



이 학 박 사 학 위 논 문

제주도 만장굴의 용암 공급지와 형성과정

Lava source and Formation processes of the Manjanggul
lava tube, Jeju Island, Korea

2010년 1월

안 동 대 학 교 대 학 원

지구환경과학과 광물암석화산학 전공

안 응 산



사과 생산지의 재배환경조건이
기능성 물질 발현에 미치는 영향

指導教授：鄭 亨 鎭

이 論文을 農學博士學位 論文으로 提出함.

安東大學校大學院 資源植物學科 資源植物學專攻

沈 長 燮

沈 長 燮의 農學博士學位 論文을 認准함.

2009 年 12 月

學位論文審查委員會

委 員 長：	尹 台 明	(印)
委 員：	李 仁 中	(印)
委 員：	金 建 佑	(印)
委 員：	李 鍾 和	(印)
委 員：	鄭 亨 鎭	(印)

安東大學校大學院委員會



제주도 만장굴의 용암 공급지와 형성과정

지도교수 : 황 상 구

이 논문을 이학박사학위 논문으로 제출함.

안동대학교 대학원 지구환경과학과 광물암석화산학 전공

안 응 산

안 응 산의 이학박사학위 논문을 인준함.

2010년 1월

학 위 논 문 심 사 위 원

위원장 : (인)

위 원 : (인)

위 원 : (인)

위 원 : (인)

위 원 : (인)

안 동 대 학 교 대 학 원 위 원 회

목 차

표차례	v
그림차례	vi
국문요약	x

1부. 만장굴 용암동굴을 형성한 용암의 공급지에 관한 연구

1. 서언	2
2. 연구지역에 대한 기존연구	3
3. 용암 공급지를 지시하는 증거	4
3.1. 용암류역에서 나타나는 증거	4
3.1.1. 용암류역 구분	4
3.1.2. 용암류역 기재	5
3.2. 용암동굴 분포와 연결성	12
3.3. 거문오름 협곡의 성인	24
3.3.1. 협곡의 규모	24
3.3.2. 평행 열극	24
3.3.3. 협곡의 성인	25
4. 토의	26
4.1. 용암류의 구분과 층서해석	26
4.2. 거문오름 용암동굴계의 범위와 동굴선	27
4.3. 봉괴도랑과 주간동굴의 관계	30
5. 결론	33

2부. 정밀 측량과 동굴 내부구조 연구를 통한 만장굴 용암동굴의 형성과 성장과정에 대한 해석

1. 서 언	36
2. 연구방법	38
3. 동굴의 규모 및 형태	39
3.1. 동굴의 규모	39
3.2. 동굴의 종단면	41
3.3. 동굴의 평면	48
3.3.1. 동굴의 폭	48
3.3.2. 동굴의 굴곡률	49
3.4. 동굴의 횡단면	50
4. 동굴의 내부구조	55
4.1. 내부구조 기재 및 해석	56
4.1.1. 만장굴 3입구(L1)	59
4.1.2. 상·하위동굴 사이의 창구조(L2)	60
4.1.3. 창구조와 안도배(L3)	61
4.1.4. 다층구조(L4)	63
4.1.5. 모래시계형 동굴단면(L5)	64
4.1.6. 용암선반과 마지막 용암흐름(L6)	66
4.1.7. 용암제방과 고랑(L7)	67
4.1.8. 속동굴(L8)	68
4.1.9. 용암역류와 큐폴라(L9)	71
4.1.10. 다층구조와 용암역류의 증거(L10)	72
4.1.11. 용암상승과 동굴바닥경사(L11)	75
4.1.12. 용암부가와 붕괴(L12)	78
4.1.13. 용암표석의 부가(L13)	79

4.1.14. 동굴 내의 규암 포획체(L14)	80
4.1.15. 아래로 볼록한 동굴천장(L15)	82
4.1.16. 거대 용암동굴(L16)	83
4.1.17. 협곡형태의 용암동굴(L17)	85
4.1.18. 용암석주(L18)	87
4.1.19. 동굴 내의 용암부가(L19)	91
4.1.20. 낙반과 용암부가(L20)	92
4.1.21. 벽치마와 중력신장균열(L21)	94
4.1.22. 낙반(L22)	97
4.1.23. 표류낙반(L23)	98
4.1.24. 안도배의 붕괴(L24)	100
4.1.25. 다락구조(L25)	101
4.1.26. 동굴바닥 보다 높이 있는 윗가지굴(L26)	102
4.1.27. 상위동굴에서의 용암상승과 하강(L27)	105
4.1.28. 상위동굴 바닥의 하강(L28)	106
4.1.29. 용암의 부가와 부가층간 주입(L29)	108
4.1.30. 상위동굴과 하위동굴(L30))	111
4.1.31. 용암교(L31)	112
4.1.32. 용암동굴 내의 용암수위(L32)	114
4.1.33. 용암상승과 압출(L33)	115
4.1.34. 찰흔(L34)	116
4.1.35. 상·하위동굴의 바닥 표면구조(L35)	117
4.1.36. 용암동굴 내의 낙반흔적(L36)	119
4.1.37. 용암두루마리(L37)	121
4.1.38. 상·하위동굴 사이의 용암층 붕괴(L38)	122
4.2. 상·하위동굴의 내부구조 비교	124

5. 토의	128
5.1. 만장굴의 초기형성	128
5.1.1. 만장굴을 형성한 용암류	128
5.1.2. 만장굴 초기동굴 형성메커니즘	131
5.2. 만장굴의 성장	134
5.2.1. 침식에 의한 확대	134
5.2.2. 용암부가	140
5.3. 다층구조	143
5.3.1. 다층구조의 형성과 변형	143
5.3.2. 다층구조에 영향을 미치는 요소	146
6. 결론	150
 참고문헌	 152
 영문요약	 160
 APPENDIX	 164

LIST OF TABLES

Table 1-1. Entrance location of many lava tubes in the study area ...	14
Table 2-1. General geometry measured in the Manjanggal lava tube	40
Table 2-2. Individual geometry in several zones of the Manjanggal lava tube	42
Table 2-3. Comparison of geometry between upper and lower level tubes of boxed area in Fig. 2-3.	43
Table 2-4. Ratios of maximum height to width in each zone of the lava tube	51
Table 2-5. Topographic data of master tube line(the Utsanjeungul to the Yongcheondonggul lava tube) in the Geomunoreum lava flows	129
Table 2-6. Evidences for lava erosion in the Manjanggal lava tube.	136
Table 2-7. Evidences for lava accretion in the Manjanggal lava tube ...	141

LIST OF FIGURES

Fig. 1-1. Geological and topographic map in the study area	6
Fig. 1-2. Older scoria cones(OSC) giving a few topographic barriers to lava flows.	8
Fig. 1-3. Total alkalis versus silica diagram for the lava flows in the study area	9
Fig. 1-4. Contact boundaries between lava flows in the study area ...	11
Fig. 1-5. Lava flow field map showing the locations of lava tube entrances in each lava flows	13
Fig. 1-6. Three collapse trenches between the Bukoreungul and the Daerimdonggul	17
Fig. 1-7. The remnants of lava tube within collapse trench	19
Fig. 1-8. Relation between the Manjanggul and the Daerimdonggul lava tube	20
Fig. 1-9. Relation between the Manjanggul and the Gimnyeonggul lava tube	22
Fig. 1-10. 3D topographic image of the Geomunoreum scoria cone and cross sections across the collapse trench	23
Fig. 1-11. Parallel fissures occurred on both sides of the collapse trench	25
Fig. 2-1. Index map and topographical map of the northeastern Jeju Island showing location of the study area	37

Fig. 2-2. Plan of the Manjanggul lava tube	44
Fig. 2-3. Longitudinal profile of the Manjanggul lava tube	45
Fig. 2-4. Profile of the boxed area in Fig. 2-3	46
Fig. 2-5. Profile of the lava column and the final lava flow at zone C ...	47
Fig. 2-6. Division of five zone in the Manjanggul lava tube by existence of multi-level tube.	52
Fig. 2-7. Plan and cross sections of the boxed area in Fig. 2-3	54
Fig. 2-8. Location of description of internal features on Longitudinal profile of the Manjanggul lava tube	57
Fig. 2-9. Location of description of internal features on plan of the Manjanggul lava tube	58
Fig. 2-10. Photo and schematic cross section of the 3rd entrance	59
Fig. 2-11. Window between upper and lower level tube	61
Fig. 2-12. Window and lining	62
Fig. 2-13. Multi-level tube with four superposed levels	63
Fig. 2-14. Hourglass-shaped cross section of lava tube	65
Fig. 2-15. Lava shelf and last lava to flow through tube	66
Fig. 2-16. Levee and gutter	68
Fig. 2-17. Tube-in-tube	70
Fig. 2-18. Cupola	72
Fig. 2-19. Multi-level tube and evidence of overflow	74
Fig. 2-20. Inflation of last lava to flow through tube.	75
Fig. 2-21. Zones of inflated tube floor(IF) with convex surface	77
Fig. 2-22. Slumping of accreted lava from wall	78
Fig. 2-23. Ceiling and wall coated with rafted breakdown	79

Fig. 2-24. Quartzite xenolith within lava fused to ceiling and upper part of wall in tube	81
Fig. 2-25. Downward bulge in mid-ceiling	83
Fig. 2-26. Largest passage in Manjanggul lava tube	84
Fig. 2-27. Canyon-shaped lava tube passage	86
Fig. 2-28. Lava column	88
Fig. 2-29. Lava flow and lava toe	90
Fig. 2-30. lava shelf formed through growth of crust from wall at constriction	91
Fig. 2-31. Breakdown and lava accretion	93
Fig. 2-32. Apron and cracks by gravitational stretching on apron	95
Fig. 2-33. Breakdown	97
Fig. 2-34. Rafted breakdown	99
Fig. 2-35. Slumped lining	100
Fig. 2-36. Alcove in the wall of upper level tube	102
Fig. 2-37. Perched tube in the wall of upper level tube	103
Fig. 2-38. V-shaped deflated floor in upper level tube	105
Fig. 2-39. Deflated floor in upper level tube	107
Fig. 2-40. Lava accretion and the injection of lava into gaps between superposed linings	109
Fig. 2-41. Small blocks surrounded by injection of lava between linings	110
Fig. 2-42. Upper and lower level tubes	111
Fig. 2-43. Lava bridge in upper level tube	113
Fig. 2-44. Lava level in lava tube	114
Fig. 2-45. Out-squeezing lava in upper level tube	115

Fig. 2-46. Grooves or striae on wall in upper level tube	116
Fig. 2-47. Floor textures in upper and lower level tubes	118
Fig. 2-48. Remnants of breakdown in upper level tube	120
Fig. 2-49. Schematic longitudinal section from T16 to T21	121
Fig. 2-50. Scroll in lower level tube	122
Fig. 2-51. Window between upper and lower level tubes created through collapse of lower level roof	123
Fig. 2-52. Comparison between upper and lower level tubes	125
Fig. 2-53. Detailed plan of zone in which multi-level tube is well preserved	127
Fig. 2-54. Longitudinal profile of ground surface from the Utsanjeungul to the Yongcheondonggul lava tube	129

국문요약

제주도 만장굴의 용암 공급지와 형성과정

안 응 산

안동대학교 대학원

지구환경과학과

광물암석화산학 전공

(지도교수 : 황 상 구)

제주도 북동부 지역에서 만장굴을 형성한 용암은, 그 용암의 공급지가 거문오름 분석구로 추정되었으나, 그 공급지에 대한 자세한 연구가 진행되지 않아, 공급지에 대한 이견이 좁혀지지 않고 있다. 더욱이 만장굴 용암동굴은 지금까지 그 길이 및 규모 등에 관한 조사는 진행되었으나, 형성메커니즘이나 동굴의 성장과정에 관한 연구에는 소홀하였다. 이에 금번 연구에서는 현생 화산지역에서 형성되고 있는 세계 도처의 용암동굴에 관한 연구자료 수집과 검토, 제주도 북동부 지역에 대한 야외조사와 지질도작성, 그리고 만장굴 정밀측량과 내부구조 기재 및 해석을 통해 만장굴의 용암 공급지는 물론 그 형성메커니즘과 성장과정을 밝히고자 한다.

우선, 만장굴을 형성한 용암이 어디에서 공급되었는지를 추적하고자 제주도 북동부 지역에서의 암상, 형상과 고도를 바탕으로 용암류역도를 작성하고, 각 용암류역에 나타나는 용암동굴의 분포와 상호 연관성을 검토하였다.

거문오름 용암동굴계는 웃산전굴, 북오름굴, 대림동굴, 만장굴, 김녕굴, 용천동굴로 연결되는 큰 규모의 다층구조를 보이는 주간동굴선(master tube line)

과 뱃지굴로 대표되는 복합동굴망(complex anastomosing system), 그리고 김녕빌레못굴~개웃샘굴로 연결되는 단일동굴선(unitary tube line)으로 구성된다. 특히 용암동굴계의 주간동굴선은 각 동굴들이 지표 및 동굴내부 특징을 근거로 연관시키면 단속적이지만 하나로 연결된다. 옷산전굴과 북오름굴은 동굴붕괴에 의한 붕괴도랑으로 연결되며, 북오름굴과 만장굴 3입구 사이에는 붕괴도랑 2곳과 대림동굴로 연결된다. 특히 대림동굴과 3입구 사이는 만장굴 3입구 쪽의 낙반에 의해 용암튜브 통로가 막혀 용암이 흘러가지 못하고 굳어져 튜브가 막혔으며(breakdown jam), 만장굴과 김녕굴 사이 또한 낙반에 의한 댐 형성으로 인해 튜브 내부의 용암수위가 상승하여 튜브 천장까지 용암이 채워져 막힌 것으로 추측된다. 김녕굴과 용천동굴은 그 방향성과 인접성으로 연결됨을 유추할 수 있다. 또한 거문오름 분석구에서 북북동 방향으로 발달되는 약 2km 협곡은 기존 용암동굴의 붕괴도랑으로 해석되며 그 위치와 방향성에 의하면 거문오름 용암동굴계의 주간동굴선 상류인 옷산전굴로 연결될 것으로 예측되어, 주간동굴선의 일부분임을 알 수 있다. 따라서 용암류역도, 용암동굴 분포, 붕괴도랑 방향성 등을 고려할 때, 만장굴 용암동굴을 형성한 용암류는 거문오름 분석구에서 공급된 것으로 판단된다.

다음으로 만장굴의 형성과 성장과정을 밝히고자, 내부구조가 잘 보존된 만장굴 3입구에서 1입구에 걸친 구간을 광과측량기를 이용하여 정밀측량하고, 측량자료를 토대로 동굴 내의 특징적인 내부구조를 기재하고 해석하였다.

만장굴은 규모가 크고 다층구조를 갖는 전형적인 주간동굴(master tube)로 광과측량기를 이용하여 3입구~1입구 구간을 정밀 측량한 결과, 동굴중심선상의 측정거리는 약 4.5 km, 두 입구간의 지표고도차는 54 m로 동굴통로를 따른 지표경사는 평균 0.7° 이며 그 바닥경사는 평균 0.4° 이다. 3입구와 1입구 사이의 직선거리는 약 3.4 km이며 직선상 지표경사는 0.9° 이다. 이는 세계적으로 가장 규모가 큰 동굴로 알려진 하와이 카주무라 동굴(측정거리 약 42 km, 직선거리 약 32 km, 표고차 1,108 m, 측정거리에 의한 경사 1.5° , 직선 경사 1.9°)에 비해 매우 완만한 형태를 띤다. 동굴천장 높이는 2~23 m, 동굴폭은

3~21 m로 불규칙하며, 일반적으로 동굴폭이 넓은 곳은 12~15 m, 좁은 곳은 4~7 m 정도이다. 지표에서 동굴천장까지의 두께는 3.4~14 m 정도이며, 지표에서 동굴바닥까지의 거리는 14~33 m 정도로 하류로 갈수록 더 작아지는 경향이 있다. 전체적으로 만장굴은 동굴내부 최대높이와 최대폭의 비가 1.3으로 폭보다 높이가 큰 길쭉한 형태를 띠며, 동굴바닥은 하류로 일정하게 경사져 있으나, 동굴천장의 높이는 2~23 m로 일관성 없이 극히 불규칙하다.

이와 같은 만장굴의 형태 및 규모는 용암튜브가 만들어지는 과정에서 튜브 내를 흘러가는 용암의 침식과 부가작용에 의한 것으로 판단되며, 만장굴 내에는 그러한 작용을 지시하는 다양한 내부구조가 관찰된다. 용암에 의한 침식의 증거로는 ①용암동굴 벽면에 나타나는 클링커층, ②단면상 동굴 벽면 상하부의 비대칭적 형태, ③평면상에서 상·하위동굴 통로의 어긋남, ④상위동굴 바닥보다 높은 곳에 발달한 오목하게 들어간 다락구조(alcove) 혹은 윗가지굴 흔적, ⑤해골형 혹은 모래시계형의 용암동굴 단면 등을 관찰할 수 있다. 용암에 의한 부가의 증거로는 ①다층구조, ②용암선반, ③안도배, ④규암 포획체 산출양상(용암동굴 천장부에 주로 부가되어 나타남), ⑤부가층간 용암주입 현상 등이 관찰된다.

이상의 정밀측량결과와 내부구조기재를 통해 만장굴의 형성과정을 해석해보면, 시트상 용암류가 완만한 지형을 따라 흘러가면서 그 표면이 먼저 굳고 그 아래로 용암이 계속 흘러 초기형태의 용암동굴이 형성되었다. 이후 이 동굴은 내부로 지속적으로 공급되는 용암에 의해 동굴바닥의 열적침식으로 폭보다 높이가 더 크게 길쭉한 형태로 성장하였다. 이렇게 동굴바닥에서는 열적침식이 우세하게 일어나는데 반해, 동굴천장과 벽면에는 차별적 용암부가와 붕괴가 주로 일어나 동굴천장 높이를 매우 불규칙하게 만들었다. 최초에 형성된 용암동굴은 그 내부를 흘러가는 용암에 의한 침식과 부가작용에 의해 서서히 성장해가게 된다. 이때 용암에 의한 침식정도는 용암동굴 내를 흘러가는 용암흐름 지속시간, 지형경사 등의 요인에 의해 크게

좌우되며, 다층구조와 같은 용암부가현상은 동굴 내의 용암수위가 일정하게 유지되는 기간과 지형경사 등에 의해 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

이러한 해석을 바탕으로 만장굴의 형성과 성장과정을 구성해 보면, 초기형태의 용암동굴이 만들어진 후, 이미 생성된 초기형태의 용암동굴로 용암이 계속해서 유입되어 흘러가면서 그 표면이 굳어 하위동굴 지붕이 형성되고 내부가 배출되어 하위동굴을 형성하여 전체적으로 다층용암동굴을 이루게 되었다. 이후에도 용암은 계속 하위동굴 내를 흘러 천장과 벽면에는 용암이 부가되었고 동굴바닥은 더 깊게 침식되었다. 그 결과 현재와 같이 다층구조를 갖는 아래로 길쭉한 형태의 주간동굴이 형성된 것으로 판단된다. 만장굴 내의 특징적인 구조물인 용암석주는 이렇게 주간동굴이 완성된 후 새로운 용암류가 만장굴 상부 지표를 흘러가다 천장창 혹은 창구조를 통해 만장굴내로 흘러들어 형성된 것으로 판단된다.

1부. 만장굴 용암동굴을 형성한 용암의 공급지에 관한 연구

Part 1. Lava source of the Manjanggul Lava Tube

만장굴 용암동굴을 형성한 용암의 공급지에 관한 연구

1. 서언

세계도처에 분포하는 주요 용암동굴들 중에 멕시코 수치옥(Suchiooc) 화산의 용암동굴(Espinasa, 2006), 하와이 카주무라(Kazumura) 동굴(Allred and Allred, 1997, 2002), 미국 캘리포니아 주의 라바 베드스 천연기념물(Lava beds National Monument)내의 용암동굴계(Larson and Larson, 1989; Waters et al., 1990), 호주 동부의 운다라(Undara) 용암동굴(Atkinson and Atkinson, 1995) 등은 그 용암공급지뿐만 아니라 형성 메커니즘, 공급지로부터의 변화경향, 기타 특이한 특징 등과 같은 다양한 관점에서 조사되었다.

그러나 제주도 북동부 지역에 위치하는 만장굴 용암동굴의 경우는 그 용암공급지가 만장굴의 남서쪽에 위치하는 거문오름 분석구(이하 거문오름)로 추정되었으나(이문원 외, 2003; 황상구 외, 2005), 그 공급지에 대한 화산학적, 암석학적 증거에 대한 추가적 연구가 진행되지 않아, 이에 대한 이견이 좁혀지지 않고 있다.

만장굴은 생성시기가 비교적 오래되었으며(황상구 외, 2005: 약 0.2 Ma), 가까운 곳에 여러 개의 분석구들이 분포하기 때문에, 만장굴과 특정 분석구와의 직접적인 연관성을 쉽게 인지할 수 없다. 따라서 그 용암공급지를 찾아내는 것은 공급지에서의 화산활동형태, 용암동굴 형성메커니즘, 용암의 지표형상(feature), 용암동굴 분포, 층서 등을 종합적으로 고려하여야 한다.

그런데 만장굴 및 용천동굴 등이 위치하는 지역은 매우 넓지만 과거의 광역적인 지질도에서 오로지 하나의 층서단위로 기재되었거나 고도에 따른 상하층서로 구분되었다(농업진흥공사, 1971; Lee, 1982; 박기화 외, 1998, 2006; 원종관 외, 1998). 이러한 기존의 연구는 현생 화산에서 관찰되는 하와이언 및 스트롬볼리언 분출과 그에 뒤따라 발생하는 용암류의 흐름특징에 대한 연구 자료가 그리 많지 않았던 시기의 연구결과로, 최근 현생 화산지역에서 얻

어지고 있는 연구결과를 이 지역 연구에 새롭게 적용하는 작업이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 기존 연구결과와 현장지질조사를 바탕으로 현생 화산에서의 용암류의 흐름특성을 고려하여 용암류역도를 작성하고, 용암동굴 분포와 특징, 거문오름 분석구 주변의 특징적인 화산구조 등을 근거로 만장굴 용암동굴을 형성한 용암의 공급지를 유추하고자 한다.

2. 연구지역에 대한 기존연구

기존연구에서 연구지역은 층서상 최하위에 놓이는 침상장석 감람석 현무암이 분포하며, 그 위에 분석구들이 놓인다고 기재되었다(농업진흥공사, 1971). 그런가 하면 연구지역에 넓게 분포하는 용암류들은 모두 제주도 형성과정에서 용암대지를 형성하는 제2단계의 현무암으로 해수면상에서 지표에 분포하는 암석 중 층서상 최하위에 놓이는 용암류로 기재되기도 하였다(Lee, 1982). 이후 제주·한림도폭에서는 연구지역의 북서쪽 부분을 선흘리 현무암질 안산암으로 기재하고, 성산도폭(원종관 외, 1993)에서의 덕천리 현무암의 연장부로 인식하였다(박기화 외, 1998). 또한 제주도 북동부 지역은 암석학적 연구(원종관 외, 1998)에서 해안지대에 넓게 분포하는 온평리 현무암(원종관 외, 1993: $0.67 \pm 0.03 \sim 0.60 \pm 0.13$ Ma)과 중산간의 덕천리 현무암(원종관 외, 1993: 0.37 Ma)으로 구분되어 기재되었으며, 해발고도가 높아짐에 따라 암석연대가 젊어진다고 하였다.

연구지역의 연대측정 자료를 살펴보면, 만장굴 용암동굴은 0.22~0.29 Ma 사이의 어느 시기에 형성된 것으로 보고되었으며, 만장굴 북서쪽 지역(대섭이굴 근처) 지표암석과 만장굴내부 하위동굴 벽면암석에서 얻어진 약 1 Ma의 K-Ar 연대치는 만장굴 이전 용암류로 기재되었다(황상구 외, 2005). 이후 시추코아에서 채취한 시료에 대한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 측정에서 제주도 동부지

역의 저지대 지표에 분포하는 용암류는 200 Ka 이내의 비교적 젊은 화산암류로 이루어져 있고, 내륙에서 해안으로 점진적으로 확대되면서 섬이 만들어졌다고 추정할 수 있다(고기원 외, 2008).

한편 기존연구에서 광역지질도 작성은 암상 혹은 화학조성에 근거하여 용암류역을 구분하고, 동일한 지역을 대부분 침상장식 감람석 현무암으로 기재하였다. 뿐만 아니라 K-Ar 절대연대 및 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 측정치에 대한 신중한 검토 없이, 층서해석에 적용함으로써 지질도 작성과 해석에 있어 연구자마다 상이한 연구결과를 제시하게 되었다.

3. 용암 공급지를 지시하는 증거

3.1 용암류역에서 나타나는 증거

3.1.1 용암류역 구분

하와이와 같은 현생 화산에서의 용암류역도 작성은 화산활동 전후의 항공 및 위성사진 그리고 용암류 표면의 풍화상태 등을 근거로 이루어진다(Heliker et al., 2003). 그러나 제주도는 화산활동 후 시간이 경과하면서 식생 발달, 농경지 개간, 퇴적물 퇴적 등으로 분출당시의 지표특징이나 지형이 가려지고 변형되었기 때문에, 지표 암상분포나 지형적 특징 등만을 근거로 용암류역을 작성하기에는 어려움이 많다.

기존 연구에서 이동영 외(1987)는 항공사진을 활용하여 제주 전역에 걸쳐 분화구에서 흘러나온 용암류들의 유역을 표시하였다. Mackay et al.(1998)은 식생이 우거져 접근이 힘든 용암류역에 대하여 SIR-C(레이더 이미지)를 활용한 DEM(Digital Elevation Model) 자료를 토대로 화산지형 경사 분석을 통해 용암류역은 물론, 용암류의 물리적 특징을 연구하기도 하였다.

이 연구에서 용암류역도는 기존 지질도(농업진흥공사, 1971; 박기화 외, 1998; 원종관 외, 1993)를 참조하여, 야외에서 암상분포를 재조사하였으며,

1:5,000 수치지형도를 활용하여 지형변화와 함께 지표형상을 고려하였다. 1:5,000 수치지형도는 GIS프로그램으로부터 DEM자료를 추출하여 경사 분석을 할 수 있으며, 3D이미지를 생성할 수 있어 화산지형과 같이 기록이 심한 곳에서 유용하게 활용할 수 있다. 하지만 연구지역은 대부분 지형적 기록이 적은 파호이호이 용암류로 구성되기 때문에 수치지형도 상의 지형적 특징은 야외작업에 보조적인 수단으로 활용하였다. 왜냐하면 파호이호이 용암류는 얇은 두께로 매우 넓게 퍼져나가는 특징을 가지고(Cas and Wright, 1987; Hazlett and Hyndman, 2002), 서로 다른 시기의 파호이호이 용암류가 흘러 오더라도 용암류 경계가 뚜렷이 구별되지 않기 때문이다(Mattox et al., 1993; Kauahikaua et al., 1998; Heliker et al., 2003; Takahashi et al., 2003).

이번 연구에서는 암상, 용암류 흐름 특징, 지표형상 외에도 기존 화학분석자료(박기화 외, 1998; 원종관 외, 1998; 황상구 외, 2005)를 재검토하여 유역도 작성에 참고하였다.

3.1.2 용암류역 기재

본 연구지역에서 용암류는 1)선북오름 용암류(Pre-Bukoreum lava flows), 2)북오름 용암류(Bukoreum lava flows), 3)거문오름 용암류(Geomunoreum lava flows), 그리고 4)후거문오름 용암류(Post-Geomunoreum lava flows)로 나누었다. 특히 농업진흥공사(1971), 박기화 외(1998)에서 분석층 혹은 암설사태층(debris avalanche)으로 기재한 부분을 선북오름 용암류와 거문오름 용암류로 구분하여 표기하였다(Fig. 1-1).

가. 선북오름 용암류

선북오름 용암류는 북오름 및 거문오름 용암류에 의해 직접 덮여 있거나 상호 관계를 통해 하위에 놓일 것으로 유추되는 용암류역을 묶어 표시한 것으로, 각 용암 공급지(분석구 혹은 열극 등)에 따라 별도의 용암류역으로 세분하지 않았다. 먼저 거문오름 남쪽에 위치한 부대악, 부소악 분석구에서 유래한

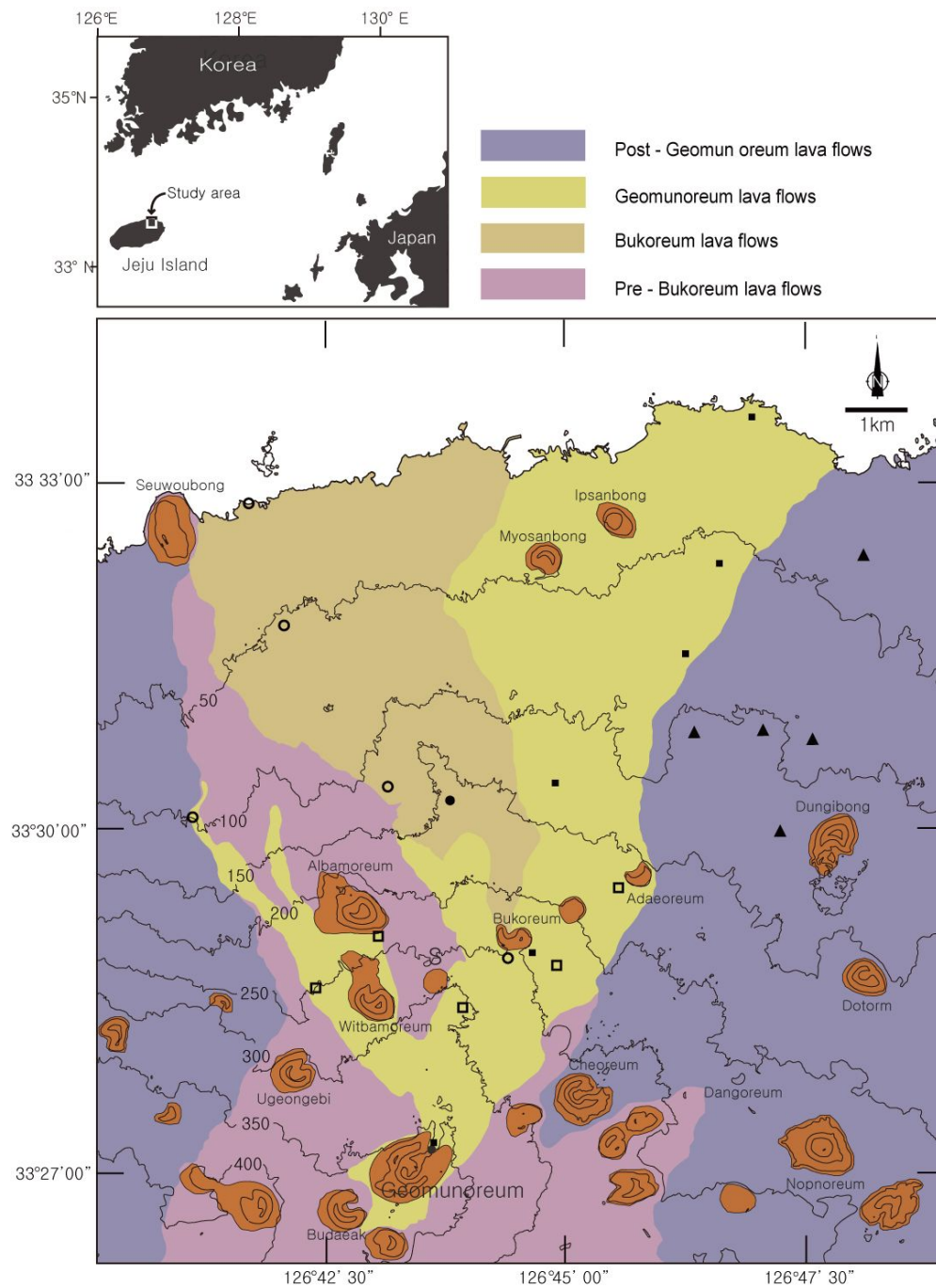


Fig. 1-2. Geological and topographic map showing four lava flow fields in the study area. Contours have 50 m intervals. (continued)

Symbols represent several sites of chemical analysis from the existing studies. Bukoreum lava flows data from Park et al., 1998(circles) and Hwang et al., 2005(solid circles). Data for Geomunoreum lava flows from Won et al., 1998(squares) and Hwang et al., 2005(solid squares). Post-Geomunoreum lava flows data from Won et al., 1998(solid triangles).

용암류는 거문오름의 화산활동에 의해 덮였으며, 거문오름 북서쪽의 우전제비 분석구에서 유래한 용암류도 거문오름에서 흘러나온 용암류에 의해 가로질러 덮여 있는 것을 지형등고선을 통해 확인할 수 있다. 또한 거문오름의 북쪽에 위치한 알밤오름과 윗밤오름 분석구에서 분출하여 쌓인 분석층이나 용암류는 거문오름과 북오름 분석구에서 흘러온 용암류에 의해 피복되어 있어 거문오름 용암류 이전에 생성된 것임을 알 수 있다.

특히 선북오름 용암류역의 윗밤오름과 북오름 분석구 사이에는 지도상에 표기되지 않은 분석구가 존재하며(Fig. 1-1), 그 남쪽 인근지역에도 분석이 쌓여 있는 낮은 언덕형태의 지형이 관찰된다(Fig. 1-2). 이러한 분석언덕들은 기존 제주·애월 지질도(박기화 외, 1998)에서 암설사태층으로 기재되었으며, 거문오름이 말굽형으로 터져나갈 때 생성된 것으로 해석되기도 하였다.

그러나 이 지역에는 별도의 분화구 역할을 하였던 분석구가 존재(Fig. 1-1: S로 표기)하고 주변에 분석구 잔재가 여러 개 발견될 뿐만 아니라 이들이 거문오름으로부터 2 km 이상 떨어져 있는 것으로 미루어, 거문오름에서의 분석구 외륜붕괴에 의해 생성된 암설사태층이라기보다는, 별개의 분석구로서 거문오름이 생성되기 이전의 화산활동으로 생성된 화산체로 여겨진다. 이러한 고화산체는 거문오름 용암류가 흘러올 당시에는 지형적 고지로써 용암류 흐름을 가로막거나 변화시키는 장애물 역할을 하여 거문오름 용암류가 북서쪽이 아닌 북쪽 혹은 북동쪽으로 흘러가게 하였을 것으로 해석된다(Fig. 1-2).

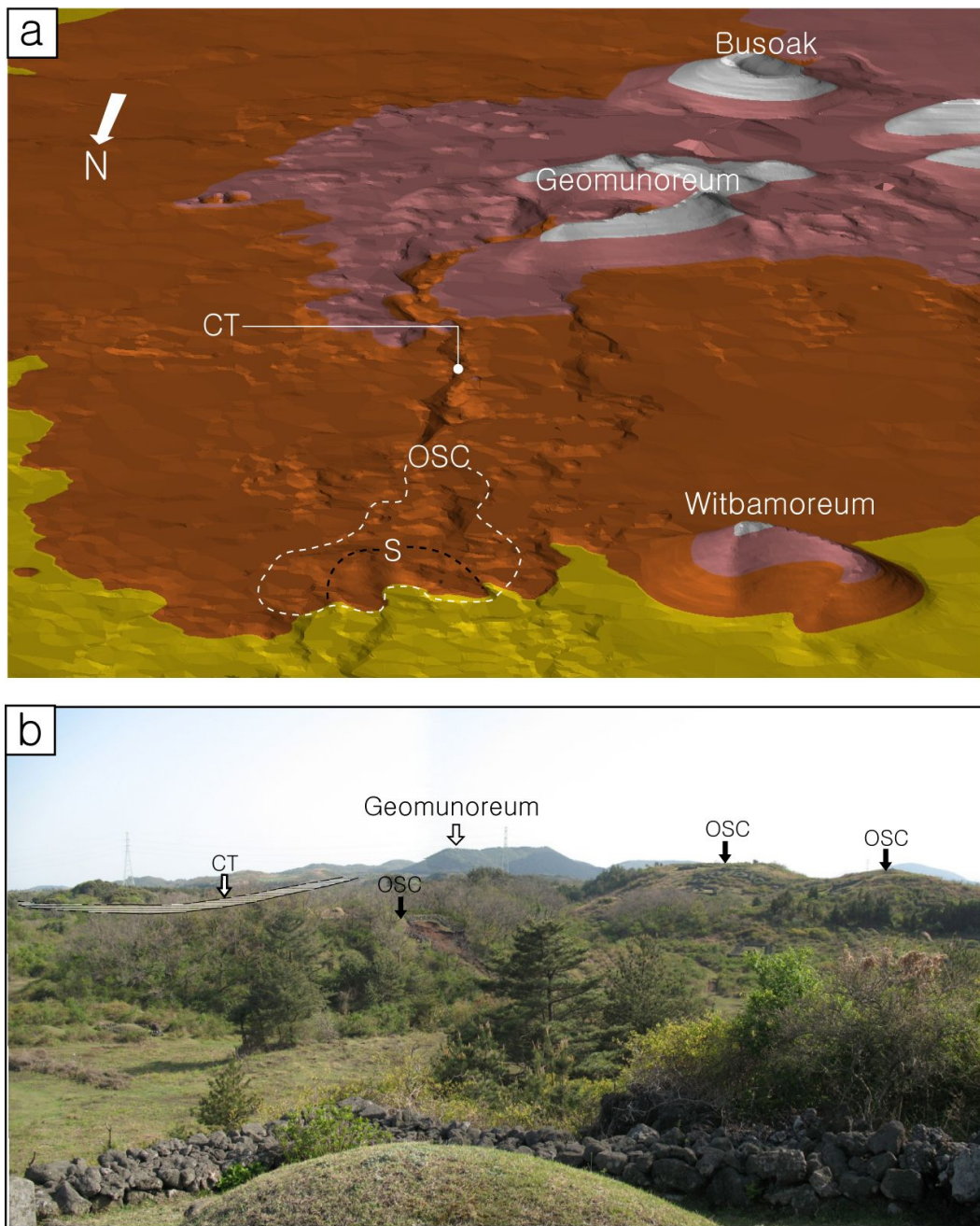


Fig. 1-2. Older scoria cones (OSC) giving a few topographic barriers to lava flows. Collapse trench(CT) connects lava tubes and the Geomunoreum scoria cone. Viewing southward.

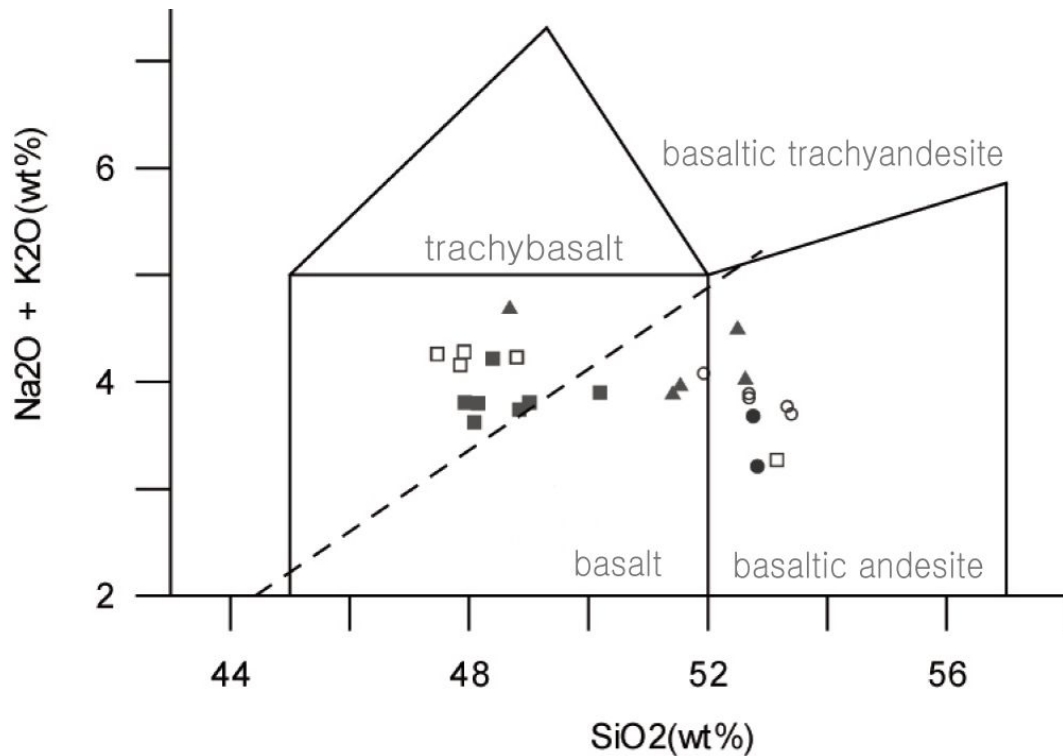


Fig. 1-4. Total alkalis versus silica diagram(Le Bas et al., 1986) for the lava flows in the study area. The dashline is the alkalic-tholeiitic dividing line by Macdonald and Katsura(1964). Symbols are the same as in Fig. 1-1.

나. 북오름 용암류

북오름 용암류는 북오름에서 분출된 용암류로 대체로 북오름을 기준으로 북서쪽에 분포하며, 북오름의 북동쪽에 분포하는 용암류는 후기 거문오름 용암류에 의해 피복되어 있다. 야외에서 북오름 용암류는 거문오름 용암류와 마찬가지로 침상장석 결정이 풍부하고 감람석 반정을 가지는 것은 유사하나 거문오름 용암류에 비하여 감람석 반정의 크기가 크고 양 또한 많다. 뿐만 아니라 북오름 용암류는 대체로 소량의 규암편(0.5~10 cm)을 포함하며 현무암질 안산암에 해당한다(박기화 외, 1998; 황상구 외, 2005)(Fig. 1-3).

다. 거문오름 용암류

거문오름 용암류는 북북동쪽으로 트여진 거문오름 분석구의 북동쪽에 넓게 분포하며, 북오름 분석구를 휘어 감싸며 북오름 분석구 생성 후에 흘러온 용암류임을 유추할 수 있다. 야외에서 거문오름 용암류는 북오름 용암류와 마찬가지로 침상장석 감람석 현무암으로 기재되지만, 북오름 용암류에 비해 대체로 감람석 반정의 양과 크기가 작은 편이나 명확하게 구분하기는 어렵다. 규암편이 관찰되지 않으며, 기존 연구 자료에 의하면 알칼리 현무암에 해당한다(원종관 외, 1998; 황상구 외, 2005)(Fig. 1-3). 곳에 따라 거문오름 용암류와 북오름 용암류 사이에는 0.5~1.5 m 두께의 적색 이질층(mud deposit)이 관찰되는데, 이 층은 북오름 용암류 표면의 얇은 곳을 채우고 있는 것이 특징이며, 층리는 발달되지 않는다(Fig. 1-4). 거문오름 용암류역 내에는 어대오름, 묘산봉, 입술봉 등이 분포하는데 이들은 거문오름 용암류에 의해 그 하단부가 피복되어 있다.

라. 후거문오름 용암류

후거문오름 용암류는 북오름 용암류나 거문오름 용암류와 직접적인 관계를 관찰할 수 없기 때문에 그 시기를 동정할 수 없는 용암류로서 거문오름 용암류에 비해 후기로 유추되는 용암류를 묶어 표기하였다.

후거문오름 용암류는 거문오름 용암류의 동쪽에 인접하여 분포하며 야외에서 침상장석 감람석 현무암으로 오인할 정도로 거문오름 용암류와 유사하지만, 화학조성이 다른 현무암질 안산암 영역에 도시된다(원종관 외, 1998)(Fig. 1-3).

원종관 외(1998)는 이 용암유역을 해안지역의 온평리현무암과 중산간의 덕천리현무암을 나누고, 알칼리 현무암으로 기재하였으며, 두 현무암이 분포하는 곳에는 쏘리아이트 용암류가 소량 분포하지만 그 암상이 서로 비슷하고 그 경계가 분명치 않아 지질도에 표기하기 어렵다고 하였다.

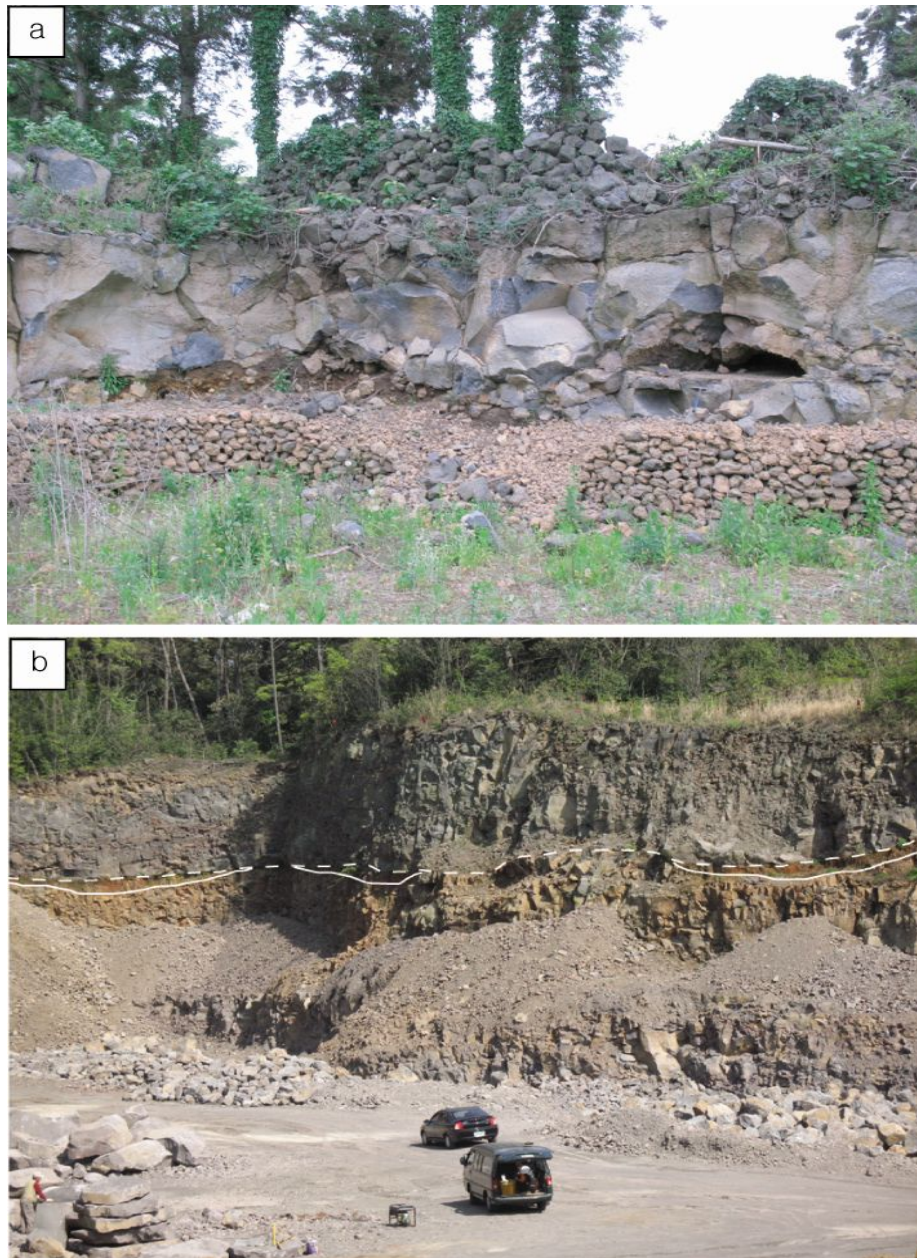


Fig. 1-5. Contact boundaries between lava flows. (a) Aa surface of the Pre-Bukoreum lava flows below pahoehoe lavas of the Bukoreum lava flows. (b) Mud deposits between the Bukoreum lava and the Geomunoreum lava flows.

그러나 안웅산과 황상구(2008)는 만장굴을 정밀측량하여 만장굴 종단면도를 작성하고, 만장굴 용암동굴 지표의 지형기복이 만장굴 흐름과 일치하지 않는 부분(만장굴 용암석주 상부)이 있음을 지적하고, 이를 만장굴 형성 후 흘러온 용암류일 것으로 추측하였다(안웅산과 황상구, 2008, Fig. 2b). 이러한 특징은 지형등고선의 추세가 만장굴의 진행방향과 조화롭지 않은 것으로도 확인할 수 있다(Fig. 1-5: 점선박스 내부). 또한 해안선 모양을 살펴보면, 만장굴 및 용천동굴이 진행하는 방향에서 동쪽으로 조금 떨어진 해안이 갑자기 돌출되는데, 이는 거문오름 용암류를 형성한 후, 다른 공급지(체오름 혹은 제3의 위치)에서 새로운 용암이 흘러와 해안가에 새로운 용암대지를 넓혀 가면서 만들어진 돌출된 지형임을 암시한다(Mattox et al., 1993; Peterson et al., 1994; Heliker et al., 2003). 그러나 거문오름 용암류와 그 동쪽의 후거문오름 용암류와의 직접적인 경계는 확인되지 않는데, 이는 서로 시기를 달리하는 파호이호이 용암류의 경계 확인이 어렵다는 것을 감안하여야 한다(Mattox et al., 1993; Kauahikaua et al., 1998; Heliker et al., 2003; Takahashi et al., 2003).

위에서 세분한 각 용암류역의 선후관계를 살펴보면, 북오름에서 나온 북오름 용암류가 먼저 북쪽으로 흘렀으며, 이후 거문오름에서 흘러나온 용암류가 북오름 분석구의 북서쪽 부분으로 일부 흘러갔으나, 많은 양의 용암은 북오름 분석구의 북동쪽으로 흘러갔다. 북오름 분석구와 거문오름 용암류의 선후관계는 북오름 분석구 주변의 등고선 모양으로도 확인할 수 있다.

3.2 용암동굴 분포와 연결성

용암동굴은 지하에 분포하지만 천장창(skylight)이나 창구조(window)를 통해 확인하고 출입할 수 있다. 지금까지 연구지역에는 천장창 혹은 창구조의 발견으로 20여개의 용암동굴이 분포하는 것으로 조사된 바 있다(문화재청, 2003). 작성된 용암류역도 상에서 지금까지 확인된 용암동굴의 위치(Table 1), 모양, 상호관계 등을 토대로 각 용암유역에 분포하는 용암동굴의 특징과

분포를 살펴본다(Fig. 1-5).

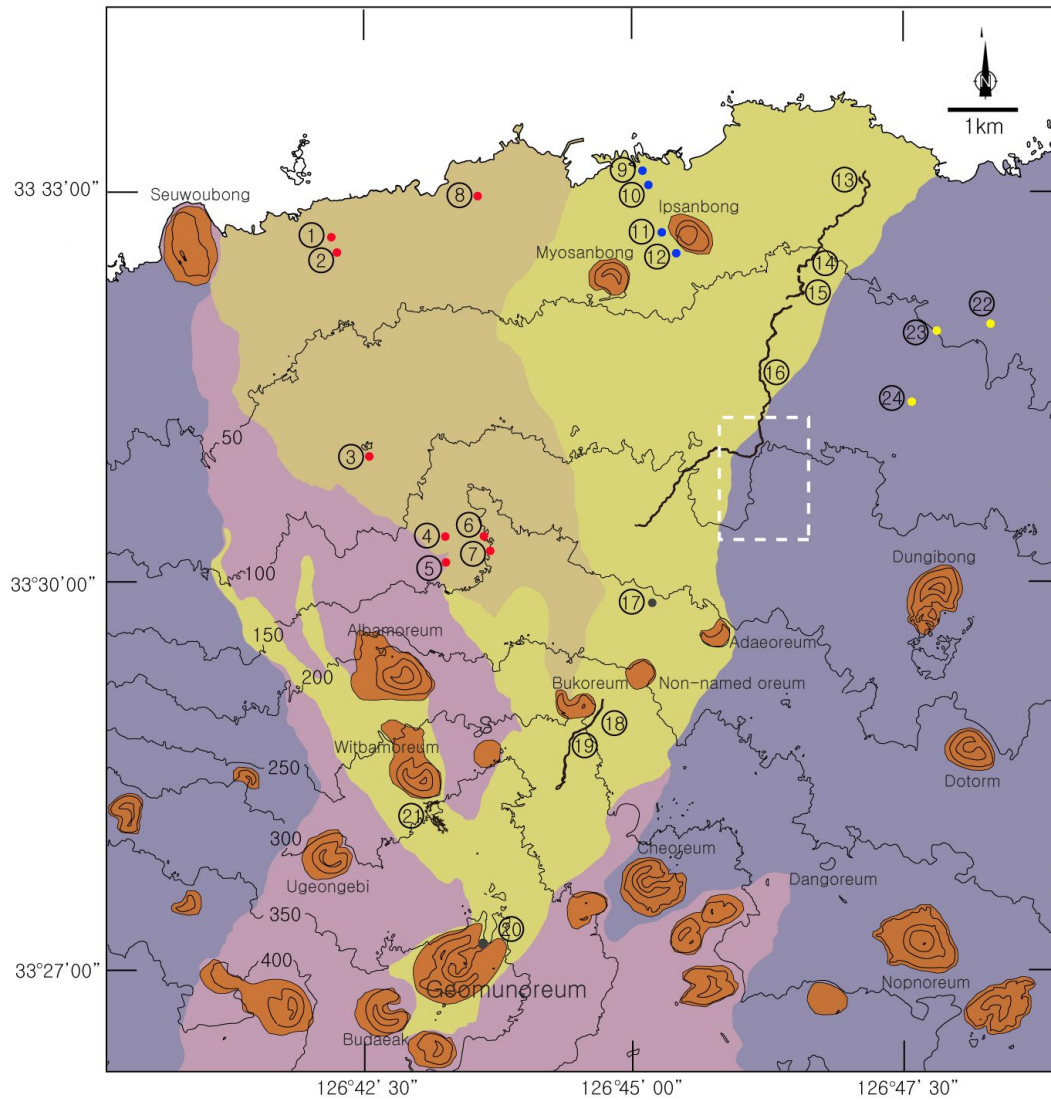


Fig. 1-5. Lava flow field map showing the locations of lava tube entrances in each lava flows. Numbers are the same as in table 1.

Table 1-1. Entrance location of many lava tubes in the study area.

No.	Lava tube name	Latitude(N)	Longitude(E)	Remarks
1	Bukchongul	33° 32 ' 43.7 "	126° 42 ' 12.3 "	U
2	Godugidonggul	33° 32 ' 38.5 "	126° 42 ' 08.5 "	U
3	Idaegimodeulgul	33° 31 ' 04.1 "	126° 42 ' 27.9 "	A
4	Doteulgul	33° 30 ' 23.7 "	126° 43 ' 14.5 "	A
5	Geyeomeolgul	33° 30 ' 20.1 "	126° 43 ' 16.6 "	A
6	Moksumulgul	33° 30 ' 18.7 "	126° 43 ' 46.1 "	U
7	Daeseobigul	33° 30 ' 14.3 "	126° 43 ' 50.7 "	U
8	Dongbokgul	33° 33 ' 03.9 "	126° 43 ' 29.2 "	buried
9	Gaeusaemgul	33° 33 ' 10.1 "	126° 45 ' 17.1 "	U or A
10	Shindangdonggul	33° 32 ' 55.0 "	126° 45 ' 13.7 "	U or A
11	Gwenaegigul	33° 32 ' 44.4 "	126° 45 ' 17.1 "	U
12	Gimyeongbilemotgul	33° 32 ' 13.3 "	126° 45 ' 25.7 "	U or A
13	Dangcheomuldonggul	33° 33 ' 12.7 "	126° 47 ' 11.9 "	U
14	Yongcheondonggul	33° 32 ' 42.3 "	126° 46 ' 47.7 "	M
15	Gimnyeonggul	33° 32 ' 23.9 "	126° 46 ' 37.8 "	M
16	Manjanggul	33° 31 ' 30.0 "	126° 46 ' 20.5 "	M
17	Daerimdonggul	33° 29 ' 50.1 "	126° 45 ' 12.3 "	M
18	Bukoreungul	33° 29 ' 01.9 "	126° 44 ' 43.9 "	M
19	Utsanjeungul	33° 28 ' 47.7 "	126° 44 ' 26.7 "	M
20	Seonheul vertical donggul	33° 27 ' 20.3 "	126° 43 ' 40.8 "	window
21	Bengdwigul	33° 28 ' 18.8 "	126° 43 ' 12.8 "	A
22	Doramgigul	33° 31 ' 58.1 "	126° 48 ' 17.6 "	U or A
23	Hanmosalgul	33° 31 ' 55.4 "	126° 47 ' 54.5 "	U or A
24	Turnsulgul	33° 31 ' 22.9 "	126° 47 ' 30.1 "	U or A

M, master tube; U, unitary tube; A, complex anastomosing systems of small tubes. Location data are from the Cultural Heritage Administration of Korea(2003) except for two lava tubes(No. 14 and 19).

용암동굴은 모양, 규모 혹은 대칭성에 따라 분류될 수 있다. Espinasa(2006)는 멕시코 수치옥(Suchiooc) 화산에 발달한 일련의 용암동굴을 모양, 규모, 진행모습 등에 따라, 단순하게 하나의 줄기형태로 진행되는 단일동굴(linear, simple, unitary tubes), 작은 규모의 동굴들이 복잡하게 얹혀 있는 복합동굴망(complex anastomosing systems of small tubes), 그리고 동굴규모가 크고 횡단면에서 아래로 길쭉하며 격막에 의해 여러 층으로 나누어지는 주간동굴(master tube)로 구분하였다. 반면에 Calvari and Pinkerton(1999)은 동굴 단면의 대칭성에 따라 대칭 단순동굴(symmetric simple tube), 비대칭 단순동굴(asymmetric simple tube), 대칭복성동굴(symmetric compound tube), 비대칭복성동굴(asymmetric compound tube) 등으로 구분하기도 하였다. 동일한 용암동굴 내에서도 위치에 따라 단면의 대칭성이 다른 것(Greeley, 1971; 안웅산과 황상구, 2008)을 감안한다면, 동굴 모양과 규모 및 진행모습에 따른 Espinasa(2006)의 구분기준에 따라 용암동굴을 분류하는 것이 서로 간의 연관성을 살펴보는데 더 적합할 것으로 판단된다.

북오름 용암류역 내에는 북촌굴, 고두기동굴, 동복굴, 이데기모들굴, 도틀굴, 게여멀굴, 목수물굴, 대섭이굴 등의 용암동굴이 분포하는데, 이들은 인접한 지역에 분포하여 서로 연관된 동굴로 추정되나 직접적인 연결관계를 지시하는 야외증거를 찾을 수 없다. 하지만 이 용암류역 내 용암동굴은 대체로 규모가 작고, 지표 아래에 얕은 곳에 발달해 있으며, 동굴 높이 보다 폭이 큰 특징을 보이며, 관찰이 가능한 짧은 동굴구간에서 단일동굴 형태를 띤다. 그러나 북오름 용암류역의 가장자리에 위치하는 도틀굴, 게여멀굴 등은 여러 가지로 갈라졌다가 다시 합쳐지기를 반복하는 복합동굴망의 특징을 보이기도 한다(문화재청, 2003).

이에 반해 거문오름 용암류역 내의 용암동굴 중에서 웃산전굴, 북오름굴, 대림동굴, 만장굴, 김녕굴, 용천동굴, 당치물굴 등은 대체로 동굴규모가 크고, 지표아래에 깊은 곳에 위치하며, 동굴단면은 동굴 폭 보다는 동굴 높이가 더 큰,

길쭉한 형태의 해골 혹은 모래시계 형태를 가지며, 길쭉한 형태의 동굴이 위 아래로 여러 개의 층으로 구분되는 전형적인 주간동굴(master tube)의 특징을 보여준다(Larson and Larson, 1989; Larson, 1993; Espinasa, 2006; 안웅산과 황상구, 2008).

그러나 이 용암류역 내에서 북쪽에 분포하는 김녕빌레못굴, 켜네기굴, 신당동굴, 게웃샘굴 등은 대체로 지표아래에 얇게 위치하며, 동굴단면이 대체로 반타원 형태를 보이는 단순한 단일동굴이다.

벵뒤굴은 거문오름의 북서쪽, 윗밤오름 분석구의 남쪽에서 주로 북서방향으로 진행하며, 확인된 총길이가 약 4.5 km로 지표하에 얇게 분포한다. 이 벵뒤굴은 소규모 용암동굴들이 서로 얹혀 있으며, 이들이 다시 합쳐져 하나의 더 큰 규모의 동굴이 되기도 한다. 또한 소규모 용암동굴들이 위 아래로 발달해 있기도 하고 진행방향이 서로 직각으로 교차하기도 하여 아주 복잡한 구조를 보이는 전형적인 복합동굴망에 해당한다(제주환경연구센터, 1998). 벵뒤굴의 진행방향을 살펴보면, 거문오름 분석구에서 흘러온 용암류가 윗밤오름 분석구의 서쪽으로 우회하여 흘러가면서 형성된 것으로, 윗밤오름의 북서쪽에서 발견되는 소규모 용암동굴로 연장될 것으로 추측된다.

거문오름 용암류역의 동쪽에 분포하는 ‘후거문오름 용암류역’에는 턴술굴, 한모살, 도람지굴이 발견되는데, 이들은 지표 아래에 얇게 발달해 있으며, 동굴규모가 작다. 턴술굴은 복합동굴망 형태를 띠며, 그 하류지역에서 관찰되는 한모살, 도람지굴은 단순한 단일동굴에 해당하는데, 이들을 전체적으로 보면 복합동굴망의 일부 구간에 해당하는 것으로 생각된다.

거문오름 용암류역 내에 분포하는 웃산전굴, 북오름굴, 대림동굴, 만장굴, 김녕굴, 용천동굴은 하나의 선상에 놓여 서로 연결된다고 보고 거문오름 동튜브계로 명하기도 하였다(황상구 외, 2005). 이 동굴들의 연결관계를 살펴보면, 웃산전굴과 북오름굴 사이는 동일 동굴내의 일부구간이 붕괴되어 동굴통로가 막혀서 여러 동굴로 나누어진 것으로 하나의 용암튜브로 연결됨을 알 수 있다. 또한 북오름굴과 대림동굴 사이에는 소규모 붕괴도랑(collapse trench or

lava trench)들이 발달해 있어 서로 연결되는 것으로 유추된다(Fig. 1-6). 특히 이 구간에서 관찰되는 붕괴도랑 3곳 중(Fig. 1-6: T1, T2 and T3), T2와 T3은 식생이 무성하고 경사가 급해 직접 그 내부를 관찰하기에 어려움이 있으나, 북오름굴 남쪽에 위치하는 T1의 경우 내부 접근이 가능하다.

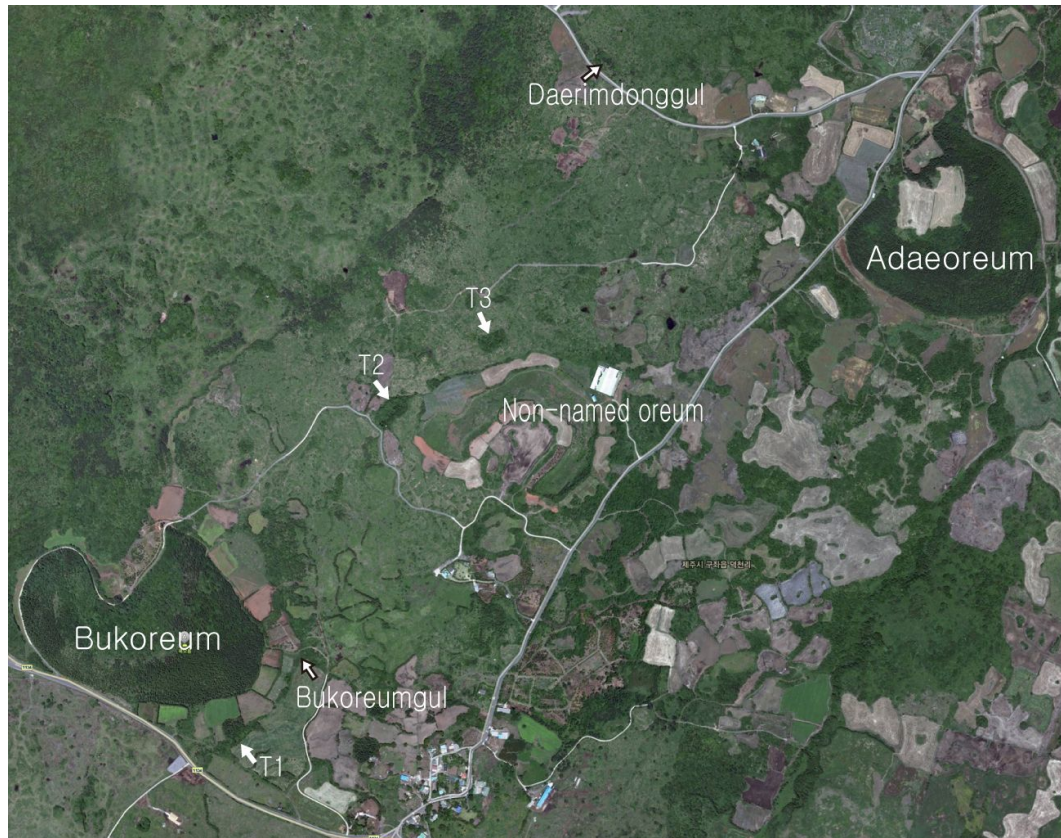


Fig. 1-6. Three collapse trenches between the Bukoreumgul and the Daerimdonggul lava tube. The trenches are densely filled with many trees. T1 is approachable to the inner part(Figs 1-7a, b, c and d), but T2 and T3 are not.

T1은 폭 7~10 m, 깊이 5~6 m, 길이 약 300 m 정도로 소규모이지만, 상류방향(웃산전굴 방향)으로 낙반에 의해 동굴이 막혀 있으며 함몰지의 일부구간에서 용암교가 관찰되고(Fig. 1-7a), 봉괴도랑 하류의 끝부분은 북오름굴로 연결된다. 봉괴도랑 벽면에는 용암유선이나 용암선반과 같은 동굴내부에서 관찰할 수 있는 구조들이 관찰된다(Fig. 1-7b). 봉괴도랑의 한쪽 벽면은 완전히 붕괴되어 벽면구조를 관찰할 수 없는가 하면(Fig. 1-7c), 맞은편 벽면에서는 용암유선이 선명하게 관찰된다(Fig. 1-7d). 이상에서와 같이 봉괴도랑이 상류와 하류에서 동굴로 연결되고, 용암동굴 내에서 관찰할 수 있는 내부구조를 가지며, 일부 붕괴되지 않은 부분에 동굴천장이 그대로 남아 있는 것으로 보아, 봉괴도랑은 동굴천장이 붕괴되어 형성된 특징적인 구조로 유추된다.

대림동굴과 만장굴 3입구 사이는 지금까지 용암동굴이 발견되지 않았고, 거리 또한 수평으로 약 1.2 km 떨어져 있어 지표상에서 두 동굴사이의 연결관계를 직접 확인할 수 없는 상황이다. 그러나 두 동굴내부 끝부분의 특징을 살펴보면, 대림동굴은 동굴폭보다는 동굴높이가 더 큰, 아래로 길쭉한 형태를 가지며 하류로 가면서 동굴천장이 낮아지면서 막히게 된다(북제주군, 2004). 만장굴 최상류 3입구에는 상류방향으로 진행할 수 없게 막혀 있으며, 바닥에 특징적으로 둥근 표면구조를 나타낸다(Figs 1-8a and b). 이는 틈을 따라 용암이 비집고 흘러나와서 돔과 같은 형태로 굳어진 것이다(Figs 1-8b and c). 이러한 구조는 3입구 상부의 천장이 붕괴되어 생성된 대규모 낙반에 의해 동굴통로가 막히고 동굴 내를 흘러가던 용암이 낙반더미를 밀어내지 못하고 상류구간을 채워지면서, 대림동굴과 만장굴 사이가 용암으로 막히게 되고 일부 용암이 틈사이로 비집고 흘러나와 돔 형태로 굳어진 것으로 해석된다(Waters et al., 1990)(Fig. 1-8d).

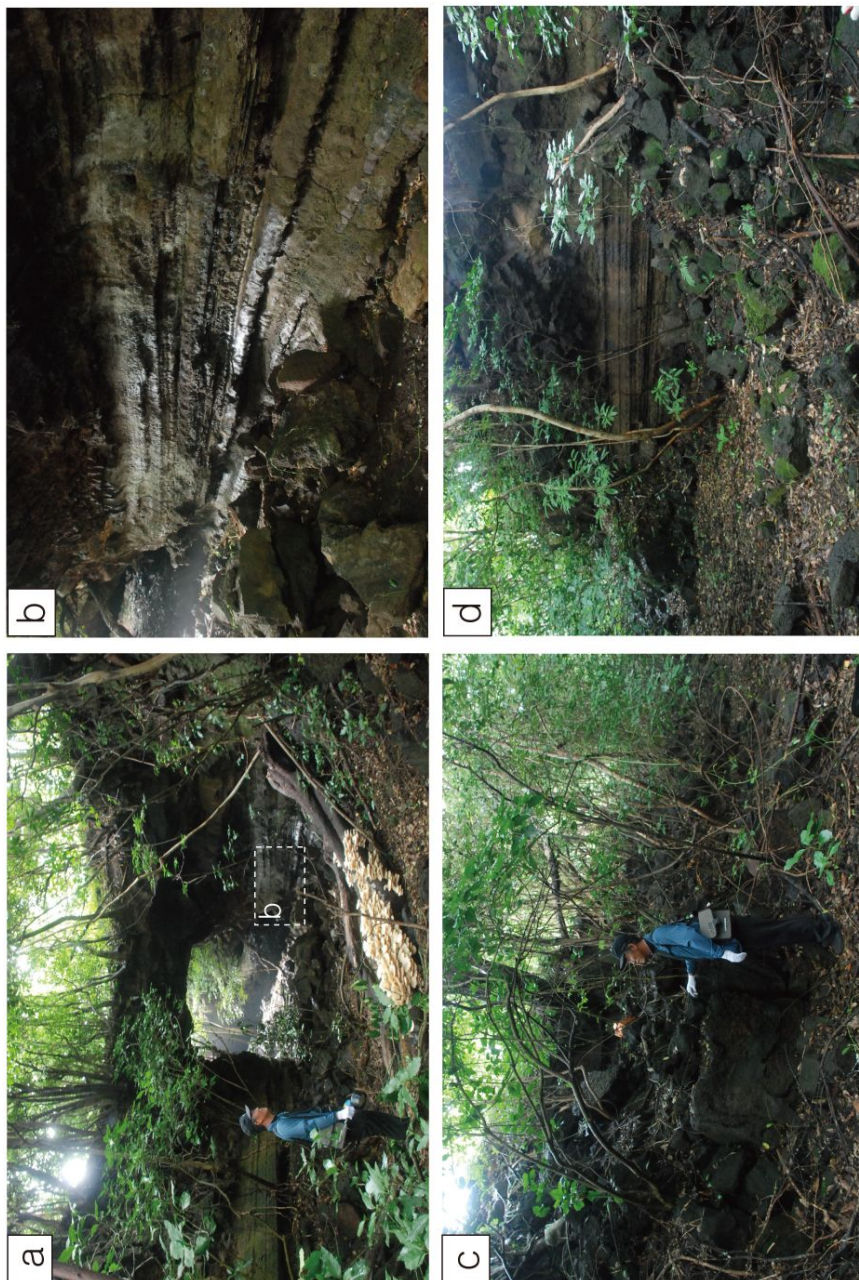


Fig. 1-7. The remnants of lava tube within collapse trench (T1) in Fig. 1-6. (a) Uncollapsed roof of the lava tube(lava bridge); (b) Flowline and lava shelves on the wall of collapse trench which is remnant of lava tube wall. (c) Massive wall is because of wall collapses of lava tube. (d) Flowline well preserved on the wall at the opposite side of Fig. 1-7c.

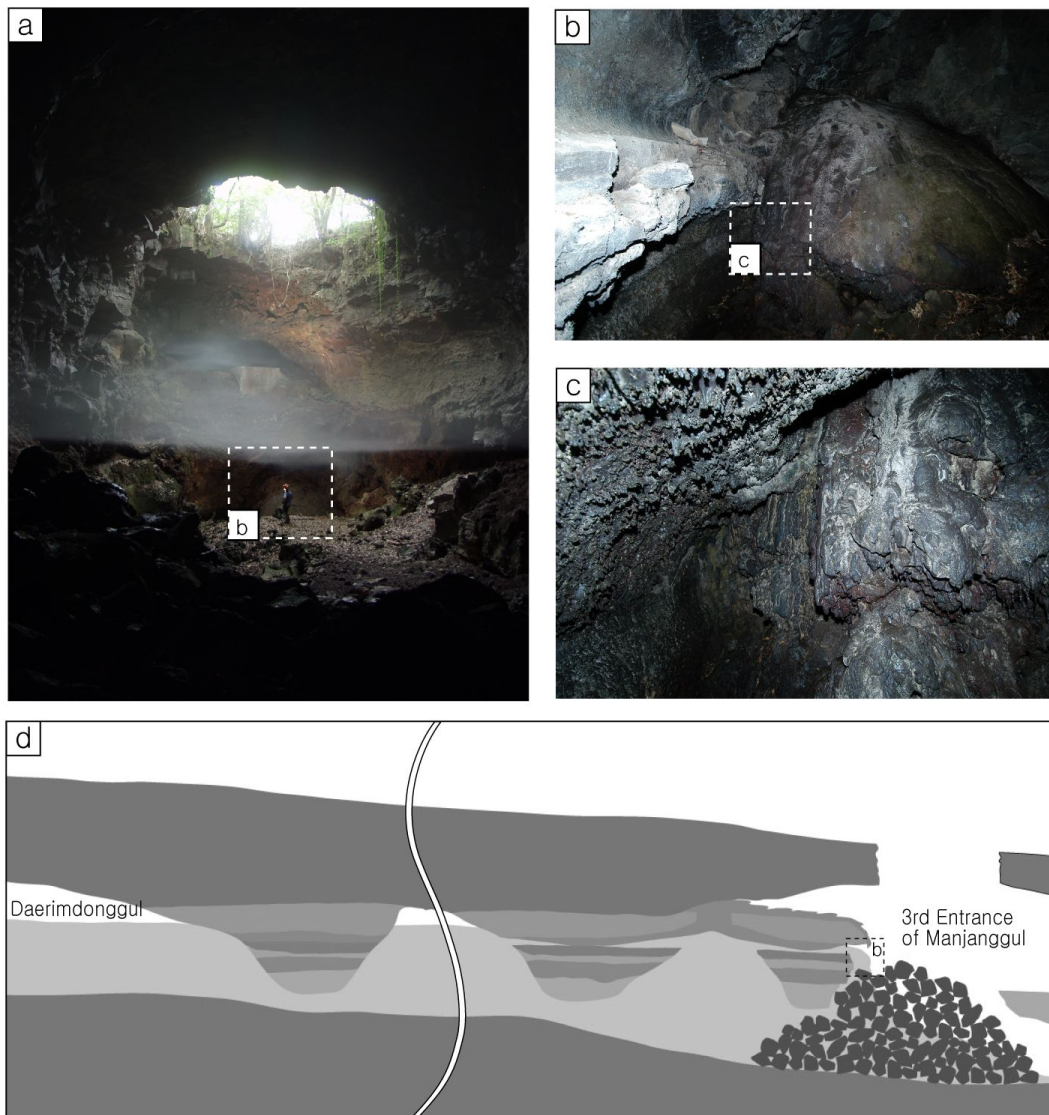


Fig. 1-8. Relation between the Manjanggul and the Daerimdonggul lava tube. (a) 3rd entrance of the Manjanggul lava tube, viewing upflow. A dotted box (b) displays the close-up site. (b) A out-squeezing lava feature of semi ball-shape inside of the small upper-level of the Manjanggul lava tube. A dotted box (c) displays the larger close-up site. (c) Close-up of the out-squeezing lava feature. (d) Schematic longitudinal section showing lava seal between the Daerimdonggul and the Manjanggul lava tube. Location of the out-squeezing lava feature is represented by a dotted box. Photos by Choi, D.W., NHC.

그러나 두 동굴 사이의 구간은 주간동굴의 북동 진행방향에서 벗어나 북서쪽으로 다시 휘어지는 것을 알 수 있는데, 이는 거문오름 용암류 이전의 고지형의 영향으로 여겨진다. 즉 대림동굴 동쪽에 위치한 어대오름은 거문오름보다 먼저 있었던 말굽형 분석구로서 북서방향으로 길쭉한 작은 순상체를 형성하였다. 이 순상체는 거문오름 용암류를 북서방향으로 우회시키는 지형적 장애물 역할을 하였으며, 그 결과 용암류 내의 용암동굴도 북서쪽으로 형성되었던 것으로 보인다(Fig. 1-5).

만장굴은 하류 부분에서 김녕굴과 직접 연결되지 않고 천장이 낮아지면서 끝부분이 막힌다. 김녕굴은 상류 부분에서 썰기와 같이 막혀 있지만(Fig. 1-9a), 하류로 가면서 동굴천장이 다시 점점 높아진다. 그리고 김녕굴 상류 막장에서 하류로 약 70 m 지점에는 소규모 용암폭포가 관찰되며 동굴 바닥이 갑자기 약 2 m 아래에 놓인다(Fig. 1-9b). 만장굴 하류와 김녕굴 상류에서의 형태와 용암폭포는 좁은 동굴 내부에 쌓여 있는 암석더미(상류에서 용암에 의해 쓸려 내려오다 정지된 낙반들 혹은 그 지점 천장이 붕괴되어 쌓인 낙반들일 수 있다)가 동굴내부를 흘러오던 용암을 막아주는 댐과 같이 작용함으로써, 막힌 부분 상류에는 용암수위가 높아지면서 만장굴과 김녕굴 사이가 용암으로 채워져 상대적으로 천장이 낮아지면서 막히게 된 것으로 추측된다(국립문화재연구소, 2007)(Fig. 1-9c). 용암동굴 형성과정에서 동굴 내부의 낙반생성이나 낙반에 의해 동굴 내부의 용암흐름이 막히는 예들이 보고된 바 있다(Larson and Larson, 1989; Allred and Allred, 1997; Kauahikaua et al., 1998; Espinasa, 2006).

김녕굴과 용천동굴 사이는 두 동굴 사이의 거리가 약 80 m로서 붕괴된 동굴내부에 패사로 채워져 통로가 막혀있지만 서로 연결된 것으로 추측된다.

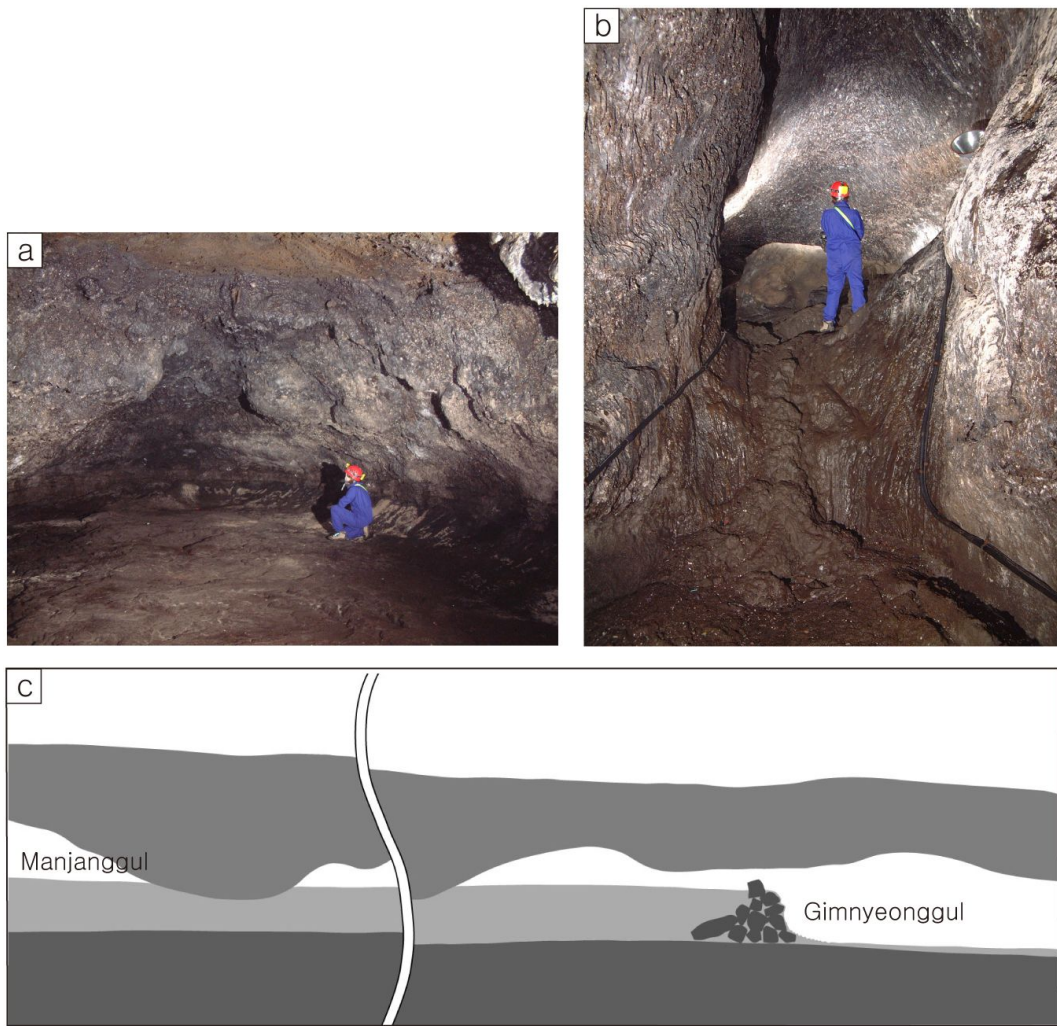


Fig. 1-9. Relation between the Manjanggal and the Gimnyeonggul lava tube. (a) Lava seal at upflow of the Gimnyeonggul lava tube, viewing upflow. (b) Lava fall at 70 m downflow from the lava seal, viewing upflow. (c) Schematic longitudinal section showing relationship of lava seal, lava fall and breakdown blocks between the Manjanggal and the Gimnyeonggul lava tube. Photos by Kim, R., CRIK.

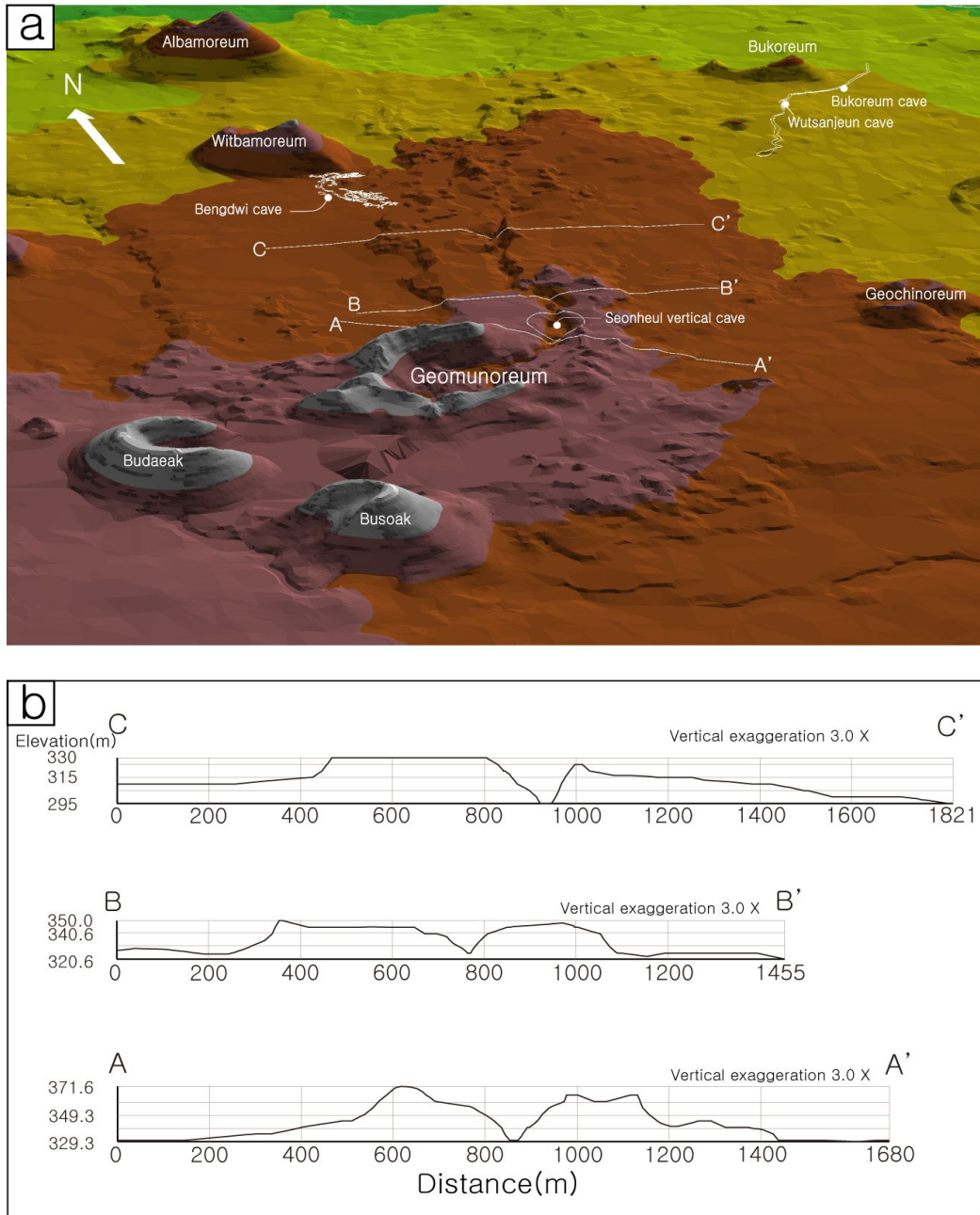


Fig. 1-10. (a) 3D topographic image of the Geomunoreum scoria cone and surrounding area. (b) Cross sections at three lines across the collapse trench.

3.3 거문오름 협곡의 성인

거문오름 용암류역 상류의 옷산전굴과 거문오름 분석구 사이에는 특징적인 지형으로 협곡(혹은 함몰구)과 선홀수직동굴이 보고된 바 있다(제주도동굴연구소, 2001). 이 협곡의 위치와 규모를 기재하고 용암동굴과의 연관성을 검토하여 그 성인을 유추해 본다.

3.3.1 협곡의 규모

거문오름 분석구는 북북동 방향으로 트여진 말굽형 분석구이며, 그 북북동에는 주변지형에 비해 매우 깊게 패인 대규모 협곡이 북쪽 혹은 북북동 방향으로 발달해 있다. 이 협곡은 식생이 무성하고 경사가 급해 직접 규모를 측정하는 것이 어렵지만 1:5,000 수치지형도 상에서 그 규모를 측정할 수 있다. 계곡 폭은 80~150 m에 달하고, 주변지형에 비해 15~30 m 가량 깊게 패여 있으며(Fig. 1-10), 계곡의 길이는 대략 2 km에 이른다.

선홀수직동굴은 거문오름 분석구 말단부로부터 3백여 m 거리에, 깊이 패인 협곡의 중앙부분에서 약간 벗어난 부분에 위치한다. 그 깊이는 35 m에 달하고, 동굴모양은 대체로 엷어놓은 깔때기 형태를 나타낸다. 동굴 바닥에는 낙석이 쌓여 있고 북쪽 방향으로 길이 40여 m의 수평굴로 연결된다(제주도동굴연구소, 2001).

3.3.2 평행 열극

협곡의 양옆에는 열극이 진행방향과 나란하게 발달해 있다(Fig. 1-11). 이 열극은 연장이 수백 m에 이르고, 그 깊이는 지표에서 7~10 m 정도로, 아랫부분으로 가면서 좁아지고 무너져 내린 암석으로 채워져 정확한 깊이 측정은 불가능하다. 지표상에서 열극의 폭은 1~5 m 정도이고 경사는 협곡의 바깥쪽으로 약간 경사지거나 거의 수직이다. 단면상에서 열극은 협곡 양편에 깊은 V자 모양으로 평행하게 발달해 있다. 접근이 가능한 폭넓은 열극은 내부 노출면에서 3~5 m 두께의 용암층이 관찰되는데, 대체로 작고 균질한 크기의 기공

이 치밀하게 발달해 있다.

이들 열극은 연장이 단속적이지만 협곡의 양편에 평행하게 발달하는 것으로 보아 협곡의 형성과정에서 함께 생겨난 것으로 여겨진다.

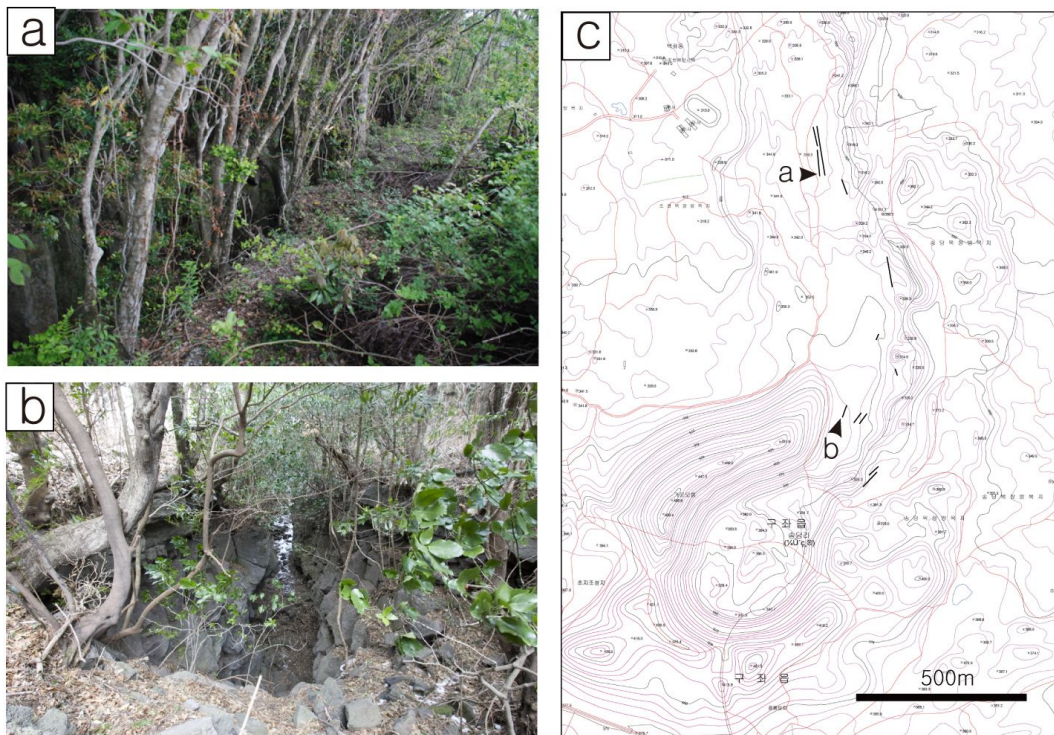


Fig. 1-11. (a) and (b) Parallel fissures occurred on both sides of the collapse trench. (c) Topographic map showing the collapse trench and many fissures(thick lines).

3.3.3 협곡의 성인

협곡의 바닥은 하류 방향으로 일정하게 경사되는 것이 아니라 불규칙한 기복을 나타낸다(Fig. 1-11c). 이렇게 협곡 바닥의 높이가 불규칙한 것은 협곡의 벽면에서 붕괴된 낙석이 협곡 내부에 불규칙하게 쌓여 그러한 지형이 만들

어질 수도 있다. 하지만 협곡의 진행선상에 있어서 선홍수직동굴의 주변지형과 같이 협곡의 양안이 완만하게 경사진 오목한 지형으로 서로 이어지는 부분들이 여러 지점에서 관찰되는 것으로 미루어보아, 크게 확대된 용암동굴의 차별적 붕괴에 의해 그러한 결과가 초래되었을 것으로 판단된다. 불규칙한 바닥경사, 켜기 모양으로 벌어진 평행 열극들, 선홍수직동굴의 바닥에 수평으로 연결된 동굴 등을 종합적으로 고려하면, 깊은 협곡은 이미 형성된 용암동굴이나 형성되고 있는 용암동굴의 지붕이 차별적으로 붕괴되어 형성된 붕괴도랑으로 여겨진다.

4. 토의

4.1 용암류의 구분과 층서해석

이 연구지역은 기존 지질도에서 침상장석 감람석 현무암(농업진흥공사, 1971), 표선리현무암(Lee, 1982), A1(박기화 외, 2006) 등으로 기재되어 제주도 육상에 분포하는 용암류 중 층서상 가장 하위에 놓이는 것으로 여겨졌었다. 그러나 이 지역은 지형, 암상, 지면구조 등에 의해 용암류를 구분할 수 있었고 그 용암류들은 하위에 아아 용암류로 구성되는 선북오름 용암류가 놓이며, 선북오름 용암류를 북오름 용암류가 피복하고 있는 것이 확인되고, 북오름 용암류는 다시 거문오름 용암류에 의해 피복된다는 것을 알 수 있었다(Fig. 1-4). 이러한 층서해석은 고기원 외(2008)에 의한 시추코아 시료의 화학조성 및 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대치와 일치한다. 이들은 동부지역 해안으로부터 내륙으로 일정한 거리로 얻어진 시추코아 시료를 연대 측정하여 수직적으로 지하에서 지표로 연대가 감소하고, 수평적으로는 내륙에서 해안으로 연대가 감소하는 것으로 보고하였다. 즉 육지지형이 내륙에서 해안으로 점진적으로 성장해 갔다고 해석하였다. 이러한 해석은 본 연구에서 선북오름 용암류, 북오름 용암류, 거문오름 용암류, 후거문오름 용암류 순으로의 층서해석과 일치한다.

4.2 거문오름 용암동굴계의 범위와 동굴선

용암동굴계(lava tube system)는 다음과 같이 정의된다. "용암동굴계는 용암동굴을 통한 용암 공급에 의해 파호이호이 용암류가 이동하는 용암동굴 분포망을 가지며 매우 넓고 얇게 퍼지는 흐름 방식으로 이동할 때 나타난다. 이때 동굴계는 단일동굴에서부터 동굴들이 평행하거나 횡단하며 재유입됨으로서 복잡하게 얽힌 동굴망(tube network)까지 복합적으로 나타나며, 대개 확실한 주간동굴을 가지면서 넓은 수지상 패턴을 나타낸다. 하나의 용암동굴계는 동시기의 흐름단위의 일부에 해당하는 용암동굴, 붕괴도랑과 기타 특징으로 이루어지는 동굴열(series) 혹은 동굴망이다(Larson, 1993)."

한편 Espinasa(2006)는 멕시코 수치옥 화산으로부터 흘러나온 용암류 내에 분포하는 용암동굴들 중에 위치적으로 서로 떨어져 있으면서 여러 갈래로 분포하는 복합동굴망(complicated network)을 개개의 용암동굴계라 이름 붙이고 더 작은 단위로 사용하기도 하였다. 그러나 이는 단순히 동굴 무리를 묶는 단위로 사용된 용어이며, 다른 지역에서의 연구사례(Larson and Larson, 1989; Atkinson and Atkinson, 1995; Allred and Allred, 1997)를 고려한다면, Larson(1993)의 정의와 같이 동시대 동일한 공급지에서 흘러온 용암류역 내에 분포하는 용암동굴의 집합으로 보는 것이 타당할 것이다. 특히 정의에서 언급된 바와 같이 용암동굴 붕괴에 의해 생성된 붕괴도랑도 같은 맥락에서 용암동굴계의 일부분으로 포함되어야 할 것이다.

제주도에는 120여개의 용암동굴이 분포하는데, 이들을 지역별로 묶어 용암동굴군(lava tube group)으로 명명하기도 하였다(손인석, 2000). 거문오름 북쪽 지역에 분포하는 20여개의 용암동굴은 하나의 군집으로 묶어 거문오름 용암동굴계(Geomunoreum lava tube system)로 부르기도 하였다(이문원 외, 2003). 그러나 이와 같은 용어 사용은 서로 지리적으로 가까운 용암동굴들의 인접성을 고려하여 하나의 용암동굴군 혹은 동굴계로 부른 것이며 상호간의 관계와 공급지의 동일성에 대해서는 검토되지 않았다. 이러한 이유에서 동일한 용암류 내에서 동굴분포 특성 등을 고려할 때, 거문오름 용암동굴계는 거

문오름 용암류 내에 분포하는 옷산전굴~용천동굴로 연결되는 주간동굴선, 뽕뒤굴 동굴망, 김녕빌레못굴~계웃샘굴 동굴선을 묶어서 정의하며, 이에는 봉괴도랑도 반드시 포함해야 한다(예: Larson and Larson, 1989; Larson, 1993; Atkinson and Atkinson, 1995).

이 거문오름 용암동굴계에 포함되는 동굴선과 동굴망 간의 관계에 대해 살펴본다. 먼저 뽕뒤굴 동굴망과 주간동굴선과의 관계를 살펴보자. 앞에서 살펴본 바와 같이 뽕뒤굴은 지표 아래 얕은 곳에 작은 동굴이 거미줄처럼 얽혀 있는 전형적인 복합동굴망에 해당하며 북서방향으로 진행한다. 반면에, 주간동굴선은 지하 깊은 곳에 큰 규모로 발달하며 전체적으로 북동방향으로 진행한다. 즉 거문오름 용암동굴계는 복합동굴망과 주간동굴이 동시에 발달하는 용암동굴계의 특징을 보여준다. 하나의 용암동굴계 내에서 주간동굴과 복합동굴망이 동시에 나타나는 사례는 하와이의 카주무라 동굴(Allred and Allred, 1997), 미국 캘리포니아주의 헤드쿼터(Headquarter) 용암동굴계(Larson and Larson, 1989), 멕시코의 수치옥 화산의 용암동굴(Espinasa, 2006) 등에서 찾아 볼 수 있다. 이렇게 주간동굴과 복합동굴망이 동시에 나타나는 원인으로서는, ①주간동굴 내부를 흘러가던 용암류가 동굴막힘에 의해 동굴천장의 약한 부분을 통해 터져나감(breakout)으로서 지표에 소규모 동굴을 형성하는 경우(Larson and Larson, 1989; Allred and Allred, 1997; Espinasa, 2006), ②경사가 상대적으로 급한 곳에서는 용암이 단일동굴(unitary tube)을 주로 형성하며, 경사가 완만한 곳에서는 여러 갈래로 갈라진 복합동굴망이 주로 형성되는데, 용암분출이 오랜 시간 지속되면, 초기에 생성된 단일동굴과 복합동굴망 모두 지속적으로 용암이 흘러간 통로를 따라 주간동굴이 형성되면서 복합동굴망도 함께 발견되는 경우(Espinasa, 2006), ③용암동굴 내를 흘러가던 용암류가 동굴의 어떤 부위를 터뜨리고 다른 통로를 따라 흘러가면서 새로운 용암동굴을 형성하면서 여러 갈래의 용암동굴이 생성되고, 그 중 오랜 시간동안 가장 우세하게 용암을 흘려보낸 용암동굴이 주간동굴로 변화해 가는 경우(Kauahikaua et al., 1998) 등을 생각할 수 있다. 이러한 세 경우 모두는 주

간동굴 주변부에 복합동굴망이 지표하에 상대적으로 낮게 분포하는 특징이 있으며, 첫 번째 경우와 같이 터져 나간 용암류에 의해 생성된 동굴들은 주간동굴 상위에 복합동굴망을 발달시키며 그 길이는 그리 길게 형성되지 않는 특징이 있다(Larson and Larson, 1989). 또한 두 번째와 같이 복합동굴망에서 주간동굴로 진화해 가는 경우에는 주간동굴이 주변에 발달한 동굴들을 자르고 지나가는 형태로 발견되는 경향이 있다(Espinasa, 2006).

벵뒤굴의 경우 전체적으로 북서방향으로 진행하며, 주간동굴로 합쳐지는 경향이 관찰되는 것으로 미루어(제주환경연구센터, 1998), 복합동굴망에서 주간동굴로 진화해 가는 과정에 해당하는 것으로 판단된다. 이러한 상황은 주간동굴의 막힘에 의해서 터져 나온 용암류가 장기간 유지된다면 벵뒤굴과 같은 형태의 동굴이 만들어 질 수 있을 것이다. 그러나 앞서서의 가정과 같이 주간동굴 막힘에 의해 장기간 벵뒤굴로 용암이 흘러갔다면, 주간동굴에서 터져나간 지점의 상류와 하류의 특정부위는 용암으로 채워져 그 통로를 잃어버리고 용암동굴로 남지 않게 될 것이다. 하지만 벵뒤굴과 봉괴도랑의 상호 위치에서 보면(Fig. 1-10a), 봉괴도랑은 용암으로 채워져 있지 않으며, 그 하류방향으로도 계속해서 봉괴도랑은 발달해 있다. 즉 봉괴도랑 부분이 벵뒤굴이 만들어 질 시기에 일시적으로 막혔던 부분이라면 이후에 다시 트여졌거나, 다른 통로로 용암을 흘려보냈을 것이다. 또 다른 가능성은 거문오름에서 흘러나온 용암류가 분석구의 북동방향 트여진 곳으로 흘러가면서 길쭉한 형태의 순상체를 형성하며 서서히 그 영역을 넓혀 갈 때, 용암류의 한 가지가 북서방향으로 흘러가 벵뒤굴을 형성하고, 이후 북서방향으로의 용암류 공급은 차단되고, 대부분의 용암류는 북동방향으로 흘러 일련의 주간동굴선(웃산전굴~용천동굴)을 형성한 것으로 추측할 수 있다. 즉 거문오름 용암동굴계의 주간동굴선의 형성이전에 벵뒤굴이 형성되었을 것으로 추측된다.

거문오름 용암류역 내에서 만장굴 북북서쪽에 위치한 김녕빌레못굴~계웃샘굴 동굴선은 주간동굴선에 비해 규모가 작은 동굴들이다. 이 동굴선과 주간동굴선과의 관계는 특별히 유추할 수 있는 구조나 또 다른 동굴이 발견되지 않

았다. 하지만 거문오름 용암류와 유사한 물리적 특성을 가지는 현생 하와이의 용암류에서 시간이 지나면서 용암류역이 바뀌고, 동시에 용암튜브의 경로도 바뀌는 예(Mattox et al., 1993; Kauahikaua et al., 1998)를 볼 때, 이 소규모 동굴선은 주간동굴선에서 갈라져 나온 가지동굴일 것으로 추측된다. 특히 Kauahikaua et al.(1998)은 푸오오 분석구에서 흘러나온 용암류가 용암동굴을 지나가는 시간을 측정하였는데, 상류에서는 4.5년으로 가장 길고, 하류로 가면서 용암동굴에 새로운 가지동굴이 생성되면서 용암동굴이 용암의 통로로 사용되는 시간이 1.5년에서 0.5년으로 짧아지는 경향성을 관찰하기도 하였다. 이와 같이 주간동굴라인은 하류의 어느 지점에선가 새로운 용암동굴 가지가 형성되면서 용암류역을 확장해 갔을 것이며, 주간동굴은 본래의 통로를 따라 계속해서 용암을 흘려보내면서 더 큰 규모의 주간동굴로 발달시켰던 것으로 추측된다.

위와 같이 현생 화산지역에서의 연구결과를 비교하면서 이 지역에서의 용암동굴 분포와 특성을 살펴본 결과, 벵뒤굴 동굴망과 김녕빌레못굴~게웃샘굴 동굴선은 주간동굴선에 연관되는 거문오름 용암동굴계의 구성원이다. 따라서 거문오름 용암동굴계는 전형적인 주간동굴과 복합동굴망이 모두 관찰되는 대표적인 용암동굴임을 시사한다.

4.3 붕괴도랑과 주간동굴의 관계

용암동굴의 붕괴에 의해 생성된 붕괴도랑은 여러 화산지역에서 다양한 용어로 기재된 바 있다. 예를 들면 하와이 몰로카이섬의 한 용암동굴계에서 카우하코 채널(Kauhako Channel)은 용암도랑(lava trench)(Halliday, 2002) 혹은 붕괴용암동굴(collapsed lava tube)로 기재된 바 있다(Coombs et al., 1990). Larson(1993)은 용암동굴의 천장이 붕괴되면서 생성된 곳으로 일반적으로 양측면의 경사가 급하고 구불구불하게 휘어져 있으며, 길쭉한 형태의 함몰지형을 붕괴도랑으로 정의하였다. 이러한 붕괴도랑은 용암동굴계의 정의에서 주간동굴과 연관되어 있다고 하였다(Larson and Larson, 1989; Larson, 1993).

세계의 도처에서 여러 용암동굴계는 주간동굴에 연관되어 붕괴도랑이 나타난다고 보고되었다(Greeley, 1971; Larson and Larson, 1989; Atkinson and Atkinson, 1995). 특히 Larson(1993)은 지형도 상에서 쉽게 파악되는 붕괴도랑의 존재로부터 주간동굴의 유무를 유추할 수 있다고 하였다.

거문오름 용암동굴계에서 주간동굴은 폭 보다는 높이가 크고 특징적으로 다층구조를 보이고(황상구 외, 2005; 안웅산과 황상구, 2008), 여러 개의 동굴들로 구성되며, 이들 동굴 사이에는 특징적인 붕괴도랑이 관찰된다. 특히 선홍수직동굴과 웃산전굴 사이에는 약 2 km에 달하는 붕괴도랑이 분포하며, 북오름굴 입구의 남쪽에도 그에 인접한 붕괴도랑 구조가 관찰된다(Fig. 1-6). 또한 북오름굴과 대림동굴 사이에도 규모는 작지만 지표에서 뚜렷이 인지되는 2개의 붕괴도랑(Fig. 1-6: T2 and T3)이 존재한다. 앞서 살펴본 바와 같이 이러한 붕괴도랑은 이미 형성된 용암동굴이나 형성되고 있는 용암동굴의 지붕이 차별적으로 붕괴되어 만들어진 것으로 여겨진다. 하지만 대부분의 붕괴도랑은 무성한 식생과 급한 경사에 의해 접근이 어려우며, 접근하더라도 오랜 시간에 걸쳐 여러 번 붕괴되어 동굴벽면이나 천장에 나타나는 특징적인 구조를 찾기는 쉽지 않다. 일례로 웃산전굴의 천장과 벽면이 붕괴되어 생긴 상류 입구의 경우 붕괴지의 바닥이나 벽면에서 동굴내부를 지시하는 흔적이 거의 발견되지 않아, 상·하류지점에서 동굴로 들어갈 수 있는 통로가 발견되지 않는다면, 붕괴에 의해 생성된 함몰지가 동굴의 일부구간이라고 인지할 수 없을 것이다. 또한 하와이 카주무라 동굴의 경우 최상류 약 2 km의 동굴구간에서는 동굴내부의 안도배(lining)가 크게 붕괴되어 용암동굴에서 특징적으로 나타나는 구조나 조직이 거의 관찰되지 않는다고 보고되기도 하였다(Allred and Allred, 1997).

거문오름에서 북북동 방향으로 발달한 약 2 km의 붕괴도랑이 주간동굴 형성과 관련된 것이라면 이러한 붕괴도랑의 규모는 주간동굴의 규모와도 관련이 있을 것으로 판단된다. 거문오름 분석구(용암의 공급지)에서 가까운 붕괴도랑의 경우 그 깊이가 15~30 m로 측정되었으나, 이는 붕괴도랑 양 측면에서 붕

괴된 암석이 채워진 것으로, 이보다 더 깊었을 것으로 추측된다. 왜냐하면 이보다 하류에 위치한 만장굴은 지표에서 하위동굴 바닥까지의 깊이가 14~34 m로 측정되며, 상류에서 하류로 가면서 그 깊이가 감소하는 것이 관찰되기 때문이다(안용산과 황상구, 2008; Fig. 2). 이러한 해석은 물이 여러 분수계에서 모여들어 하나의 강줄기를 따라 흘러가는 강이 하류로 가면서 규모가 커지는 것과는 달리, 용암은 상류에서 하나의 공급지에서 흘러와서 하류 지역에서 여러 개의 가지로 분기되어(Mattox et al., 1993; Calvari and Pinkerton, 1998; Kauahikaua et al., 1998; Takahashi et al., 2003) 상류에서는 동굴의 규모가 크고 하류로 가면서 그 규모가 작아진다(Larson and Larson, 1989)는 해석과 일치한다. 이러한 해석은 동굴 내부를 흘러가는 용암류에 의해 동굴 바닥이 계속해서 침식된다는 가정 하에 가능하다(Peterson et al., 1994; Allred and Allred, 1997; Kauahikaua et al., 1998; Greeley et al., 1998; Fagents and Greeley, 2001; Espinasa, 2006; Hon, 2007).

붕괴도랑의 양옆에는 붕괴도랑의 생성과 연계된 것으로 보이는 열극이 발견된다. 이러한 예는 하와이 킬라우에아 화산지역의 푸오오-쿠파이아나하 분출에서 직접 관찰되기도 하였다. 즉 푸오오 분석구에서 남동 방향으로 3.5 km 떨어진 쿠파이아나하 화구는 거의 5년 반에 걸친 기간 동안(1986. 7~1992. 2) 파호이호이 용암을 분류(effusion)하면서 용암동굴을 형성하였고, 용암이 용암동굴을 통해 멀리 해안가까지 흘러가게 되었다(Mattox et al., 1993; Heliker et al., 2003). 그 과정을 살펴보면 쿠파이아나하(Kupaianaha) 화구는 초기에 용암분류에 의해서 화구주변에 용암이 쌓이면서 상대적으로 주변 지형보다 높은 작은 순상체(shield)를 형성하고, 이후 계속적으로 흘러나오는 용암은 화구의 한쪽으로만 지속적으로 흘러가면서 용암동굴을 형성하였으며, 계속해서 동굴을 통해 용암을 흘러보내면서 이미 생성된 용암동굴이 붕괴되어 주변보다 깊은 붕괴도랑을 형성하였다. 이 붕괴도랑의 양측에는 이미 굳어진 용암층에 열극이 생성되어 용암층이 붕괴도랑 내부로 무너져 내리는 것이 관찰되기도 하였다(Weisel and Heliker, 2003). 본 연구지역에서 붕괴도랑 양

측에 나란하게 발달하는 열극들은 이와 유사한 과정에 의해 생성된 것으로 생각된다.

본 지역에서 거문오름과 웃산전굴 사이에 나타나는 붕괴도랑은 그 규모가 하류의 주간동굴보다 크거나 거의 같으며, 북북동 방향으로 같은 연장선상에 붕괴도랑 구조가 나타난다. 이러한 붕괴도랑은 그 규모나 하류 용암동굴과의 연장성 등을 고려하면, 용암이 말굽형 거문오름 분석구의 트여진 부분으로 지속적으로 용암이 흘러나와, 붕괴도랑을 통해 지나가면서 그 열에 의한 지속적인 열침식으로 확대된 유사한 규모의 용암동굴로 연결된다.

그러므로 거문오름과 웃산전굴 사이의 붕괴도랑은 용암 공급지와 용암동굴을 잇는 용암류의 통로였으며, 붕괴도랑 측부에 위치하는 선홀수직동굴은 용암동굴이 붕괴를 거치는 과정에서 아래로 길쭉하게 만들어진 창구조에 해당된다.

5. 결론

제주도 북동부 지역은 기존 지질도에서 대부분 침상장석 감람석현무암이라는 하나의 층서단위로 표기되었다. 그러나 본 연구에서는 화산지형, 암상, 화학조성, 지표형상 등에 근거하여 (1) 선북오름 용암류, (2) 북오름 용암류(현무암질 안산암), (3) 거문오름 용암류(알칼리 현무암), (4)후거문오름 용암류로 구분하였다. 웃산전굴~용천동굴은 거문오름 용암류역을 지나고, 대섭이굴, 도틀굴, 게여말굴 등은 북오름 용암류역을, 그리고 도람지굴, 한모살굴, 턴술굴 등은 후거문오름 용암류역을 통과한다.

거문오름 용암류 내에 분포하는 웃산전굴, 북오름굴, 대림동굴, 만장굴, 김녕굴, 용천동굴은 하나의 연장선상에 놓이고 공통적으로 해골형 혹은 모래시계형 단면을 나타내기 때문에 주간동굴로 기능하였다. 거문오름 용암동굴계는 웃산전굴에서 용천동굴에 이르는 주간동굴선, 뽕뒤굴 복합동굴망, 김녕빌레못

굴~계웃샘굴 구간의 단일동굴선으로 구성된다.

거문오름 분석구는 북북동 방향으로 트인 말굽형이며, 이 분석구의 북북동 방향에는 큰 용암동굴의 함몰로부터 유래된 깊은 붕괴도랑이 북북동 방향으로 발달되어 있다. 이 붕괴도랑은 규모와 방향성으로 미루어보아 용암동굴이 붕괴되어 생긴 구조로 웃산전굴과 연결되는 것으로 사료된다.

결론적으로 만장굴은 거문오름 용암류 내에서 선흘수직동굴에서부터 웃산전굴, 북오름굴, 대림동굴, 만장굴, 김녕굴, 용천동굴까지 연결되는 하나의 주간동굴선 상에 놓이고, 거문오름 주변의 붕괴도랑이 웃산전굴로 연결될 수 있음을 고려할 때, 만장굴을 포함하는 거문오름 용암동굴계가 거문오름 분석구에서 공급되는 용암에 의해 형성된 용암동굴로 판단된다.

2부. 정밀 측량과 동굴 내부구조 연구를 통한 만장굴 용암동굴의 형성과 성장과정에 대한 해석

Part 2. Interpretation of Formation and Growth Processes of
the Manjanggul Lava Tube through Detailed Surveying
with Electronic Total Station and Studying
of Lava tube Features

정밀 측량과 동굴내부 구조연구를 통한 만장굴 용암동굴의 형성과 성장과정에 대한 해석

1. 서언

제주도에는 120여개의 용암동굴이 분포하는 것으로 조사된 바 있으며(문화재청, 2003), 만장굴 용암동굴(이하 만장굴)을 비롯하여 특징적인 몇몇 용암동굴들(수산굴, 용천동굴, 빌레못동굴 등)은 (사)제주도동굴연구소에 의해 측량되기도 하였다.

제주도의 용암동굴 중 그 규모와 보존상태가 우수한 거문오름 용암동굴계는 2007년 7월 세계자연유산으로 등재되어 관련 학자와 일반인들의 관심이 더욱 커지고 있다. 만장굴은 거문오름 용암동굴계의 일부구간으로 1967년부터 일반인들에게 공개되어 그동안 많은 사람들의 사랑을 받아왔다. 만장굴은 그동안 연구 및 보존차원에서 조사되어 왔으나, 규모, 형성과정, 형성시기 등 풀리지 않은 많은 과제들이 있다.

지금까지 만장굴에 대한 연구를 살펴보면, 만장굴(3입구~1입구 하류까지)은 약 5.3 km의 통과길이를 가지며 상·하위동굴의 중복구간을 합치면 7.4 km에 달한다(손인석, 2003). 이문원 외(2003)는 만장굴 주변에 연관성이 인지되는 여러 용암동굴들(거문오름 ~ 선흘수직동굴 ~ 북오름굴 ~ 대림동굴 ~ 만장굴 ~ 김녕굴 ~ 당치물동굴 등)을 묶어 용암동굴계(lava tube system)라는 용어를 사용하였으며, 황상구 외(2005)는 이러한 연계성을 고려하여 용암동굴에 용암을 공급했을 것으로 유추되는 거문오름의 이름을 따 거문오름 동튜브계로 명명하고 그 길이를 13 km로 보고 하였다.

만장굴의 형성시기에 대한 연구는 산발적으로 진행되었는데, Sawa et al.(1990)은 만장굴내의 두 용암석주에 대하여 K-Ar 절대연대를 측정하고

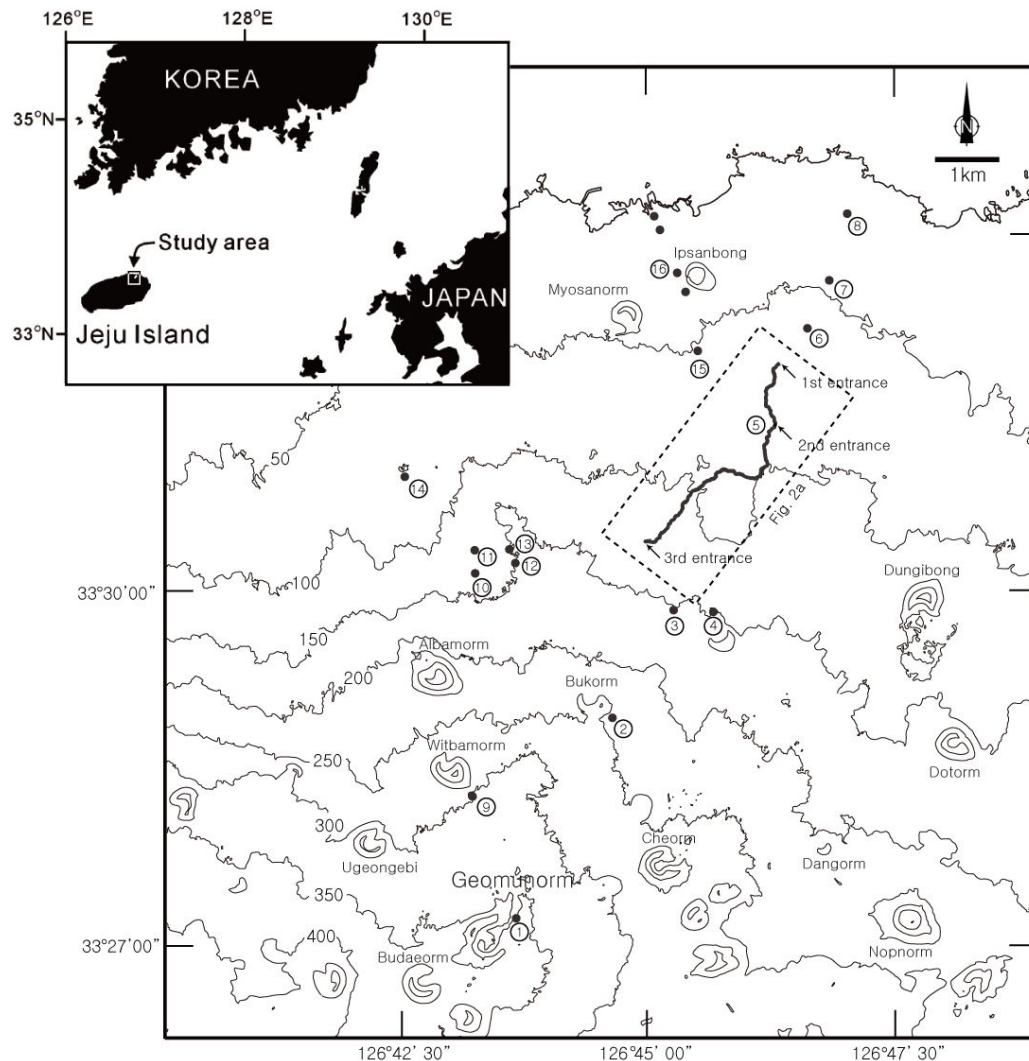


Fig. 2-1. Index map and topographical map of the northeastern Jeju Island showing location of the study area. The contour interval is 50 meters. Inset square marks location of the Manjanggal lava tube. Cinder cones are mainly distributed in the southern area of the Manjanggal lava tube. The Geomunoreum cinder cone is located in western part of the Seonheul vertical donggul ①. Numbered circles are the sites of lava tubes: ① Seonheul vertical donggul, ② Bukoreumgul, ③ Daerimdonggul, ④ Dukcheongul, ⑤ Manjanggal, ⑥ Gimnyeonggul, ⑦ Yongcheondonggul, ⑧ Dangcheonmuldonggul, ⑨ Baengdwigul, ⑩ Geyeomulgul, ⑪ Doteulgul, ⑫ Daeseobigul, ⑬ Moksumulgul, ⑭ Idaegimodeulgul, ⑮ Gimyeongbilemotgul, ⑯ Gwenaegigul.

각각 0.03 Ma와 0.42 Ma의 연대를 제시하였고, 그 후 Sawa and Inoue(1999)는 만장굴내의 다층구조가 전형적으로 나타나는 구간의 가장 위쪽 용암교에 대하여 K-Ar 절대연대를 측정하여 0.19 Ma 값을 제시하고, 두 연대측정치를 바탕으로 만장굴내의 두 용암석주 중 하나는 0.32-0.42 Ma에 형성되고 그 이후 0.19 Ma전에 용암교가 형성되었으며, 그 후 0.03-0.05 Ma 전에 나머지 하나의 용암석주가 형성되었다고 결론 내렸다. 최근 황상구 외 (2005)는 만장굴 내부의 벽면과 천장, 용암동굴 입구 주변 그리고 거문오름 근처 등에서의 시료에 대하여 K-Ar 절대연대를 측정하고 그 형성시기를 0.224-0.293 Ma 전으로 보고하였다.

지금까지의 만장굴 연구결과를 보면, 만장굴의 규모(높이, 폭, 절대적 위치)가 아직 명확하게 보고되지 않았으며, 절대연대측정 자료를 바탕으로 형성시기를 논리적으로 유추할 수 없었다. 만장굴의 형성과 성장과정에 관한 조사가 선행되고, 이를 바탕으로 형성시기를 조사하여야 보다 명확한 결과를 얻을 것으로 생각된다.

이러한 취지에서 거문오름 용암동굴계 중 접근이 용이하고 내부구조가 잘 관찰되는 만장굴 3입구에서 1입구까지 구간(Fig. 2-1)을 광파측량기로 정밀측량하고, 정밀측량 자료를 토대로 동굴 내 특징적인 내부구조를 기재하고 공간적으로 재구성함으로써 만장굴의 형성과 성장과정을 밝히고자 한다.

2. 연구방법

만장굴 1입구에서부터 3입구까지 약 4.5 km 구간은 삼각대를 설치하여 광파측량기를 사용할 수 있는 규모를 가지고 있어, 끈과 나침반을 이용한 기존 측량방법을 대신해, 무타킷광파측량기(Sokkia R-130)를 사용하여 측량의 정밀도를 높였다. 측정구간은 1입구에서부터 3입구까지 4.5 km구간과 2입구에서 1입구 사이의 상위동굴(지하1층굴) 0.64 km, 총 5.14 km를 측량하였다. 3입

구에서 하류방향으로 발달해 있는 상위동굴은 측량시 안전과 어려움으로 측량에서 제외하였다.

측량은 동굴내부의 평면모양을 측정하기 위하여 동굴내부의 가장 넓은 부분(주로 동굴벽면의 하단부)을 측정하였으며, 동굴바닥 중심선 부분과 동굴천장의 가장 높은 부분을 측정하였다. 측정값은 Geomap이라는 프로그램을 이용하여 캐드프로그램으로 데이터를 불러와 좌표화하고 도면화하였으며, 지표지형과 비교하기 위하여 1대 5,000 축척의 수치지형도에 투영하였다. 이러한 정밀측량을 통해 동굴의 폭, 천장높이, 바닥높이, 바닥경사, 지표에서부터 동굴 천장까지의 거리, 상·하위동굴 사이의 용암층 두께, 상·하위동굴 통로의 일치여부 등을 파악할 수 있다. 측량을 위한 기준점은 만장굴 진입부 도로상에 설치되어 있는 대한지적공사에서 부여한 기준점을 참조하였으며, 동굴을 측량하면서 기준이 되는 기준점들은 2입구에서 상류방향으로는 CPO로, 2입구에서 하류방향으로의 하위동굴은 PPO로, 2입구에서 하류방향으로의 상위동굴은 TPO로 기준점을 별도 표시하여 동굴내부 조사 시 기준점으로 활용하였다.

측량결과는 동굴내부 폭과 높이에 관한 정보를 제공할 수 있으나 그 세부적인 단면모양을 제공할 수 없어 동굴단면은 별도로 작성하고 위치를 기재하였으며, 상·하위동굴을 모두 관찰할 수 있는 구간(2입구에서 1입구 구간)에 대해서는 상·하위동굴의 같은 지점에서 사진을 촬영하고 그 특징을 기재함으로써 용암동굴의 성장과정과 만장굴 내의 다층구조의 형성원인을 해석하는 자료로 사용하였다.

3. 동굴의 규모 및 형태

3.1. 동굴의 규모

측량된 만장굴 3입구~1입구 구간에 한하여 규모를 살펴보면, 만장굴은 크게 두 개의 층으로 이루어진 다층 용암동굴이다. 동굴 내에서 상위동굴과 하

위동굴이 직접 관찰되는 구간은 3입구에서 하류방향으로 약 1,150 m에 이르는 구간(CP93~CP54)과 2입구에서 1입구 방향으로 약 900 m에 이르는 구간(CP3~P21)이다.

제3입구에서 1입구까지의 동굴의 중심선을 따라 측정된 거리는 4.5 km에 달하며, 두 입구간의 지표면의 고도차는 54 m로, 동굴지표 평균경사는 0.7°이다. 동굴의 일부구간 바닥에는 천장이나 벽이 붕괴되어 쌓인 낙반에 의해 바닥 높이를 측정하기 어려운 구간이 존재한다. 그러한 이유로 만장굴 최상류의 동굴바닥 높이는, 낙반에 의해 바닥이 채워지지 않은 최상류 지점인, CP85의 10 m 상류지점에서 측정하였다. 이 지점에서부터 최하류 1입구 근처(P27) 바닥까지의 바닥높이를 비교한 결과, 동굴바닥의 고도차는 32.4 m이며, 두 지점 간 측정거리는 4,304 m로, 동굴바닥 평균경사가 0.4°임을 알 수 있다(Table 2-1).

Table 2-1. General geometry measured in the Manjanggul lava tube.

	Vertical extent	Horizontal surveyed distance *	Horizontal linear distance	Average slope *	Linear average slope	Remark
Ground surface	54m	4,502m	3,383m	0.7°	0.9°	CP93 ~ P27
Tube's floor	32.4m	4,304m	3,262m	0.4°	0.6°	around CP85~P27

The values are measured between the 3rd and 1st entrances. In particular, difference in altitudes of the floors between the two entrances is at least 32.4 m. Because it is not possible to measure the altitude of the tube's floor at the 3rd entrance filled with breakdown blocks, altitude of upmost lava tube' floor was measured at about 190m downstream(around CP85) from the 3rd entrance. * This is based on horizontally surveyed distance through the meanders of the lowest level.

조사구간에서 동굴표층의 두께가 가장 두꺼운 곳은 3입구에서 하류로 약 190 m 떨어진 지점(CP85 상류)이 32 m로 가장 두껍고, 3입구에서 하류로 약 3,870 m 떨어진 지점(T15 상류)이 3.4 m로 가장 얇다(Fig. 2-3). 동굴바닥에서 천장까지 가장 높은 곳은 CP85 지점으로 23 m에 달하며, 가장 낮은 곳은 1입구 근처의 P26 지점으로 2 m이다(Fig. 2-3). 상위동굴과 하위동굴이 나누어지는 층의 두께는 T9 지점에서 7.6 m로 가장 두껍고, T10 부분에서 1.8 m로 가장 얇다(Fig. 2-4). 동굴폭이 가장 넓은 곳은 CP62 부근에서 21.3 m에 달하고, 가장 좁은 곳은 CP42와 CP9~8 부근으로 3.4 m이다(Fig. 2-2).

3.2. 동굴의 종단면

측량자료를 바탕으로 기준점(CP93)으로부터 거리에 따라 동굴바닥과 천장 등의 높이를 그래프로 표현하면 Fig. 2-3과 같다.

측정된 만장굴 하위동굴 바닥의 경사는 3입구에서 1입구까지 평균 0.4° 로 극히 저각이며, 경사에 따라 크게 5구간으로 구분된다(Fig. 2-3). 조사구간 중 가장 상류로 경사가 가장 급한 A구간은 바닥경사가 평균 0.7° 이며, 그 하류인 B구간은 0.1° 이하로 거의 수평이다. C구간은 다시 경사가 급해져 0.5° 정도이며, D구간은 0.1° 이하로 거의 수평에 가깝다. 가장 하류 부분인 E구간의 경사는 0.6° 이다(Table 2-2). 경사가 상대적으로 급한 구간과 완만한 구간이 교대로 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 특히 경사가 완만한 구간은 거의 수평에 가깝다.

Fig. 2-3에서 동굴 바닥경사가 동굴 지표경사와 잘 조화됨을 알 수 있다. 즉 동굴 바닥이 상대적으로 급한 A, C구간의 지표는 경사가 급하고, 상대적으로 경사가 거의 수평인 B, D구간의 지표경사는 작다.

경사를 서로 달리하는 5개 구간을 더 세분화하면, 총 22구간으로 구분할 수 있다. A구간은 보다 작은 8개의 구간으로 나뉘는데, 경사가 가장 급한 곳은 1.6° 이며 경사가 가장 작은 구간은 거의 수평이다. 5개 구간으로 대분할 수 있는 것과 같이 더 작은 구간으로 세분했을 때에도 경사가 큰 부분과 경사가

작은 부분이 교대로 나타나는 특징이 있다. B구간은 거의 수평으로 내부의 경사 변화를 관찰할 수 없다. C구간은 10개의 작은 구간으로 나뉘는데 경사가 가장 급한 곳은 1.7° 이며 가장 완만한 곳은 0.1° 이하이다. 이 또한 경사가 급한 부분과 경사가 완만한 부분이 교대로 나타나는 특징이 있다. E구간에서 1입구로 가면서 경사가 갑자기 증가하는데, 짧은 구간에서 약 5.5° 의 경사를 보이기도 한다. 이는 1입구에서 하류로 조사를 더 진행하여야 정확한 패턴을 예측할 수 있을 것으로 판단된다(Appendix 1).

Table 2-2. Individual geometry in several zones of the Manjanggul lava tube.

Location		Zone A	Zone B	Zone C	Zone D	Zone E	Total
Slope of tube's floor	vertical extent of tube's floor(m)	16.4	0.2	14.5	0.3	1	32.4
	surveyed distance(m)	1,347	552	1,836	476	93	4,304
	average slope of floor(deg)	0.7	< 0.1	0.5	< 0.1	0.6	0.4
Width of lava tube	maximum	13.39	14.84	14.07	12.74	-	-
	minimum	5.09	6.6	4.25	6.84	-	-
	max/min	2.65	2.25	3.31	1.86	-	-
Sinuosity	PD(m)	1,291	552	1,836	476	81	4,236
	LD(m)	1,187	440	1,290	413	78	3,197
	PD/LD	1.08	1.25	1.42	1.15	1.03	1.32

Several zones are divided based on the floor's slope of the lava tube. The maximum and minimum widths are the average three largest widths and the average three least ones in each zone. In the sinuosity, PD indicates a distance of central line in the tube and LD, a horizontal linear distance between two points, respectively.

이와는 달리, 측량된 만장굴 상위동굴의 바닥은 곳곳의 붕괴 및 낙석 그리고 용암교 등의 발달로 바닥높이가 불규칙하여 하위동굴에서처럼 바닥경사를 측정하는 것은 어렵다. 그러나 측량결과를 도식화하여 상위동굴 바닥의 가장 높은 곳들을 연결하면 나란히 나열되어 동굴의 하류 쪽으로 기울어짐을 확인할 수 있다. Fig. 2-4에서 보는 바와 같이 T3 지점에서 T16 지점까지 바닥의 가장 높은 지점을 연결하면 가장 높은 점들(T4, T9, T14, T15 등)이 경사를 가지면서 일직선상에 놓인다. 이 구간에서 가장 높은 지점들은 동굴폭이 좁은 곳으로 용암교가 발달한 지점이며(Fig. 2-2), 상대적으로 바닥이 낮은 부분은 동굴폭이 넓은 곳이다. 이러한 용암교의 흔적은 용암동굴 내를 흘러가던 용암이 용암교의 높이까지 채웠음을 지시하는 것이다. 상위동굴의 가장 높은 지점을 연결한 선의 경사는 0.4° 이며, 같은 구간에 있어 하위동굴 또한 바닥경사가 0.5° 로, 상위동굴과 하위동굴의 바닥경사가 거의 같음을 알 수 있다 (Table 2-3).

Table 2-3. Comparison of geometry between upper and lower level tubes of boxed area in Fig. 2-3.

Location		upper level tube	lower level tube
Slope of tube's floor	vertical extent of tube's floor(m)	3.3	4.0
	surveyed distance(m)	474	474
	average slope of floor(deg)	0.4	0.5
Width of lava tube	maximum	14.86	10.77
	minimum	4.15	6.4
	max/min	3.58	1.68

The maximum and minimum widths are the average three largest widths and the average three least ones in each zone.

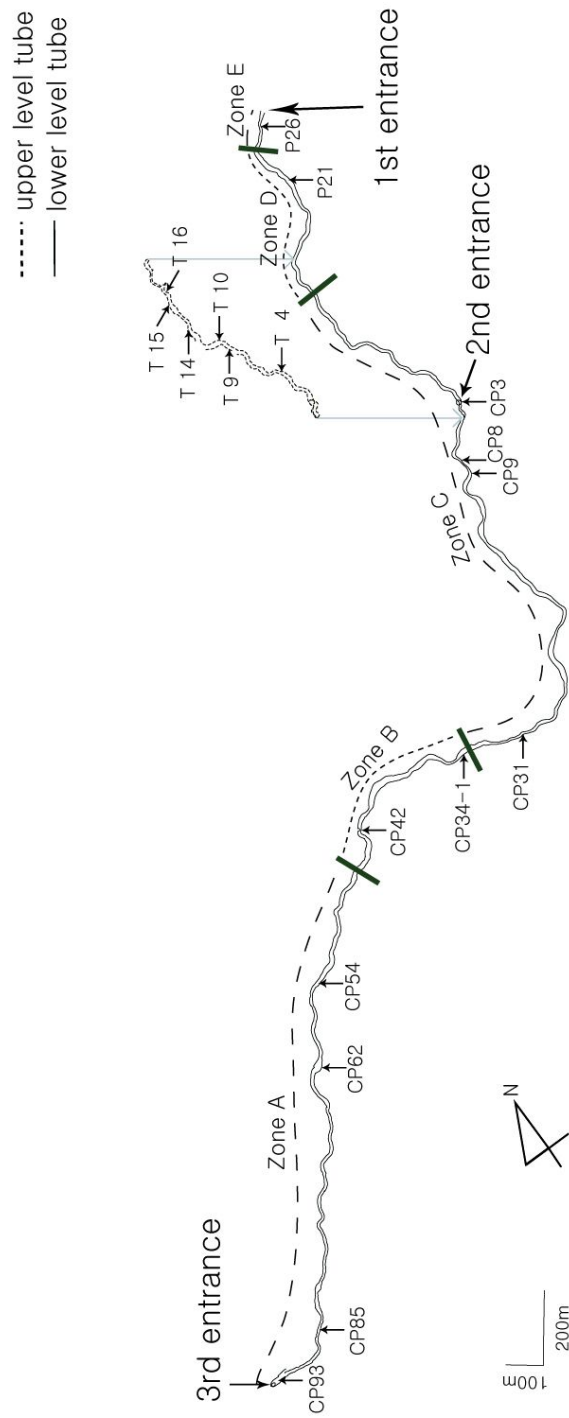


Fig. 2-2. Plan of the Manjanggul lava tube. Five zones are divided by floor slope in the lower level tube. Although the upper level tube exists just on top of the lower level tube, it was separately depicted to distinguish it from the other (see Fig. 2-7a).

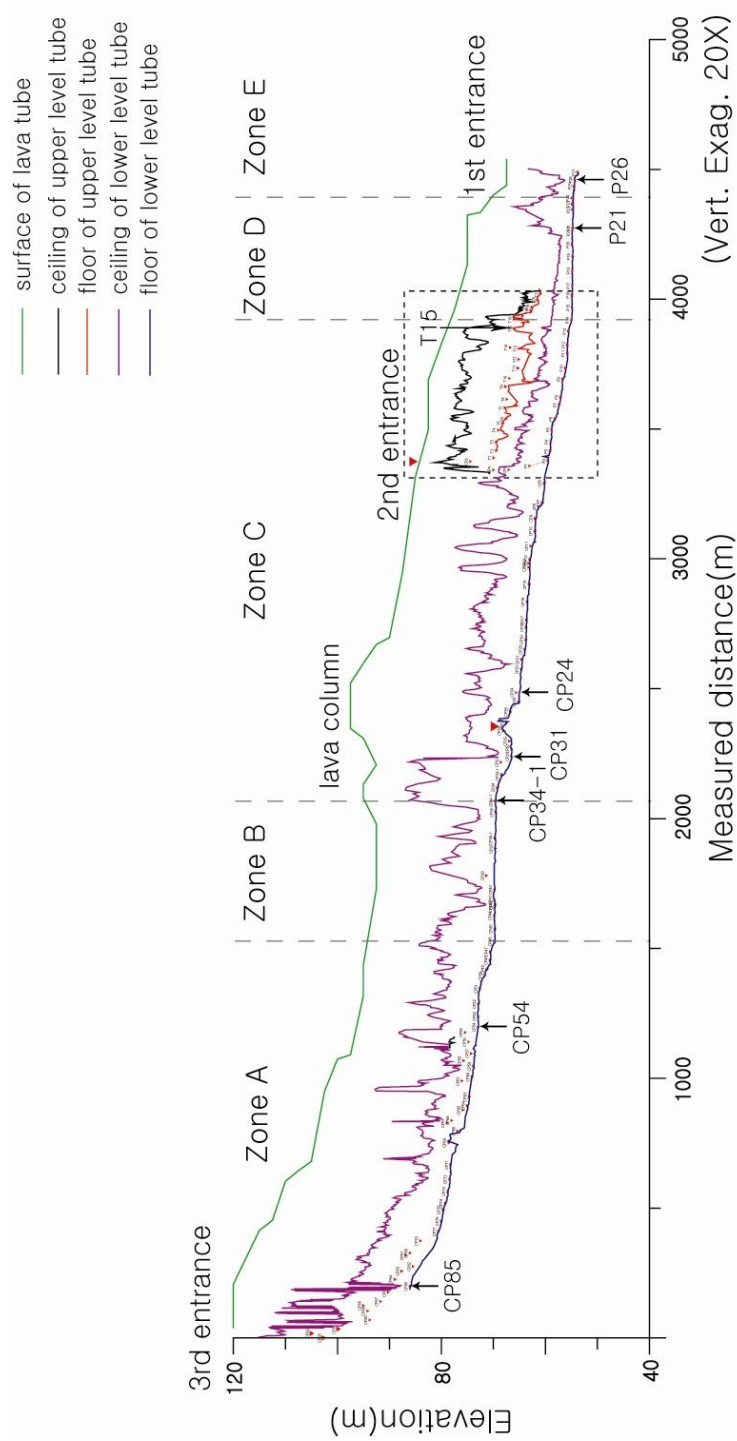


Fig. 2-3. Longitudinal profile of the Manjang lava tube. Five zones are divided by floor slope in the lower level tube such as Fig. 2-2. The X axis is the distance measured from CP93 point near the 3rd entrance and the Y axis shows altitudes above sea level. The area, open to the public, is from the 2nd entrance to lava column. The altitudes of ground surface are obtained from digital topographic maps and the altitudes values of tube floors and ceilings are taken from our measurement.

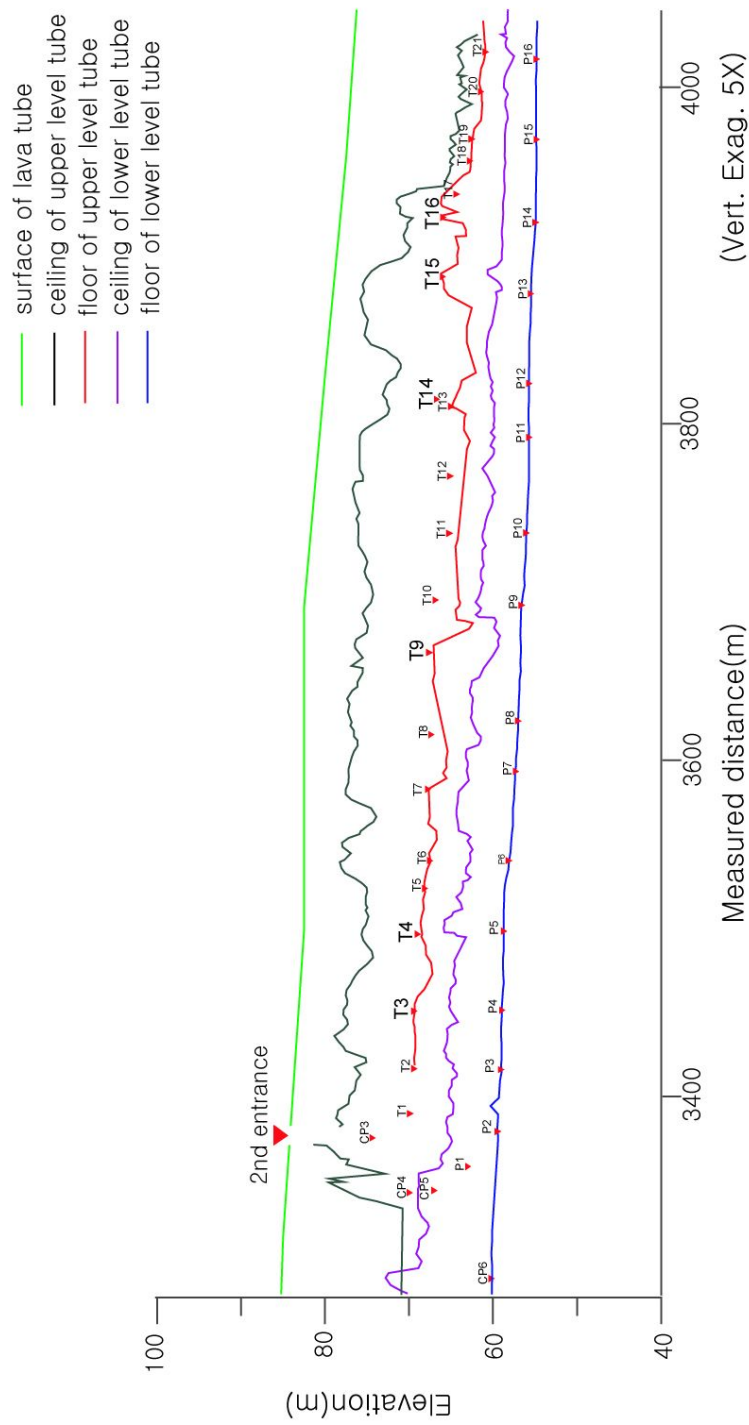


Fig 2-4. Profile of the boxed area in Figure 2-3. The lower level tube generally has a flat floor in contrast to the large difference in height of the floor of the upper level tube. When connecting the heights of higher floor sites (T3, T4, T9, T14, T15, T16), the floor lies on the curve with a similar slope to the floor of the lower level tube (see Table 2-3).

상위동굴과 하위동굴의 천장높이는 좁은 구간에서 뚜렷한 변화패턴을 보이지 않는다. 그러나 측량결과를 바탕으로 조금 더 큰 구간에서 동굴천장의 가장 높은 부분들을 연결해 보면 지표와의 거리가 거의 일정하면서 지표경사에 평행하게 서로 연결됨을 알 수 있다(Fig. 2-3). 그리고 용암동굴 천장이 낮은 부분들을 연결하면 이 또한 하위동굴의 천장과 유사한 패턴으로 연결되는 것을 관찰할 수 있다.

3입구에서 CP54에 이르는 구간과 2입구에서 하류방향으로 P21에 이르는 구간에서는 상위동굴을 직접 관찰할 수 있으나 나머지 구간에서는 상위동굴을 직접 볼 수 없다(북제주군, 2003). 이렇게 상·하위동굴이 직접 구별되지 않는 구간 중 CP34-1에서부터 CP31까지 부분의 동굴천장 높이를 살펴보면, 상위동굴이 직접 관찰되는 구간에서의 천장높이와 잘 연장됨을 알 수 있다(Fig. 2-3).

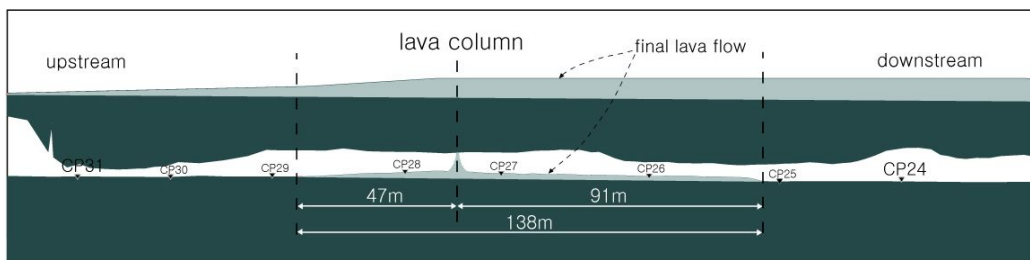


Fig. 2-5. Profile of the lava column and the final lava flow at zone C, which poured down the ceiling of the lower level tube. 1.5 m thick, the lava flow traveled 47 m toward upstream and 91 m toward downstream.

위에서 언급한 것과는 달리 C구간(Fig. 2-3)의 지표는 상류나 하류의 지표 경사와 달리 불룩하게 돌출되어 있는 지형이 관찰된다. 이 돌출된 부분은 주변 지형을 고려하여 규모를 측정해 보면, 돌출정도(두께)는 6.5 m이며, 폭은 500~600 m로 측정된다. 돌출된 지형 아래의 동굴 내부에는 용암석주가 위치

하며, 용암석주를 기준으로 그 상류와 하류로 하위동굴 바닥 또한 돌출되어 있다. 이렇게 돌출된 부분은 용암석주가 생성될 당시 동굴 내부에서 상류와 하류로 흘러간 용암임을 알 수 있다. 측량결과에 의하면, 이 용암은 용암석주로부터 하류로 91 m, 상류로 47 m를 흘러 총 138 m에 걸쳐 분포하며, 평균 바닥면을 기준으로 두께가 가장 두꺼운 부분은 용암석주의 상류 쪽에서 2.3 m이며, 상류와 하류의 대부분의 구간에서 평균 1.5 m로 거의 일정하다(Fig. 2-5).

3.3. 동굴의 평면

3.3.1. 동굴의 폭

측량자료들을 평면상에 표시하면, Fig. 2-2와 같이 구불구불하게 휘어져 있다. 동굴 내에서 직접 동굴폭을 측정하지 않더라도 정밀측량 결과를 바탕으로 도면상에서 동굴폭을 측정할 수 있다. 하위동굴의 가장 넓은 부분은 3입구에서 950 m 하류에 위치한 CP62 지점으로 21 m에 이르고, 가장 좁은 부분은 3입구로부터 1,650 m 하류에 위치한 CP42 지점으로 3.4 m이다. 상위동굴의 경우(2입구~D구간 상류) 가장 넓은 곳은 15 m이며, 가장 좁은 곳은 3.2 m이다.

동굴 내 가장 넓은 구간(CP62)은 용암동굴 내부가 붕괴된 암석으로 절반이상 막혀 있어, 용암동굴이 형성된 후 동굴 벽면의 붕괴로 그 폭이 확대된 것으로 판단된다.

용암동굴 폭의 변화경향을 파악하기 위하여 구간별 최대, 최소폭을 가지는 3지점의 평균값을 계산하였다. 최대폭을 가지는 부분 중 용암동굴 생성 후 벽면 붕괴로 폭이 넓어진 것으로 판단되는 부분은 비교에서 제외하였다(Table 2-2). 동굴의 폭은 상류에서 하류로 가면서 뚜렷한 변화경향은 관찰되지 않으며, 동굴의 폭이 큰 곳은 대체로 12~15 m에 달하며, 좁은 곳은 4~7 m이다.

동굴바닥의 경사와 동굴폭과의 관련성을 살펴보면, 경사가 급한 A, C구간은 최대폭과 최소폭의 비가 2.65~3.31로 상대적으로 큰데 비해, 바닥면이 거의

수평인 B, D구간은 그 비가 1.86~2.25로, 경사가 완만한 구간에서 동굴폭의 변화가 상대적으로 작게 나타난다.

상·하위동굴이 모두 측량된 구간에서 동굴폭을 살펴보면, 상위동굴은 최대폭이 더 크고, 최소폭은 더 작다. 따라서 상위동굴의 최대폭과 최소폭의 비 또한 하위동굴에 비해 크다(Table 2-3, Fig. 2-7a).

상·하위동굴 부분의 확대 평면도(Fig. 2-7a)에서 상·하위동굴이 대략적인 진행방향은 거의 일치하나, 상·하위동굴의 벽면은 서로 정확하게 일치하지 않고 어긋나 있다. 그 불일치 정도를 살펴보면, 2입구 직하부에서 상·하위동굴의 벽면은 6 m 정도 어긋나 있으며, 그 외 여러 곳에서 2~4 m 정도씩 어긋나 있다. 그리고 상·하위동굴의 굴곡의 정도를 살펴보면 상위동굴이 급하게 굴곡하는데 비해, 하위동굴은 보다 완만하게 굴곡함을 알 수 있다(Fig. 2-7).

3.3.2. 동굴의 굴곡률

만장굴 측량결과를 도면 위에 표시해 보면 마치 하천과 같이 휘어진 부분들이 발달해 있으며, 이러한 특징은 여러 연구사례에서도 보고된 바 있다(Allred and Allred, 1997; Espinasa, 2006). 이러한 굴곡이 용암이 흘러간 지표경사와 어떠한 상관성이 있는지를 살펴보기 위해, Allred and Allred(1997)가 사용한 "굴곡률(sinuosity)" 공식을 사용하였다.

$$S(\text{굴곡률}) = PD/LD$$

여기서 PD는 두 조사지점간의 동굴 중심선의 거리

LD는 두 조사지점간의 직선거리

앞서 용암동굴의 종단면에서 살펴본 바와 같이 만장굴을 형성한 용암류의 지표경사는 용암동굴 바닥경사와 조화롭게 변화하는 것을 알 수 있었다. 따라서 용암류가 흘러간 지표경사를 대신하여 용암동굴의 바닥경사와 굴곡률의 상

관관계를 비교해 보았다. E구간은 조사구간이 상대적으로 짧아 다른 구간과 비교하기에는 부적절한 것으로 판단되어 비교에서 제외하였다.

측량된 전체구간의 용암동굴 바닥경사는 0.4° 이며, 굴곡률은 평균 1.32이다. 바닥경사가 서로 다른 4개 구간에 대하여 바닥경사와 굴곡률과의 상관관계를 살펴보면, 평균경사보다 큰 A, C구간은 굴곡률이 각각 1.08과 1.42이며, 동굴 바닥이 거의 수평인 B, D구간은 각각 1.25와 1.15로 조사되었다(Table 2-2).

하와이 카주무라 동굴의 경우 평균 굴곡률이 1.1이고, 경사가 급한 상류 구간은 1.01~1.32(평균 1.1)이며, 경사가 상대적으로 완만한 하류 구간은 1.09로 조사되어, 경사가 급한 곳에서 형성된 용암동굴의 굴곡률이 더 클 수 있다는 가능성이 제시되기도 하였다(Allred and Allred, 1997).

그러나 만장굴의 경우 경사가 급한 구간과 완만한 구간에 있어서 카주무라 동굴에서와 같은 바닥경사와 굴곡률간의 상관관계는 찾을 수 없었다.

3.4. 동굴의 횡단면

측량결과를 바탕으로 용암동굴의 횡단면을 살펴보면, 조사구간 전반에 걸쳐 그 모양이 단순한 반타원형이 아니라, 동굴폭보다는 높이가 더 큰 아래로 길쭉한 형태를 보인다(Table 2-4).

기재와 비교를 위하여 상·하위동굴의 존재 및 측량 유무에 따라 조사구간을 5개 구간으로 구분하였다. 상위동굴은 1, 3, 4구간에서 인지되며, 2, 5구간에서는 구별되지 않는다. 특히 상위동굴이 인지되는 세 구간 중 제3구간(2입구에서 1입구 방향)은 상·하위동굴이 모두 측량되었다. 제1, 4구간은 상위동굴이 인지되지만, 제1구간은 측량의 어려움으로, 제4구간은 동굴 내부로의 진입의 어려움으로 측량되지 않았다. 그러나 제1구간은 상·하위동굴이 부분적으로 창구조로 뚫려있어 제한적으로 동굴의 전체 높이를 측량할 수 있었다(Fig. 2-6).

이러한 조건하에서 동굴의 전반적인 횡단면 모양을 살펴보면, 각 구간에서 가장 폭이 넓은 곳은 13~15 m로 대체로 일정하며, 가장 높은 곳은 상·하위

동굴이 인지되는 곳에서 대략 20~22 m에 달하여, 동굴높이/동굴폭의 값이 약 1.3이다. 즉 동굴의 폭보다 동굴 높이가 더 큰 길쭉한 형태로, 동굴 내 여러 곳에서 이러한 형태가 관찰된다.

Table 2-4. Ratios of maximum height to width in each zone of the lava tube

Location	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
Max. height(m)	22.8	19.4	20.2	3.4	11.4
Max. width(m)	11.3	15.08	15	13.3	14.2
Height/Width	2.02	1.29	1.35	0.26	0.80

Zones are divided based on the existence of upper or lower level tube. The maximum height and width were measured at the highest and the widest sites in each zone. The zone 1, 3 and 4 have upper and lower level tubes, but the zone 2 and 5 are not exactly distinguished. Geometry of both upper and lower level tubes were measured only in the zone 3. In the zone 1, the height of ceiling in the upper level tube was measured through a collapsed window connecting between upper and lower level tubes. Although it was reported to find the upper level tube in zone 4, we could not survey it.

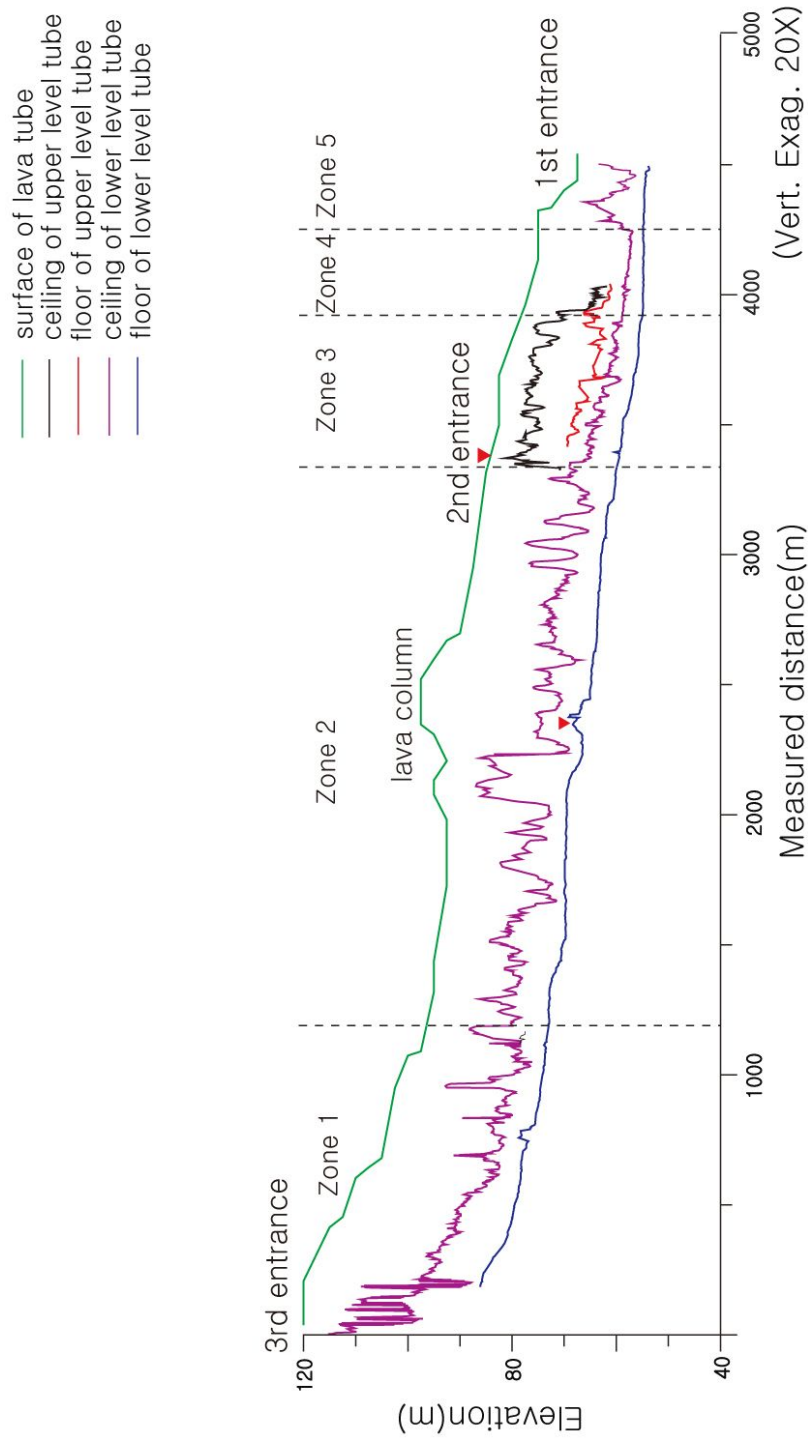


Fig. 2-6. Division of five zones in the Manjanggul lava tube by existence of multi-level tube. Both upper and lower level tubes are recognized in the zone 1, 3 and 4 but they are not distinguished in the zone 2 and 5. The geometry of both upper and lower caves could be measured only in the zone 3 (see Table 2-4).

특히 상·하위동굴이 모두 측량된 구간(제3구간)은 측량자료를 바탕으로 상·하위동굴의 특징적인 횡단면을 관찰할 수 있는 부분에서 단면도를 작성하였다(Fig. 2-7b).

A 지점에서는 상·하위동굴의 폭이 거의 유사하며 상위동굴의 경우 바닥면이 팽창하여 위로 부풀어 올랐으며, 그 후 1.5 m 정도 내려앉았다.

B 지점의 경우 A 지점과 마찬가지로 상위동굴의 바닥면이 아래로 내려앉았으며, 바닥면보다 높은 곳의 벽면이 오목하게 들어가 있다. 그 맞은편 벽면에는 동굴의 주방향과 다른 윗가지굴(perched tube)이 발달해 있으며, 상위동굴과 하위동굴의 폭의 차이가 크고 벽면의 위치도 서로 어긋나 있는 것이 관찰된다.

C 지점은 상위동굴의 바닥 아랫부분에 얇은 층이 관찰되며, 그 아래에 놓여 있던 층은 더 깊이 내려앉은 구조가 관찰된다. 그 내려앉은 깊이는 낙석에 의해 덮여 최소 4.6 m로 측량되나, 더 클 것으로 예상된다.

D 지점 또한 상위동굴의 바닥은 부풀어 올랐다가 내려앉은 구조를 보이며, 그 내려앉은 깊이가 2.8 m로 측량되었다. 하위동굴은 상위동굴 하위에 놓이나, 중앙에서 오른쪽으로 치우쳐 있다. 상위동굴과 하위동굴 사이의 용암층 두께는 1.8 m로 측량된다.

E 지점은 만장굴 내에서 다층구조가 가장 잘 관찰되는 지점으로 상위동굴보다 하위동굴 폭이 더 크다. 상위동굴 내에서 관찰되는 다층구조에서 각 층의 폭을 측정해 보면 가장 상위층의 폭(6.3 m)보다 그 하위층의 폭(4.3 m)이 더 작다. 그리고 최하위동굴은 그 폭이 8.4 m로 아래로 내려오면서 다시 커지는 것을 관찰할 수 있다.

상위동굴과 하위동굴에 있어서 전체적인 횡단면을 보면 모래시계(A), 해골형(B, D)과 같이 아래로 길쭉한 형태를 나타내며, 이러한 모양은 상위동굴과 하위동굴이 구별되지 않는 구간에서도 유사한 형태로 흔히 관찰된다.

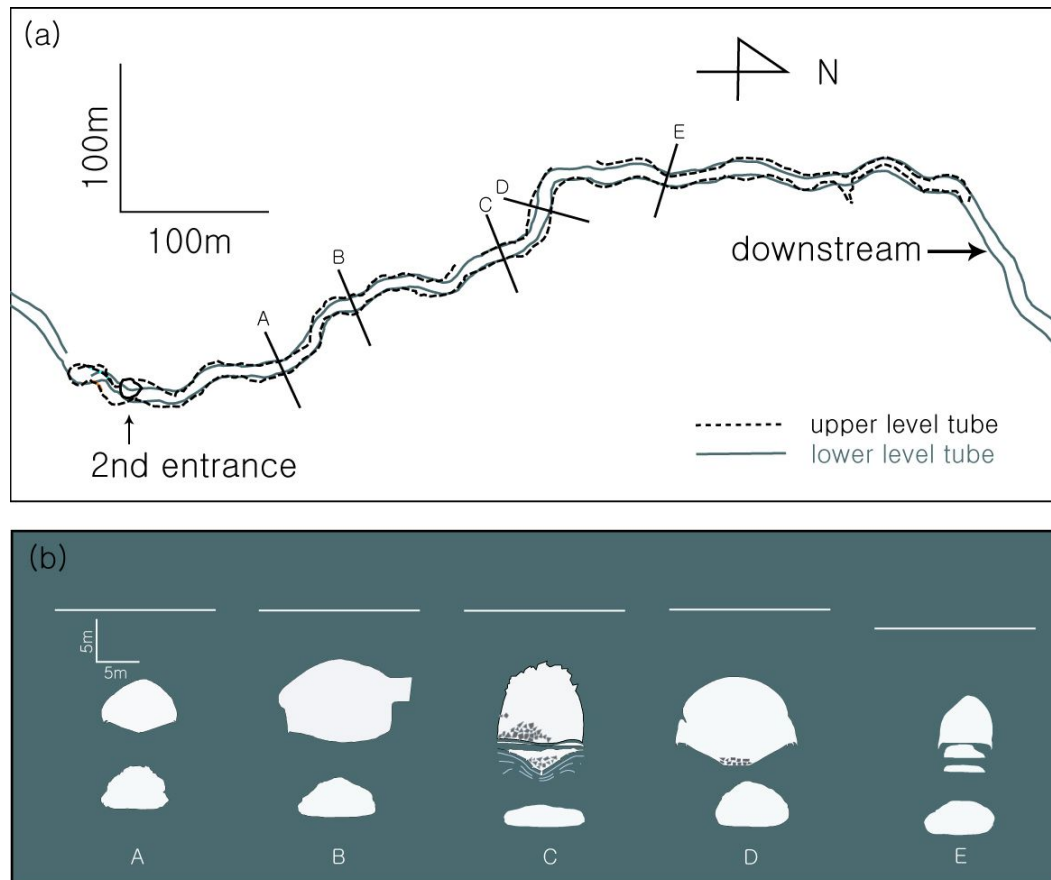


Fig. 2-7. Plan (a) and cross sections (b) of the boxed area in Fig. 2-3. (a) The upper and lower level tubes laterally deviate about 2 ~ 6 m, and downstream migration of overlying and underlying meanders can be found in the survey area. It is also observed that the widths are generally larger and have higher variation in comparison to those of the lower level tube (see Table 2-3). (b) The floor of the upper level tube is often found to be either inflated up or sunk down and the floor of the lower level tube is mostly in a concave shape. The "tube-in-tube" structure is well observed in the C and E profile.

4. 동굴의 내부구조

현생 용암동굴의 형성과정을 직접 관찰하고 보고한 학자들은 용암동굴이 생성되고 난 후에 동굴 내에 남아 있는 흔적(내부구조 등)을 근거로 용암동굴이 어떻게 생성되었는지를 판단하는 것은 사실상 불가능하거나 어렵다고 하였다(Peterson et al., 1994; Kauahikaua et al., 1998). 그러나 용암동굴의 주변 지질과 동굴 내부구조를 바탕으로 용암동굴의 형성과정을 알아낼 수 있으며(Calvari and Pinkerton, 1999), 뿐만 아니라 용암동굴이 형성된 후 새롭게 흘러온 용암에 의해 형성 당시의 흔적들이 지워지고, 가려져 생성 당시의 초기모양이 완벽하게 남아있지 않더라도 동굴 내에 존재하는 형태와 구조 등을 바탕으로 형성과 성장과정을 밝힐 수 있다(Allred and Allred, 1997; Espinasa, 2006).

만장굴을 비롯한 여러 용암동굴들은 접근성의 문제뿐만 아니라 동굴 내부에서의 절대위치와 모양 그리고 동굴 내의 다른 부분과의 관계를 입체적으로 파악하기가 어려운 상황이었어서 그 형성과 성장과정을 해석하는 데는 많은 어려움이 있다. 지금까지 만장굴을 비롯한 세계도처의 용암동굴에 대한 여러 연구들은 평면적인 측량에 주목하였고, 수직적인 측량에는 상대적으로 소홀하였다. 그 결과 수직·수평적으로 복잡한 동굴 내부구조의 해석에 많은 어려움과 이견이 있었다(Larson and Larson, 1989; Larson, 1993; Atkinson and Atkinson, 1995; Allred and Allred, 1997; Calvari and Pinkerton, 1999; 북제주군, 2003; Espinasa, 2006).

앞에서 살펴본 바와 같이, 만장굴은 상·하위동굴로 이루어진 다층구조가 연장성 있게 관찰되어(북제주군, 2004; 황상구 외, 2005; 안웅산과 황상구, 2008), 상·하위 용암동굴의 구조비교가 용이할 뿐만 아니라, 정밀측량 도면을 바탕으로 동굴 내의 특정위치에 존재하는 내부구조의 상관관계 및 선후관계를 재구성 하면, 다층구조는 물론 만장굴 용암동굴의 형성과 성장과정도 유추할 수 있을 것이다.

특히 전형적인 상·하위동굴이 관찰되는 2입구~1입구 구간에 대해서는 상·하위 동굴의 동일지점에서 사진을 촬영하고 이를 활용하여 상·하위 동굴 전체에 대한 단면도를 작성하면, 만장굴의 성장과정을 보다 구체적으로 유추할 수 있을 것으로 판단된다.

4.1. 내부구조 기재 및 해석

동굴 내부구조에 관한 연구에서 개개의 구조에 관한 상세한 기재도 중요하지만, 그 내부구조를 입체적으로 이해하고 해석하기 위해서는 무엇보다 구조가 발달해 있는 동굴 내부에서의 위치가 중요하다. 이를 위하여 특징적인 동굴 내부구조가 발달한 지점을 종단면도(Fig. 2-8), 평면도(Fig. 2-9; Appendix 2)상에 표기하고, 각 지점별로 내부구조를 기재하고 특이사항을 해석하였으며, 필요시 이해를 돕기 위해 단면 모식도를 작성하였다. 특히 상·하위동굴을 모두 관찰할 수 있는 구간(2입구에서 1입구 구간 : 상위동굴 기준점 T1~T21구간)에 대해서는 상·하위동굴의 같은 지점에서 같은 방향으로 사진을 촬영하고 그 특징을 기재하고 해석함으로써 입체적·공간적으로 동굴 내부의 규모와 형태를 확인할 수 있도록 하였다. 상·하위동굴 전체높이, 상·하위동굴 사이의 용암층 두께 등은 정밀측량을 통해 얻은 측량도를 이용하여 측정하였다.

동굴 내부에서 관찰되는 여러 구조들은 동굴경사, 동굴폭, 상류와 하류의 특징적 구조 등 여러 가지 조건과 관련이 있을 것으로 판단되어 동굴 내부구조 기재와 해석 시 함께 고려하였다.

Fig. 2-8. Location of description of internal features on the profile of the Manjanggul lava tube.

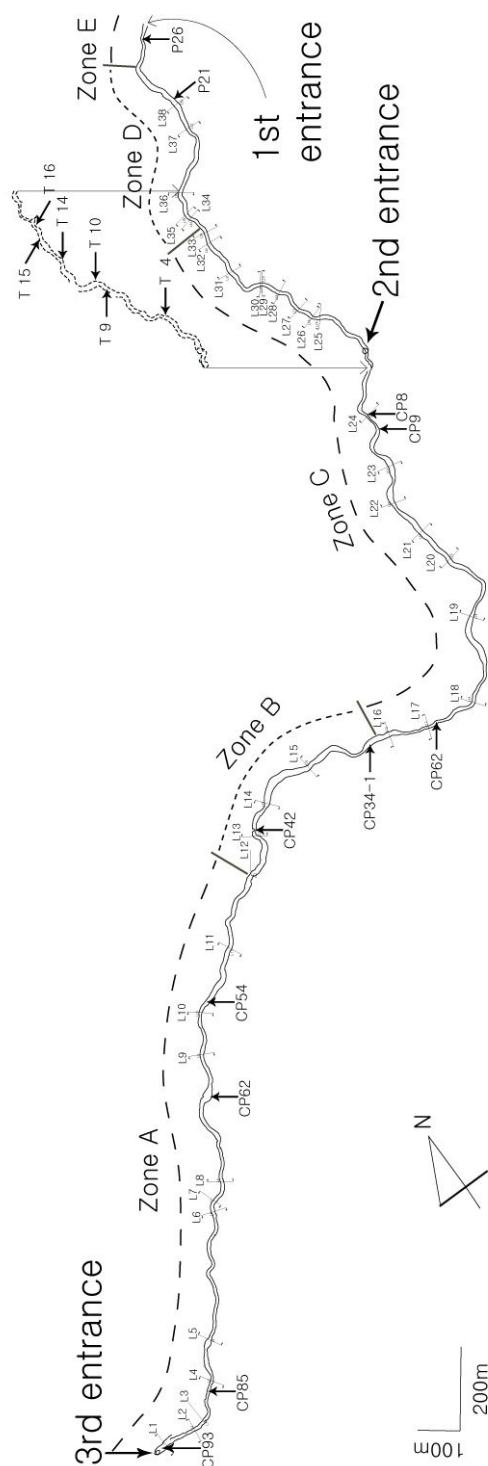


Fig. 2-9. Location of description of internal features on the plan of the Manjanggul lava tube.

4.1.1. 만장굴 3입구(L1)

만장굴의 3입구는 2입구로부터 중심선을 따라 수평거리로 약 3.4 km 거리에 위치한다(L1 in Figs 2-8 and 2-9). 이 3입구는 지표에서의 직경이 약 13 m로 열려있으며, 지표에서 낙반까지의 깊이는 약 15 m지만, 낙반이 쌓이기 전 원래 동굴바닥은 더 깊을 것이다(Fig. 2-10). 지표아래에 상위동굴이 관찰되며(점선), 그 하위에는 둥근형태의 용암체(검은 화살표)가 관찰된다(Fig. 2-10a). 둥근형태의 용암체 표면은 매끈하지만 내부에 기공이 많으며, 양과겉질처럼 3~5 cm 두께의 여러 층이 겹겹이 쌓여 있는 것이 관찰되며, 특징적으로 표면에는 상부로부터 흘러내린 구조가 관찰된다. 이러한 둥근 형태의 용암체는 상류에서의 용암이 동굴 내부의 어떠한 틈을 따라 비집고 흘러나온 것으로 판단된다(Fig. 1-8).

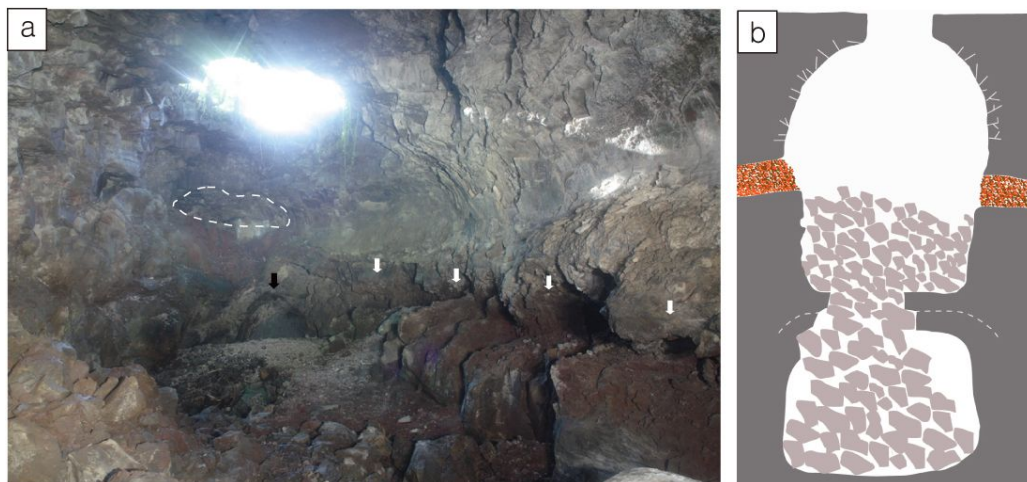


Fig. 2-10. Photograph (a) and schematic cross section (b) of the 3rd entrance. View is upstream. (a) shows only upper level tube, due to the accumulation of fallen blocks in the passage of the upper and lower level tubes, as illustrated in (b). A clinker layer about 1 m in thickness is exposed along wall (white arrows) and a spherical out-squeezing of lava (black arrow) is shown under another upper level tube (dashed ellipse) in the background (Also see Fig. 1-8). See Fig. 2-8 and 2-9 for Location (L1).

이 지점으로부터 하류 방향으로 십여 m 지점에서 동굴통로가 상·하위동굴로 나누어져 있다(북제주군, 2003). 이를 감안하면 3입구에서의 낙반은 상·하위동굴을 관통하여 쌓여 있을 것으로 예상된다(Fig. 2-10b).

Fig. 2-10a의 중간부에 약 1 m 두께의 적갈색 클링커층이 관찰된다(흰색 화살표). 클링커층은 아아 용암류의 표면에 생성되는 자파쇄 쇄설물로써, 아아 용암류의 상부와 하부에서 관찰된다(Cas and Wright, 1987; Hazlett and Hyndman, 2002). 이러한 클링커층이 동굴벽면 양쪽에 노출되어 있는 것은 만장굴을 형성한 용암이 오랜 시간 흘러가면서 하위의 아아 용암층을 침식시켜 들어가면서, 용암층 경계의 클링커층이 노출된 것으로 판단된다. 만장굴 내 CP90~CP88구간의 양쪽 벽면에도 클링커층은 잘 관찰된다. 이렇게 용암동굴 벽면에 노출된 클링커층은 용암에 의한 침식의 증거가 되며, 이를 기준으로 용암에 의한 침식의 깊이를 측정하기도 한다(Greeley et al., 1998).

4.1.2. 상·하위동굴 사이의 창구조(L2)

3입구로부터 하류로 약 100 m에 위치하는 CP89 지점(L2 in Figs 2-8 and 2-9)에는 상·하위동굴 사이의 용암층이 일부 붕괴되어 트여있는 창구조가 발달해있다(Fig. 2-11). 이러한 창구조는 상·하위동굴이 발달한 3입구에서부터 CP55 사이에 총 8개 곳(CP90, CP89, CP88, CP86, CP70, CP66, CP62, CP56 등)에서 관찰되는데, 종단면도에서 천장 높이가 갑자기 높게 나타나는 지점들이다(Figs 2-3 and 2-8).

상·하위동굴 바닥에는 벽과 천장에서 무너져 내린 낙반이 쌓여있다. 창구조 아래의 바닥(낙반의 윗면)에서부터 하위동굴 천장까지의 높이는 약 5.5 m이며, 상위동굴 천장까지는 약 18 m이다. 상위동굴과 하위동굴 사이에 두 겹의 용암층(①, ②)이 관찰되며, 하위동굴 벽면에는 여러 겹의 안도배가 관찰된다(Fig. 2-11). 이러한 구조적 특징은 초기에 생성된 용암동굴 속으로 용암이 흐르면서 그 표면이 굳어 초기 하위동굴 지붕(①)이 형성되고, 이후에도 용암이 지속적으로 흘러 이미 형성된 용암층(①)의 하위에 새로운 용암층(②)이 형

성된 것으로 해석된다. 또한 하위동굴 벽면에 나타나는 여러 겹의 안도배는 용암동굴 내를 흘러가던 용암의 수위가 일정하게 유지되어 형성된 용암층들이 용암수위 하강 등의 이유로 지지력을 잃게 되어 하나의 용암층으로 유지되지 못하고 붕괴되어 떨어져 나가고, 그 일부가 동굴벽에 남은 잔재물이다(Calvari and Pinkerton, 1999).

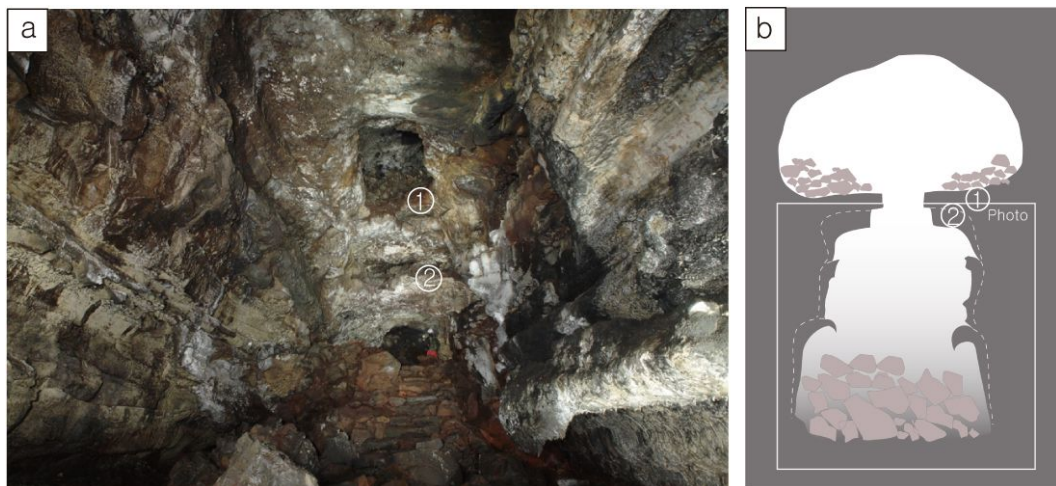


Fig. 2-11. Photograph (a) and schematic cross section (b) of window between upper and lower level tubes. View is upstream. Two-layered lava (①,②) is exposed at this section of window. Under the window, several linings with successive levels are shown on both walls, formed through lava accretion during periods of steady lava levels and successive lava decreases, as illustrated in (b). Window shows the highest points of the lava tube's ceiling at locations such as CP90, CP89, CP88, CP86, CP70, CP66, CP62 and CP56 in Figs 2-3 and 2-8, because the ceiling of the upper level tube was only surveyed at these locations through the limited windows available. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L2).

4.1.3. 창구조와 안도배(L3)

안도배 단면은 3입구로부터 하류로 약 120 m 거리의 CP88 지점에 잘 나타난다(L3 in Figs 2-8 and 2-9). 이러한 안도배 단면은 상·하위동굴이 트

여있는 부분의 동굴벽이 붕괴되어 잘 관찰된다. 상·하위동굴을 나누는 용암층(①)의 하위에 벽으로부터 약하게 돌출되어 있는 안도배(②)가 동굴벽 양쪽에 수평으로 연장성 있게 발달해 있으며, 붕괴된 안도배 뒤쪽에는 적갈색의 클링커층(③)이 관찰된다. 이는 초기에 형성된 동굴 내로 새로운 용암의 유입 혹은 용암수위의 일정한 유지 등의 이유로 새로운 용암층(①)이 생성되어 현재의 상위동굴이 생성되고, 그 아래를 흘러가는 용암에 의해 용암동굴 벽에 새롭게 용암이 부가되어 안도배(②)가 생성된 것으로 추측된다.

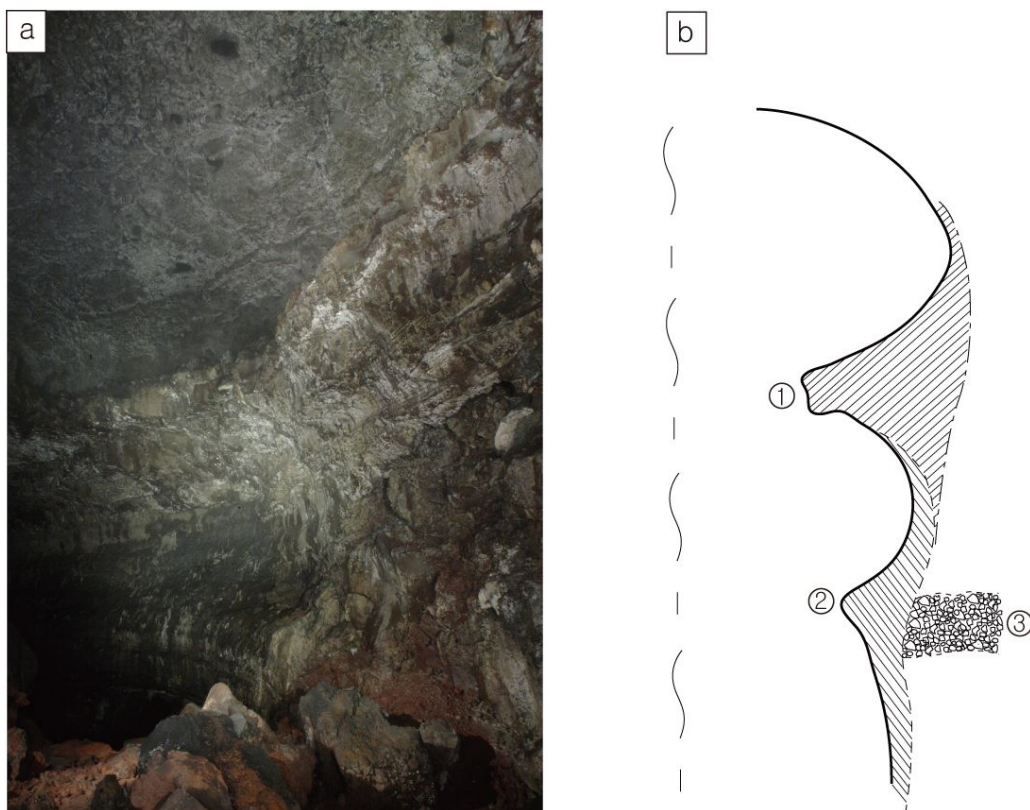


Fig. 2-12. Photograph (a) and sketch (b) of window and lining. View is downstream. (a) shows window by collapse of septum (①) between upper and lower level tubes. Under the window, successively accreted lining (②) is exposed along wall. Behind the collapsed lining, reddish brown clinker (③) is shown, as illustrated in (b). See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L3).

4.1.4. 다층구조(L4)

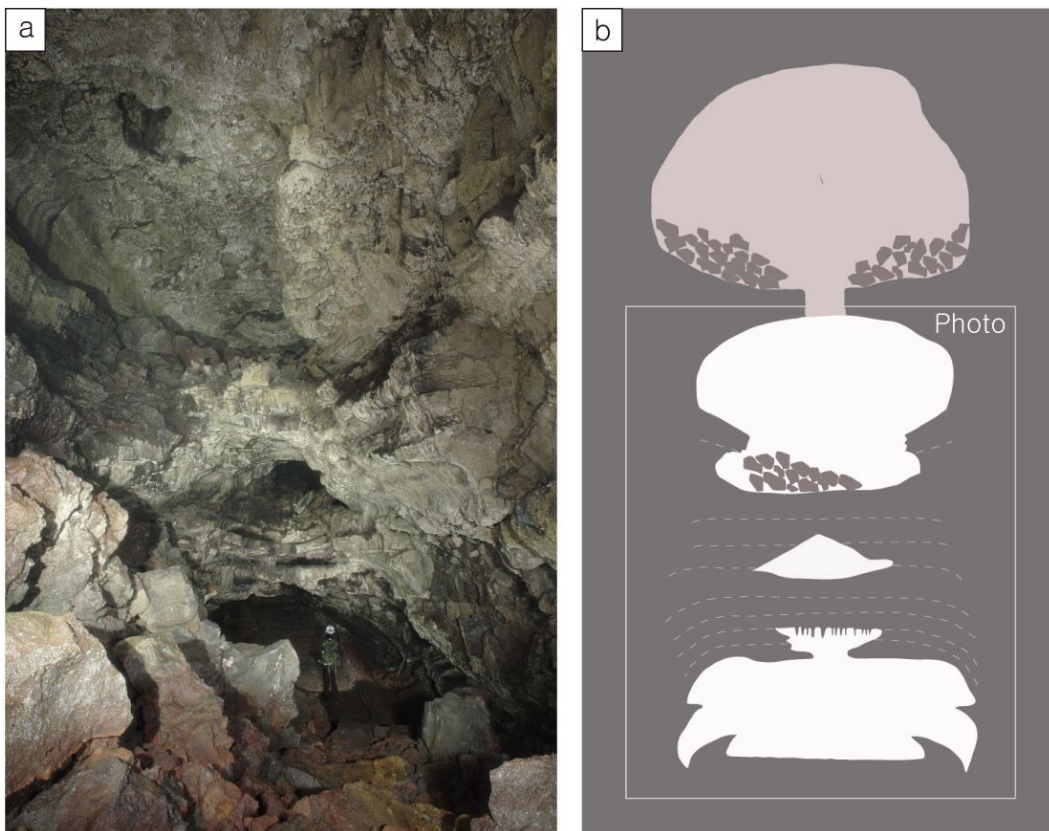


Fig. 2-13. Photograph (a) and schematic cross section (b) of multi-level tube with four superposed levels. View is upstream. There are three superposed levels visible and one unseen level above, the existence of which is known through survey data (see Fig. 2-3 and cross section diagram (b)). This portion is narrower than the upstream and downstream passages (see Fig. 2-9 and Appendix 2-1). Each level has several lava layers, created through sustained lava accretion in a narrow passage. The pictured man is 1.7 m tall. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L4).

다층구조는 3입구로부터 하류로 약 200 m 거리의 CP84 지점에 잘 나타난다(L4 in Figs 2-8 and 2-9). 이곳에는 동굴 내부에 총 3개 층이 관찰되며, 그 상위에 또 다른 동굴통로가 있어 총 4개 층을 갖는 다층구조임을 알 수 있

다(Fig. 2-13b). 각 층을 이루는 용암층은 여러 개의 용암층들로 이루어져 있다(Fig. 2-13a). 동굴바닥에서부터 Fig. 2-13a 내의 가장 높은 동굴천장까지의 높이는 약 12 m 이다. 가장 아래쪽 동굴바닥에는 마지막에 동굴 내를 흘러간 용암에 의해 만들어진 제방구조가 발달해 있으며, 제방과 벽 사이에는 고랑구조가 발달해 있다(Fig. 2-13b). 동굴바닥은 적갈색의 아아 구조를 보이며, 최하부 동굴천장에는 용암중유가 잘 관찰된다. 종단면도에서 이 지점의 상류와 하류에서 천장이 모두 높게 나타난다(Fig. 2-8). 특히 CP85 지점 상류에서는 하류에서보다 천장이 더 높는데, 이는 하류통로의 상위에 직접 관찰할 수 없는 또 다른 상위동굴이 있음을 암시하는 것이다. 평면도 상에서 CP85 지점은 상, 하류의 다른 지점보다 상대적으로 그 동굴폭이 좁다. 이와 같은 동굴의 종단면과 평면상에서의 특징을 종합적으로 고려해 보면, 용암동굴 내를 흘러가는 용암의 표층부는 냉각되어 새로운 용암층들이 형성되게 되는데(Kauahikaua et al., 1998), 이렇게 형성된 용암층은 동굴폭이 좁은 곳에서는 쉽게 붕괴되지 않고 잘 보존되는데 비해, 상대적으로 폭이 넓은 곳에 형성된 용암층은 자체 무게를 견디지 못하고 쉽게 붕괴되어 용암류에 휩쓸려 떠내려감으로써, 동굴폭이 좁은 구간에서는 용암층이 겹겹이 잘 보존되어 동굴천장이 상대적으로 낮고, 동굴폭이 넓은 곳은 용암층이 붕괴되어 상대적으로 천장이 높게 나타날 수 있음을 유추할 수 있다. 또한 용암수위의 계속적인 하강과 연속적인 용암층 형성은 여러 층으로 구성되는 다층구조를 형성할 수 있음을 알 수 있다. 더불어 용암동굴 내를 흘러가는 용암의 표층부가 굳으면서 형성된 새로운 용암층은 용암동굴 상부의 공기층과 액체상 용암을 분리시켜 용암의 열손실을 작게 하는 단열작용을 하기도 한다(Allred and Allred, 1997).

4.1.5. 모래시계형 동굴단면(L5)

모래시계형 동굴단면은 3입구로부터 하류로 약 330 m 거리의 CP80 지점에서 잘 관찰된다(L5 in Figs 2-8 and 2-9). 이 지점에서 바닥부터 천장까지의 높이는 대략 12 m이고, 아랫부분 동굴폭은 7 m이다. 동굴의 천장과 바닥

부분이 넓고 벽면 중간부분이 더 좁아 단면상에서 마치 모래시계 혹은 열쇠구멍과 같은 형태를 띤다. 동굴의 천장 및 벽면 윗부분에는 암괴들이 떨어져 나간 흔적들이 주로 관찰되는데 비해, 벽면 아랫부분에는 용암유선(flow line)이 잘 발달해 있다. 붕괴된 벽면 뒤쪽으로 적갈색의 클링커층이 관찰되기도 한다.

흔히 최초 형성되는 용암동굴은 높이보다 폭이 넓은 형태인데(Kauahikaua et al., 1998), 이 지점과 같이 용암동굴에 있어 동굴높이가 동굴폭보다 훨씬 큰, 아래로 길쭉한 형태를 띠는 단면을 갖는 것은 용암동굴이 형성된 이후 긴 시간 동안 용암이 계속해서 흘러가면서 동굴바닥을 침식시켜, 모래시계 형태의 단면을 갖게 된 것으로 해석된다(Larson, 1993; Greeley et al., 1998; Espinasa, 2006). 벽면 중앙부분에 돌출된 부분은 용암이 부가되어 생성된 것으로 여겨진다.

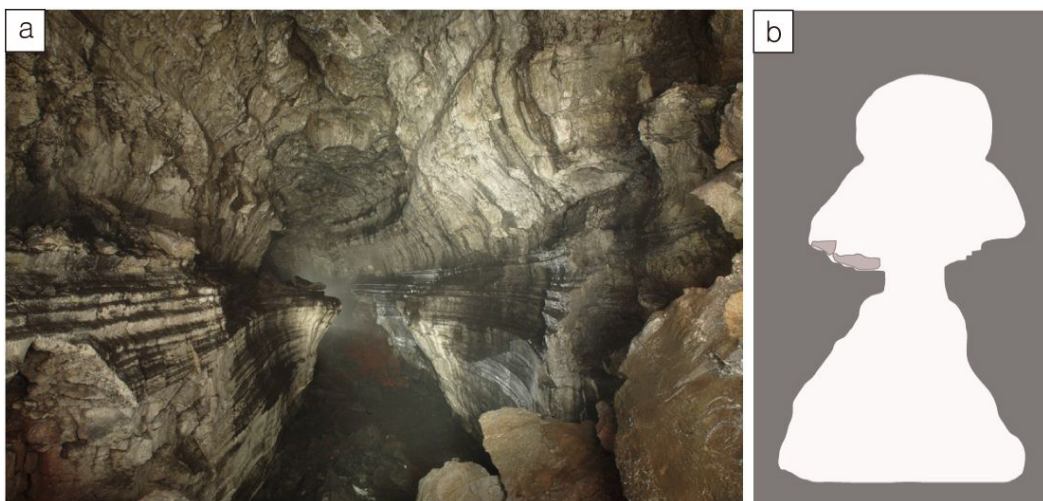


Fig. 2-14. Hourglass-shaped cross section of lava tube. (a) Flow lines are easily noticeable in the lower part of lava tube wall but not in the upper part. The midsection of the wall juts out. View is downstream. (b) Cross section of this area. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L5).

종단면도(Fig. 2-8)를 참조하면, 동굴 내에서는 직접 관찰할 수 없지만, 칼

영지점(CP80)의 상류(CP86)와 하류(CP70)에서 상위동굴로 통하는 창구조가 있는 것으로 미루어, 상위동굴이 존재함을 알 수 있다(북제주군, 2003).

4.1.6. 용암선반과 마지막 용암흐름(L6)

용암선반은 3입구로부터 하류로 약 650 m 거리의 CP71 지점에 잘 나타난다(L6 in Figs 2-8 and 2-9). 이 지점은 상류와 하류에서 상·하위동굴이 트여진 창구조가 관찰되는 것으로 미루어, 상위동굴이 존재할 것으로 추측된다(Fig. 2-15b). 동굴벽면에 수평으로 용암선반(lava shelf)이 관찰되며, 벽면 하부에는 벽면과 바닥 사이에 제방(levee)이 그리고 제방과 벽면 사이에는 고랑(gutter)이 약하게 발달하였다. 제방의 안쪽 바닥은 동굴 중앙부로 기울어져 오목한 형태를 띤다. 용암선반 상위의 표면과 벽면은 매끈한 표면조직을 보이는데 비해, 제방과 동굴바닥에는 적갈색의 아아 구조가 관찰된다.

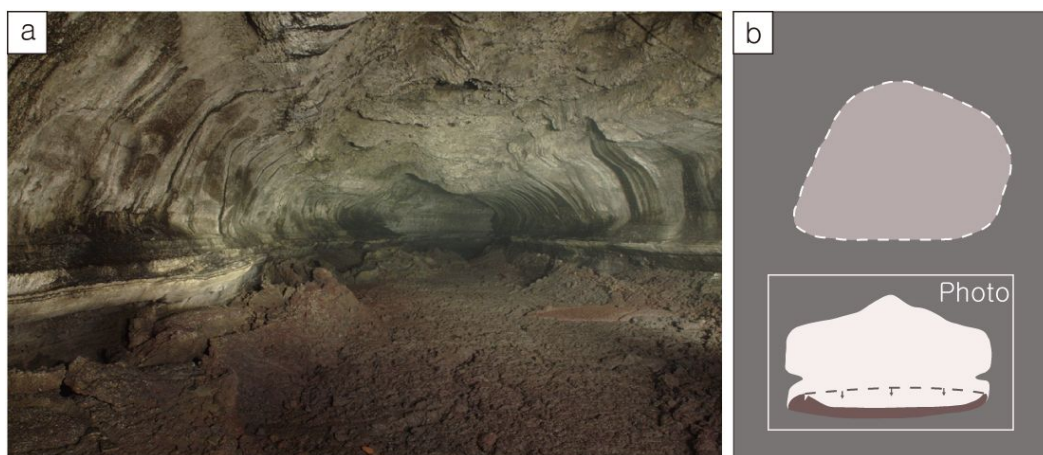


Fig. 2-15. Lava shelf and last lava to flow through tube. View is upstream. (a) Lava tube is floored with a rough aa surface, but the surface of the lava shelf and wall is smooth. Gutters developed between levee and adjacent walls. (b) Schematic cross section shows upper level tube not directly shown in tube, according to survey data like Fig. 2-3. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L6).

수평으로 연장성 있게 관찰되는 용암선반은 용암동굴 내를 흐르는 용암이 일정하게 높이를 유지하며 흘렀음을 의미하는데(Greeley et al., 1998; Calvari and Pinkerton, 1999), 이러한 용암선반과 벽면에서의 표면구조와 동굴바닥에서의 표면구조가 서로 다른 것은 용암동굴 내를 흘러가는 용암의 물성변화 혹은 시간적 간격을 갖는 새로운 용암의 유입 등 여러 가지 원인을 생각할 수 있다.

바닥에 나타나는 제방과 고랑구조는 용암동굴 내부를 흘러간 최후의 용암이 동굴바닥의 가장자리에 제방을 형성하고, 이후 용암은 제방의 안쪽을 따라 흘러가며, 용암의 공급이 지속됨에 따라 수위가 높아지면서 서서히 제방도 함께 높아져 제방과 벽 사이에 고랑이 형성되었다는 것을 보여준다. 또한 동굴바닥의 중앙부가 오목한 형태를 띠는 것은, 동굴통로의 상류에서 용암공급이 줄어들거나 차단되고, 하류로의 용암배출이 우세한 상황에 접어들어 용암이 서서히 배출됨에 따라 용암 표층부에 이미 형성된 용암층 또한 서서히 아래로 내려앉아 현재와 같은 오목한 형태를 띠게 된 것으로 여겨진다.

4.1.7. 용암제방과 고랑(L7)

용암제방과 고랑은 3입구로부터 하류로 약 670 m 거리의 CP71 지점에서 잘 나타난다(L7 in Figs 2-8 and 2-9). 이곳에서는 제방과 고랑이 발달해 있으며, 바닥에는 양배추형 아아 구조가 관찰된다. 특히 Fig. 2-16의 오른쪽 부분에서는 이미 형성된 제방을 넘쳐흐른 용암이 고랑을 따라 흘러간 것(화살표)을 관찰할 수 있다.

만장굴 내부를 마지막으로 흘러간 용암은 흘러가면서 그 수위의 증감에 따라 통로의 양쪽에 제방을 만들었고, 제방이 성장해 감에 따라 벽면과의 사이에는 고랑이 형성되었다. 이러한 제방은 용암동굴 내를 흘러가는 용암수위가 변화함에 따라 서서히 동굴중앙 방향으로 성장하여 하나의 용암층을 형성하기도 한다(Peterson et al., 1994; Espinasa, 2006).

만장굴 내부 바닥의 특징을 살펴보면, 만장굴 3입구에서 CP54 지점까지는 Fig. 2-16과 같이 양배추형 아아 구조와 제방구조를 보이고, CP54~CP52 구간에서 점이적인 양상을 보이며, 이보다 하류에서는 대체로 중력신장에 의한 균열이 우세하게 발달한다.



Fig. 2-16. Levee and gutter. View is upstream. The last lava to flow in tube forms lava levees on both sides of floor, continues to flow and overflow the levee (white arrow), and flows along gutter between wall and levee. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L7).

4.1.8. 속동굴(L8)

속동굴(tube-in-tube)은 3입구로부터 하류로 약 730 m 거리의 CP69 지점에서 잘 나타난다(L8 in Figs 2-8 and 2-9). 이 속동굴은 주동굴(main tube) 내에 마지막 용암류가 좁은 구간을 흘러가면서 새로운 용암층을 형성하고 그 내부가 배출되면서 형성되었다. 지점 7(L7)과 지점 9(L9)에서는 지점 8에서보다 동굴폭이 더 넓으며, 속동굴이 제방형태로 점차 변해가고 제방과 벽 사이에 고랑이 발달되어있다. 이러한 사실에 의하면 속동굴은 짧은 구간(약 40 m

구간)에서 용암층의 지지가 가능한 곳에서만 관찰되고, 이 지점보다 동굴폭이 넓은 상류나 하류에서는 형성된 용암층이 내려앉거나(Fig. 2-17a) 단락되고 소실되어(Fig. 2-17b) 존재하지 않는다는 것을 알 수 있다.

용암동굴 내부를 가장 마지막 단계에 흘러간 용암류의 표면은 아아 혹은 양배추형 아아 조직을 보이는데 반해, 이전에 형성된 용암동굴 벽에는 용암유선이 매끈하게 관찰된다(Fig. 2-17a: ②부근의 벽면). 이미 형성된 벽면과 새롭게 유입되어 마지막으로 동굴 내부를 흘러간 용암과의 관계를 보면, 이미 만들어진 용암동굴로 마지막 단계에 흘러온 용암류가 채워지면서 그 표면이 서서히 상승하여 벽면과 맞닿은 형태를 띠고 있는데, 이는 매끈한 형태의 벽면을 이룬 용암이 흐르는 시기와 마지막 단계의 용암흐름 사이의 시간적 단절을 의미할 수 있다.

하류 방향에서 바라본 사진(Fig. 2-17b)에는 용암층이 남아있는데 끝부분은 단절되어 있고 벽면에 작은 선반만이 남아 있는 것으로 미루어 볼 때, 용암이 흘러가는 과정에서 용암층이 형성되었으며, 이후 붕괴된 용암층은 하류로 이동되었음을 알 수 있다. Greeley et al.(1998), Calvari and Pinkerton(1999) 등은 용암의 수위가 일정하게 유지될 때 용암의 표층부에 새로운 용암층이 형성되며, 이렇게 형성된 용암층은 자체하중을 견딜 수 있을 만큼 성장하지 않은 상태에서 그 하부를 흘러가는 용암수위가 하강하게 되면 내려앉게 되어, 남지 못하게 된다고 하였다.

Allred and Allred(1997)는 상당량의 기공을 가지는 낙반(breakdown)의 경우 용암동굴 내를 흘러가는 용암에 비해 비중이 더 작아 용암류의 표층부에 떠내려 갈 것이라고 추측하고, 이를 증명하기 위하여 낙반시료를 채취하여 그 비중을 측정하였다. 그 결과 기공을 많이 갖는 대부분의 천장 안도배는 비중이 1.5~2.0이고, 가장 비중이 큰 부분은 2.33과 2.36으로 측정되었다. 또한 동굴 내의 천장에 달라붙어 있는 표류암괴(rafterd rock)의 중심부에 비중이 큰 부분이 2.11로 측정되었다. 이러한 측정결과를 토대로 용암동굴 내를 흘러가는 용암이 안도배의 비중보다 크므로 안도배가 붕괴되어 생긴 낙반은 용암

에 의해 쉽게 떠내려 갈수 있을 것으로 추측하였다.

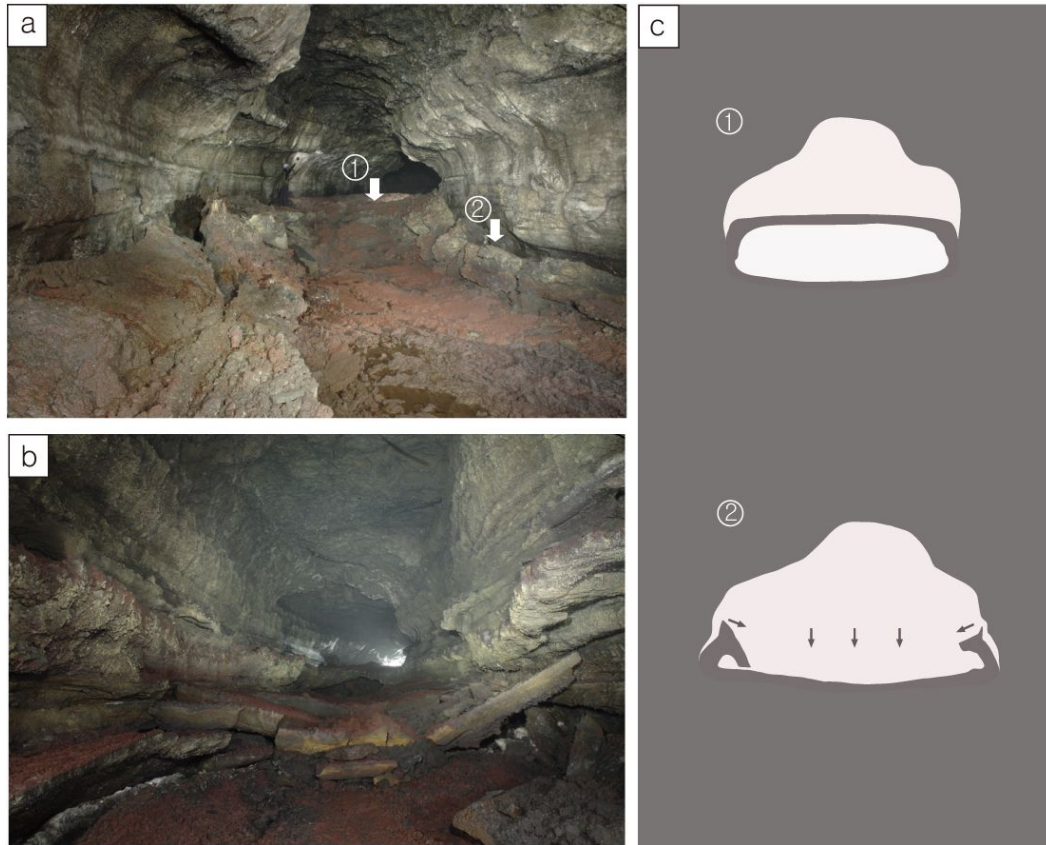


Fig. 2-17. Tube-in-tube. Photograph (a) shows tube-in-tube with gradually deflated roof upstream. View is downstream. Photograph (b) taken about 40 m downstream from photograph (a) shows remnants of lava layer which had collapsed and then been swept out by lava flow through tube. View is upstream. (c) Schematic cross section at ①, ② in photograph (a) showing well preserved lava roof at ① narrower passage, but deflated lava roof at ② wider passage upstream. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L8).

Swanson(1973)은 1969-1971에 걸친 킬라우에아의 마우나올루(Mauna Ulu)화산에서 용암동굴을 통해 흘러가는 용암의 비중과 기공함량을 측정하였

다. 그 결과, 용암은 화구에서 비중이 1이하이고, 화구로부터 12 km 떨어진 해변에서의 용암동굴 속 용암의 경우 2.48로 증가하였으며, 기공함량은 화구에서는 50~70%였으나, 멀어지면서 18%로 감소하는 것을 측정하고, 화구에서 멀어질수록 용암의 비중은 증가하고, 기공함량은 감소함을 보고하였다.

이상에서와 같이 기존 연구결과를 감안하면, 용암동굴 속을 흘러가는 용암의 표면에 형성된 용암층은 자체하중을 이겨낼 만큼 강도를 가지지 못한 상태에서 수위가 낮아지면 붕괴되고, 용암에 의해 쓸려 내려갈 수 있음을 유추할 수 있다.

하류와 달리 CP69 부분의 상류 구간에는 이미 형성된 용암층이 떠내려가기 보다는 아래로 내려앉은 것이 관찰되는데(Fig. 2-17a: ②부분 상류), 아래로 내려앉은 형태가 하류처럼 급하게 단절되기 보다는 점진적으로 휘어져 있는 것으로 보아 용암수위의 하강과 함께 서서히 점진적으로 내려앉았을 것으로 추측된다.

4.1.9. 용암역류와 큐폴라(L9)

용암역류와 큐폴라는 3입구로부터 하류로 약 1,060 m 거리의 CP58 지점에서 잘 나타난다(L9 in Figs 2-8 and 2-9). 종단면도(Fig. 2-8)에서 현 지점의 상류(CP63)와 하류(CP56)의 천장높이를 살펴보면, 상위동굴이 존재함을 유추할 수 있다(Fig. 2-18b)(북제주군, 2003).

이 지점의 동굴천장에는 오목하게 들어간 큐폴라(cupola)가 발달해 있는데, 동굴바닥에서 큐폴라 지점 천장까지는 약 5.5 m이다. 큐폴라의 상류 끝부분에는 입구는 작고 안쪽으로는 넓어지는 공간(화살표)이 관찰되는데, 그 바닥은 하류방향으로 기울어져 있다. 단면상에서 동굴폭은 큐폴라 아랫부분에서 갑자기 넓어지며, 넓어지는 지점에는 벽면 양쪽에 소규모 용암선반(③)이 부분적으로 발달해 있다. 동굴바닥에는 용암제방과 그에 따른 고랑구조, 그리고 적갈색의 아아 구조가 관찰된다(Fig. 2-18). 이러한 동굴의 형태적 특징을 토대로 그 과정을 구성해 보면, 용암동굴 내를 흘러가는 용암은 오랜 기간 용암수위

가 일정하게 유지되면 새로운 용암층(①)을 형성하여 다층구조를 만든다. 이런 상황에서 용암 유입량의 급증 혹은 하류의 막힘 등의 이유로 용암수위가 상승하는 경우, 이미 형성된 용암층(①)의 일부가 붕괴되어 만들어진 창구조 혹은 약한 부분을 뚫고 상위동굴로 용암이 넘쳐흐를 수 있다(② in Fig. 2-18)(Allred and Allred, 1997; Bunnell. 2008). 이후 다시 수위가 낮아지면서 벽면과 천장에 새로운 안도배(③)가 형성되고, 최후에 흘러간 용암은 아아 조직(④)을 보이며 동굴 양쪽에 제방구조를 발달시켰다.

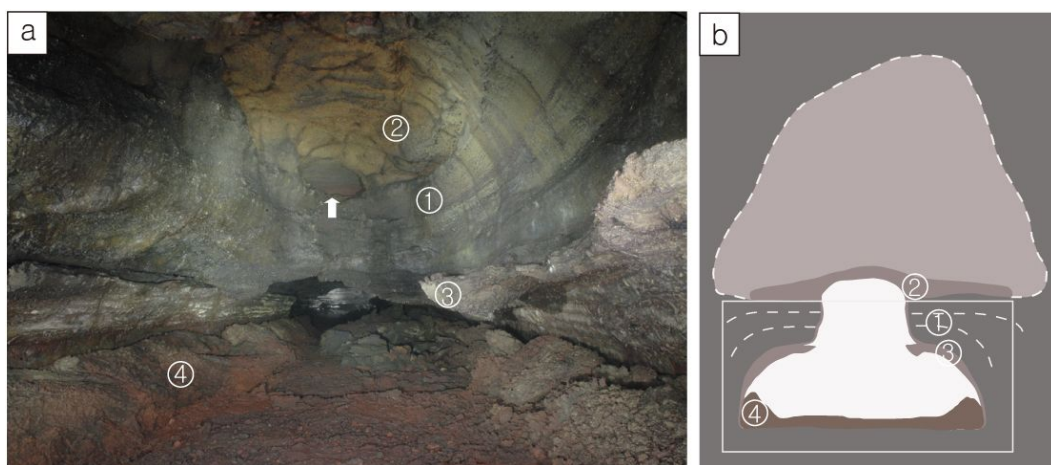


Fig. 2-18. Photograph (a) and schematic cross section (b) of cupola. View is upstream. Numbers in (a) and (b) illustrate ① lower level roof, ② dome-like cupola formed through lava upwelling and sealed off beneath window, ③ lava shelf accreted on both walls in lower level, ④ last lava to flow in tube, developing levees. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L9).

4.1.10. 다층구조와 용암역류의 증거(L10)

용암역류의 증거는 3입구로부터 하류로 약 1,170 m 거리의 CP55 지점에 잘 나타나 있다(L10 in Figs 2-8 and 2-9). 이곳에는 하위동굴 지붕이 붕괴되어 상·하위동굴이 동시에 관찰된다(Fig. 2-19a). 바닥의 낙반에서부터 상위동굴 천장까지는 약 13 m이다. 상위동굴에는 동굴중앙부로 기울어져 벽에

붙어있는 용암층(①)이 관찰되며, 바닥에는 용암에 묻혀있는 암괴와 그 상위에 떨어진 암괴들이 존재한다. 상위동굴은 약 15 m 정도 진행되다가 암괴(직경 1 m 이상)들이 쌓여 있는 곳에서 동굴통로가 좁아진다. 동굴통로를 좁게 만든 암괴들의 상부에는 용암이 넘쳐흐른 흔적이 관찰된다. 대부분의 하위동굴 바닥에서 하류방향으로 경사져 있는 것을 쉽게 인지할 수 없는 것과는 달리, 이 구간의 상위동굴 바닥은 하류방향으로 경사져 있는 것을 육안으로도 쉽게 알 수 있다. 상위동굴 바닥에서 용암에 묻혀 있는 암괴의 경우, 암괴의 상류부분에는 용암이 암괴를 감싸며 흘러간 구조가 여러 곳에서 관찰되며, 암괴주변에 부가된 용암의 흔적으로 미루어 용암의 수위는 시간이 지나면서 조금씩 낮아졌다는 것을 알 수 있다(Fig. 2-19b).

하위동굴 바닥에는 천장과 벽면에서 떨어져 내린 낙석이 약 2 m 정도 쌓여 있다. 하위동굴 벽면에는 용암이 흘러가면서 겹겹이 부가되어 형성된 여러 겹의 안도배(②, ④)가 관찰된다.

이상의 내부구조적 특징들을 토대로 그 생성과정을 유추해 보면, 상위동굴 벽면에 기울어져 있는 용암층(①)은 현재 하위동굴 지붕(③)이 생성되기 이전에 생성된 것으로, 붕괴되어 용암에 의해 떠내려가고 (①)로 표시된 일부만 남은 것으로 판단된다(Figs 2-19a and c). 또한 상위동굴 바닥에는 암괴들이 관찰되는데, 용암에 의해 둘러싸여 묻혀 있는 것(Fig. 2-19b)과 그 위에 놓여 있는 암괴로 구분되는데, 여기서 용암에 의해 일부분이 묻혀 있는 암괴들은 하위동굴 지붕이 만들어진 후 그 상위에 암괴들이 떨어지고, 이 지점보다 상류의 어느 지점에 발달한 창구조(상·하위동굴이 트여진 부분)를 통해 하위동굴의 용암이 상위동굴로 역류하여 상위동굴 바닥을 따라 흘러가면서 상위동굴에 떨어져 있던 암괴들을 둘러싸면서 흘러간 것으로 여겨진다(Fig. 2-19c). 용암에 묻혀 있지 않은 암괴들은 이후 천장이나 벽면에서 떨어진 것으로 생각된다. 하위동굴 벽에 부가된 안도배(②, ④)는 용암의 수위가 낮아지면서 동굴의 천장과 벽에 계속적으로 용암이 부가되어 형성된 것으로 여겨진다.

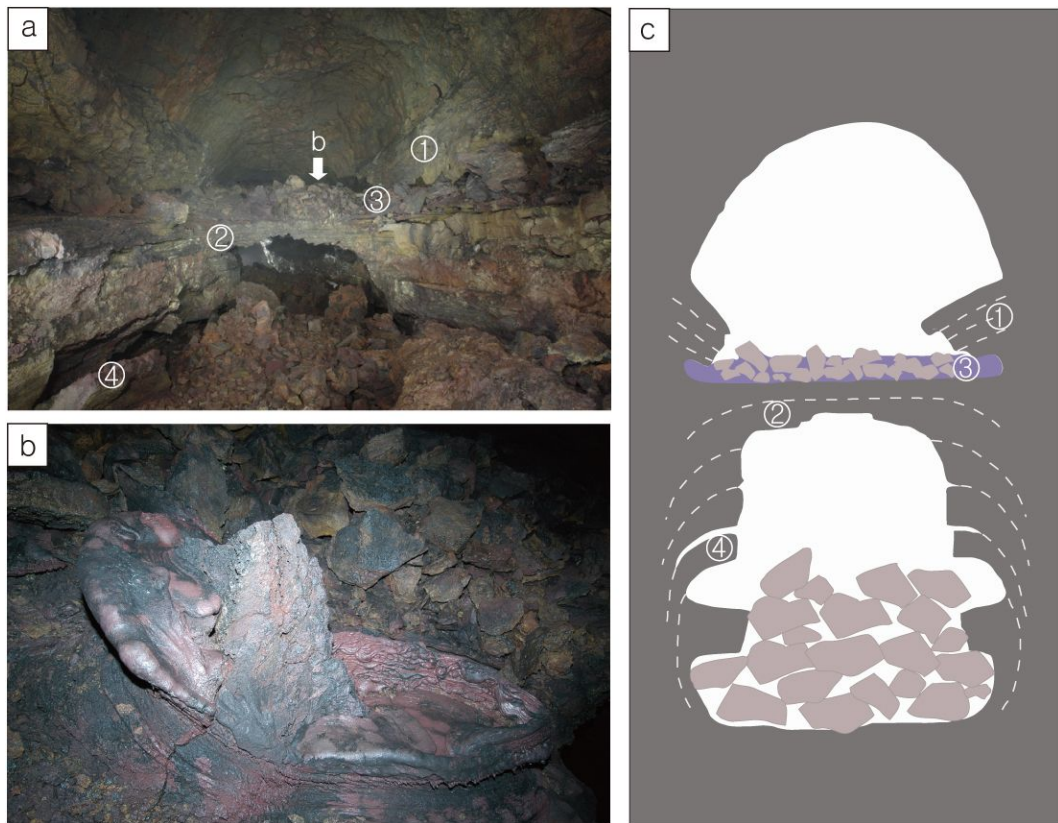


Fig. 2-19. Multi-level tube and evidence of overflow. (a) Due to collapse of lower level roof, upper and lower level tubes are shown in one place. View is upstream. (b) On lower level roof, blocks have been enveloped by late overflow through window. Numbers in photograph (a) and schematic cross section (c) indicate ① remnants of deflated lava layer formed earlier, ② lower level roof, ③ overflow through window to flow on the lower level roof (②) and envelope the blocks as in photograph (b), ④ lava linings successively accreted on wall as lava level decreased. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L10).

또 다른 해석도 가능하다. 현재의 하위동굴 지붕면보다 조금 더 낮은 위치에 동굴바닥이 형성되어 있던 시기(즉 현재의 하위동굴 바닥보다는 동굴바닥이 덜 침식되어 그 높이가 높았던 시기)에, 용암에 의해 떠내려 오던 암괴들

이 하위동굴 지붕이 형성될 때 함께 굳어 용암 속에 묻혀 있는 형태가 되고, 이후 계속해서 용암은 이미 형성된 용암층(초기 하위동굴 지붕) 아래를 흘러가면서 동굴바닥을 더 깊이 침식하여 현재와 같은 규모로 성장하였을 가능성도 있다. 그러나 후자의 경우와 같은 방식으로 암괴가 용암 표층부에서 함께 굳어진 것이라면, 상위동굴이 잘 관찰되는 2입구에서 1입구 구간의 상위동굴 바닥에서 그러한 예들이 관찰될 것으로 기대되지만, 실제로 그러한 예는 관찰되지 않는다. 이러한 것을 고려할 때, 두 가지 가능성 중 전자의 경우가 더 타당할 것으로 판단된다.

4.1.11. 용암상승과 동굴바닥경사(L11)



Fig. 2-20. Inflation of last lava to flow through tube. Floor has convex surface in medial portion. View is downstream. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L11).

용암상승은 3입구로부터 하류로 약 1,350 m 거리의 CP51 부분에서 관찰된다(L11 in Figs 2-8 and 2-9). 만장굴은 3입구에서 1입구까지 평균바닥경사가 0.4° 로 극히 저각이며, 곳에 따라 거의 수평에 가까운 구간이 존재한다. CP51 부근에서 동굴바닥에서 천장까지는 약 6 m 이며, 동굴바닥의 중앙부분이 약간 볼록하

게 부풀어 오른 것이 특징이다(Fig. 2-20). 이 구간은 동굴바닥을 경사에 따라 세분하였을 때 a-5 구간(0.1° 이하)에 해당하는 부분으로 그 경사가 거의 수평에 가깝다(Appendix 1). 이 구간의 상류 a-4 구간은 바닥경사가 0.4° 이며, 하류 a-6 구간은 약 1° 로, 본 구간의 경사가 상대적으로 아주 완만하다.

전체적으로 경사가 완만한 만장굴의 특성에 의해 상류에서 용암공급이 감소하거나 중단되면, 이 구간처럼 평평한 구간에서 용암은 하류로 쉽게 배출되지 않고, 정체되어 동굴바닥 중앙부가 위로 부풀어 오르는 현상(용암상승: inflation)을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 바닥경사가 거의 수평(0.1° 이하)인 B구간에서도 흔히 관찰된다(Fig. 2-21). 이에 비해 바닥경사가 상대적으로 큰 구간은 대체로 통로의 가장자리가 더 높고, 가운데 부분이 낮은 오목한 형태를 띤다.

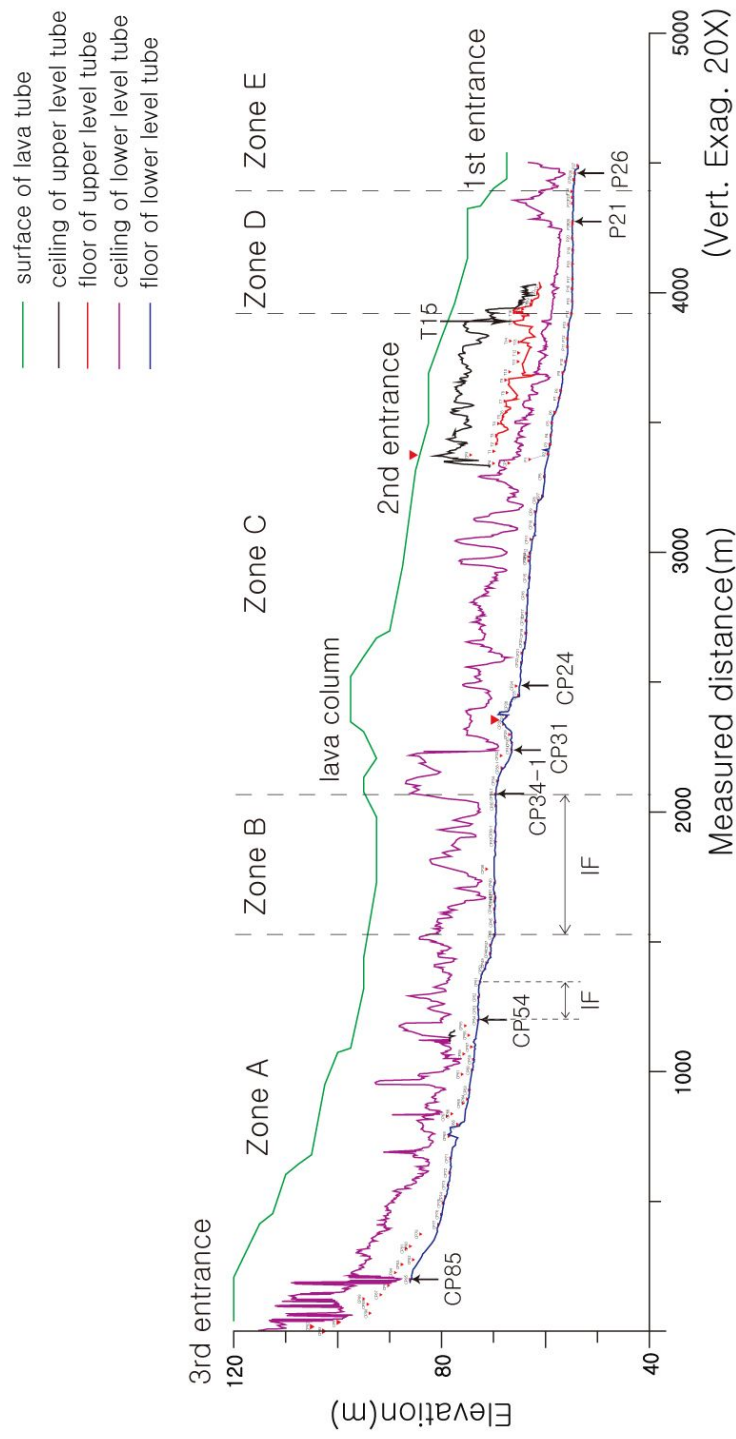


Fig. 2-21. Zones of Inflated tube floor(IF) with convex surface. Floor slope of these zones is less than 0.1° .

4.1.12. 용암부가와 붕괴(L12)



Fig. 2-22. Slumping of accreted lava from wall. Weakly protruding lava shelves are shown along upper part of wall, but accreted lava on lower part is slumped with vertical striae. View is downstream. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L12)

벽면에 부가된 용암의 붕괴는 3입구로부터 하류로 약 1,530 m 거리의 CP46 지점에서 잘 관찰된다(L12 in Figs 2-8 and 2-9). 이곳에서는 벽면 상부에 약하게 용암선반이 발달하였으며, 벽면 하부에는 부가된 용암이 흘러내리면서 생긴 찰흔(striae)이 수직으로 발달해 있다(Fig. 2-22). 동굴바닥에서 천장까지는 약 11 m이다. 벽면에 돌출되어 수평으로 연장되어 있는 구조는 동굴 내의 용암 수위가 비교적 일정하게 유지되는 동안 용암이 용암벽면과 맞닿는 가장자리에서부터 굳으면서 벽면에 부가되어 생성된 것이다. 이를 통해 용암수위가 지속적으로 하강하였음을 알 수 있으며, 가장 아랫부분에 발달했던 부가부분은 용암수위의 하강에 의해 자체무게를 견디지 못하고 벽면을 타고 흘러내렸다.

어느 정도 취성을 가진 용암표면 부가 벽면을 따라 미끄러져 내릴 때 벽면에 아직 굳지 않은 부분을 끊어 내리면서 수직방향으로 찰흔구조가 발달한다(Calvari and Pinkerton, 1999).

4.1.13. 용암표석의 부가(L13)

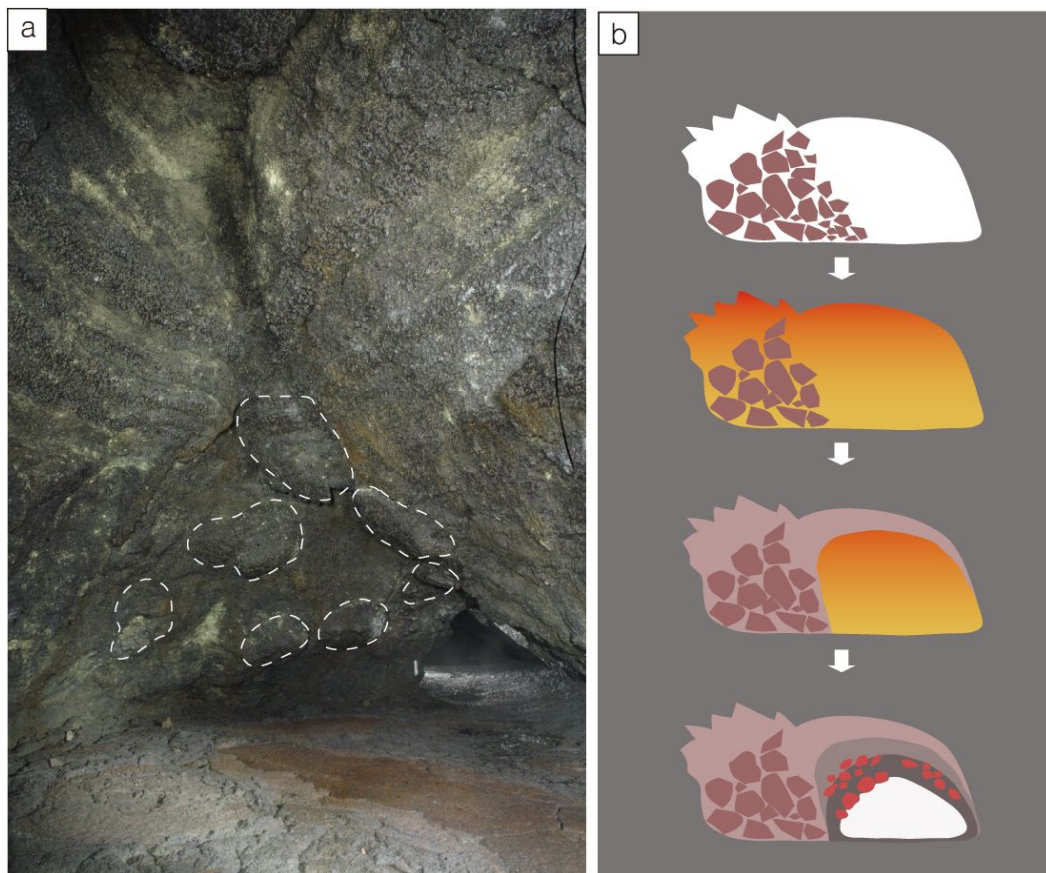


Fig. 2-23. Ceiling and wall coated with rafted breakdown in smallest passage of Manjanggul lava tube. (a) Rafted breakdowns are attached to ceiling with coated lava (dashed line). View is downstream. (b) Cross section diagrams illustrate successive stages of the progressive narrowing of tube passage due to collapse of tube and lava accretion, and the attachments of rafted breakdowns on ceiling and wall. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L13).

용암표석의 부가는 3입구로부터 하류로 약 1,640 m 거리의 CP44 부분에서 관찰된다(L13 in Figs 2-8 and 2-9). 이 부분은 만장굴에서 가장 좁은 부분으로 폭 3.4 m, 높이 1.9 m이다. 동굴의 왼쪽 벽과 천장에는 주변과 달리 돌출된 물체가 관찰되는데(Fig. 2-23a: 점선), 벽면이나 천장과는 조화롭지

얇게 등근 형태를 띠어 암괴로 판단된다. 평면도(Fig. 2-9; Appendix 2)에서 CP42 부분만이 용암동굴 안쪽으로 돌출되어 있으며, 그 돌출된 부분의 상류 부분에 암괴가 붙어 있다.

암괴가 천장이나 벽면에 붙어 있는 원인으로 여러 경우를 생각할 수 있다. 먼저 동굴벽면의 한쪽이 붕괴되어 낙반이 쌓여 좁아진 통로로 용암이 흐르면서 천장과 벽면에 용암이 부가되어 통로는 계속해서 좁아지고, 바닥은 계속해서 침식되어 깊어짐으로써, 원래 용암의 흐름을 막았던 낙반의 잔류물이 벽면에 노출된 경우를 생각할 수 있다. 또 다른 경우로는 용암에 의해 떠밀려오던 암괴가 용암동굴의 좁은 부분에 걸려 벽면과 천장에 붙어서 이와 같은 특징이 나타날 수 있다(Allred and Allred, 1997).

평면도(Fig. 2-9; Appendix 2)에서 CP42 부근 동굴통로 폭을 살펴보면 상·하류에서는 거의 동일하나 CP42 부근에서만 갑자기 좁아지는 것을 알 수 있으며, 종단면도(Appendix 1)에서 보면 CP42 부근에서부터 동굴천장이 낮아진다. 이러한 용암동굴의 입체적 모양을 고려하면, 동굴의 성장과정에서 동굴천장의 낮은 부분이 무너져 내려 동굴통로가 축소된 후, 용암의 계속적인 부가에 의해 용암통로가 더욱 축소되면서 상류로부터 떠내려 온 암괴가 좁은 통로에 함께 부가되어 그러한 구조가 형성된 것으로도 해석할 수 있다(Fig. 2-23b). 이러한 해석은 특히 CP42 부근에서만 동굴폭이 비조화적으로 좁게 나타나는 특징을 설명할 수 있다.

4.1.14. 동굴 내의 규암 포획체(L14)

규암 포획체는 3입구로부터 하류로 약 1,740 m 거리의 CP40 부근에서 발견된다(L14 in Figs 2-8 and 2-9). 특히 CP40 부근의 천장에서 흰색 규암편이 다량으로 관찰되는데, 이러한 규암편은 만장굴 내의 CP39, CP36, CP28, CP19, CP13 등 여러 지점의 낙반이나 천장 혹은 벽면의 높은 부분에서도 발견된다. 크기는 대체로 10 cm 이내이며 큰 것은 15~20 cm에 달하는 것도 관찰된다.

유사한 사례로 호주 서부의 캄발다(Kambalda)지역 코마티아이트 용암에는 기반암을 이루는 퇴적물이 부분적으로 녹아 들어온 포획액(xenomelt)이 코마티아이트에 비해 밀도가 더 작아 코마티아이트 용암 내에서 위로 떠올라 상부의 채널 가장자리에 집적되었다고 보고(Frost and Groves, 1989)되기도 하였다(Greeley, 1998).

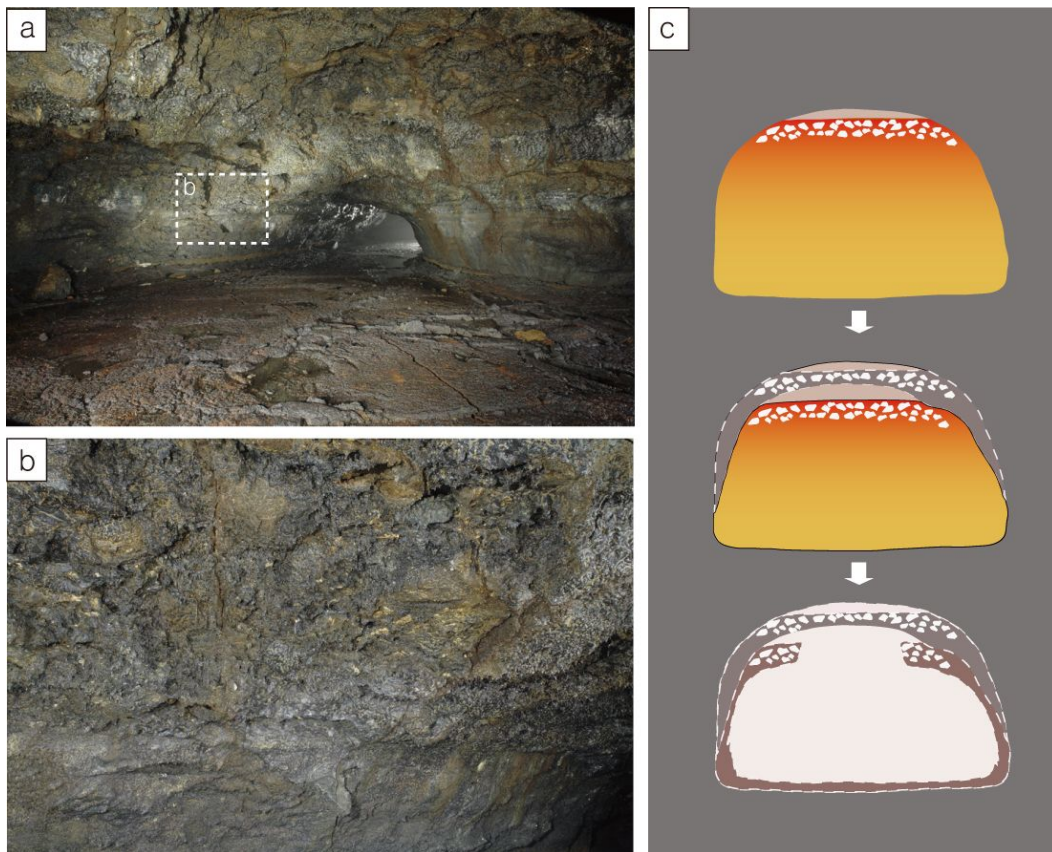


Fig. 2-24. Quartzite xenoliths within lava fused to ceiling and upper part of tube wall. (a) View is upstream. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L14). (b) Detailed view of inset b in Fig. 2-24(a). (c) Cross-section diagrams illustrate accretion of lava with less dense quartzite xenoliths on the ceiling and upper part of lava tube wall.

만장굴 내부에서 관찰되는 규암 포획체는 포획액의 형태를 띠지는 않지만, 호주 캄발다 코마티아이트내의 포획액의 경우와 유사하게 밀도차이에 의해 용암동굴 내를 흘러가는 용암의 상부로 떠올라 동굴 내부에 부가된 경우로 여겨진다. 즉 규암편은 용암동굴 내를 흘러가는 현무암질 용암의 밀도인 $1 \sim 2.48 \text{ g/cm}^3$ (Swanson, 1973)에 비해 작아 용암이 흘러갈 때 용암의 표층부에 떠 이동하다가 용암이 용암동굴의 천장이나 벽면에 부가될 때 규암편도 함께 달라붙어 용암동굴의 천장이나 벽면 높은 곳에서 주로 관찰되는 것으로 여겨진다. 이는 용암동굴 내의 용암부가의 간접적 증거이기도 하다.

그 동안의 제주도 기반암에 관한 연구에 의하면(이동영 외, 1987; 원종관 외, 1993, 1995; 이문원, 1994; 안건상 외, 1995), 제주도의 기반암은 화강암, 응회암, 선캄브리아기 변성암류 등으로 구성되며, 한반도의 서남부와 유사한 것으로 해석되었다(이문원, 1994). 이러한 것으로 비추어 봤을 때, 만장굴 내에서 산출되는 규암 포획체는 제주도 기반암을 이루는 변성암류에서 유래된 것으로 유추된다.

4.1.15. 아래로 볼록한 동굴천장(L15)

아래로 볼록하게 처진 동굴천장은 3입구로부터 하류로 약 1,900 m 거리의 CP37 지점에서 나타난다(L15 in Figs 2-8 and 2-9). 이곳에서 동굴천장은 흔히 아치 형태를 띠고 있는데, 특이하게 천장이 아래로 볼록하게 처져 있다(Fig. 2-25). 동굴바닥에서 천장까지는 약 3.8 m이며, 동굴폭은 약 10 m이다. 아래로 볼록하게 처진 천장에는 여러 겹의 안도배 구조가 관찰되며, 상류와 하류로 더 넓어지는 구간에서는 이러한 안도배들이 떨어져나간 것을 알 수 있다. 이 부분은 통로가 좁아지는 곳(Fig. 2-9; Appendix 2)으로 용암이 흘러갈 때 표층이 굳어 생성된 여러 겹의 용암층이 부가되는 과정에서 부가된 층을 지지하던 용암류 수위의 하강(공급지에서의 공급의 감소, 하류지역 막힘 해소, 바닥면의 지속적인 침식에 의한 수위하강 등)으로 아직은 연성을 가진 용암층(안도배)이 자중에 의해 아래로 내려앉아 형성된 것으로 여겨진다.

(Calvari and Pinkerton, 1999). 흔히 볼록한 곳을 따라 동굴진행 방향으로 절리가 발달한다.



Fig. 2-25. Downward bulge in mid-ceiling. View is downstream. Longitudinal crack along middle of bulge is theorized to have formed as result of weight of the accreted lining (roof). See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L15).

4.1.16. 거대 용암동굴(L16)

거대 용암동굴은 3입구로부터 하류로 약 2,120 m 거리의 CP34 지점에서 가장 현저하다(L16 in Figs 2-8 and 2-9). 이곳은 만장굴에서 가장 넓은 부분으로, 높이 17.5 m, 바닥 부분의 폭 15 m이며, 동굴벽면 상부가 이 보다 더 넓다(Fig. 2-26). 벽면 상부에는 용암유선이 관찰되지 않는데 반해, 벽면 하부에는 수평의 용암유선이 잘 발달해 있다.

이와 같이 주간동굴 내에 동굴폭이 넓고 천장높이가 높아 용적이 큰 구간은 용암동굴 형성과정에서 화구에서의 갑작스러운 분출량 증가 혹은 하류의 막힘 등과 같은 상황에서 용암을 일시적으로 저장하는 역할을 한다. 이러한 임시저

장고 기능을 통해 동굴 내를 흘러가는 용암의 양을 일정하게 유지하는 역할을 하며, 그 결과 용암동굴의 지속적인 성장에 기여한다(Allred and Allred, 1997). 더 나아가 동굴 내의 이러한 구간은 저장고 역할을 함으로써, 용암동굴을 통해 끊임없이 용암을 흘러보내는 역할을 함으로써 용암을 멀리까지 흘러보내, 결과적으로 넓고 평탄한 순상지를 형성하는데도 일조한다(Peterson et al., 1994; Allred and Allred, 1997).

Peterson et al.(1994)은 마우나올루 분출시(1969~1973) 알레아 피트 분화구 용암호(Alae Pit Crater Lake)가 화구에서의 변덕스러운 분출양상을 조절하는 것을 보고하기도 하였다.



Fig. 2-26. Largest passage in Manjanggal lava tube. View is upstream. The ceiling is 17.5 m high and the floor is 15 m wide. The upper part of lava tube is wider than the lower part. High, voluminous passage acted as limited storage buffer to help regulate flow and keep flood lava within the tube system. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L16).

4.1.17. 협곡형태의 용암동굴(L17)

협곡형태의 용암동굴은 3입구로부터 하류로 약 2,210 m 거리에 CP32 부분에서 가장 현저하다(L17 in Figs 2-8 and 2-9). 이 부분은 천장높이가 최고 약 19 m에 달하고, 동굴 아랫부분의 폭이 4.5 m로, 동굴폭에 비해 높이가 상당히 큰 길쭉한 협곡형태를 보인다(Fig. 2-27). 동굴 하부와 상부의 폭이 더 넓고 가운데 부분은 볼록하게 약간 좁아 모래시계 형태의 단면을 보인다. 이러한 깊은 계곡 형태의 용암동굴은 전형적인 주간동굴의 특징으로 기재되어 왔다(Larson and Larson, 1990; Waters et al., 1990; Larson, 1993; Espinasa, 2006). 벽면의 중간부분 아래에서부터 수평 유선이 연속적으로 발달해 있으며, 동굴바닥과 벽의 경계부에는 용암의 마지막 흐름에 의한 전단구조가 발달해 있다.

이러한 좁고 깊은 계곡 형태의 용암동굴은 CP31 부근에서부터 천장높이가 약 3 m로 급격히 낮아지며 CP31 부근 천장에서 여러 겹의 용암층이 관찰되는 것으로 미루어, 계속적인 용암부가에 의해 천장이 아래로 낮아지게 되었음을 알 수 있다(Fig. 2-8). 특히 CP31~CP30 구간은 동굴천장 높이가 약 3 m로 천장이 아주 낮는데, 평면도 상에서 이 구간이 대체로 동굴폭이 좁은 것을 알 수 있다(Fig. 2-9; Appendix 2).

실제로 협곡형태를 띠는 구간과 하류의 천장이 갑자기 낮아지는 구간(CP31~CP30)에서 동굴폭은 크게 다르지 않다. 그렇다면 무슨 이유에서 상류에는 협곡과 같이 천장이 높은 부분이 형성되고 이보다 하류에는 천장이 갑자기 낮아지는 것인가? 이는 동굴바닥의 경사에 의한 것으로 판단된다. Fig. 2-27에서 관찰되는 구간은 평균경사가 0.5°인 C 구간 중 첫 구간(c-1구간)으로 경사가 약 1.2°에 달한다. 그러나 하류에 천장이 갑자기 낮아지는 부분은 평균경사가 0.3°로 C 구간 내에서 상대적으로 완만한 구간임을 알 수 있다(Appendix 1). 즉 경사가 급한 곳에서는 완만한 곳으로 흘러가는 용암은 일시적인 정체로 인해 용암수위가 잘 유지되었을 것이며, 용암수위가 일정하게 유지됨으로써 새로운 용암층의 부가가 쉽게 이루어져(Greeley et al., 1998;



Fig. 2-27. Canyon-shaped lava tube passage. View is upstream. The ceiling is 19 m high. The slope of floor upstream from this portion is 1.2° , but 0.3° downstream (see Appendix 1). Where it is less steep, the height of the ceiling falls abruptly. Because sudden slope changes created congestion in the flow of lava along moderate slopes, steady lava levels developed the lava layers along the walls or lava linings on the ceiling of lava tube. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L16).

Calvari and Pinkerton, 1999), 결과적으로 천장이 점점 낮아졌을 것으로 판단된다.

Swanson (1973) 은 1969~1971년 마우나올루 분출동안 용암동굴 내의 용암 수위가 낮아지는 만큼 용암동굴 바닥이 점진적으로 깊어지는 것을 관찰하고, 이를 근거로 18개월 혹은 이보다 짧은 기간에 주간동굴은 15 m만큼 침식되었다고 추론하였다. 그렇다면 Kauahikaua et al.(1998) 은 현생 용암동굴에서 쇠막대기를 이용하여 용암동굴 바닥의 깊이를 직접 측정하고 용암이 하루에 10 cm 정도씩 동굴바닥을 침식시킨다고 보고하였다. 이러한 현생 화산활동에서의 관찰결과에 비추어 볼 때, 이 지점에서와 같이 협곡형태의 용암동굴 단면이나 지표로부터 만장굴 바닥까지의 깊이(14~34 m) 등을 고려하면 만장굴 용암동굴은 상당히 오랜 기간 동안 지속적으로 용암이 흘러 형성된 것임을 유추할 수 있다.

4.1.18. 용암석주(L18)

용암석주는 3입구로부터 하류로 약 2,350 m 거리의 CP28 지점에 존재한다(L18 in Figs 2-8 and 2-9). 이 용암석주는 2입구로부터 약 1 km 상류(공개구간 끝)에 위치하며, 측량을 통해 유추할 수 있는 원래 동굴바닥으로부터 약 8 m의 높이까지 용암이 쌓여 천장에 닿아 있다. 용암석주 표면에는 용암이 쌓여 석주가 형성된 것을 지시하는 구조들이 확인되며, 석주 주변 가까운 곳에는 밧줄구조가 관찰되는데, 이는 용암석주로부터 용암이 흘러나갔음을 지시한다. 석주 상부에는 상위동굴로 통하는 창구조가 있으며, 창구조 단면을 통해 상위동굴 바닥(하위동굴 지붕)이 3매의 용암층이 추가되어 형성된 것임을 알 수 있다(Figs 2-28a, b and c). 용암석주보다 상류에 위치하는 상위동굴 바닥에서는 용암석주를 만든 용암이 흘러든 흔적을 찾을 수 없는데(Fig. 2-28b) 반해, 용암석주보다 하류에 위치하는 상위동굴 내부의 바닥에서는 용암이 흘러든 흔적을 발견할 수 있다(Fig. 2-28a).

이렇게 용암석주 지점에서부터 동굴내로 흘러든 용암은 이미 형성된 용암동굴 바닥을 따라 상류로 47 m, 하류로 91 m 까지 총 138 m를 흘러갔다(See Fig. 2-5). 이 용암이 동굴의 하류 방향뿐만 아니라 상류 방향으로도 상당한 거리를 흘러간 것은 이 구간(c-2구간)의 바닥경사가 0.3° 로 아주 완만하기 때문에 가능하였을 것이다(Appendix 1). 이런 것을 종합해보면, 용암석주(lava column)는 천장에서 흘러내린 용암이 쌓여서 생성된 것으로, 석주 상부에는 이미 형성된 용암동굴내로 용암이 흘러들 수 있는 통로역할을 하는 상위동굴이 존재하였을 것이다. 즉, 만장굴이 생성된 이후 지표를 흘러가던 용암류가 만장굴 상위 지표의 천장창을 통해 만장굴 내부로 흘러들었을 것으로 추측된다(Figs 2-5 and 2-28c). 또한 지표에서 용암석주 상부의 천장까지의 거리가 약 23 m임을 감안한다면, 현재의 용암동굴 천장 위에는 용암부가에 의해 생성된 용암층들이 다층구조를 이루고 있어, 용암이 흘러드는 통로 역할을 하였을 것으로 예상된다(Fig. 2-28c). 상위동굴과 하위동굴 사이에는 3개의 부가층이 관찰되는데(Figs 2-28a, b and c), 이 또한 용암동굴 내의 용암의 부가

작용에 의한 지속적인 용암층 형성과 그에 따른 다층구조 형성의 증거가 된다.

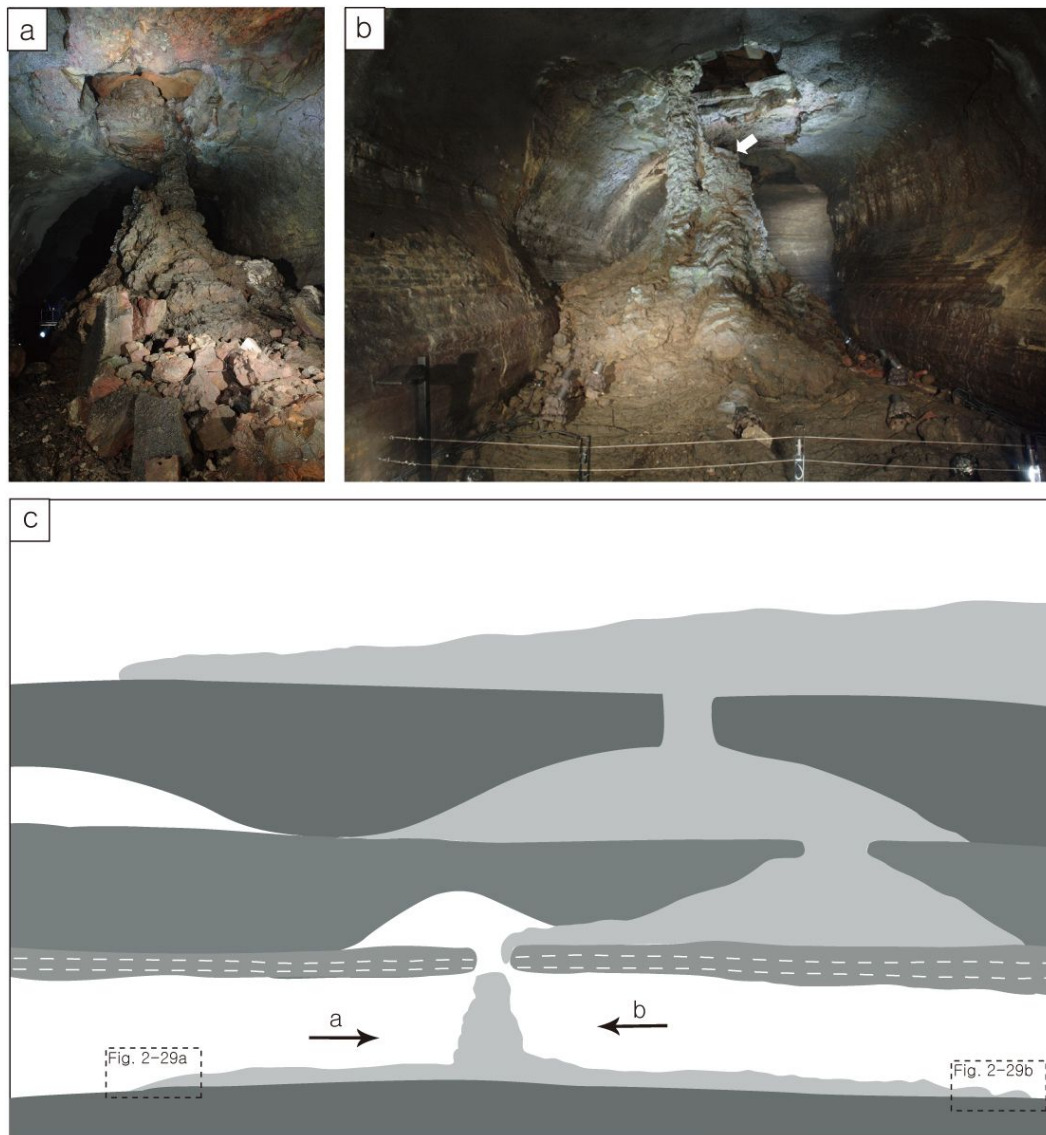


Fig. 2-28. Lava column located at CP28 (L18) in Fig. 2-8. (a) Photograph taken upstream shows lava column formed by accumulation of lava that flowed down from the downstream part of the upper level tube. (continued)

(b) Photograph taken downstream showing two columns, one attached to ceiling of lower level tube, the other broken at the top (white arrow) which has a chimney-like cross section, similar to hornitos. There is no evidence of lava flows in the upstream part of the upper level tube. (c) Schematic longitudinal section illustrating the later lava intrusion into the Manjanggul lava tube through a window and skylight. The depth of the tube's floor from the surface is roughly 29 m. Upstream is on the left, downstream on the right.

이렇게 이미 형성되어 있는 용암동굴 내를 흘러간 용암은 용암동굴 통로의 가장자리에서는 높이가 낮고 가운데 부분은 높아, 단면상에서 불룩한 형태를 갖고 있으며, 상부표면에는 용암상승에 의한 균열이 발달해 있고, 용암의 선단 부에는 용암발가락(lava toe)이 관찰된다. 이는 천장으로부터 흘러든 용암이 용암선단부의 반복적 터짐현상을 통해 흘러났음을 지시한다(Cas and Wright, 1987; Hon et al., 1994; Keszthelyi and Denlinger, 1996)(Fig. 2-29). 이러한 흐름에서 용암 선단부 뒤쪽의 용암은 표면에서부터 식으면서 용암표층(lava crust)을 형성하게 되고, 동시에 그 아래를 흘러오는 용암에 의해 표층부가 서서히 상승하게 되는데, 이때 표층부의 용암층은 두꺼워짐과 동시에 하위의 용암에 의해 밀려올라가 표층부 용암층에 균열이 발생하게 된다(Walker, 1991; Hon et al., 1994; Kauahikaua et al., 1998).

이렇게 이미 형성된 용암동굴 내로 새롭게 용암이 흘러들어간 예들은 간혹 보고되어 왔다. Allred and Allred(1997)는 카주무라 용암동굴에 있어서 여러 동굴 입구(entrance)에서 동굴 내부로 용암이 흘러들어간 것을 기재하였는데, 어떤 것은 480 m까지 흘러가 동굴을 막은 예를 보고하기도 하였다. 이렇게 동굴 내부로 흘러든 용암의 표면은 검은색 유리질이며, 표면의 절리와 동굴벽면의 절리가 일치하지 않는 것 등을 근거로 동굴이 식은 후에 용암이 동굴 내로 흘러들었다고 추론하기도 하였다. 뿐만 아니라 하와이 푸오오-쿠파이아나 하 화산활동 지역에서는 푸오오 분석구의 기저부에서 흘러나온 용암(에피소드 53)이 이미 형성된 용암동굴(에피소드51 동안 형성)의 천장창을 통해 흘러들어간 거리를 흘러가는 것이 직접 관찰되기도 하였다(Kauahikaua et al., 1998)

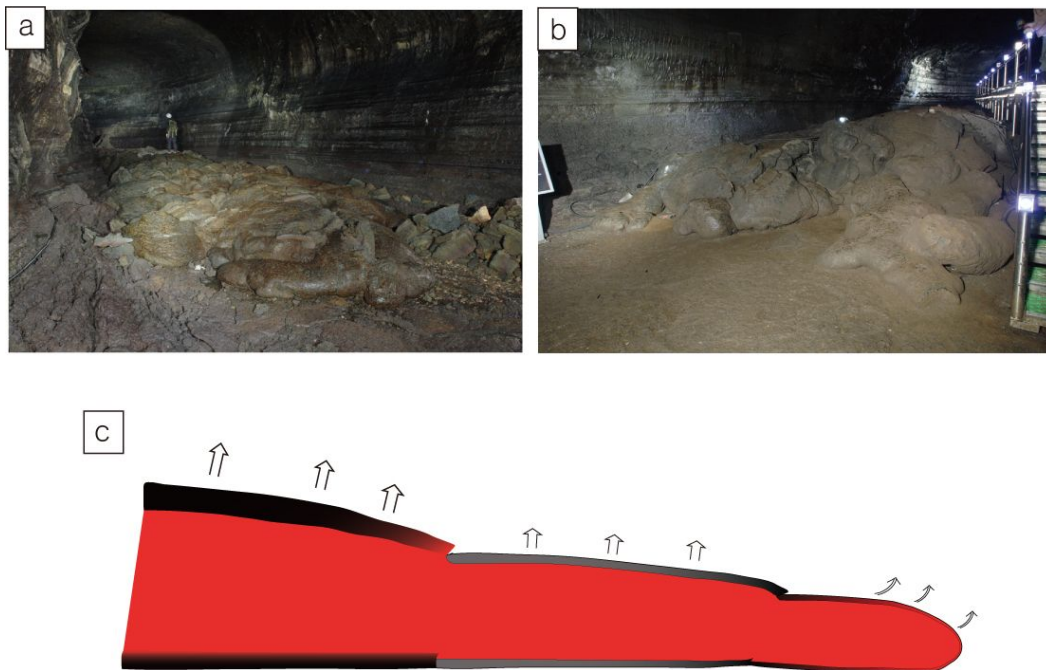


Fig. 2-29. Lava flow and lava toe. (a) Lava flow lobes developed upstream of lava column are swollen and have medial cracks caused by lava inflation (location shown in Fig. 2-28c). (b) Lava toes at distal part of lava flow lobes downstream from lava column (location shown in Fig. 2-28c). (c) Cross section diagram of lava flow lobe shows the flow lobe motion by pushing the crust up and out of the way of the lobe front, which is modified after Keszthelyi and Denlinger (1996).

용암이 직접 흘러들어온 것을 확인할 수 있는 석주부분에서 천장에 맞닿은 용암석주 옆으로 그 상단이 부러져진 또 다른 용암석주의 흔적(화살표)이 관찰된다(Fig. 2-28b). 부러진 석주는 내부가 막혀있지 않고 마치 굴뚝과 같이 비어 있으며, 내부에 용암방울들이 흘러내린 구조가 관찰된다. 이는 호니토의 내부와 유사한 특징을 가진다(박기화 외, 2006). 이러한 특징으로부터 석주의 형성과정을 유추해보면, 이미 생성되어 상당히 시간이 경과한 용암동굴 바닥에는 현재의 동굴바닥과 같이 물이 어느 정도 고여 있었을 것으로 유추되는

데, 이러한 조건에서 새로 흘러든 용암은 바닥에 고인 물과 반응하여 2차적인 폭발성을 갖게 되어, 작은 규모의 화구로부터 용암방울들을 약하게 뿜어내게 되고, 화구주변에 쌓여 마치 굴뚝모양과 같은 호니토를 형성하게 된 것으로 생각된다(Cas and Wright, 1987; 박기화 외, 2006; 황상구 외, 2005).

4.1.19. 동굴 내의 용암부가(L19)



Fig. 2-30. Lava shelf formed through growth of crust from wall at constriction point. View is downstream. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L19).

동굴 내에서 용암부가는 3입구로부터 하류로 약 2,570 m 거리의 CP22 부분에서 잘 관찰할 수 있다(L19 in Figs 2-8 and 2-9). 이 부분에서 동굴이 좁아지는 곳의 천장 높이는 약 2.5 m이며, 폭은 약 5 m이다(Fig. 2-30). 동굴 높이와 폭이 하류로 가면서 낮아지고 좁아지는데, 좁아지는 곳의 천장 높이에 나란하게 용암선반이 약하게 발달해 있는 것을 관찰할 수 있다(Fig. 2-30). 좁아지는 지점의 천장에는 용암종유(lava stalactite)가 관찰되는데, 거꾸로 세워진 길쭉한 뿔모양의 일반적인 용암종유라기 보다는, 용암흐름의 방향에 나란하게 일렬로 수개의 용암종유가 발달해 있다. 이러한 선상으로 배열

된 용암종유는 각 선상에서 하류 끝부분에 있는 것이 대체로 더 길다.

만장굴의 천장 높이는 오르락내리락 매우 불규칙하다(Fig. 2-8). 이러한 동굴 내부에서 천장높이가 낮은 구간의 상류 부분에는 천장높이와 나란하게 발달한 용암선반이 흔히 관찰된다(Fig. 2-30: 화살표). 흔히 용암동굴 내를 흘러가는 용암은 그 표면부, 특히 벽면과 맞닿는 부분에서 더 쉽게 고화되며(Allred and Allred, 1997), 동굴의 벽면에서부터 고화되어 중심부로 성장해가서 서로 합쳐져 새로운 용암층을 만들기도 하는데, 마치 지퍼가 잠기는 것과 같은 형태이다(Peterson et al., 1994; Espinasa, 2006). 동굴 내의 천장이 낮고, 폭이 좁은 곳에서는 이러한 방식으로 용암층이 잘 형성되고 보존되어 시간이 지날수록 점점 더 천장이 낮아지게 되는 것을 알 수 있다.

4.1.20. 낙반과 용암부가(L20)

낙반에 용암이 추가되는 것은 3입구로부터 하류로 약 2,750 m 거리의 CP18 지점에서 관찰된다(L20 in Figs 2-8 and 2-9). 이곳에는 일명 '거북바위'라 불리는 구조가 동굴통로 한쪽 편에 바닥보다 1.5 m 높은 곳에 위치하며, 하류방향으로 2~3 m 지점에는 용암에 덮여 있는 낙반이 관찰된다. 거북바위를 측면에서 보면, 둥근형태의 암괴에 30~60 cm 폭의 용암선반이 발달해 있으며, 이는 거북바위 주변의 벽에 발달한 용암선반의 높이와 대체로 일치한다(Figs 2-31a and b). 뿐만 아니라 큰 낙반(점선)과 인접하여 작은 낙반(화살표와 점선)이 하류 방향에 위치하고, 이들 두 낙반 사이는 용암선반으로서 연결되어 있다(Fig. 2-31c).

거북바위 주변의 낙반 잔류체, 낙반에 부가된 용암선반의 발달양상 등을 토대로 생성과정을 유추해 보면, 용암동굴 내의 동굴붕괴로 인해 발생한 낙반이 동굴 내에 쌓이고, 동굴 내를 흘러가는 용암이 일정한 높이를 유지하며 흘러가면서 표면이 식어 동굴벽면에 용암선반을 형성하기도 하지만(Fig. 2-31a: 화살표), 낙반의 가장자리에도 용암이 부가되어 소규모의 용암선반을 형성하게 된다. 이후 용암수위가 서서히 낮아짐에 따라 현재와 같이 바닥보다 높은

곳에 벽면의 용암선반과 나란한 높이에 거북바위 용암선반이 발달하게 된 것으로 해석된다(Figs 2-31b and d).

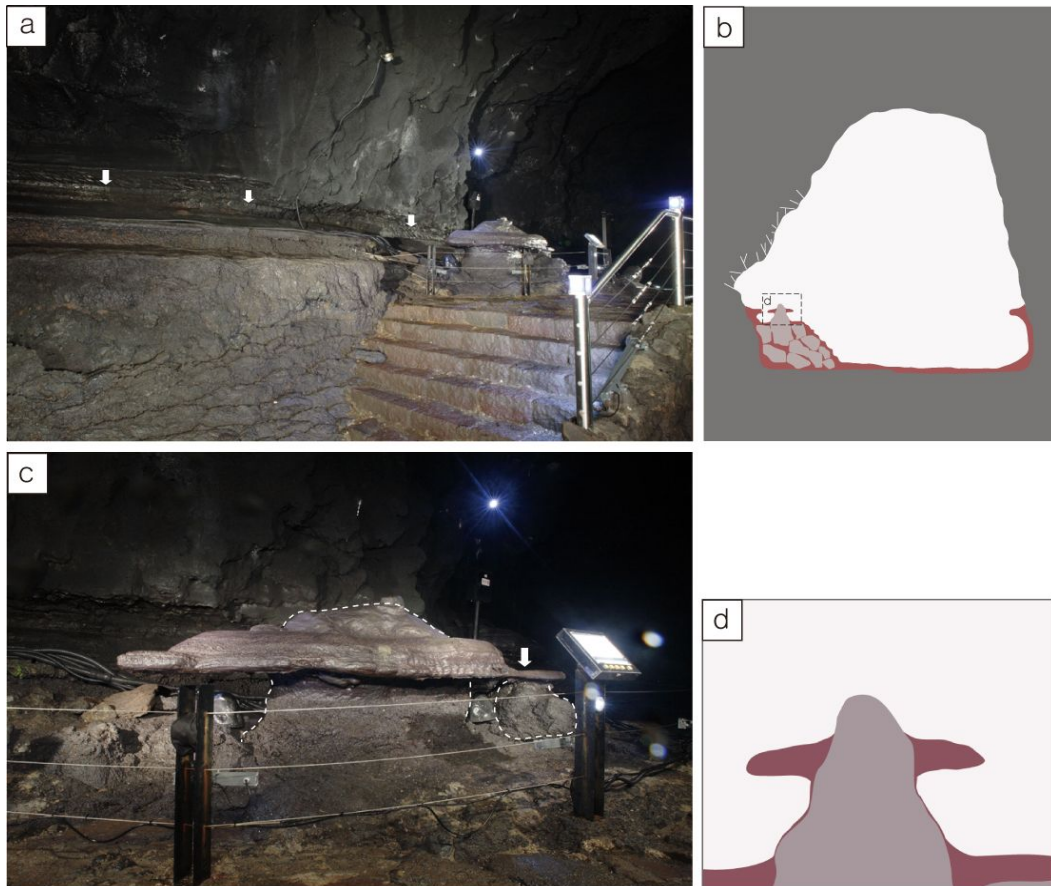


Fig. 2-31. Breakdown and lava accretion (deposition). (a) Lava shelf on wall (white arrows) is aligned with the lava shelf around breakdown. (b) Schematic cross section of Fig. 2-31a showing the breakdown and the lava which accreted on it by the following final lava to flow through tube. (c) The lava shelf around big breakdown (dashed line) in center is connected to the shelf around small breakdown (white arrow) on right. (d) Diagram of inset d in Fig. 2-31b. It shows block and accreted lava shelf on it. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L20).

기존의 연구에서 용암동굴 내를 흘러가는 용암은 낙반을 쉽게 이동시킨다고 보고되기도 하였지만(Peterson et al., 1994; Allred and Allred, 1997; Kauahikaua et al., 1998), 일부 낙반의 경우 가장 마지막 용암이 흘러가는 단계, 즉 용암의 계속적인 공급이 없이 용암동굴 내에 잔류하는 용암이 만장굴과 같이 완만한 바닥경사(0.4°)를 따라 수동적으로 배출될 때에는 낙반들이 모두 떠내려가지 보다는 상당부분 붕괴지점에 잔류하게 될 것으로 예측된다. 천장이나 벽면에서 소규모 붕괴에 의해 발생한 낙반의 경우 그 비중이 작아(Allred and Allred, 1997) 쉽게 용암에 의해 이동될 것으로 예상되지만, 침식에 의해 깊이 패여 동굴벽에 노출된 기존 용암층(Allred and Allred, 1997; Greeley et al., 1998; Williams et al., 2004)이 붕괴된 낙반의 경우 그 비중이 용암동굴 내를 흘러가는 용암(Swanson, 1973: 1~2.48)보다 커, 용암에 의해 쉽게 이동되지 않을 것으로 추론된다. 이상에서 살펴본 것과 같이 거북바위는 낙반을 끌고 내려 갈수 없을 만큼 아주 느린 속도로 흘러가거나 동굴 내에 잠시 정체된 마지막 단계의 용암이 낙반에 부가되어 형성된 용암부가의 증거물로 판단된다.

4.1.21. 벽치마(apron)와 중력신장균열(L21)

벽치마(apron)는 3입구로부터 하류로 약 2,860 m 거리의 CP16 부근에서 상당히 큰 규모로 나타난다(L21 in Figs 2-8 and 2-9). CP15에서 상류로 40 여 m 지점에서부터 CP21 구간까지 약 270 m 구간의 벽면에는 벽면 최하부에 벽면으로부터 0.5~1 m 정도 돌출된 용암의자(lava bench)가 발달하거나, 동굴바닥이 통로 중앙으로 비스듬히 기울어진 벽치마 구조가 동굴통로의 양쪽에 관찰된다(Fig. 2-32). 특히 벽치마의 표면에는 바닥면이 기울어진 방향에 직각(통로의 축방향)으로 균열들이 발달해 있는데, 그 깊이는 2~4 cm 정도이다. 이 구간에서 벽치마가 관찰되지 않은 부분에서는 벽치마와 벽면이 만나는 높이에 작은 규모의 용암선반이 관찰된다(Fig. 2-32a).

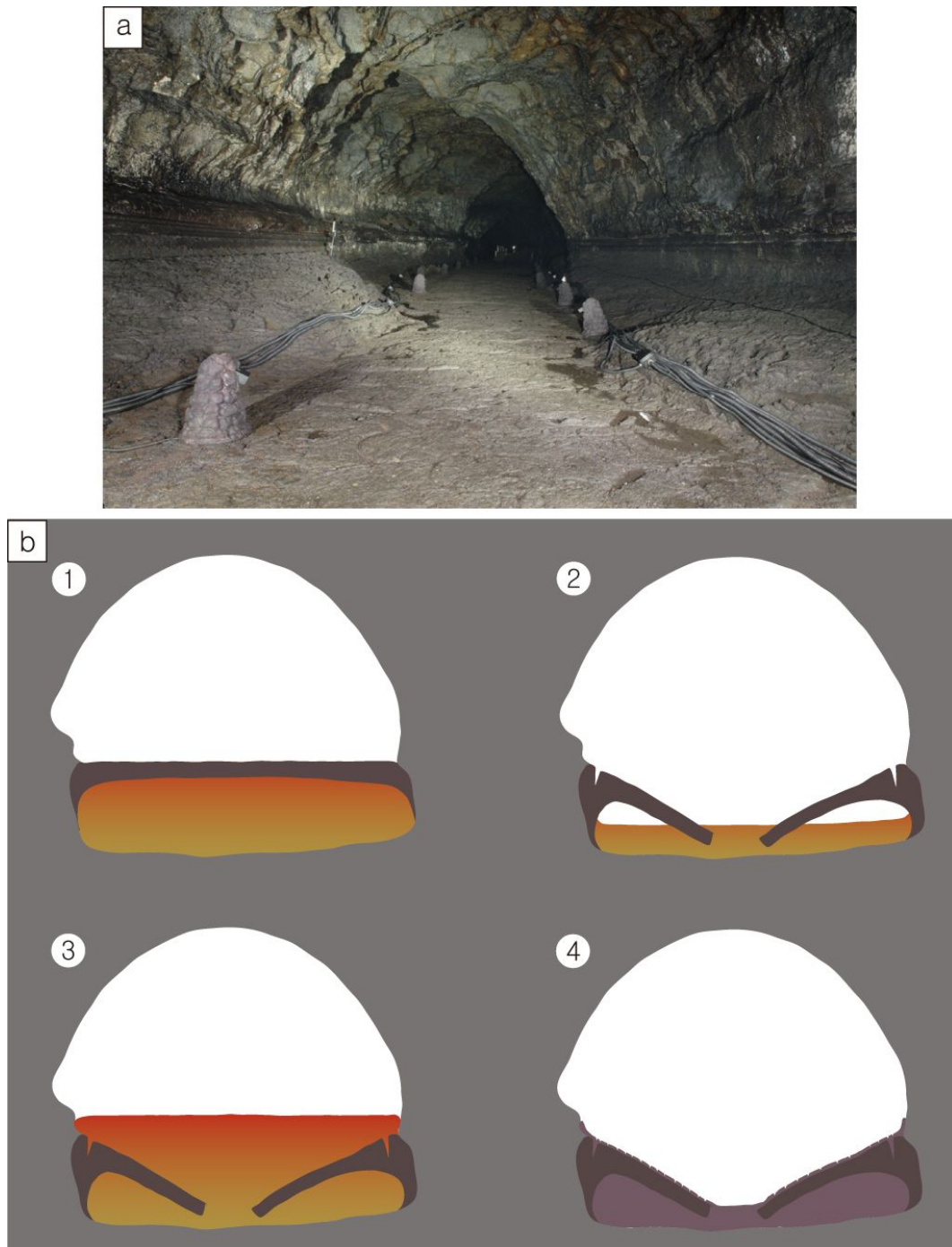


Fig. 2-32. Apron and cracks by gravitational stretching or tearing on apron.

View is upstream. (a) Apron with cracks of 2~4 cm in depth parallel to tube direction along both sides. (b) Diagrams illustrate successive stages of ① roof development by sustained flow, ② subsidence of roof by lowering lava stream, ③ overflow, ④ cracks by gravitational stretching on apron by final passive lava drain in tube. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L21).

벽치마, 용암선반 흔적 그리고 표면구조 등의 특징을 바탕으로 특징적인 구조의 형성과정을 추리해 보면(Fig. 2-32b), 벽치마 및 용암의자는 용암동굴 내부를 흘러가던 용암의 표층부가 굳어 생성된 용암층(Fig. 2-32b: ①)이 자중을 견디낼 만큼 굳지 않은 상태에서 하부의 용암수위 하강 등의 이유로 아래로 내려앉거나 떨어져 나가 하류로 쓸려가 형성된 구조로 여겨진다(Fig. 2-32b: ②). 벽치마 표면의 균열은 용암층의 붕괴 및 하강(deflation) 후 용암동굴 내 용암수위가 벽치마보다 높은 위치까지 상승한 이후(Fig. 2-32b: ③) 서서히 배출되는 환경에서 용암표면에 형성된 얇은 두께(2-4 cm)의 표층부가 용암 내에 잠겨있던 벽치마의 경사진 표면을 따라 내려앉았을 때, 중력에 의해 벽치마의 경사진 면을 따라 신장되고 찢어져 현재와 같은 조직으로 남게 된 것으로 판단된다(Fig. 2-32b: ④).

용암은 흔히 연성적으로 변형할 수 있는 온도한계 아래로 온도가 내려가거나 한계이상의 변형을 받으면, 취성적 변형이 발생하여 표면부가 쪼개져 아아혹은 판상의 파호이호이 용암을 형성한다(Kilburn, 2004). 용암의 표면이 연성적으로 변형할 수 있는 온도에 관하여는 연구자에 따라 조금씩 다른 값을 보이는데 Ball et al.(2008)은 700~800℃, Pinkerton et al.(2002)은 750-900℃ 등을 제시하는가 하면, Hon et al.(1994)은 800℃를 그 하한으로 제시하기도 하였다. 특히 Ball et al.(2008)은 용암 표면온도가 700℃ 이하로 낮아지면 표층부 아래를 흘러가는 용암에 의해 표층부가 찢어져 그 하부의 연성적 특징을 갖는 용암이 노출된다고 한다.

이러한 용암의 특성을 고려할 때, 벽치마 표면의 틈은 용암동굴 내를 흘렀던 마지막 단계의 용암이 이미 동굴의 중앙부분으로 기울어져 있던 물체를 따

라 중력에 의해 수동적으로 흘러가면서 만들어진 중력신장에 의한 균열(crack by gravitational stretching or tearing)이라는 것을 알 수 있다. 또한 벽치마는 용암동굴의 진화과정에서 상대적으로 마지막 단계에 생성된 용암층의 잔류물로 여겨진다.

4.1.22. 낙반(L22)



Fig. 2-33. Breakdown. View is downstream. Some time after the tube had drained, the wall and ceiling collapsed, leading to a pile up of blocks in the tube. Collapsed blocks have quartzite xenoliths 5~20 cm in diameter. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L22).

낙반은 3입구로부터 하류로 약 2,960 m 거리의 CP14 부분에서 큰 규모로 존재한다(L22 in Figs 2-8 and 2-9). 이 부분은 동굴벽면과 천장에서 떨어진 암괴더미에 의한 낙반에 의해 갑자기 통로가 좁아진다(Fig. 2-33). 낙반 내부에는 규암 포획체(5~20 cm)가 다수 관찰되며, 낙반이 떨어져 나온 벽면에서도 규암 포획체가 관찰된다. 이 낙반은 용암동굴이 완전히 완성된 이후 동굴 벽면과 천장이 붕괴되어 쌓인 암괴들이다.

용암동굴 붕괴는 화산활동이 끝난 후에도 일어나지만, 용암동굴 생성과정에도 동굴의 천장과 벽면으로부터 흔히 붕괴가 일어나게 되는데 용암이 흘러갈 때 보다 용암공급이 중단된 시기에 흔히 일어난다(Kauahikaua et al., 1998). 이렇게 붕괴에 의해 쌓인 암괴더미는 1차적으로 용암흐름을 막는 역할을 하지만, 계속적으로 용암이 흘러가는 경우에는 동굴의 휘어짐을 증가(Allred and Allred, 1997; Bunnell, 2008)시키거나 용암에 의해 쓸려내려 가면서 바닥을 긁어내리거나 열교환을 증가시켜 열기계적 침식을 증가시키는 역할을 한다(Kauahikaua et al., 1998; Fagents and Greeley, 2001). 뿐만 아니라 용암에 의해 이동되는 암괴는 동굴 내의 좁은 통로를 밀봉(breakdown jam)하거나(Larson, 1993; Bunnell, 2008), 좁은 통로에 적체되어 댐을 만들어 용암폭포(lava fall)를 형성하기도 한다. 거문오름 용암동굴계에 있어서 전형적인 용암폭포는 김녕굴 1곳, 용천동굴 3곳 등 거문오름 용암동굴계의 하류구간에서 흔히 관찰되는데(제주특별자치도, 2009), 흔히 용암동굴의 폭이 좁은 곳에 암괴들이 집적되어 형성된 것으로 추측된다(Fig. 1-9). 이렇게 만장굴을 포함하는 거문오름 용암동굴계의 주간동굴선상에서 낙반 혹은 다른 이유에 의해서 형성되는 폭포는 김녕굴과 용천동굴과 같은 하류구간에 주로 분포한다. 이에 비해 세계적으로 가장 긴 용암동굴로 알려진 카주무라동굴의 경우에는 42 km의 구간 중 주로 상류구간에 대규모 용암폭도들이 더 많이 분포하는 것으로 조사되기도 하였다(Allred and Allred, 2002)

4.1.23. 표류낙반(L23)

표류낙반은 3입구로부터 하류로 약 3,040 m 거리의 CP11 지점에서 관찰된다(L23 in Figs 2-8 and 2-9). 동굴바닥에는 동굴 내를 흘러가던 마지막 용암에 의해 떠내려가거나 떠밀려 가던 판상 암괴 즉 표류낙반이 관찰된다(Fig. 2-34). 판상 암괴의 표면구조를 살펴보면, 암괴 주변(특히 상류방향)에 용암의 흐름을 지시하는 전단변형구조(shear structure)가 관찰되지 않으며, 암괴 표면에는 약 2~4 cm 두께의 용암표층이 중력에 의해 찢어진 중력신장

균열이 발달해 있다. 이는 용암동굴 내를 흘러가는 마지막 단계의 용암은 하류 방향으로 흘러가기보다 거의 정지상태에서 어느 정도 표면층이 형성되고 그 아래의 액체상 용암만이 서서히 하류로 배출되면서 수위가 서서히 하강하였음을 지시한다. 이때 용암표면부에 굳은 표면층은 하류로 거의 이동하지 않은 것으로 추측된다. 이러한 특징은 이 구간(c-2구간)의 바닥경사가 0.3° 로 매우 완만한 것과도 연관이 있을 것이다.

암괴의 형태가 판상인 것은 용암동굴 내 상류 지역에서 이미 형성된 용암층의 일부가 붕괴되어 떠내려 온 것으로 여겨진다.

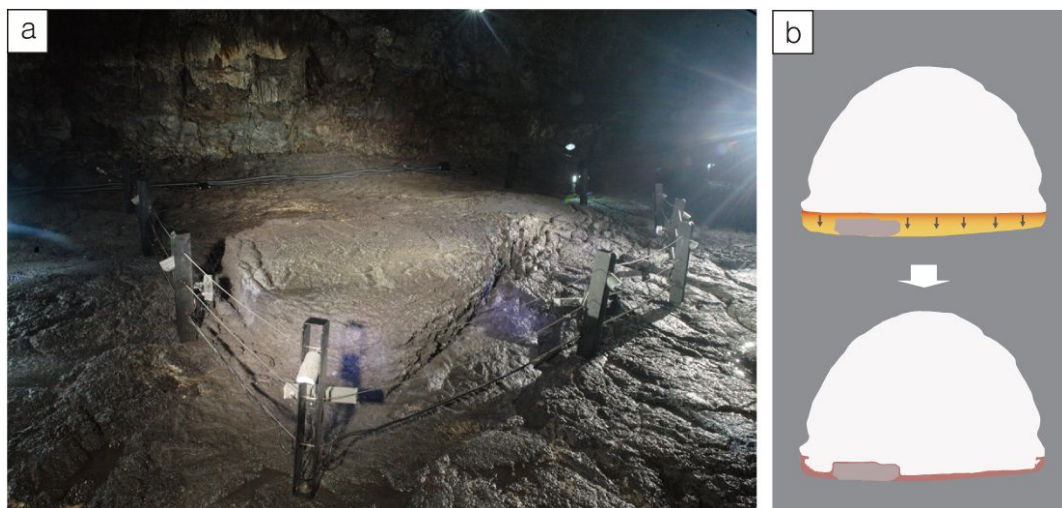


Fig. 2-34. Rafted breakdown. View is upstream. (a) Flat breakdown is enveloped in final lava flow in tube, on which cracks 2~4 cm deep developed through gravitational stretching. Structure of upstream part of breakdown shows no strains, which indicates that, at the final stage, the molten material below the ductile crust 2-4 cm in thickness passively drained and the crust moved very little downstream. (b) Cross-section diagrams illustrate successive stage of rafted breakdown and final lava drain. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L23).

4.1.24. 안도배의 붕괴(L24)

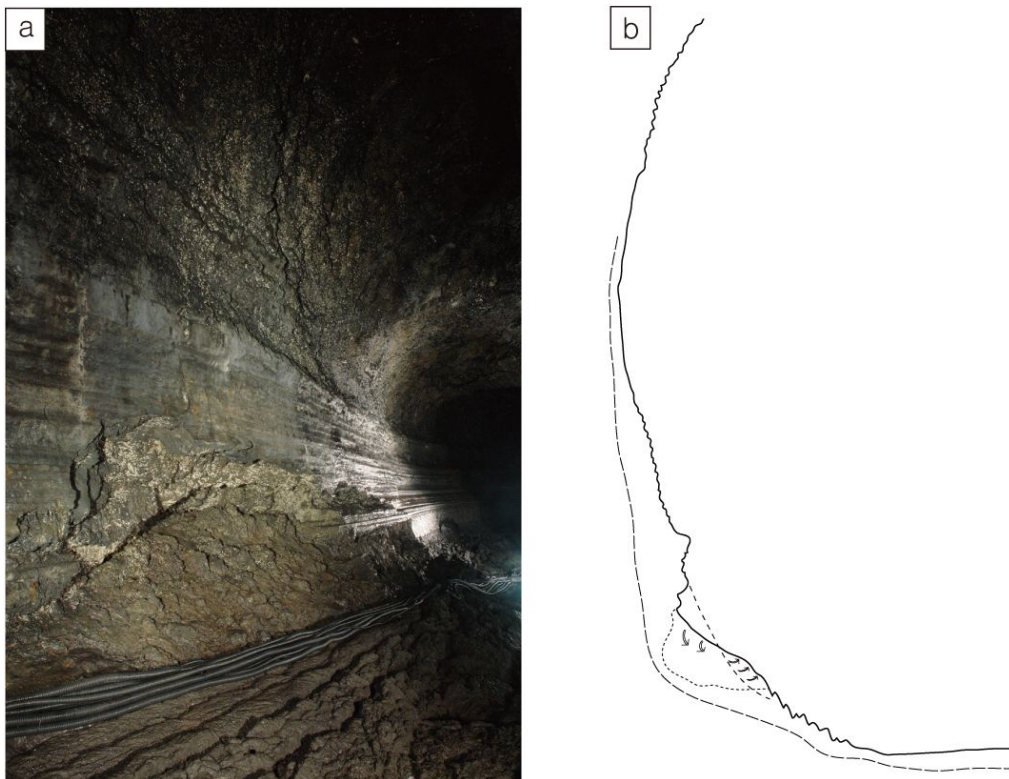


Fig. 2-35. Slumped lining. View is downstream. (a) Slumped lining cutting the flow lines in lower part of tube wall was swept away by final lava flow in tube on the steepest floor with slope of 1.7° (zone c-6 in Appendix 1). (b) Sketch of cross section of wall illustrating accreted lining, slumped lining, and their order of development. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L24).

안도배의 붕괴는 3입구로부터 하류로 약 3,200 m 거리의 CP8 부분에서 잘 관찰된다(L24 in Figs 2-8 and 2-9). 동굴 내부를 흘러가는 용암은 부가와 침식작용에 의해 동굴내부에 다양한 구조를 생성한다(Allred and Allred, 1997). 벽면에는 용암동굴 내부를 흘러가던 용암이 부가되어 수평방향으로 용암유선이 잘 발달되어 있다. 벽면 하부에는 용암이 부가되어 형성된 안도배가

중력에 의해 붕괴되어 용암유선을 끊고 있다(Fig. 2-35). 이 구간은 공개구간 중 바닥경사가 가장 급한 c-6 구간(1.7°)으로 바닥과 벽면 경계부에는 용암의 흐름에 의한 전단구조가 잘 관찰된다. 또한 여러 지점에서 안도배 붕괴가 관찰되는데, 안도배가 붕괴되어 흘러내린 용암은 동굴 내를 흘러가던 용암에 의해 쓸려 내려가 그 잔재가 관찰되지 않는 경우와 붕괴된 안도배 물질이 바닥과 벽면 사이의 전단구조를 덮고 있는 경우 두 가지 모두가 관찰된다. 이는 용암이 마지막으로 동굴 내를 흘러갈 당시에도 동굴 내의 온도가 매우 높아 부가된 용암이 완전한 고체 상태로 굳지 않았거나, 부가된 안도배 구조를 녹일 만큼 매우 온도가 높았음을 지시하는 것이다(Hon, 2007). 또한 동굴 내의 용암이 배출되고 난 뒤에도 용암동굴 내의 온도는 상당히 높게 유지되었으며 (Peterson and Swanson, 1974), 그 결과 완전히 고화되지 않은 벽면 안도배 부분은 용암배출이 종료된 후에도 붕괴되어 떨어져 내린 것으로 추측된다.

4.1.25. 다락구조(L25)

다락구조(alcove)는 3입구로부터 하류로 약 3,520 m 거리의 T5 부분에서 상위동굴에 나타난다(L25 in Figs 2-8 and 2-9). 이 부분의 벽면 상부에는 Fig. 2-36의 화살표에서와 같이 오목하게 들어간 다락구조가 발달해 있으며, 용암유선은 관찰되지 않는다. 이에 비해 벽면 하부에는 용암유선이 잘 발달해 있다(Fig. 2-36a). 동굴바닥에는 밧줄구조를 비롯한 파호이호이 구조가 잘 관찰되며, 대체로 검붉은 갈색을 띤다. 동굴내의 양쪽 벽면과 바닥 사이에는 고랑이 발달해 있으며, 고랑 내부에는 바닥과 벽면사이로 비집고 올라온 용암이 부분적으로 관찰된다.

이처럼 상위동굴에 특징적으로 다락구조가 나타나는 것은 초기에 용암동굴이 형성되고 난 이후, 용암은 용암동굴의 낮은 부분으로 흘러가기 때문에 동굴의 일부분만이 차별적으로 침식되고, 용암수위보다 높았던 부분은 그대로 남게 되어 생성된 것으로 여겨진다(Fig. 2-36b). 이렇게 오목 들어간 다락구조는 용암에 의한 침식의 증거가 된다(Allred and Allred, 1997). 그러나 만

장굴의 하위동굴에서는 이러한 다락구조가 관찰되지 않는다.

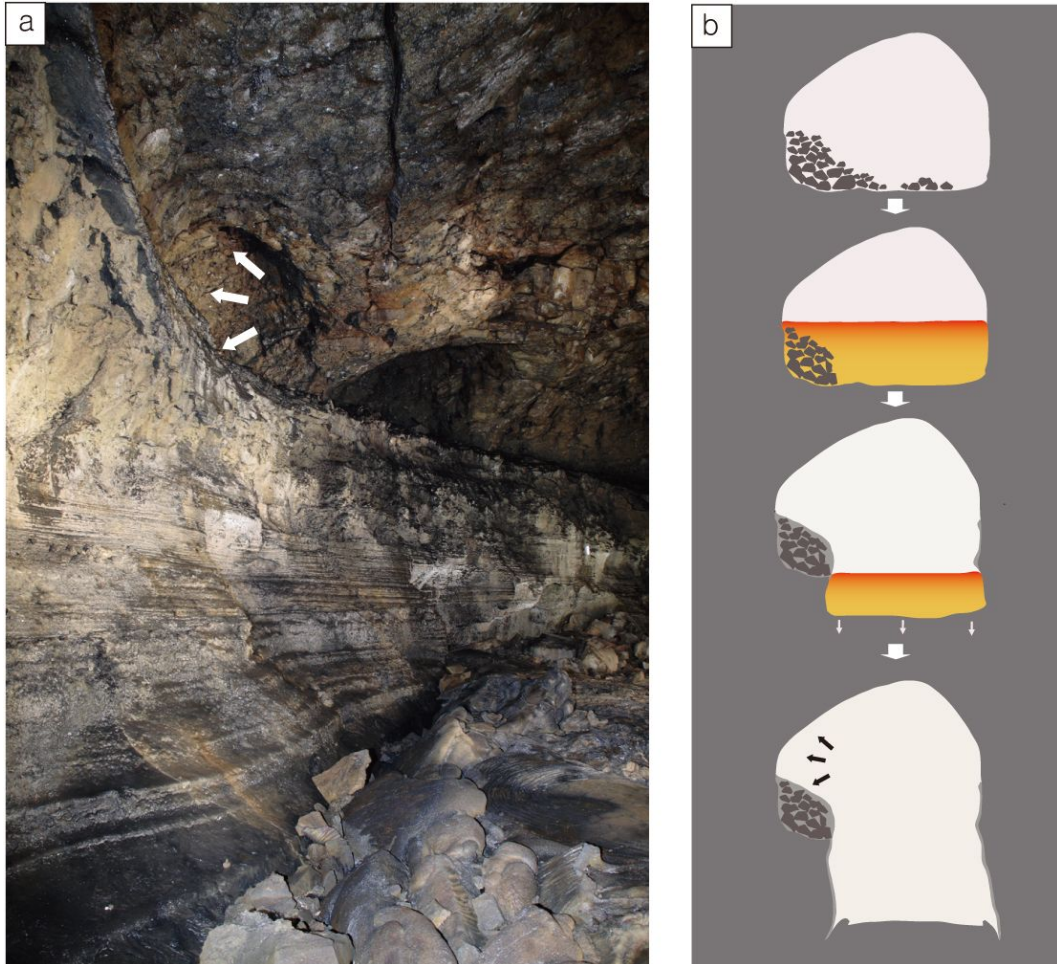


Fig. 2-36. (a) Alcove in the wall of upper level tube (white arrows). View is downstream. (b) Schematic cross sections illustrate successive stages of the narrowing of lava passage by collapse and the development of alcove by differential erosion. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L25).

4.1.26. 동굴바닥 보다 높이 있는 윗가지굴(L26)

윗가지굴은 3입구로부터 하류로 약 3,540 m 거리의 T6 부분에 잘 나타난

다(L26 in Figs 2-8 and 2-9). 이 부분은 Fig. 2-37에서와 같이 하위동굴 바닥에서 상위동굴 천장까지의 높이가 20 m이며, 상위동굴과 하위동굴 각각의 천장높이가 약 10.5 m, 약 5 m이다. 상·하위동굴 사이의 용암층의 두께는 약 4.5 m이다.

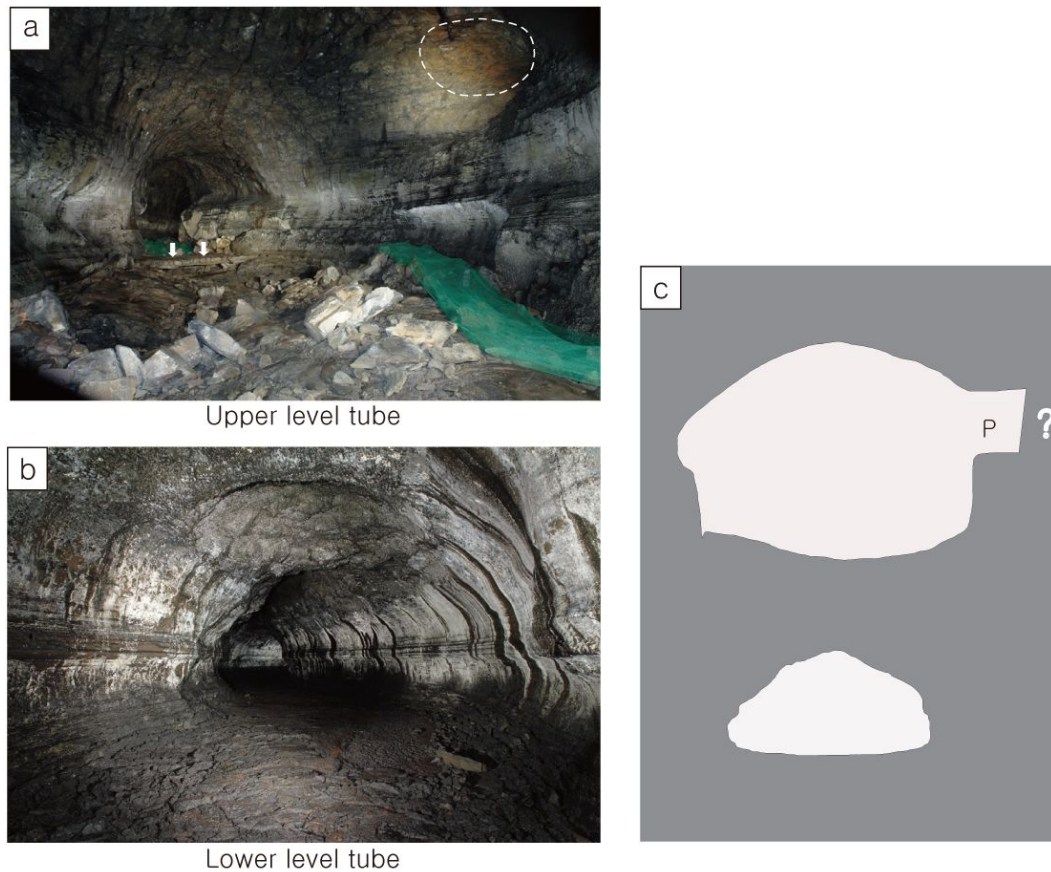


Fig. 2-37. Perched tube in the wall of upper level tube. View is downstream. (a) Perched tube (dashed line), bridge (arrows) and breakdown are shown in upper level tube. Of note is the fact that the perched tube is above the floor and found at ceiling level. (b) Cross section of semi-elliptical lower level tube with level floor and gravitational stretching cracks on floor. (c) Cross section of multi-level tube drawn to scale based on survey data. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L26).

상위동굴의 벽면상단에 윗가지굴이 관찰되며(점선), Fig. 2-37a의 중앙우측에는 소규모의 용암교(화살표)가 관찰된다. 상위동굴에서는 동굴폭이 좁아지는 구간에서 용암표층부가 굳어서 형성된 용암층이 붕괴되지 않고 남아 용암교의 형태로 흔히 관찰된다. 대체로 상위동굴이 하위동굴보다 폭이 더 넓고, 폭의 변화도 심하며, 하위동굴과 달리 천장이나 벽면에서 떨어진 낙반이 많다(Allred and Allred, 1997).

만장굴에서는 이 부분에서만 전형적인 윗가지굴이 관찰되는데 비해, 거문오름 용암동굴계의 주간동굴선(안용산과 황상구, 2009) 상에서 하류에 위치하는 용천동굴에는 전형적인 윗가지굴이 3곳에서 관찰된다(문화재청, 2005; 제주특별자치도, 2009). 이러한 윗가지굴은 만장굴의 경우 상위동굴에서만 관찰되며, 용천동굴의 경우 상·하위동굴로 나뉘지지 않은 구간에서 바닥보다 높은 곳에 위치하는 것으로 미루어보아, 그 형성에 관하여 두 가지의 경우를 생각할 수 있을 것이다. 먼저 초기 용암류가 지표를 흘러가면서 여러 갈래(통로)로 갈라져 흘러가면서 몇 가닥의 소규모 초기용암동굴이 형성되고, 시간이 지나면서 여러 갈래의 용암동굴 중 우세한 통로로만 지속적으로 용암이 흘러가면서 용암에 의해 침식되어 그 바닥면이 깊어지게 되고, 상대적으로 용암이 흘러가지 않는 곳은 고립되어 천장 높은 곳에 가지굴의 형태로 남게 되는 경우이며, 다른 하나의 경우는 만장굴이나 용천동굴을 형성하는 용암류 이전에 형성된 용암동굴이 존재하였고, 이후 만장굴~용천동굴라인을 형성한 용암류가 흘러가면서 새로운 용암동굴이 만들어지고 용암의 침식작용에 의해 서서히 아래로 성장해 가면서 기존의 용암동굴을 절단하는 경우를 생각할 수 있다. 만약 두 번째의 경우와 같은 과정을 거치게 된다면 아마 동굴 내를 흘러가는 용암은 기존 용암동굴로 흘러들어 쉽게 이동하게 되었을 것이며, 그 결과 용천동굴의 경우에서와 같이 뚜렷한 형태로 윗가지굴이 남아있지 않을 것으로 추측된다. 또한 용천동굴과 같이 지표 아래에 상대적으로 얕은 곳에 형성된 용암동굴에서 윗가지굴을 기존에 이미 있었던 용암동굴의 잔재구조로 보기에 어려움이 있을 것이다. 이러한 이유로 만장굴이나 용천동굴에서 관찰되는 윗

가지굴은, 용암동굴의 형성초기에 형성된 여러 갈래의 소규모 동굴들이 계속적인 용암흐름에 의한 침식으로 아래로 성장해 가는 과정에서 남은 잔재물로,



Upper level tube



Lower level tube

Fig. 2-38. V-shaped deflated floor in upper level tube. View is downstream. (a) V-shaped deflated floor and the gutter between inflated floor and adjacent wall, which indicate early lava inflation and later deflation during the development of upper level floor. (b) Furrowed ceiling formed through detachment of ceiling linings. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L27).

용암에 의한 침식을 지시하는 뚜렷한 증거로 여겨진다.

하와이 카주무라 동굴의 경우에서도 용암동굴이 그 내부를 지속적으로 흘러가는 용암에 의해 아래로 침식되어 성장해 간 것으로 조사되었으며, 여러 지점에서 윗가지굴들이 기재된 바 있다(Allred and Allred, 1997, 2002).

4.1.27. 상위동굴에서의 용암상승과 하강(L27)

용암상승과 하강은 3입구로부터 하류로 약 3,580 m 거리의 T7 부분에서 상위동굴에 잘 나타난다(L27 in Figs 2-8 and 2-9). 이 부분은 Fig. 2-38에서와 같이 하위동굴 바닥에서 상위동굴 천장까지는 약 20 m이며, 상위동굴과 하위동굴 각각의 천장높이는 약 11.3 m, 약 5.8 m이다. 상·하위동굴 사이의 용암층의 두께는 약 2.9 m이다. 상위동굴

바닥은 V자 형태로 아래로 내려앉아 바닥 높이의 변화가 심한데 비해, 하위동굴은 바닥높이의 변화 없이 하류방향으로 아주 완만하게 경사져 있다(Fig. 2-38)(Zone c-9(0.5°) in Appendix 1). 상위동굴의 벽면과 바닥 사이에는 고랑이 관찰되는데, 이는 초기 상위동굴 바닥이 형성될 때 용암동굴 내부를 흘러가던 용암의 표층부가 굳고 서서히 상승하여 위로 볼록한 형태를 갖게 되고, 이후 용암의 배출이 우세한 환경에서 이미 굳은 용암표층이 서서히 아래로 내려앉으면서 V형태를 갖게 된 것으로 추측된다. 하위동굴의 천장에 발달한 홈은 용암동굴 천장에 부가된 안도배가 떨어져나가고 남은 구조로, 떨어져 내린 암괴들은 용암에 의해 하류로 떠내려 간 것으로 추측된다(Allred and Allred, 1997; Kauahikaua et al., 1998).

4.1.28. 상위동굴 바닥의 하강(L28)

동굴 바닥의 하강은 3입구로부터 하류로 약 3,640 m 거리에 해당하는 T9 지점의 상위동굴에서 잘 나타난다(L28 in Figs 2-8 and 2-9). 이 지점에서 하위동굴 바닥에서 상위동굴 천장까지의 높이는 약 19.7 m이며, 상위동굴의 가장 높은 바닥에서 천장까지는 약 8.9 m이고, 하위동굴의 바닥에서 천장까지는 약 2.6 m이다(Fig. 2-39). 상위동굴은 통로가 좁은 곳에서 용암표층이 굳어서 형성된 용암층이 잘 보존되어 있으며, 상류방향으로 통로가 넓어지면서 용암층이 아래로 내려앉은 구조를 관찰할 수 있다(Fig. 2-39a). 상위동굴 최상부 바닥면 아래에는 2~3매의 용암층이 부분적으로 남아 있는데, 이들 용암층은 기공이 많은 것이 특징이다. 이러한 여러 매의 용암층은 용암동굴 내에서 용암의 수위가 일정하게 유지되는 여러 단계에 용암수위에 따라 여러 용암층이 형성되었으며, 이후 많은 부분들이 붕괴되어 하류로 떠내려가고 그 일부분이 남은 것임을 유추할 수 있다. 하위동굴은 반타원체 단면을 보이며, 사진(Fig. 2-39b) 중앙부에 멀리 보이는 암괴더미는 용암이 완전히 용암동굴 내를 빠져나가고 난 후 천장을 이루는 안도배된 용암층이 무너져 쌓인 것이다. 하위동굴의 벽에 보이는 일직선상의 수평선들은 동굴 내로 흘러든 물의 높이

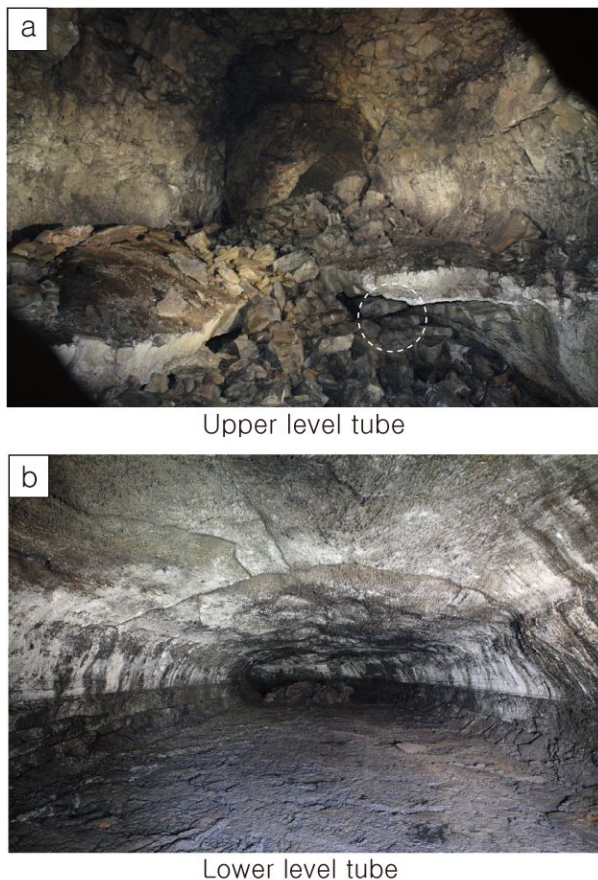


Fig. 2-39. Deflated floor in upper level tube. View is downstream. Deflated floor of upper level tube indicated by dashed-circle has vesicularity ratios of 29~34%. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L28).

않을 것으로 판단되며, 그 결과 서서히 내려앉는 용암층은 하위의 용암에 떠 있는 형태로 서서히 내려앉을 것으로 예상된다.

Hon et al.(1994)은 지표를 흘러가면서 서서히 팽창하는 시트상 용암류의 표면에 생기는 절리 내부에서 온도가 800~1070℃임을 측정하였는데, 이러한 온도 범위를 갖는 표층부(crust)는 점탄성(viscoelastic)의 특징을 보인다고 하

를 나타내는 것이다.

상위동굴 최상부층 아래의 용암층(점선원)에서 시료 4개를 채취하여 점셈법(counting point)으로 기공함량을 측정한 결과, 기공체적이 29~34%에 달하여, 기공을 가지지 않는 용암의 비중을 3(Swanson, 1973)으로 가정했을 때, 측정한 용암층의 비중은 1.98~2.13으로 계산된다.

앞서 지점 8(L8)에서 살펴본 바와 같이 기공을 다량 함유한 용암층이 형성되고 자체의 하중을 견뎌낼 만큼 강도를 가지기 전에 용암의 수위가 하강할 경우, 용암층은 아래로 서서히 내려앉게 될 것이다. 이때 아래로 내려앉는 용암층의 비중은, 앞에서 기공체적 측정을 통해 계산된 바와 같이, 하위를 흘러가는 용암의 비중에 비해 크지

였다. 이들은 시트상 용암류의 상부 표층부(crust)를 3개 층으로 구성되었다고 하였다. ①상부표층부의 가장 아래 부분은 매우 점성이 높은 용암으로 용암류의 액체상 중심부(liquid core)와 그 상부의 고화된 암층(②)과의 사이 부분이고, ②중간 부분은 고화된 암층으로 그 온도가 800~1070℃이며 점탄성적 특징을 보이는 부분으로, 상부 표층부의 강도는 이 부분에 의해 결정되며, ③가장 바깥쪽 표면부는 온도가 더 낮아, 상승하는 동안에 취성적(brittle)으로 깨어지는 부분으로 작은 강도를 가진다고 하였다.

동굴 내부 환경에서도 지표에서와 마찬가지로 용암의 온도가 내려감에 따라 용암의 표층부에 새로운 용암층이 형성되는데, 이는 곧 그 아래를 흘러가는 용암의 열손실을 막아주는 역할을 함(Allred and Allred, 1997)과 동시에 형성된 용암층은 강도를 가지게 된다. 그러나 이러한 용암층은 강도가 충분히 커지기 전에 하류를 흘러가는 용암의 수위가 하강하게 되는 경우에는 단순히 취성적으로 부서지기보다는, 어느 정도 점탄성적으로 행동하여 서서히 내려앉게 되고, 진행과정에서 자체하중을 견뎌낼 정도의 강도를 갖게 되면 용암수위의 하강에 더 이상 영향을 받지 않고 아래로 내려앉은 형태를 그대로 유지한 상태로 남게 될 것이다.

상위동굴 바닥에서 아래로 내려앉은 침하구조들은 용암 표층부에 생성되는 용암층의 이러한 물리적 특징을 반영하는 것으로 판단된다.

4.1.29. 용암의 부가와 부가층간 주입(L29)

용암부가층 간의 주입은 3입구로부터 하류로 약 3,700 m 거리의 T10 지점에서 잘 관찰된다(L29 in Figs 2-8 and 2-9). Fig. 2-40은 이 지점에서 상위동굴과 하위동굴을 찍은 사진으로(상류방향 촬영), 하위동굴 바닥에서 상위동굴 천장까지는 약 18 m이며, 상위동굴의 가장 낮은 바닥에서 천장까지는 약 10.6 m이고, 하위동굴의 바닥에서 가장 낮은 천장까지는 약 2.4 m이다. 이 지점은 상·하위동굴 사이의 용암층이 가장 얇은 곳으로 그 두께는 약 1.8 m이다. 하위동굴에서는 용암부가현상과 이미 형성된 여러 겹의 안도배 사이

틈으로 용암이 주입된 구조가 잘 관찰된다(Figs 2-40 and 2-41).

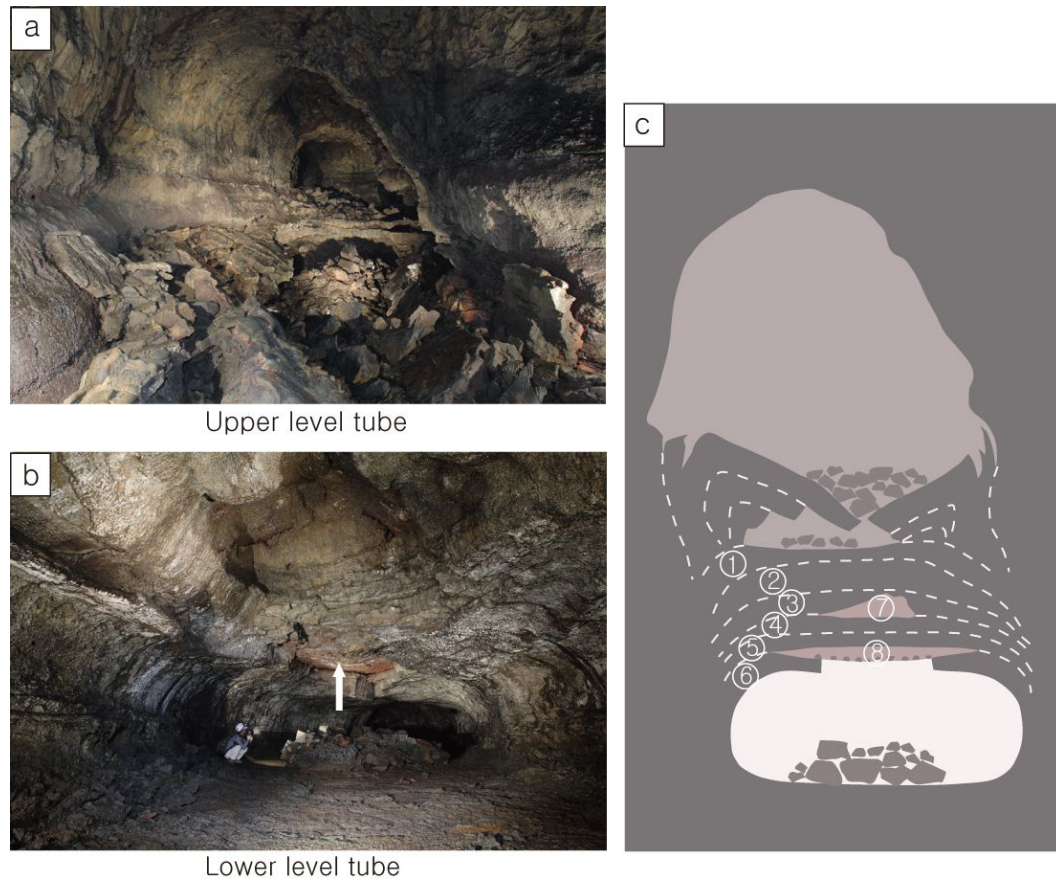


Fig. 2-40. Lava accretion and the injection of lava into gaps between superposed linings. Photographs (a), (b) were respectively taken at location (L29) in upper and lower level tubes. View is upstream. (b) Injected lava (arrow) is shown in Fig. 2-41. c) Numbers in schematic cross section of upper and lower level tubes indicate successive downward lava accretion (①~⑥), and the lava injected into the gap between linings (⑦, ⑧). See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L29).

Fig. 2-40에서 관찰되는 여러 내부구조들을 재구성해보면, 하위동굴의 초기

천장이 생성된 후 계속적으로 그 하위에 새로운 용암층(①, ②, ③)이 생성되면서 하위동굴 천장이 생성되었다. 이후 용암층(③)의 하부가 떨어져나가 하류로 떠내려가 천장이 오목하게 들어간 구조가 만들어졌다. 뒤이어 용암공급의 지속, 하류 막힘 등으로 인해 용암수위가 다시 높아져 용암층(④, ⑤, ⑥)이 추가로 만들어진다. 이러한 과정에서 상류에서 부가층이 떨어져 나간 부분을 통해 이미 형성된 용암층과 용암층 사이로 용암이 주입되어, 부가층(③, ④, ⑤, ⑥)과는 부조화적인 용암층(⑦, ⑧)이 존재하게 된다. 주입용암체(⑦)의 경우 주변 용암층(③)과 ④와 나란하지 않고 단면상에서 볼록한 형태를 띠어, 천장의 부가층이 떨어져 나간 공간을 채웠음을 알 수 있고, 주입용암체(⑧)의 경우 하부에서 보면 주입체 바닥면에 암편들이 용암 내부에 박혀 있는데(Fig. 2-41), 이는 주입체가 부가층 사이의 틈을 주입하기 이전에 부가층 상위에 떨어져 있던 암편들이 용암이 주입될 때 함께 포획된 것으로 판단된다.



Fig. 2-41. Small blocks surrounded by injection of lava between lining ⑤ and ⑥ of Fig. 2-40b. View is upward toward bottom of injection ⑧ (arrow) in Fig. 2-40b.

4.1.30. 상위동굴과 하위동굴(L30)

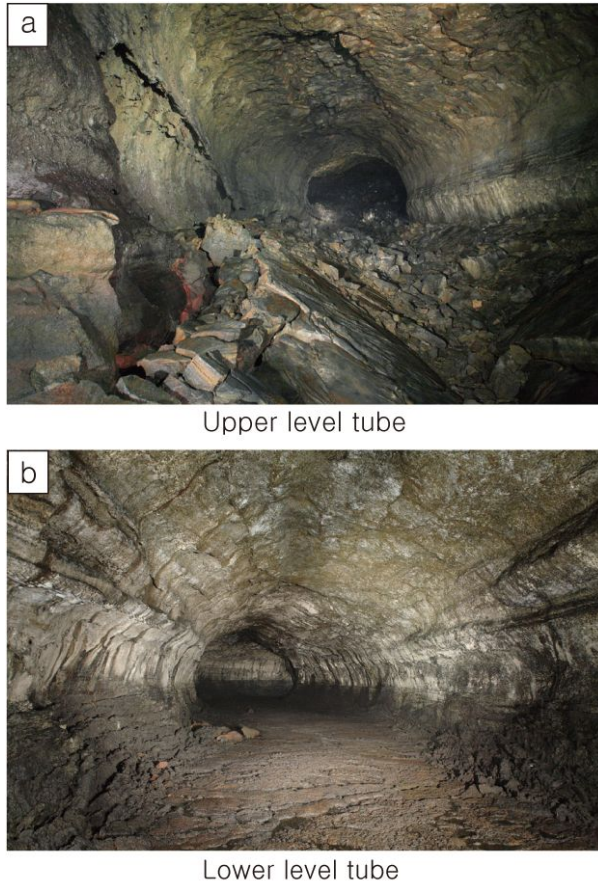


Fig. 2-42. Upper and lower level tubes. View is downstream. In left foreground of photograph (a), we can see the contact between the accreted lava and the previously formed upper level tube's wall by the collapse of accreted linings. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L30).

같은 위치에서 상위동굴과 하위동굴의 차이는 3입구로부터 하류로 약 3,700 m 거리의 T10 부분에서 현저하다(L30 in Figs 2-8 and 2-9). Fig. 2-42는 상위동굴과 하위동굴의 같은 지점에서 찍은 사진으로(하류방향 촬영), 하위동굴 바닥에서 상위동굴 천장까지는 약 19 m이며, 상위동굴의 가장 낮은 부분에서 천장까지는 약 11 m이고, 하위동굴의 바닥에서 천장까지는 약 5 m이다. 상·하위동굴 사이의 용암층의 두께는 약 3 m이다. 같은 지점에서 상위동굴 폭은 14 m, 하위동굴 폭은 8 m로 상위동굴이 훨씬 넓고 크다(Fig. 2-42). 상위동굴은 V자 형태로 동굴바닥이 대규모로 내려앉았으며 그 내려앉은 깊이는 대략 3 m이다. 상위동굴의 좌측에는 동굴바닥이 내려앉으면서 기존 동굴벽면이 노출되었

는데(Fig. 2-42a), 벽면은 검은색을 띠며 용암유선이 선명하게 그대로 보존되

어 있다. 이에 비해 벽면에 붙은 용암층의 바깥쪽 표면은 적갈색을 띤다. 이러한 접촉면은 상위동굴 바닥을 형성한 용암이 벽면에 직접 액체상태로 부가되기보다, 흘러가는 용암이 어느 정도 식어 얇은 표층이 형성된 이후, 서서히 표면이 상승되면서 이미 형성된 상위동굴 벽면의 형태에 맞물려 있는 것으로 추측된다. 하위동굴은 대체로 바닥이 평평한 찰흙 형태이다. 하위동굴 벽면하부와 바닥의 경계부에는 중력신장균열이 벽면을 따라 바닥면에 평행하게 발달하는데, 이는 용암동굴 내를 흘러가던 용암이 최후에 하류로 아주 낮은 속도로 배출되면서 용암 표층부에 가해진 인장력에 의해 생성된 균열로 여겨진다.

4.1.31. 용암교(L31)

용암교는 3입구로부터 하류로 약 3,800 m 거리의 T13 지점에서 잘 관찰된다(L31 in Figs 2-8 and 2-9). 이 지점에서 하위동굴 바닥에서 상위동굴 천장까지는 약 17 m이며, 상위동굴의 가장 낮은 바닥에서 천장까지는 약 9.6 m이고, 하위동굴의 바닥에서 천장까지는 약 4 m이다. 상·하위동굴 사이의 용암층의 두께는 약 3.3 m이다. 상위동굴에 있어서 용암교 부분의 동굴폭은 6.4 m로 하위동굴의 같은 지점 8.4 m보다 폭이 좁다. 상위동굴에서 가장 상위의 용암교는 위로 불록하게 휘어져 있으며, 용암교의 상류와 하류의 벽에는 용암교의 높이와 나란하게 용암층이 있었던 흔적이 남아 있다. 용암교의 연장선상에 놓이는 용암층은 아래로 내려앉아 동굴 중앙부로 급하게 기울어져 있으며, 이들 표면은 모두 파호이호이 구조를 보인다. 동굴바닥면이 내려앉은 벽면에는 찰흔구조가 관찰된다(Fig. 2-43). 이러한 용암교와 용암층의 하강구조는 용암층의 형성 그리고 그 하위의 용암배출에 의한 용암층 붕괴 및 이동으로 이러한 구조가 형성된 것으로 여겨진다. 하위동굴의 천장에는 얇은 용암층이 양과깍질처럼 붙어 있는데 이는 용암동굴 내부를 흘렀던 용암이 용암천장에 부가되어 만들어진 안도배로, 용암동굴 내의 용암수위 하강 혹은 화산활동 휴지기에 이러한 용암층들은 쉽게 붕괴되어 떨어져 나가기도 한다(Kauahikaua et al., 1998). 현재 하위동굴에서 관찰되는 낙반들은 화산활동

이 종료된 이후 용암이 완전히 배출된 후에 천장에서 떨어진 것이다(Fig. 2-43b).

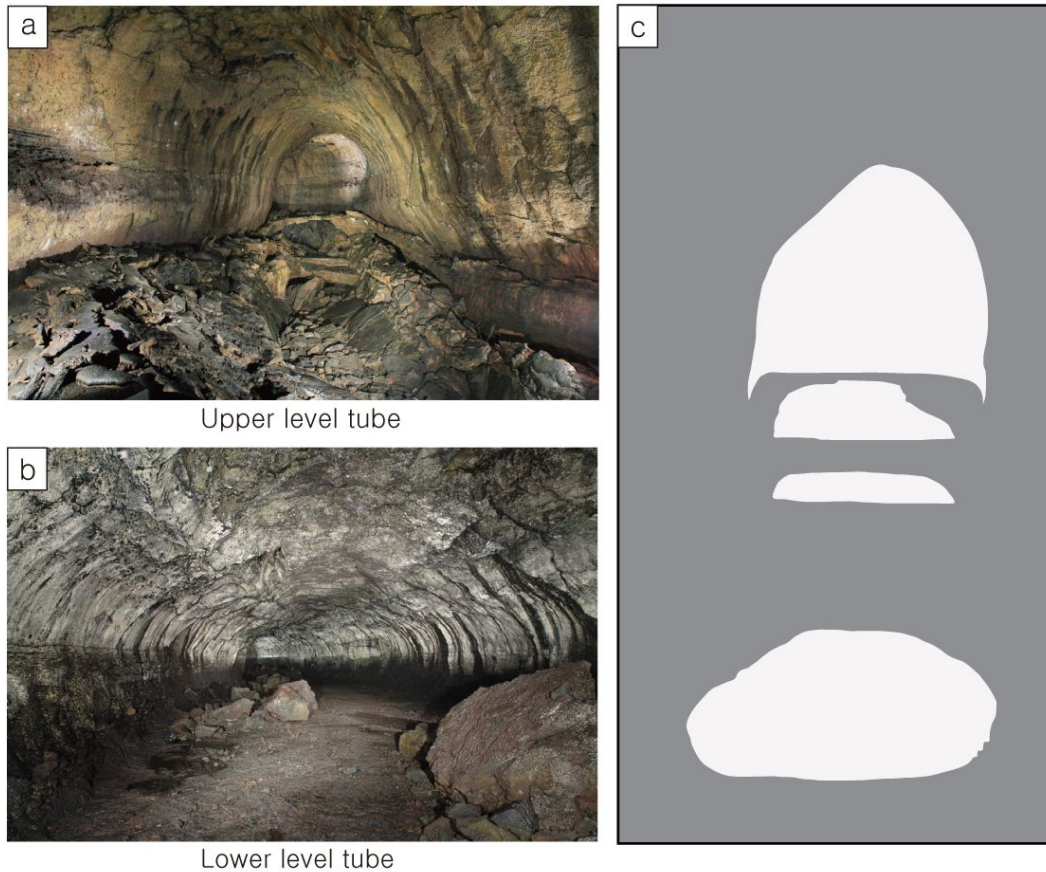


Fig. 2-43. Lava bridge in upper level tube. View is downstream. (a) There are two lava bridges, one above and one below, and the remnants of the uppermost accreted lava layer deflated to the medial portion of floor. The remnants of lava layer are aligned with the top of the lava bridge. (b) Lining collapsed from ceiling like the peel of an onion. (c) Cross section of multi-level tube drawn to scale based on survey data. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L31).

4.1.32. 용암동굴 내의 용암수위(L32)

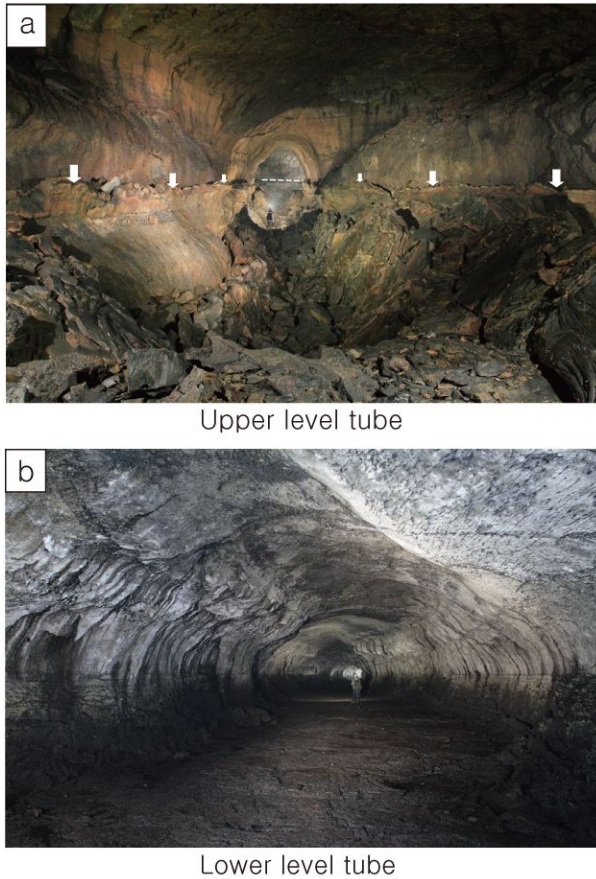


Fig. 2-44. Lava level in lava tube. View is upstream. Photograph (a) shows the lava bridge (dashed line) in background and the protruded remnants of the lava layer (arrows) which indicate the level of lava which flowed through the tube. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L32).

동굴 내의 용암수위를 지시하는 구조는 3입구로부터 하류로 약 3,880 m 거리의 T15 부분에서 잘 관찰된다(L32 in Figs 2-8 and 2-9). Fig. 2-44는 상·하위동굴의 전경(상류방향 촬영)으로, 하위동굴 바닥에서 상위동굴 천장까지는 20 m에 달하며, 상위동굴과 하위동굴의 천장높이는 각각 약 13 m, 약 4 m이며, 상위동굴과 하위동굴 사이의 용암층의 두께는 약 3 m이다. 지표에서 상위동굴 천장까지의 거리는 약 3 m 정도로, 만장굴에서 천장두께가 가장 얇은 부위에 해당한다. 상위동굴의 바닥높이는 불규칙하며, 가장 높은 지점은 대부분 용암교의 형태를 띤다. 멀리 용암교(점선)가 보인다(Fig. 2-44). 이 용암교는 한때 용암동굴을 채웠던 용암의 높이를 지시하는 것이다. 상위동굴 중앙부에 수평으로 벽면에 붙어 있는 돌

출구조는 용암교와 연장선상에 놓이는 것으로 과거의 용암수위를 지시한다. 용암교 및 용암교와 연장선상에 놓이는 돌출구조에서 내려앉은 동굴바닥까지

의 높이 차이는 약 3.6 m이다. 이는 최초 상위동굴 바닥을 형성한 용암의 수위가 최소한 3.6 m 이상 서서히 내려갔음을 지시한다.

4.1.33. 용암상승과 압출(L33)

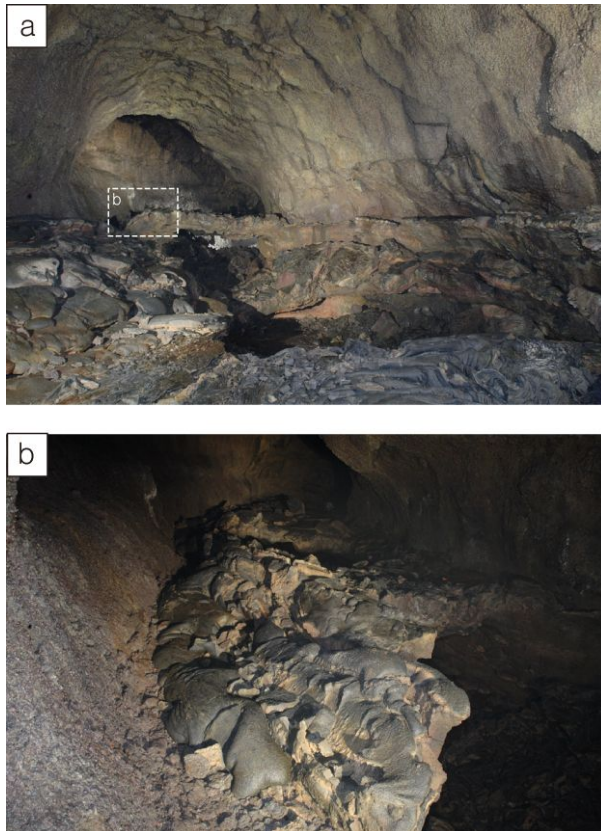


Fig. 2-45. Out-squeezing lava in upper level tube. View is downstream. (a) Lava bridge with convex surface showing lava inflation during the formation of upper level tube's floor. (b) Close-up of inset b in Fig. 2-45a. Out-squeezing lava flows to the gutter. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L33).

용암압출은 3입구로부터 하류로 약 3,910 m 거리의 T16 부분에서 잘 관찰된다(L33 in Figs 2-8 and 2-9). 이 부분에서 상위동굴 천장에서 상위동굴의 가장 상부 바닥면까지의 높이는 약 3.4 m이다(Fig. 2-45a). 상위동굴 표면은 밧줄구조가 발달해 있으며, 바닥 중앙부가 위로 볼록하게 된 용암상승 구조가 흔히 관찰된다(Fig. 2-45a). 이는 용암의 지속적인 유입 혹은 하류의 막힘 등의 이유로 용암의 수위가 일정하게 유지되는 기간에 용암의 표층이 굳은 후에 용암수위의 상승에 따라 내부 압력증가로 서서히 밀려 올라가 생성된 구조로 여겨진다. 특히 위로 볼록한 동굴바닥과 벽면사이에는 용암발가락(lava toe : Fig. 2-45b)이 관찰되는데, 이는 용암표층 아래의 압력증가로 틈

을 따라 비집고 올라온 용암압출과 연결되어 있다. 이후 용암공급보다 배출이 우세한 환경에서 이미 굳은 용암층은 남게 되고, 용암수위는 낮아져 1.7 m 아래에 또 다른 하위층이 형성되었다. 이 지점으로부터 30 m 하류에는 3.5 m 낮은 새로운 상위동굴바닥이 관찰되는데 표면은 붉은색이며 아아의 특징을 보인다(See Fig. 2-47).

4.1.34. 찰흔(L34)



Fig. 2-46. Grooves or striae on wall in upper level tube. View is downstream. Lava layers ①, ② formed successively through a decreasing lava level. Inclined striae on wall formed when the established lava layer ① subsided along the plastic wall of the tube. Thereafter, the lower lava layer ② formed according to conditions of the lower lava level that flowed through the tube. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L34).

찰흔은 3입구로부터 하류로 약 3,960 m 거리의 T18 지점에서 잘 관찰된다. T17 지점에서 T18 지점으로 진행하면서 상위동굴 천장이 갑자기 낮아지

며, 동굴의 폭도 좁아지는 부분이다(L34 in Figs 2-8 and 2-9). 동굴바닥에서 천장까지의 높이는 약 1.8 m이다. 좁은 지점에서 두개의 용암층(①, ②)이 관찰된다. 용암층(①)은 상대적으로 동굴벽의 상부에 위치하며, 동굴 중앙부로 기울어져 있으며, 또 다른 조각으로 나뉘어져 있으며, 표면에는 파호이호이 구조가 관찰된다. 이에 비해 용암층(②)은 벽면의 하부에 위치하며, 수평으로 벽면에 부가되어 있으며, 표면에는 붉은 주황색을 띠는 아아 구조가 관찰된다(Fig. 2-46).

이 지점에서와 같이 상위동굴의 좁은 통로에는 용암의 표층부가 굳어서 생성된 용암층들이 상대적으로 잘 남아있는 특징이 있다. 이 지점에서 관찰되는 2개의 용암층의 생성순서를 살펴보면 Fig. 2-46과 같다. 동굴 내부를 흘러가는 용암표층이 식어 용암층(①)을 형성하고, 이후 용암수위의 하강에 의해 용암층(①)이 아래로 내려앉았으며, 이후 흘러온 용암이 새로운 용암층(②)을 만들었다. 용암층(②)을 형성한 용암이 흘러올 당시 혹은 이전에, 용암층(①)의 일부분은 중력과 용암흐름에 의해 하류로 쓸려 내려갔다. 사진(Fig. 2-46)의 점선부분에는 찰흔이 사선으로 발달해 있는데, 이는 용암층(①)의 일부분이 용암동굴 벽면을 따라 미끄러져 내려간 증거로, 끌려 내려간 용암층(①)은 용암층(②)을 형성한 용암류에 의해 하류로 쓸려 내려간 것으로 해석할 수 있다. 이 단면은 생성된 용암층이 용암수위의 하강에 따라 아래로 내려앉더라도 용암동굴 벽면과의 관계에 의해 그 행태를 유지하면서 일정한 높이에 고정되어 유지됨으로써 흘러가는 용암류에 의해 완전히 떠내려가지 않고 남아 있을 수 있다는 것을 보여주는 좋은 단면이다.

4.1.35. 상·하위동굴의 바닥 표면구조(L35)

동굴 바닥에서 특징적인 표면구조는 3입구로부터 하류로 약 3,970 m 거리의 T19 지점에서 관찰된다(L35 in Figs 2-8 and 2-9). 이 지점은 Fig. 2-47에서와 같이 상·하위동굴 바닥의 표면구조의 차이를 보여준다. 상위동굴의 바닥은 용암이 동굴 내를 흘러가면서 그 표면이 굳어 생성된 용암층으로

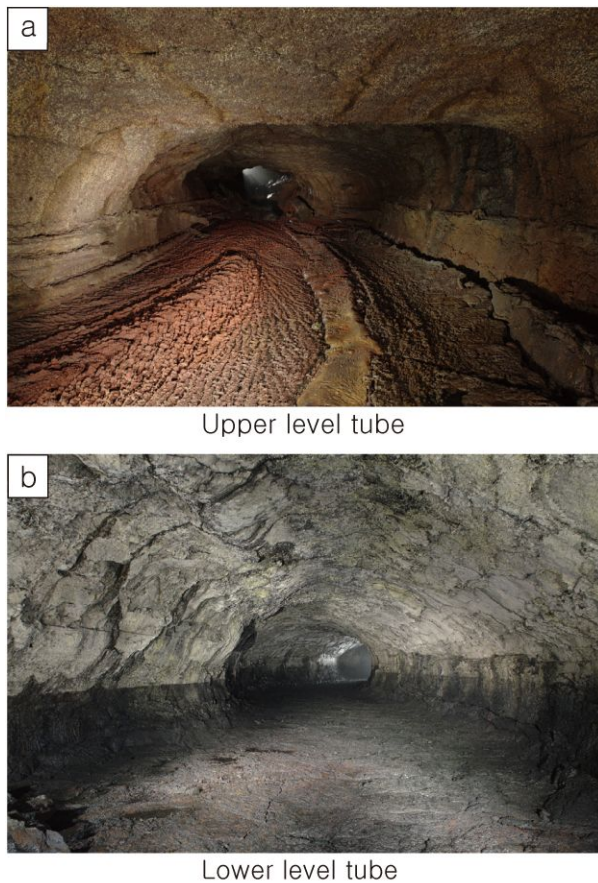


Fig. 2-47. Floor textures in upper and lower level tubes. View is upstream. (a) Cauliflower aa texture in upper level tube. (b) Cracks caused by gravitational stretching or tearing in lower level tube. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L35).

용암이 흘러가면서 생성되는 밧줄구조, 용암발가락, 용암상승과 침하구조 등과 같은 역동적인 구조가 관찰된다. 이에 반해, 하위동굴바닥에는 용암동굴 내의 용암흐름의 마지막 단계에 아주 느리게 흘러가거나 혹은 정지상태에서 표면이 굳고 그 아래의 용암이 서서히 빠져나가면서 생성된 표면당겨짐 혹은 쪼개짐 구조가 흔히 나타난다. 이는 만장굴의 바닥경사가 0.4도 이하로 아주 완만한 것과도 연관이 있다. 특히 이 구간의 상위동굴 바닥에는 다른 상위동굴 바닥에서 흔히 관찰되지 않는 양배추형 아아(cauliflower aa) 구조가 관찰되는데, 이는 용암 온도의 감소에 의한 요인보다는 동굴폭의 감소에 따른 용암 유속의 증가에 의한 전단변형의 증가에 의해 더 큰 영향을 받았을 것으로 여겨진다(Hon et al., 2003; Hon, 2007).

4.1.36. 용암동굴 내의 낙반흔적(L36)

낙반의 흔적은 3입구로부터 하류로 약 4,020 m 거리의 T21 지점에서 발견된다(L36 in Figs 2-8 and 2-9). Fig. 2-48은 상·하위동굴의 전경(상류방향 촬영)으로, 상위동굴 왼쪽벽면에는 2개의 돌출구조(화살표)가 관찰된다. 특히 이 지점(T21)의 상류인 T17지점에서부터 상위동굴 천장이 갑자기 낮아지고, 가지굴의 흔적이 관찰되며(Figs 2-8 and 2-9; Appendix 2), T17 부근에는 천장과 벽면이 무너진 벽면내부로 단일 암체가 아닌 암괴들이 쌓여 있는 것이 관찰된다. 이러한 특징들을 토대로 이 구간에서 일어난 과정들을 구성해보면, 상위동굴 천장과 상위동굴 바닥이 갑자기 맞닿는 T17 지점은 용암동굴의 형성과정에서 일시적으로 대규모 붕괴에 의한 낙반으로 동굴통로가 막혔던 지점으로, 동굴통로의 막힘 이후 상류에서는 용암의 수위가 상승하였을 것이며, 그 상부표층부가 식으면서 형성된 용암층이 현재의 상위동굴 바닥을 형성하였을 것이다(Fig. 2-49).

이후 용암은 용암동굴 내의 낙반이 쌓인 곳 중 상대적으로 낮은 부분을 넘어 계속해서 흘러갔으며, 이때 일부 작은 낙반들도 용암에 의해 하류로 이동되면서 다시 용암통로를 확보하였을 것이다. 어느 정도의 용암통로를 확보한 용암은 이후에도 지속적으로 흘러가면서 천장에는 용암을 부가시키고, 동굴바닥에는 침식을 일으켜 현재와 같은 상·하위동굴을 형성하게 된 것으로 추리된다(Fig. 2-48c). 이러한 이유에서 이 구간의 상위동굴은 다른 구간과는 달리 그 폭이 하위동굴의 폭보다 좁다. 이러한 전체적인 과정을 고려한다면 상위동굴 벽면에 부조화적으로 돌출되어 있는 암체는 붕괴된 낙반 잔재물로 멀리 이동되지 못하고 용암통로 가장자리로 밀쳐져 남은 것으로 추측된다(Fig. 2-48).

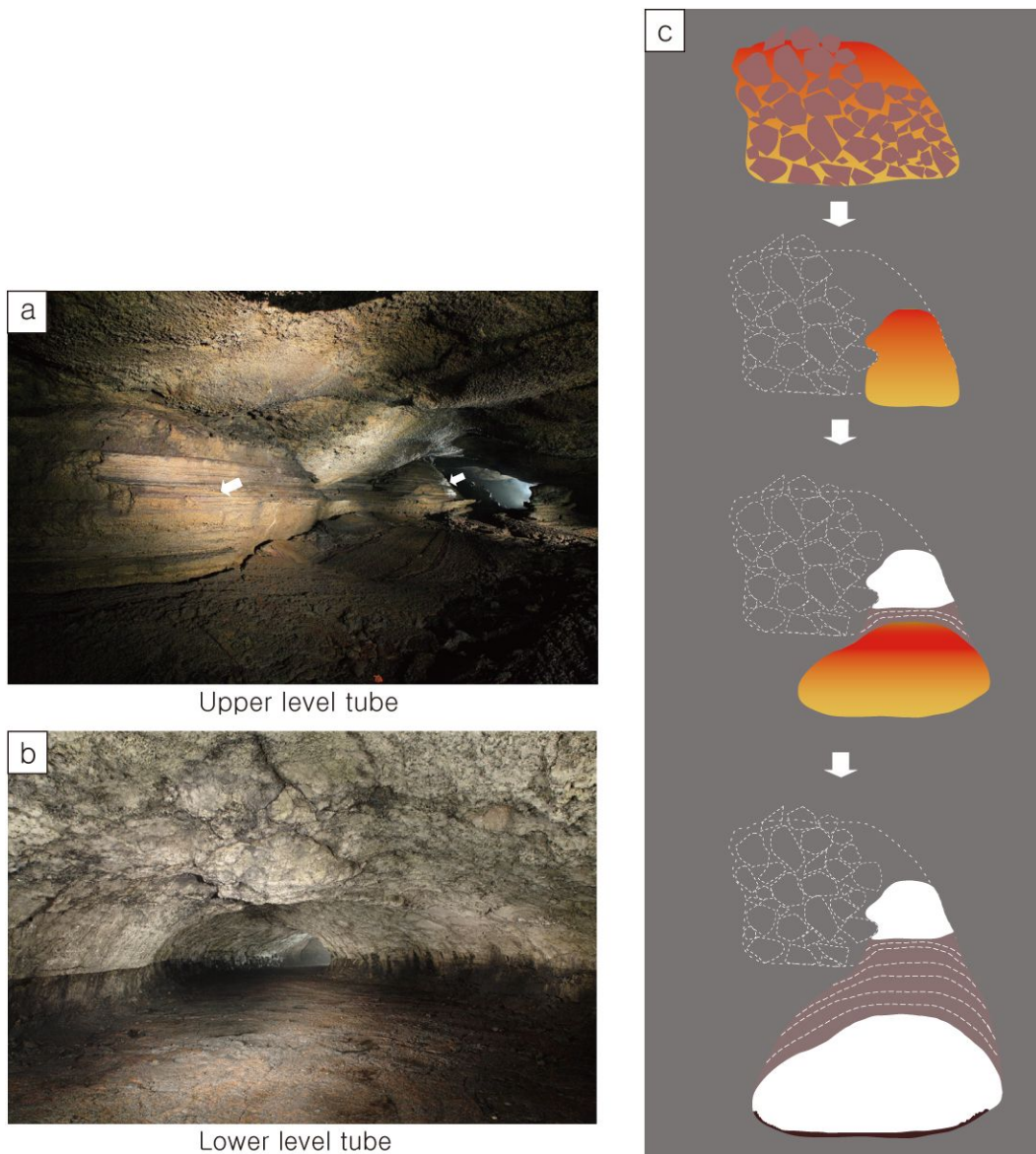


Fig. 2-48. Photographs (a) and (b) were respectively taken at location (L36) in the upper and lower level tubes. View is upstream. (a) Remnants of breakdown (arrows) on the left wall in upper level tube. (b) View of lower level tube at the same location. (c) Schematic cross section diagrams illustrate the successive stages of tube blockage by breakdown, the sweeping of blocks, the deepening of the floor by lava erosion, and the lowering of the ceiling by lava accretion. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L36).

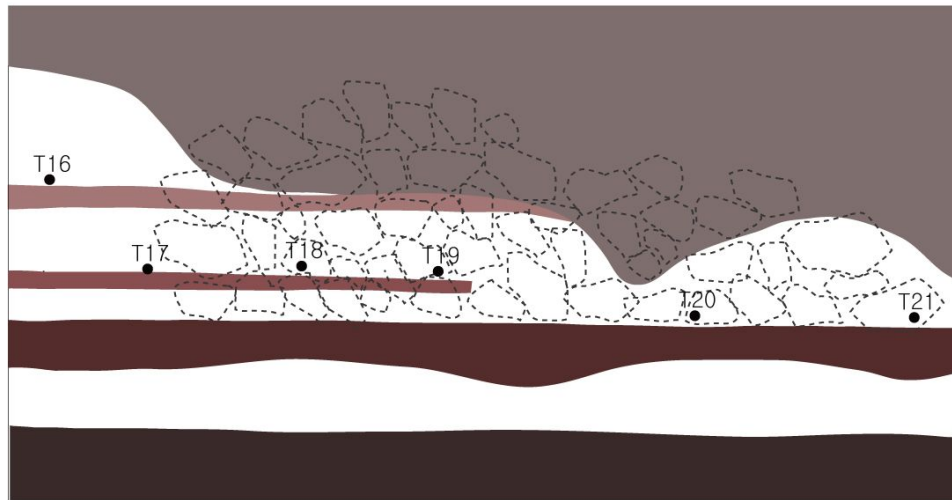


Fig. 2-49. Schematic longitudinal section from T16 to T21. See Fig. 2-8 and 2-9 for location.

4.1.37. 용암두루마리(L37)

용암두루마리는 3입구로부터 하류로 약 4,200 m 거리의 하위동굴 P20 부분에서 잘 나타난다(L37 in Figs 2-8 and 2-9). 이 부분에서 동굴벽과 바닥의 경계부에서 용암두루마리(scroll or lava roll)가 관찰되는데, 앞쪽으로는 두 겹의 용암두루마리가 그리고 뒤쪽으로는 한 겹의 용암두루마리가 관찰된다(Fig. 2-50). 두 겹의 용암두루마리는 벽면에 부가되었던 두 겹의 안도배가 순차적으로 변형되어 만들어진 것이며, 한 겹의 용암두루마리는 두 겹의 안도배 중 나중에 부가된 안도배만이 변형되어 용암두루마리를 형성하고, 먼저 부가되었던 안도배는 그대로 벽면에 붙어 있다. 두 겹의 용암두루마리가 형성된 부분의 벽에는 흔히 용암두루마리의 윗면과 용암두루마리가 떨어져 나온 벽면 부에는 용암기포, 용암곡석, 점적석 등이 많이 관찰되는데, 이는 용암이 중력에 의해 벽면에서 떨어져 나올 때, 그 내부에 압력이 해소됨에 따라 기체성분이 팽창하면서 생성된 것으로 여겨진다. 용암동굴 내의 용암은 그 표면과 벽면 경계면에서부터 서서히 식어가게 된다(Allred and Allred, 1997). 천천히 온도가 내려가면 일정한 온도범위(Hon et al., 1994; 800~1070℃)에서 용암

은 점성과 탄성을 가지는 점탄성체의 성격을 갖게 되며, 이러한 조건에서 용암의 수위가 낮아지면 벽면에 부가되었던 용암 한 켠이 벗겨지면서 아래로 휘어져 감김으로서 용암두루마리를 형성하게 된다(Greely, 1971; Larson, 1993).



Fig. 2-50. Scroll in lower level tube. View is upstream. Wall lining deformed plastically and curled away from the wall to the floor. See Fig. 2-8 and 2-9 for location(L37).

4.1.38. 상·하위동굴 사이의 용암층 붕괴(L38)

대규모 용암층 붕괴는 3입구로부터 하류로 약 4,270 m 거리의 P21 부분에서 일어났다(L38 in Figs 2-8 and 2-9). 이 부분에서 하위동굴 지붕이 붕괴된 창구조를 통해 암석더미를 올라서면 상위동굴로 진입할 수 있다(Fig. 2-51). Fig. 2-51a는 창구조 지점에서 상위동굴 내부를 상류방향으로 촬영한 전경으로, 상위동굴은 하위동굴에 비해 규모가 크고, 천장과 벽면이 붕괴된 낙반들이 많다. 또한 상위동굴의 벽면에는 용암이 흘렀던 높이를 지시하는 수평의 돌출된 용암부가구조가 관찰되는데, 그 아래에는 벽면에서 붕괴되어 아래

로 주저앉은 용암층들이 급경사면을 이루고 있다(Fig. 2-51c).

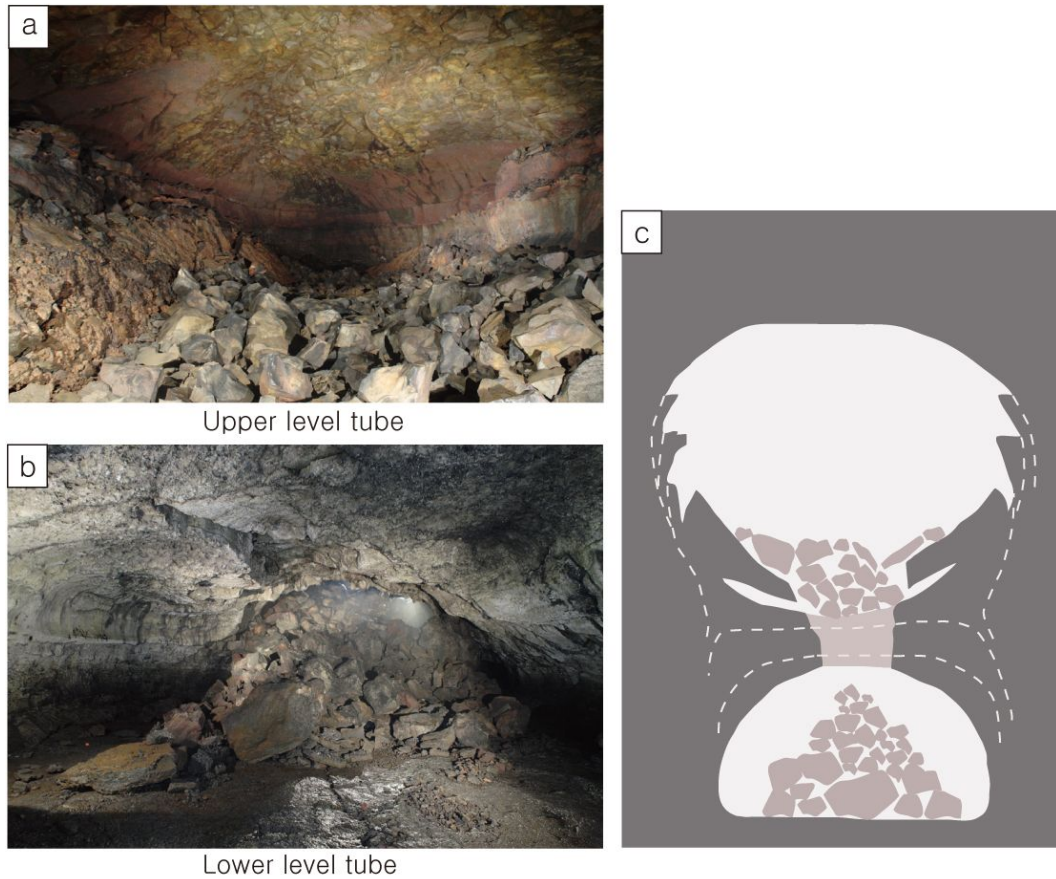


Fig. 2-51. Window between upper and lower level tubes created through collapse of lower level roof. View is upstream. (a) Upper level tube can be followed upflow for about 100 m, to where it narrows to about 15 cm in height. The weak protruded remnants of a lava level are in the back, perched above the floor. (b) Collapsed blocks heaped up on the floor in lower level tube, 2 m high. See Fig. 2-8 and 2-9 for location (L38).

창구조 지점을 기준으로 상위동굴은 상류방향으로 발달해 있으나, 하류방향으로는 완전히 막혀 있다. 상위동굴의 천장은 창구조로부터 상류방향으로 100

여 m 지점에서 갑자기 낮아져 15 cm 정도의 좁은 수평 공간으로 변한다. 이렇게 좁아지는 지점은, 상위동굴 T21로부터 하류 방향으로 200여 m 떨어진 지점으로, 더 이상 진입할 수 없을 정도로 천장이 낮아지는 부분이지만 상류 방향으로 연결되어 있다(북제주군, 2003). 하위동굴의 천장높이는 약 2 m이다.

다층구조가 잘 관찰되는 2입구에서부터 하류방향으로 약 900여 m에 위치하는 현 지점까지의 여러 내부구조를 종합해 보면, 상·하위동굴을 나누는 용암층은 한 번에 만들어진 단일 용암층이라기보다는 용암동굴 내를 흘러가는 용암의 수위가 변화함에 따라 형성된 여러 겹의 용암층으로 이루어져 있음을 알 수 있다.

4.2. 상·하위동굴의 내부구조 비교

만장굴 3입구에서 1입구까지의 가장 하위동굴의 측정거리는 약 4.5 km이며, 이중 3입구에서 하류방향으로 1,150 m, 2입구에서 하류방향으로 900 m에 이르는 구간은 상위동굴이 발달한 전형적인 다층구조를 보인다(안웅산, 황상구, 2008). 다층구조가 관찰되는 두 구간 중 접근이 용이하고 연장성이 좋은, 2입구에서 하류방향으로 600 m 구간에 대하여 상위동굴과 하위동굴의 특징을 정리하였다.

이 구간에서 상위동굴 바닥은 대체로 밧줄구조가 잘 관찰되고(Fig. 2-52a), 동굴통로의 가운데 부분이 불룩하게 부풀어 올랐거나, 혹은 V자 형태로 내려앉은 불규칙한 형태를 띠며(Figs 2-52b and 2-53), 벽과 바닥 사이에는 용암이 비집고 나온 용암압출 혹은 용암발가락 구조가 간혹 관찰된다(Fig. 2-52c). 동굴바닥 색깔은 흔히 적갈색을 띠며, 간혹 암회색을 띠기도 한다. 상위동굴에는 소규모 용암교가 관찰되며(Fig. 2-52d), 동굴바닥보다 높은 곳(동굴천장 높이부분)에 오목하게 들어간 다락구조나 윗가지굴이 관찰된다(Fig. 2-52e).

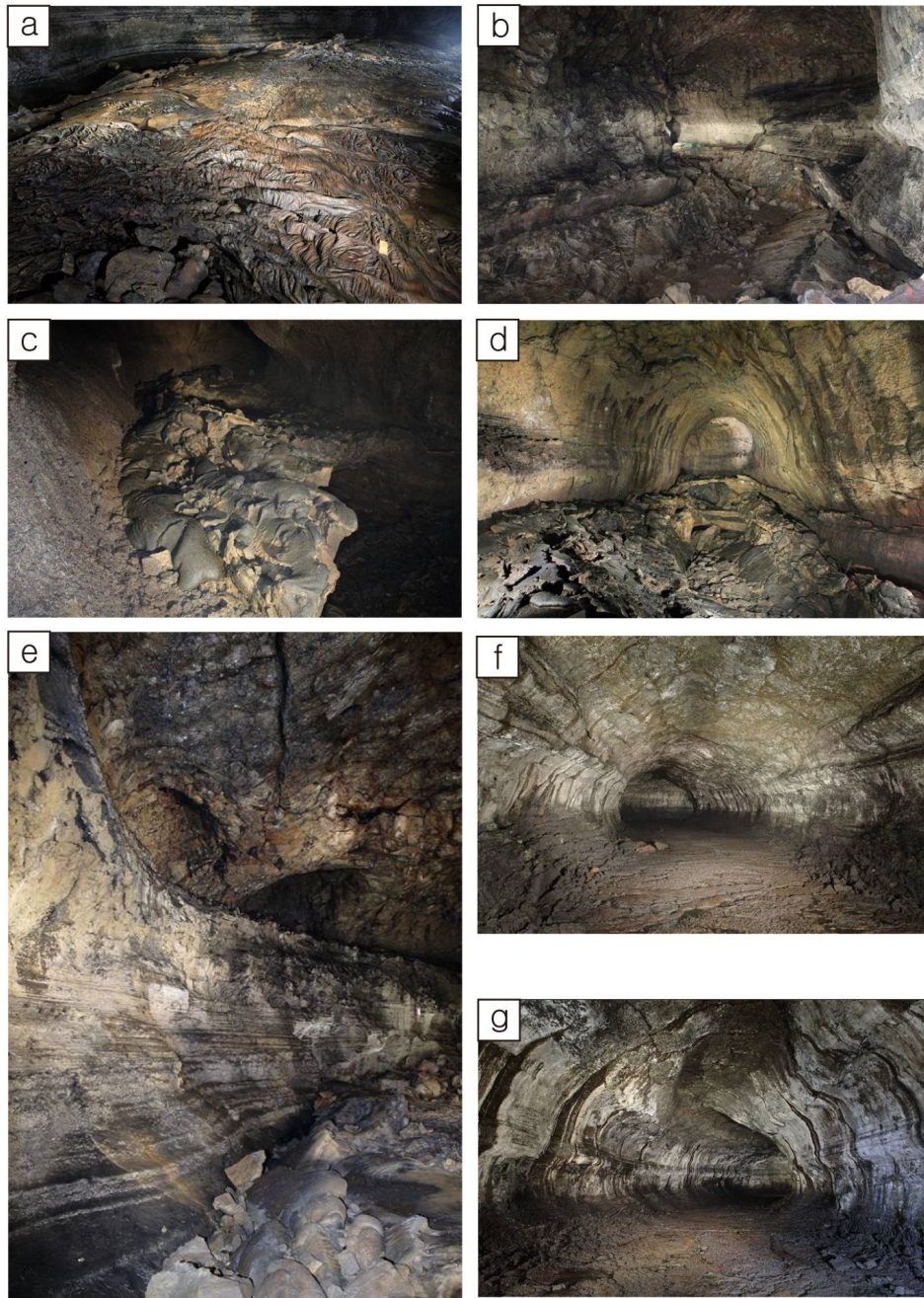


Fig. 2-52. Comparison between upper and lower level tube. Photographs (a) to (e) taken in upper level tube and photographs (f), (g) in lower level tube. (continued)

(a) Ropy structure of upper level tube' floor. (b) V-shaped deflated floor of upper level tube. (c) Out-squeezing lava within gutter between inflated floor and wall. (d) Lava bridge in upper level tube. (e) Alcove in the wall of upper level tube. Photographs (f), (g) show narrower passage, more even floors and walls, and cracks by gravitational stretching on floor in lower level tube.

이에 반해 하위동굴은 바닥이 일정하게 하류 방향으로 기울어져 있으며, 상위동굴에 비해 동굴폭이 좁고, 동굴천장 높이변화가 작다(Fig. 2-52f). 대체로 바닥과 벽면은 검은색을 띠며, 바닥에는 중력신장균열이 발달하였다(Fig. 2-52g). 또한 상위동굴 바닥에는 용암에 의해 떠내려가는 표류낙반의 잔재가 관찰되지 않지만, 하위동굴에는 표류낙반 잔재가 간혹 관찰된다.

낙반은 상위동굴과 하위동굴 모두에서 관찰되지만, 하위동굴은 낙반분포 빈도에 있어 상위동굴에 비해 낮으나(Fig. 2-53), 낙반 하나하나의 크기는 크다. 이에 비해 상위동굴은 낙반분포 빈도는 하위동굴에 비해 높으나 낙반의 크기는 하위동굴에 비해 대체로 작다. 전반적으로 하위동굴에 비해 상위동굴에 낙반이 더 흔히 나타나는 현상은 하와이 카주무라 용암동굴에서도 관측되었는데, 그 이유로 ① 상위동굴의 폭이 더 넓고, 천장형태가 하위동굴처럼 아치형의 안정된 형태를 갖지 않았거나, ② 상대적으로 온도가 낮은 조건에서 상위동굴 천장에 용암이 불안전하게 부가되었거나, 혹은 ③ 용암동굴의 형성과정에서 가열과 냉각의 반복에 의해 상위동굴 천장과 벽에 부가된 부분이 팽창과 수축을 반복하게 되는 것과 같은 여러 원인이 있을 것으로 설명되기도 하였다(Allred and Allred, 1997).

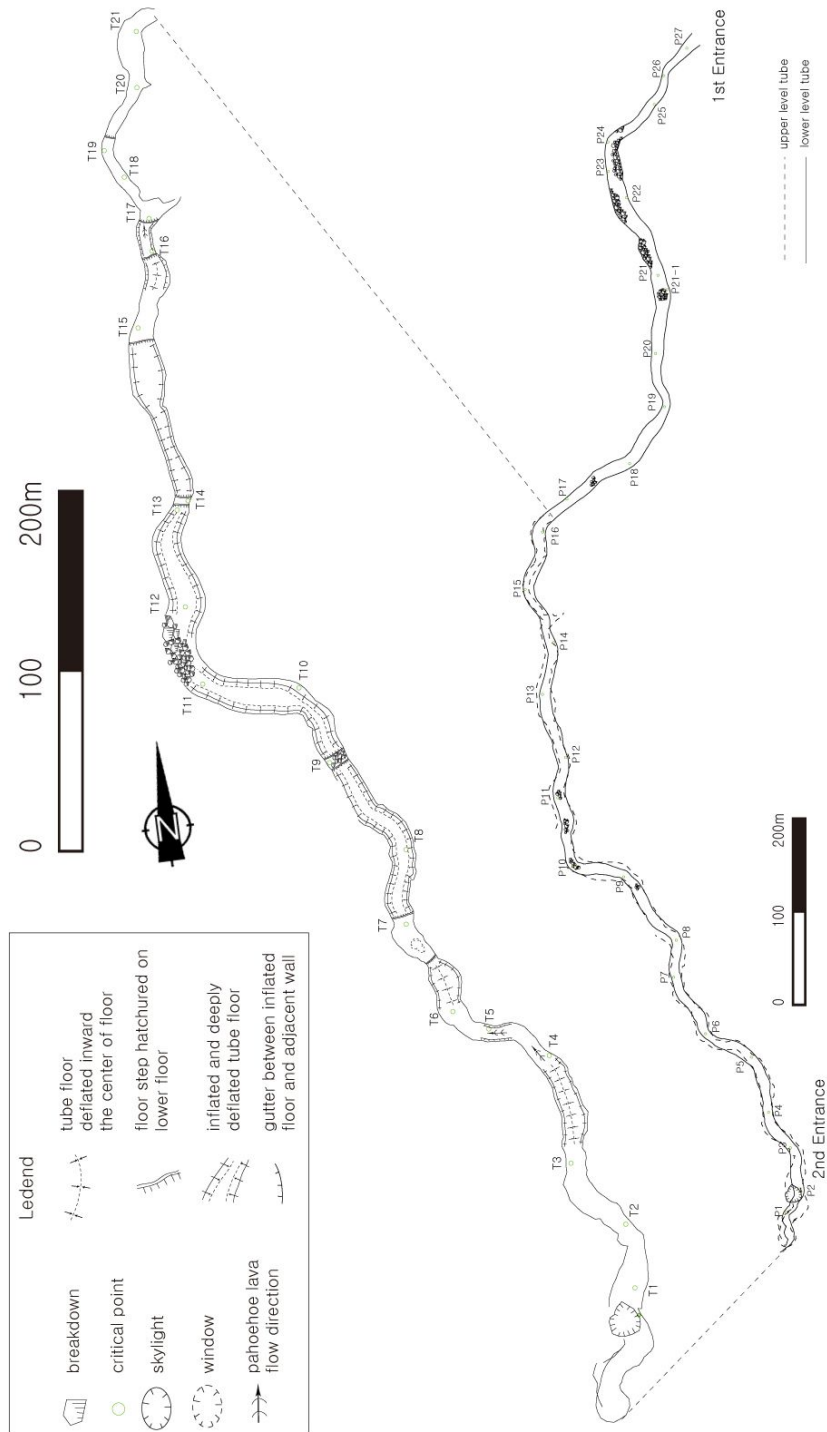


Fig. 2-53. Detailed Plan of zone in which multi-level tube is well developed.

5. 토의

5.1. 만장굴의 초기형성

5.1.1. 만장굴을 형성한 용암류

만장굴을 형성한 용암류의 특징을 밝히기 위해서는 만장굴 지표의 용암류가 만장굴 형성과 동시에 형성된 것인지, 아니면 만장굴이 형성된 후 새로운 용암류에 의해 피복되었는지를 판단하여야 한다.

이러한 관점에서 만장굴 지표의 특징과 종단면도를 검토해보면, 만장굴의 지표면과 동굴바닥의 변화경향이 조화롭게 일치하고, 지표면상의 일부 구간(용암석주 상위 지표면)을 제외하면 특정 돌출부분 없이 매끄럽게 연장되는 특징을 보인다. 뿐만 아니라 만장굴 제1, 2, 3입구의 단면 노두에서도 새로운 용암에 의한 피복의 흔적이 관찰되지 않는다. 이러한 특징들로 미루어보아, 일부 구간을 제외하면 만장굴이 형성된 이후 새로운 공급지에서 흘러온 용암에 의해 피복되지 않은 것으로 판단된다.

특히 조사구간 내 만장굴 상위에 새로운 용암류가 피복하지 않았음을 지지하는 또 다른 증거는 2입구부분 측량결과에서 찾을 수 있다(Fig. 2-4). 2입구에서 상위동굴과 하위동굴 사이의 층의 두께가 갑자기 두꺼워지는데, 이러한 현상은 하위동굴이 만들어지기 전에 이미 현재의 2입구 천장창이 만들어져 있었다는 것을 지시한다. 왜냐하면, 현생 용암동굴(Peterson et al., 1994)과 오래된 용암동굴(Allred and Allred, 1997; Espinasa, 2006)의 연구에서 관찰된 바와 같이, 천장창 하부에는 외부 차가운 공기의 유입으로 상대적으로 온도가 낮은 조건이 되어 동굴 내부를 흘러가는 용암류 상부에 새로운 용암표층이 쉽게 형성되고, 다른 부분에 비해 상대적으로 두껍게 성장해가기 때문이다. 이상에서와 같이 측량결과와 지형특징 등을 종합해 보면, 만장굴을 형성한 용암류 상위에 새로운 용암이 덮었을 가능성은 적은 것으로 판단된다.

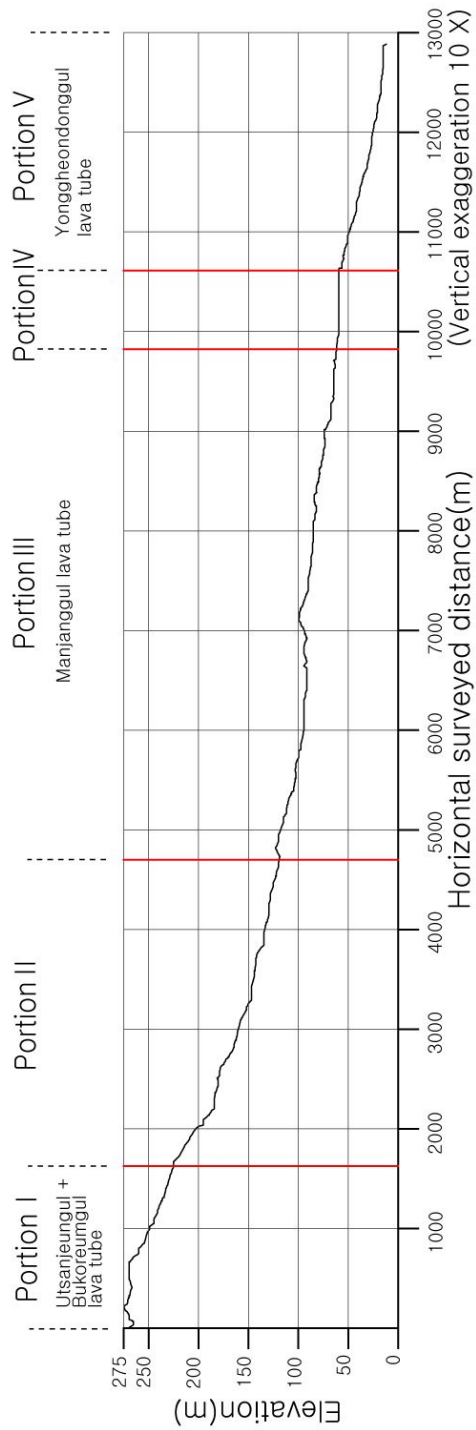


Fig. 2-54. Longitudinal profile of ground surface from the Utsanjeungul to the Yongcheondonggul lava tube.

Table 2-5. Topographic data of master tube line(from the Utsanjeungul to the Yongcheondonggul lava tube) in the Geomunoreum lava flows

Portion	I	II	III	IV	V	I ~ V
Elevation range(m)	Utsanjeungul + Bukoreumgul lava tube 270-226	Bukoreumgul ~ Manjanggul 226-120	Manjanggul lava tube 120-62	Manjanggul ~ Yongcheondonggul 62-60	Yongcheondonggul lava tube 60-12	270-12
Horizontal linear distance(m)	1468	2591	3924	503	1761	9993
Horizontal surveyed distance(m) *	1619	-	5122	-	2272	-
Linear average slope(deg)	1.7	2.3	0.9	0.2	1.6	1.5
Average slope(deg)	1.6	-	0.7	-	1.2	-

*this is based on recalibrated distance through the meanders of the lowest level on digital topographic maps from existing surveying data. I : Korea Midland Power Co., LTD., 2007; II: Ahn and Hwang, 2008 & Bukiejugun, 2003; V : Cultural Heritage Administration of Korea, 2005

용암동굴은 대체로 단위시간당 적은 양의 용암이 분출하여 흘러가면서 형성되는 파호이호이 용암류에서 흔히 생성되는 것으로 보고되어 왔다(Greeley, 1971; Peterson and Swanson, 1974; Hallworth et al., 1987; Peterson et al., 1994). 그러나 드물게 에트나 화산지역과 같은 곳에서는 시간당 훨씬 많은 양의 용암이 분출되어 아아 용암류로 흘러가면서 복잡한 형태의 용암동굴이 형성되는 예가 보고되기도 하였다(Calvari and Pinkerton, 1998, 1999). 만장굴의 경우 상위 지표가 동굴이 형성될 당시에 형성된 것이라는 것을 감안하여 지표의 특징들을 살펴보면, 밧줄구조와 튜물러스가 관찰되며 지형기복이 크지 않다. 이러한 특징은 만장굴이 지형기복이 크지 않은 넓은 지역에 완만한 경사를 따라 흘러간 파호이호이 용암류에 의해 형성된 것임을 지시한다(Mattox et al., 1993; Peterson et al., 1994; Hon et al., 1994; Kauahikaua et al., 1998).

만장굴은 거문오름 용암동굴계에 있어서 주간동굴선의 일부분으로, 만장굴 상류에는 웃산전굴, 북오름굴, 대림동굴이 분포하며, 하류에는 김녕굴, 용천동굴이 분포한다(안웅산과 황상구, 2009). 이러한 일련의 주간동굴선을 따라 지표의 지형경사를 살펴보면, 가장 상류인 웃산전굴(북오름굴 포함)과 가장 하류인 용천동굴은 지표경사가 각각 1.6° 와 1.2° 이며, 중간부분에 위치하는 만장굴은 0.7° 로 가장 완만하다. 공급지로 유추되는 거문오름 분석구와 웃산전굴 사이에는 붕괴도랑이 분포하여(안웅산과 황상구, 2009), 지형경사를 측정하기에는 어려움이 있다. 웃산전굴 가장 상류에서 용천동굴 가장 하류까지 직선상 지표경사는 1.5° 로 매우 완만하다(Fig. 2-54; Table 2-5). 이는 세계적으로 가장 규모가 큰 용암동굴로 알려진 하와이 카주무라 동굴(주통로길이(main passage length): 41.86 km; 동굴 가장 상류에서 가장 하류까지의 직선거리: 32.1 km; 주통로를 따라 측정한 평균 지표경사: 1.5° ; 최상류와 최하류의 직선상의 평균 지표경사: 2°)과 비교했을 때 거문오름 용암동굴계의 주간동굴선이 더 완만한 지형에 형성된 것을 알 수 있다(Allred and Allred, 1997; Kempe and Henschel, 2006). 특히 0.7° 로 매우 완만한 만장굴의 지형 특성

은 만장굴의 형성, 성장, 그리고 다층구조의 발달 등에 연속적으로 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

5.1.2. 만장굴 초기동굴 형성메커니즘

용암동굴의 형성메커니즘에 관한 연구는 그 형성과정을 직접 관찰할 수 있었던 현생 화산지역에서 활발히 수행되었다. 특히 하와이의 마우나올루(Mauna Ulu: 1969~1974년)나 킬라우에아의 푸오오-쿠파이아나하(Puu Oo - Kupaianaha: 1983~현재) 화구에서 형성된 용암류와 용암동굴에 관한 장기적 관찰과 다양한 분야에 걸친 연구는 용암동굴 형성에 관한 이해 증진에 크게 기여하였다(Greeley, 1971, 1972, 1987; Swanson, 1973; Peterson and Swanson, 1974; Peterson et al., 1994; Mattox et al., 1993; Hon et al., 1994; Kauahikaua et al., 1998).

용암동굴의 형성메커니즘에 관한 지금까지의 연구들에 따르면, 용암동굴은 크게 두 가지 방식으로 형성되는 것을 알 수 있다. 그 하나는 용암류가 흘러가면서 흐름의 양측에 제방이 형성되어 용암채널 형태로 흘러가면서 용암류 표면에 용암층이 만들어져 용암동굴이 형성되는 경우(roofing of lava channels)로, ①제방의 양쪽에서부터 생성된 표층이 채널 가운데까지 성장하거나, ②용암채널의 연속적인 범람으로 인해 제방이 서서히 성장하여 동굴지붕이 형성되거나, ③용암류 상부에 떠가던 표류암층(floating crustal rafts)이 누적되어 동굴지붕이 형성되는 방식으로 동굴이 형성된다고 보고되었다. 또 다른 방식은 서서히 점진적으로 흘러가는 파호이호이 용암류의 상부에 표층부가 굳어 지붕이 형성되고 그 내부로 용암이 계속해서 흘러가면서 용암동굴이 형성되는 경우(lava tubes in advancing pahoehoe flows)이다. 두 번째 방식과 같이 형성되는 경우에 있어서도 연구자에 따라 조금씩 해석이 다르다. 파호이호이 로브(pahoehoe lobe)가 반복적으로 터져나가면서 갈라져 더 많은 용암로브(lava lobe)들을 형성하여 서로 구분되는 소규모 튜브들을 형성되고, 용암류가 전진함에 따라 이들이 서로 합쳐지면서 주된 동굴이 형성되는 것으

로 해석하는가 하면(Wentworth and Macdonald, 1953; Peterson et al., 1994; Espinasa, 2006), 파호이호이 용암류 내에 동굴이 형성될 때 로브들이 다시 통합되는 것이 아니라 전진하는 용암류의 전면이 마치 시트형태로 퍼져 나가고, 그 표면에 형성된 표층부는 용암이 전진할 때, 마치 손바닥을 아래로 하고 주먹을 쥐었다가 펼치는 것과 같은 형태로 용암류가 전진하고, 동시에 용암류가 부풀어 오르면서 전진한다. 이렇게 상승(팽창)하면서 흘러가는 용암류는 그 가장자리에서부터 용암이 식고 시간이 지나면서 용암이 주로 흘러가는 통로가 용암동굴을 형성한다는 견해도 있다(Hon et al., 1994; Kauahikaua et al., 1998).

위에서 살펴본 바와 같은 두 가지 용암동굴 형성메커니즘 중 어느 한 가지 방식에 의해서만 용암동굴이 형성되는 것이 아니라, 동일한 용암류에 있어서 두 가지 형성과정이 동시에 나타날 수도 있고, 어느 한 가지 과정이 더 우세하게 일어날 수도 있다(Kauahikaua et al., 1998; Espinasa, 2006). 특히 Kauahikaua et al.(1998)은 1990~1997년 사이에 하와이 킬라우에아 화산의 푸오오와 쿠파이아나하 화구에서 유래되어 형성된 대부분의 용암동굴을 화구에서부터 멀리 해안지역까지 관찰하고 측정하여, 용암동굴의 형성과 진화, 그리고 용암동굴 내를 흘러가는 용암의 거동 등을 기재하였다. 이들은 경사가 상대적으로 더 급한 화구에 가까운 상류 지역은 흔히 용암채널에 용암지붕이 형성되는 방식으로 용암동굴이 형성되고, 하류로 흘러가면서 해안지역과 같이 경사가 완만한 지형을 흘러가게 되면, 용암류는 시트상의 파호이호이 용암류의 형태로 흘러감과 동시에 서서히 상승하면서 전진하고 그 내부에 용암동굴이 형성되는 것을 보고하였다. 이러한 관찰을 토대로 이들은 마우나올루 화산 활동 시 주로 용암동굴이 첫 번째 방식, 즉 용암채널 상부에 용암지붕이 형성되는 방식으로 형성되는 것으로 보고된 것은 그 당시의 용암동굴 관찰이 주로 경사가 상대적으로 급한 화구 가까운 상류지역에 국한되었기 때문일 것으로 추론하였다. 그런가 하면, 멕시코 수치옥 화산지역에 분포하는 용암동굴들을 조사한 Espinasa(2006)는 용암동굴은 분출량과 지형경사에 따라 선상의 단순

한 용암동굴(linear, simple, unitary tube) 혹은 복잡하게 서로 합쳐지는 용암동굴(complex anastomosing systems of small tubes)이 만들어진다고 하였다. 즉 분출량이 크고 지형경사가 더 급하면 선상의 단순한 용암동굴이 형성되고, 분출량이 상대적으로 적고 경사가 완만한 지형에서는 복잡하게 얽힌 용암동굴이 형성되어, 같은 용암류 내에서 서로 다른 형태의 용암동굴이 발달한다고 보고하고, 이러한 서로 다른 두 형태의 용암동굴 모두 주간동굴로 성장해 갈수 있다고 하였다. 그러나 일부 연구에서는 오래된 용암동굴에서의 동굴 형태나 구조를 가지고 초기 용암동굴의 형성메커니즘을 유추하는 것에는 어려움이 있다고 보고되기도 하였다(Peterson et al., 1994; Kauahikaua et al., 1998).

금번 정밀측량을 실시한 만장굴의 경우 지표경사가 평균 0.7° 이고, 길쭉한 형태의 압력언덕이 발달하였으며, 지표에 용암채널 제방의 흔적이 발견되지 않으며, 공급지 거문오름 분석구로부터 중하류지역에 발달해 있는 점 등을 고려하면, 만장굴을 형성한 용암류는 시트상의 파호이호이 용암류 형태로 흘러가면서 그 상부와 하부가 고화되고 내부에 여전히 액체의 성격을 띠는 용암유체가 계속적으로 흘러가면서 초기 용암동굴이 형성된 것으로 여겨진다. "sheet flow"라는 용어는 비교적 기복이 심하지 않고 표면이 평평한 해저 용암류에 붙여졌던 용어로, 그 두께나 용암류 가장자리의 높이에 관계없이 붙여진 용어이다(Ballard and others, 1979). Hon et al.(1994)은 "sheet flow"라는 용어를 하와이 킬라우에아 화산지역에서 나타나는 유사한 형태의 육상 파호이호이 용암류에 확장하여 사용하였는데, sheet flow는 2° 미만의 경사, 일반적으로 1° 이하의 거의 평평한 지형에서 용암류가 정지될 때 나타나는 현상으로, 저각의 지형경사는 용암이 채널형태로 흘러가는 것을 막고, 액상중심체를 가지는 시트형태로 일정한 두께를 가지는 용암류를 형성한다고 하였다. 이러한 시트형태의 용암류는 용암류 상부와 하부로부터 고화가 진행되면서 그 중심부에는 액체상의 용암이 존재하게 된다. 계속적으로 용암이 시트상의 용암류로 공급되면서 용암의 표면은 증가하게 되고, 그 하부로 계속해서 용암은

흘러가면서 멀리까지 공급되게 된다고 하였다(Hon et al., 1994; Kauahikaua et al., 1998). 특히 Kauahikaua et al.(1996, 1998)은 이러한 시트상 용암류 내의 액상중심체를 저주파전자기장치를 이용한 물리탐사방법으로 확인하였으며, 용암류의 상부에 표층부가 생성되어 그 하부를 흘러가는 용암의 양이나 용암의 수위를 직접 측정할 수 없는 경우에 이러한 방법을 사용하여 용암의 수위나 용암의 양을 측정하기도 하였다. 이렇게 시트형태로 흘러가는 용암류의 또 다른 특징은 이미 형성된 지표암층 부분이 그 아래를 흘러가는 용암류에 의해 계속적으로 서서히 상승하게 되어, 길쭉한 형태의 압력언덕이나 표면 쪼개짐과 같은 구조가 관찰되는 것이다(Hon et al., 1994; Kauahikaua et al., 1998). 이러한 시트상 파호이호이 용암류의 특징을 고려할 때, 만장굴의 상위지표면에 나타나는 길쭉한 형태의 압력언덕은 시트형태 용암류의 가장자리 부분을 상류지역에서 터져 나온(breakout) 용암류가 새롭게 피복하고, 이후에도 용암류의 상승(팽창)작용이 계속되어 형성된 용암상승 구조로 여겨진다(Kauahikaua et al., 1998).

따라서 초기 만장굴은 시트상의 파호이호이 용암류에서 그 표면부가 고화되고 차츰 두꺼워지면서 그 하부를 흘러가는 용암에 의해 형성된 것으로 판단된다.

5.2. 만장굴의 성장

5.2.1. 침식에 의한 확대

경사가 완만한 지형을 흘러가는 용암류에서 형성된 초기의 용암동굴은 높이보다 폭이 수배 더 큰, 옆으로 널찍한 동굴을 형성한다(Allred and Allred, 1997; Kauahikaua et al., 1998). 그러나 만장굴 측량결과를 살펴보면 동굴 높이가 동굴폭에 비해 크다. 그 단면 또한 길쭉한 타원체 내지 모래시계형이나 해골형의 윤곽을 보인다. 이러한 만장굴의 형태는 초기에 형성되었던 용암동굴이 동굴 내를 흘러가는 용암의 열적 침식을 받아 동굴바닥이 깎여 아래로 성장해 갔다는 것을 암시한다(Swanson, 1973; Larson, 1993; Allred and

Allred, 1997; Greeley et al., 1998; Kauahikaua et al., 1998; Fagents and Greeley, 2001; Espinasa, 2006).

Greeley et al.(1998)은 용암에 의한 동굴바닥의 침식에 대한 여러 가지 증거들을 나열하고, 세계 곳곳의 용암동굴에 대하여 그 침식여부를 조사하면서, 가장 확실한 증거는 용암동굴이 만들어질 때 그 바닥면이 낮아지는 것을 확인하는 것이라고 하였다. 실제로 용암동굴의 천장창을 통해서 용암동굴 내를 흘러가는 용암류의 흐름상태를 직접 관찰하기도 하고(Swanson, 1973; Peterson et al., 1994; Kauahikaua et al., 1998), 암석덩어리를 던져 넣어 시간이 지나면서 그 덩어리가 녹아서 결국은 없어지는 것을 실험하거나(Peterson et al., 1994), 쇠막대기를 직접 집어넣어 동굴바닥이 깊어지는 것을 직접 측정하기도 하였다(Kauahikaua et al., 1998). 뿐만 아니라, 현생 하와이 화산활동에서 여러 가지 방법에 의해 측정된 동굴 내의 용암온도는 1,130℃를 웃도는데(Swanson, 1973; Tilling et al., 1987; Heliker et al., 1998), 이러한 온도는 현무암질 용암의 고상선 985~1,010℃(Helz and Thornber, 1987) 보다 높아, 오랜 기간 동안 흘러가는 용암에 의하여 동굴바닥을 부분적으로 녹일 수 있으며, 더욱이 흘러가는 용암류에 의한 끌림(dragging)에 의하여 침식은 더욱 더 잘 일어날 수 있다(Peterson et al., 1994; Hon, 2007).

Greeley et al.(1998)은 용암에 의한 침식의 증거로 ①현재 활동 중인 화산 활동에 있어 용암동굴 내 용암에 의한 하상침식을 유추할 수 있거나 관찰할 수 있는 경우, ②열적침식의 직접적 증거(예를 들어, 녹은 하부층 물질-melted substrate), ③단면상에서 기존 용암층 내로 침식해서 들어간 용암(lava undercut into preflow material)이 관찰되는 경우, ④침식시키는 용암에서 기반암(preflow material)에 의해 혼입된(assimilation) 지구화학적 증거가 관찰되는 경우, ⑤침식시키는 용암 내로 끌려 들어간 기반암 암편(assimilated fragment of preflow material into the eroding flow)이 관찰되는 경우, ⑥동굴단면 모양이 두개골 혹은 모래시계 형태를 갖는 경우, ⑦용

암동굴 벽면에 고토양층 혹은 스코리아층이 노출되는 경우 등을 근거로 들었다. 그런가 하면, Allred and Allred(1997)는 용암침식의 증거로 ①다락구조나 윗가지굴, ②상·하위동굴의 불일치(상·하위동굴에 있어서 동굴의 굴곡부가 서서히 하류로 이동), ③계곡형태의 동굴모양 등을 제시하기도 하였다.

금번 연구에서, 기존 연구들을 토대로 만장굴 내부구조를 기재하고 해석한 결과, 용암동굴 내를 흘러가는 용암에 의해 동굴바닥이나 벽면이 침식되었다는 것을 지시하는 여러 증거들이 관찰되는데, ①용암동굴 벽면에 나타나는 클링커층, ②단면상 동굴 벽면 상하부의 비대칭적 형태, ③평면상에서 상·하위동굴 통로의 어긋남, ④상위동굴 바닥보다 높은 곳에 발달한 오목하게 들어간 다락구조 혹은 윗가지굴 흔적, ⑤해골형 혹은 모래시계형의 용암동굴 단면 등이 그것이다(Table 2-6).

Table 2-6. Evidences for lava erosion in the Manjanggul lava tube.

Evidences	Location	Description No. (after Figs 2-8 and 2-9)	Remark
Exposed clinker or paleosols in wall of lava tube	CP93, CP88, CP87	L1, L3	
Asymmetric cross section	CP8, CP10	-	
Plan view showing lateral and downstream meander migration	T1~T21	-	See Fig. 2-6.
Alcove or Perched tube	T5, T6~T7, T15	L25, L26	upper level tube
Skull or Hourglass-shaped cross section, canyon-like passage	CP77, CP32~34	L5, L17	

이 외에도 만장굴이 열적 침식을 받았다는 단편적인 증거들로는 동굴천장이 나 벽면에 발달한 용암석순 및 용암유석과 같은 용암용융구조(Kauahikaua et al., 1998; Hon, 2007)와 거북바위를 비롯한 낙반의 모서리가 둥글게 마모된 흔적 등을 들 수 있다.

만약 만장굴이 용암의 침식에 의해 동굴의 깊이가 깊어진 것이 아니라, 기존의 깊이 패인 계곡이나 하천 같은 지형을 따라 용암이 흐르면서 그 표층이 굳어 동굴천장이 생성되어 만들어진 것이라면, 현재 만장굴이 분포하는 지역 인근에 만장굴의 깊이만큼 깊은 지형이 발달해 있어야 할 것이다. 그러나 만장굴 주변에는 만장굴의 깊이(14~34 m)만큼 깊은 계곡이나 하천은 발달해 있지 않다. 이 또한 만장굴이 침식에 의해 현재의 길쭉한 단면을 가지는 동굴로 성장했다는 것을 지시하는 간접적인 증거일 것이다.

그러나 만장굴의 형성 초기에 용암류는 기존 지형의 낮은 부분을 따라 흘러갔을 것으로 판단된다. 만장굴의 굴곡률을 볼 때, 경사가 급한 구간과 경사가 완만한 구간사이에 어떠한 경향성도 나타나지 않는데, 이는 초기의 만장굴을 형성하던 용암류가 기존 지형의 낮은 부분을 흐르면서 초기 용암통로가 생성되고 이후에도 계속 유지되었기 때문인 것으로 생각된다. 용암동굴이 지형의 저지를 따라 흘러간다는 것은 여러 연구에서도 보고된 바 있으며(Mattox et al., 1993; Hon, 1994; 황상구 외, 2005), 많은 현생화산활동에서도 관찰되는 사례이다. 그러나 금번 연구에서 만장굴이라는 단일 용암동굴 내에서 경사와 굴곡률 간의 변화 경향성이 나타나지 않는 것은 조사구간이 비교적 짧고, 비교 대상이 적어 그 연관성을 찾지 못했을 가능성도 배제 할 수는 없을 것이다.

지금까지 기존의 여러 연구사례와 만장굴 내부구조에서 나타나는 증거, 주변 지형과의 관계 등을 토대로 만장굴이 용암동굴 내를 흘러가는 용암에 의해 침식되었다는 것을 살펴보았다. 그렇다면 용암동굴의 침식은 어떠한 요인에 의하여 영향을 받는지 살펴보아야 할 것이다. 이를 위하여 먼저 약 4.5 km(최하위동굴 길이)의 길이를 가지는 만장굴 구간 내에서 침식정도의 변화경향을

인지하여야 할 것이다. 침식의 깊이를 측정하는 방법으로는 동굴벽면에 노출된 클링커층이나 고토양층 혹은 기존 암층과의 경계면을 기준으로 그 침식깊이를 측정할 수 있을 것이다(Allred and Allred, 1997; Greeley et al., 1998). 그러나 만장굴의 경우 벽면에서 곳에 따라 클링커층이나 고토양층이 관찰되기는 하나, 침식 깊이를 비교할 수 있을 만큼 관찰되지 않아 정량적으로 그 깊이의 차이를 측정할 수는 없다. 하지만 정밀측량 자료를 활용하면 상류에서 하류로 의 침식깊이 변화를 인지할 수 있다. 즉 측량결과에 따르면 만장굴의 지표지형 경사가 0.7° 인데 반해 동굴바닥 경사는 0.4° 로, 동굴바닥이 지표에 비해 더 완만하다. 이는 만장굴 지표의 일부구간을 제외하고 후기에 흘러온 새로운 용암에 의해 덮인 흔적이 없는 것을 고려한다면, 하류로 가면서 지표와 동굴바닥의 거리가 더 가까워진다는 것을 의미하는 것이다. 즉 동굴바닥과 지표가 가깝다는 것은 하류로 가면서 침식 깊이가 더 작아지는 것으로 해석할 수 있을 것이다. 실제로 동굴의 끝과 끝의 직선거리가 약 32 km에 달하고 그 직선경사가 1.9° 에 달하는 카주무라동굴의 경우 최상류 올라아(Olaa) 구간에서 평균 침식깊이가 12 m인데 비해, 최하류인 하류 카주무라(Lower Kazumura)구간에서는 평균 7.6 m로 평균 침식깊이가 작아지는 것으로 조사되었는데(Allred and Allred, 1997), 만장굴의 경우도 이와 유사하게 하류로 가면서 침식의 깊이가 작아진 것으로 해석할 수 있다.

이러한 해석은 용암류의 흐름특성과도 연관되어 있을 것이다. 현생화산활동지역에서의 용암류 흐름 및 용암동굴 형성과정에 관한 관찰에 따르면 용암은 상류에서 하나의 공급지에서 흘러나와 하류지역 특히 경사가 아주 완만한 지형을 따라 여러 갈래로 갈라지면서 흘러 용암유역을 넓혀 가는 것으로 보고되었다(Mattox et al., 1993; Calvari and Pinkerton, 1998; Kauahikaua et al., 1998; Takahashi et al., 2003). 일례로 하와이의 푸오오-쿠파이아나하(Pu'u 'O'o-Kupaianaha) 화산활동의 에피소드 53(Episode 53) 기간 동안 푸오오 화구에서 흘러나온 용암류 내에 형성된 용암동굴의 경우, 화구에서부터 가까운 곳(0.6 km)에서부터 멀리 해안(11.3 km)까지 발달한 여러 개의 천장

창들을 통해 동굴 내부의 높이, 폭, 용암흐름속도 그리고 용암동굴의 연령 등을 측정한 결과, 화구 가까운 곳에서는 높이 15 m 이상, 폭 25 m, 용암동굴 연령 4.5년이 측정되었으며 화구에서 가장 먼 해안 쪽에서는 높이 6.5 m, 폭 3 m, 동굴연령 0.5년으로 측정되어, 화구에서 멀어지면서 동굴규모가 작아지고, 용암동굴 연령 또한 감소하는 것으로 파악되었다(Kauahikaua et al., 1998). 이와 같이 용암이 화구로부터 흘러가면서 여러 갈래로 갈라지는 용암류에서 내부에 형성되는 용암동굴 또한 하류로 가면서 여러 갈래로 갈라지게 되며, 이로 인해 용암이 용암동굴 내를 흘러가는 지속시간도 줄어들게 되고, 그 결과 용암에 의한 침식도 줄어들게 되어 하류로 갈수록 침식 깊이는 상대적으로 줄어들게 되는 것으로 여겨진다(Larson and Larson, 1989).

용암에 의한 침식의 정도에 영향을 주는 또 다른 요인으로 용암이 흘러간 지형경사를 고려하여야 할 것이다. 기존 연구에서 세인트 헬렌즈산(Mount St. Helens)의 케이브 현무암(Cave Basalt) 지역에 발달한 용암동굴(9 km)과 하와이의 아이나호우 렌치 용암동굴(Ainahou Ranch lava tube; 7 km)에서 용암이 흐른 지형의 경사와 동굴침식의 깊이와의 상관관계가 측정되었는데, 지형경사가 더 급한 상류의 경우 침식의 정도가 크고, 지형경사가 상대적으로 완만한 하류로 갈수록 침식정도가 작아지는 것으로 조사된 바 있다(Greeley et al., 1998). 그리고 하와이 푸오오에서 용암동굴이 형성되는 과정에서 지형경사가 급한 화구 가까운 곳과 부분적으로 경사가 급한 풀라말 팔리(Pulamal Pali : 여기서 'Pali'는 절벽 혹은 낭떠러지를 의미한다)에서 용암동굴의 규모가 가장 컸고, 해안의 평지에서 가장 작았다고 보고되기도 하였다(Kauahikaua et al., 1998). 뿐만 아니라 위에서 언급한 카주무라 동굴의 경우도 침식정도가 가장 큰 가장 상류구간에서 평균 지형경사가 2°로 가장 컸고, 가장 하류구간으로 가면서 지형경사가 1.1°로 감소하고 침식깊이도 작아지는 것으로 조사되었다(Allred and Allred, 1997). 금번 만장굴 정밀측량결과에 따르면 만장굴 상류에서 하류로 가면서 지형경사가 작아지는 경향성이 인지되며, 침식의 깊이가 작아지는 것으로 유추되어, 용암동굴의 성장과정에

있어서 침식의 정도를 제어하는 요인으로 용암의 흐름지속시간 뿐만 아니라 지형경사의 영향도 배제할 수 없을 것으로 판단된다.

5.2.2. 용암부가

용암동굴의 모양에 영향을 주는 중요한 요인은 용암의 부가(deposition)와 침식작용일 것이다(Allred and Allred, 1997). 기존의 여러 연구들은 용암에 의한 침식작용에 많은 관심을 쏟았지만(Peterson et al., 1994; Kauahikaua et al., 1998; Greeley et al., 1998; Fagents and Greeley, 2001), 용암의 부가작용에 대한 관심과 연구는 상대적으로 적었다(Allred and Allred, 1997).

만장굴 내에는 용암동굴 내를 흘러가는 용암이 동굴내부에 부가된다는 것을 지시하는 증거로 ①다층구조, ②용암선반, ③안도배, ④포획체(규질암편) 산출 양상(용암동굴 천장부에 주로 부가되어 나타남), ⑤부가층간 용암주입 현상과 같은 특징적인 구조가 관찰된다(Table. 2-7).

부가를 지시하는 내부구조에서 알 수 있듯이 용암동굴 내의 용암부가는 여러 가지 방식으로 일어날 수 있다. 다층구조의 경우, 앞서 살펴본 바와 같이 용암동굴 내부를 흘러가는 용암의 수위가 일정하게 유지되는 기간이 충분히 지속되어 그 용암류의 표면이 굳어 상당한 두께를 가지는 새로운 용암층이 형성되어 상·하위동굴을 나누는 격막을 만든 것으로 가장 광범위하면서도 확실한 용암부가의 형태일 것이다. 안도배 구조는 용암동굴 내에서 상대적으로 온도가 낮은 기존 용암동굴 천장이나 벽면에 동굴 내를 흘러가던 용암이 직접 부가되는 것으로 상대적으로 천장이 낮고 폭이 좁은 부분에 용암이 쉽게 부가되는 경향이 있다. 만장굴 내의 천장이나 벽면 높은 곳에서 간혹 규암 포획체가 관찰되는데 이는 동굴 내를 흘러가는 용암류 상부에 떠서 이동해 가던 포획체가 용암이 천장이나 벽면부에 부가될 때 함께 부가되어 산출되는 것으로 해석된다. 또한 부가층 간의 용암주입은 용암동굴 내에 새롭게 용암층이 만들어진 후 용암이 지속적으로 공급되거나 혹은 갑자기 공급량이 증가할 때 새롭게 생성된 용암층과 그 상위의 기존에 만들어진 용암층 사이의 틈으로 용암이

흘러들어가 층과 층을 채움으로써 용암동굴의 천장부를 더욱 견고하게 함과 동시에 천장에 용암을 부가시키는 것이다(Figs 2-40 and 2-41).

Table 2-7. Evidences for lava accretion in the Manjanggul lava tube.

Evidences	Location	Description No. (after Figs 2-8 and 2-9)	Remark
Multi-level lava tube	CP98, CP84, CP69, CP54, T13, T15, P21-1	L2, L4, L8, L10, L31, L32, L38	
Lava shelf	CP71, CP58, CP17, P27	L6, L9, L20	
Lining	CP88, CP8	L3, L24,	
Quartzite xenolith accreted at ceiling or wall of lava tube	CP40, CP30, CP36, CP28, CP19, CP13	L14	
Lava injection into gaps between superposed linings	P9, T18, CP7	L29	Rarely occurred as imprints of "rope" on tube roofs where linings have fallen.

만장굴의 경우 2입구나 3입구 등에서 쉽게 새로운 용암층의 생성에 의한 부가의 증거로 다층구조를 관찰할 수 있으며, 동굴천장이나 벽면에 용암이 부가되는 경우는 동굴천장이 매우 낮은 곳에서 흔히 관찰된다. 부가층 간의 용암주입 현상은 용암천장의 안도배구조가 떨어져 내린 곳에서 간혹 관찰할 수 있는데, 그러한 곳에서는 대체로 밧줄구조(상위동굴의 바닥에서나 볼 수 있는 표면구조)의 케스트구조가 동굴천장에 붉게 관찰되는 것이 특징이다. 여러 가지 부가형태 중에서 만장굴 모양에 가장 큰 영향을 끼친 것은 광범위한 구간

에 걸친 용암부가에 의해 하위동굴지붕(상위동굴바닥)이 형성된 것이다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 용암이 동굴 내부를 흘러가면서 여러 가지 방식으로 천장이나 벽면에 부가되면 동굴천장은 지속적으로 낮아지고, 폭은 좁아질 것으로 예상된다. 그러나 만장굴의 종단면을 살펴보면, 일정하게 하류로 경사져 있는 동굴바닥과는 달리, 동굴천장은 높이의 변화가 매우 심하다. 이에 대하여 Allred(2009; personal communication)는 만장굴과 카주무라의 형태와 규모에 있어 매우 유사함을 인지하고, 만장굴이나 카주무라 동굴에 있어 동굴천장 높이가 매우 불규칙한 것은 동굴천장의 붕괴에 의한 것으로 해석하였다. 그러나 만장굴 천장높이의 불규칙성이 단순한 동굴천장의 붕괴에 의한 것이라기보다는 용암의 차별적 부가작용과 이후 혹은 동시에 일어나는 동굴천장의 차별적 붕괴에 의한 것으로 판단된다. 즉 용암부가는, 동굴 내에서 상대적으로 온도가 낮은 천장이나 벽면에 용암이 쉽게 접할 수 있는, 용암동굴 내의 좁고 낮은 부분에서 우세하게 일어나게 되며, 그 결과 어떠한 이유(동굴낙반에 의한 막힘, 용암류의 감소 등)에서 좁게 형성된 용암동굴 통로는 새로운 용암표층이 쉽게 형성되어 상대적으로 더 낮은 동굴천장이 만들어질 것이다. 동일한 조건에서 동굴천장이 높고 폭이 넓은 구간에서 동굴천장 아래에 이격되어 유사한 규모(두께)의 용암층이 만들어지더라도 이러한 용암층은 자중을 견디낼 만큼 충분한 강도를 갖는 규모로 성장하지 못할 경우 쉽게 붕괴되어 용암에 쓸려 하류로 이동될 것이다. 다시 말해 같은 용암수위에서 동굴천장이 낮고 폭이 좁은 구간에서 천장과 맞닿아 형성된 폭이 좁은 용암층은, 천장이 높고 폭이 넓은 구간에서 천장과 이격되어 형성된 용암층에 비해, 견고하게 부가되어 용암동굴 천장을 점점 낮아지게 할 것이다. 이 경우 천장이 높고 동굴폭이 넓은 구간은 같은 규모의 용암층이 형성되더라도 버텨내지 못하고 쉽게 붕괴되어 떠내려가 용암부가가 이루어지지 않아 동굴천장이 높은 상태로 계속 유지되게 될 것이다. 결국 이렇게 동굴폭이 좁고 천장이 낮은 구간에서 동굴바닥 쪽의 침식작용보다 천장과 벽면에서의 부가작용이 더 우세해지거나, 하류의 막힘에 의해 용암수위가 상승한 상태가 유지되면 용암부가에 의해 통

로가 좁아져 동굴은 결국 막히게 될 것이다.

5.3. 다층구조

5.3.1. 다층구조의 형성과 변형

만장굴은 크게 상위동굴과 하위동굴로 나뉘지는 다층구조를 가지고 있다. 이러한 다층구조는 세계 여러 동굴(하와이의 카주무라 동굴, 멕시코의 수치옥 화산지역의 용암동굴, 이탈리아의 에트나 화산의 용암동굴 등)에서 보고된 바 있다(Allred and Allred, 1997; Calvari and Pinkerton, 1999; Espinasa, 2006). 기존의 연구들에 의하면 다층구조의 형성에 관하여 크게 두 가지 이론이 제시되어 왔다. 첫 번째는 기존 용암동굴의 직상위에 새로운 용암이 흘러 상위동굴이 형성된다는 것이며(Waters et al., 1990; Calvari and Pinkerton, 1999), 또 다른 하나는 이미 형성된 용암동굴 내로 지속적으로 용암이 흘러가면서 새로운 용암표층이 형성되고 그 아래를 흘러가는 용암류에 의해 또 다른 하위동굴 지붕이 형성되어 여러 층의 용암동굴이 만들어진다는 것이다(Allred and Allred, 1997; Espinasa, 2006). 전자의 경우 상·하위동굴의 통로가 서로 어긋나고 심지어 서로 교차하기도 하고, 용암폭포나 갑작스런 용암동굴의 크기변화가 나타나기도 하며, 비대칭적인 동굴모양을 갖는 특징이 있다(Calvari and Pinkerton, 1999). 후자의 경우에는 상·하위 용암동굴의 통로가 서로 일치하지 않기도 하지만 대체로 나란히 진행하며, 굴곡부에서 약간씩 어긋나는 특징이 있다(Allred and Allred, 1997; Espinasa, 2006).

만장굴에서는 상·하위 용암동굴이 모두 측량된 구간의 경우, 상·하위동굴의 통로가 거의 일치하며 굴곡부에서 약간 어긋나며, 만장굴 3입구에서 하류 방향으로 나타나는 상위동굴의 경우에도 여러 곳에서 상·하위동굴이 창구조로 뚫려 있어 정밀측량을 하지 않더라도 이 구간 또한 상·하위동굴이 대체로 일치하는 것을 알 수 있다(북제주군, 2003). 또한 측량된 만장굴에 인접한 지역에서 방향을 달리하거나 교차하는 다른 용암동굴이 발견된 사례가 없으며, 현생 용암류에 대한 연구에서도 용암류가 정치 혹은 흘러가고 있을 때, 그 후

에 흘러오는 용암류는 직상부를 흘러가기 보다는 용암류의 옆쪽에 발달한 상대적으로 낮은 지형을 따라 흘러가는 것이 관찰되었다(Mattox et al., 1993; Kauahikaua et al., 1998). 이러한 것들을 고려한다면 만장굴 용암동굴의 다층구조는 두 가지 형성이론 중 후자의 경우에 해당할 것으로 판단된다.

용암동굴에서 상·하위동굴이 약간씩 어긋나며 굴곡부가 이동해가는 이유로는 침식을 받는 동굴바닥 암석의 불균질성이나, 흐름을 방해하고 방향을 전환시키는 동굴 내부에 낙석의 존재, 그리고 용암동굴의 굴곡에 의해 휘어지는 안쪽부분과 바깥쪽 부분의 용암류 속도차이에 의한 벽면침식의 정도차이 등을 들 수 있다(Allred and Allred, 1997). 만장굴의 경우에서도 용암흐름을 방해하고 전환시키는 낙석이나 용암동굴의 휘어짐에 의한 용암류 속도차이로 인해 벽면의 차별침식으로 그러한 현상이 일어났을 것으로 추리된다. 동굴바닥 암석의 불균질성의 가능성을 제기하기 위해서는 더 많은 연구가 필요할 것이다. 뒷부분에서 언급하겠지만, 용암동굴을 흘러가는 용암은 흔히 동굴의 아랫부분 일부분만을 채우고 흘러가는데(Kauahikaua et al., 1998), 이러한 경우 용암동굴의 천장이나 벽면이 붕괴되어 발생한 대규모 낙석은 쉽게 떠내려가기보다는 용암의 흐름을 방해하는 역할을 하면서 동굴의 통로를 변형시키는 역할을 하였을 것으로 판단된다. 낙석에 의해 용암동굴 통로가 좁아지거나 휘어지는 현상은 공개구간에서도 관찰된다.

만장굴에는 위에서 살펴본 큰 규모의 다층구조 외에도 상위동굴에서 여러 개의 작은 층들이 관찰되는데, 이는 최초 상위동굴 용암층이 형성되고 용암의 수위가 낮아지면서 새롭게 순차적으로 형성된 용암층들이 남겨진 것이다(Figs 2-13 and 2-43).

이러한 상·하위동굴의 분포 및 상위동굴 내의 소규모 다층구조 등을 보면, 만장굴 용암동굴을 형성한 용암류는 용암동굴 전체를 채우고 흘러가기 보다는 용암동굴의 일부분을 채우고 흘렀다는 것을 보여주는 것이다(Peterson et al., 1994; Kauahikaua et al., 1998; Espinasa, 2006). 즉 초기에 어느 정도 규모의 용암동굴이 형성된 이후 공급되는 용암은 용암동굴의 아랫부분 일부분만

을 채우며 흘러가면서 상위 표층부가 굳어서 새로운 하위동굴 지붕 즉, 상위 동굴 바닥을 만들고, 이후 용암의 수위가 낮아지면 그 아래에 또 다른 용암층이 형성되어 새로운 하위동굴 지붕을 형성해 가는 것으로 판단된다.

이러한 현상은 용암동굴의 형성과정이 상세히 관찰되고 기록된 하와이 킬라우에아 화산의 푸오오 화산(1983년부터 현재까지 활동)에서의 조사자료들을 참고하여 살펴볼 수 있다. 만장굴의 경우 평균 동굴폭이 13~15 m 정도임을 감안하여, 킬라우에아 화산의 쿠과이나나하 화구로부터 흘러나와 용암동굴을 형성한 화산활동의 평균분출률($300,000 \text{ m}^3/\text{day}$)과 그 용암동굴 내의 흐름속도(평균 $0.5 \sim 1.5 \text{ m/s}$)를 감안하면(Kauahikaua et al., 1996), 만장굴 용암동굴을 흘러갔던 용암류의 깊이는 대체로 1 m를 넘지 못했을 것으로 판단된다. 이러한 추론은 Kauahikaua et al.(1998)이 천장창을 통해 직접 측정한 용암동굴 내의 용암의 수위측정 결과와도 일치한다.

만장굴의 상위동굴 바닥은, 위에서 언급한 것과 같이, 이미 생성된 용암동굴의 아랫부분 일정부분만을 채우며 흘러가는 용암류의 표면부가 서서히 식으면서 용암층이 형성되고, 이후에도 계속 유입되는 용암은 이미 만들어진 용암층을 밀어 올려 위로 부풀어 오른 볼록한 구조를 만든다. 이러한 현상은 지표의 용암상승과 유사한 현상일 것이다(Walker, 1991; Hon et al., 1994; Kauahikaua et al., 1998). 이렇게 부풀어 오른 부분과 동굴벽면 사이에는 압출(squeeze out)에 의한 용암발가락이 흔히 관찰되는데 이 또한 용암의 계속적인 공급과 그로 인한 상승의 증거로 여겨진다.

상위동굴의 또 다른 부분에서는 바닥이 V자 형태로 통로의 중앙부를 향해 기울어져 있는데 이는 용암동굴을 흘러가던 용암류의 표층이 만들어지고 서서히 그 두께가 두꺼워지면서 상승하는 과정에서 그 하위를 흘러가던 용암의 수위가 낮아져서 표층이 그 자중을 이기지 못하고 아래로 내려간 것으로 판단된다(Peterson et al., 1994; Allred and Allred, 1997; Espinasa, 2006). 여기서 용암류의 수위는 여러 가지 이유에서 낮아질 수 있을 것이다. 공급지에서부터 공급의 감소 혹은 상류지역의 일시적 막힘에 의한 용암공급 차단으로 그

수위가 낮아질 수 있으며, 또 다른 가능성은 용암동굴 내를 흘러가는 용암류의 흐름량은 일정하나 지속적으로 바닥이 침식되어 깊어짐으로써 용암수위가 상대적으로 낮아져 이미 형성된 용암층이 용암에 의한 지지력을 잃어 아래로 내려앉을 수 있을 것이다. 실제로 하와이 킬라우에아의 푸오오-쿠파이아나하 화산활동 시에 형성된 용암동굴의 지표에서 저주파 전자기장치(VLF electromagnetic induction)를 이용하여 조사한 결과, 동굴 내의 용암의 수위는 낮아지지만 그 내부를 흘러가는 용암의 유량은 일정하게 유지되는 것으로 보고되기도 하였다(Kauahikaua et al., 1998).

5.3.2. 다층구조에 영향을 미치는 요소

세계도처에 분포하는 다층구조를 갖는 용암동굴 중 하와이의 카주무라동굴(Allred and Allred, 1997, 2002)과 멕시코의 수치옥 화산지역 용암동굴(Espinasa, 2006)은 동굴의 분포와 규모, 상·하위동굴의 형태 및 특징 등이 비교적 상세히 기재되어 만장굴 다층구조를 해석하는데 많은 도움이 될 뿐만 아니라, 다층구조 형성에 영향을 미치는 요인들에 관한 비교연구를 가능케 한다.

먼저 하와이 카주무라 동굴의 경우, 42 km(최하위 동굴의 길이)에 걸쳐 상류에서부터 하류까지 여러 지점에서 다층구조가 관찰되는데, 대체로 2개의 층으로 나뉘지며, 간혹 몇몇 짧은 구간에서 3개의 층이 관찰되기도 한다(Allred and Allred, 2002). 다층구조가 끊어짐 없이 가장 길게 발달한 부분은 가장 상류의 올라아 구간에 존재하며, 그 길이는 약 600 m에 이른다(Allred, personal communication, 2009). 다층구조의 일반적 특징을 보면 상위동굴의 규모가 하위동굴에 비해 상대적으로 더 크고, 상위동굴의 바닥과 벽면이 더 불규칙하며, 상위동굴 바닥보다 높은 천장 가까이에 다락구조나 윗가지굴 등이 관찰(Allred and Allred, 1997)되는 등 상·하위동굴의 규모 및 내부구조의 특징이 만장굴과 아주 유사하다.

멕시코 수치옥 화산지대의 용암동굴은 약 10 km(최상류 동굴에서 최하류동

굴까지의 직선거리)에 걸쳐 여러 가닥의 주간동굴과 주간동굴에서 흘러나간 용암에 의한 복합동굴망으로 이루어져 있는데, 규모가 큰 주간동굴 내의 여러 지점에서 2~4개의 층으로 나뉘는 다층구조가 조사되었다(Espinasa, 2006). 대부분의 다층구조는 만장굴이나 카주무라동굴에 비해 그 연장성이 짧은 것이 특징이며, 가장 길게 발달한 구간이 약 200 m정도이다. 다층구조는 대체로 상류 및 하류로 가면서 용암선반으로 점진적으로 변하며, 그 표면에는 붉은 색의 아아조직이 발달해 있는데, Espinasa(2006)은 이러한 특징을 바탕으로 용암동굴 내를 흘러가는 용암이 벽면과 맞닿는 부분에서부터 굳어 제방이 형성되고, 이 제방이 동굴 중앙부로 성장하여 서로 합쳐져 하위동굴 지붕이 형성되는 것으로 해석하였다. 특히 이 용암동굴은 상위동굴과 하위동굴의 바닥면이 모두 붉은 색의 아아구조가 발달해 있는 것이 특징인데, 이는 만장굴이나 카주무라 동굴의 상위동굴과 하위동굴 바닥이 대부분 파호이호이 표면을 나타내는 것과는 대조적이다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 만장굴의 다층구조는 여러 가지 면에서 하와이 카주무라 용암동굴과 유사한데 반해, 멕시코의 수치옥 용암동굴과는 형태 및 규모, 특징 등에서 서로 다르다. 이러한 차이는 다층구조의 형성에 영향을 미치는 요인에 의한 것으로 판단된다.

다층구조를 형성하는데 가장 큰 영향을 미치는 공통적인 요인은 이미 형성된 용암동굴 내에 새로운 용암층이 형성될 수 있도록 용암수위가 일정하게 유지되는 환경이 만들어져야 할 것이다(Allred and Allred, 1997; Greeley, 1998; Kauahikaua et al., 1998). 용암수위가 일정하게 유지되는 환경으로는 우선 공급지에서 일정량의 용암이 꾸준히 공급되거나, 낙반 등에 의해 용암동굴이 막혀 동굴 내에 용암수위가 적당한 시간동안 유지되거나, 용암류 선단부가 갑자기 평탄한 지형을 만나면서 용암의 배출과 공급이 균형을 이루어 동굴 내에 수위가 유지되는 등 여러 가지 경우를 생각할 수 있다.

이렇게 용암수위가 일정하게 유지되는 환경에서 만들어지는 다층구조에 있어서, 위에서 언급된 서로 다른 특징이 관찰되는 것은 아마도 용암동굴이 형

성되는 지형경사의 차이에 의한 것으로 판단된다. 멕시코 수치옥 화산지역은 지형경사가 최대 12° 에 달하는데 반해, 만장굴이나 카주무라동굴의 경우 지형경사가 $1.5\sim 2^\circ$ 정도로 아주 완만한 지형에 형성된 것을 알 수 있다. 이러한 지형경사의 영향은 동굴 내부의 표면구조에도 영향을 미쳤다. 지형경사가 급한 수치옥 용암동굴의 경우 내부표면이 대부분 아아구조를 보이는데 반해, 지형경사가 완만한 만장굴과 카주무라동굴은 파호이호이구조를 보이는데, 이는 완만한 지형에서 파호이호이 형태로 흘러가던 용암류가 경사가 급한 구간을 흘러가면서 상대적으로 큰 전단변형을 받게 되어 아아구조로 전이되는 현상 용암류의 예에서 그러한 표면구조 차이의 원인을 생각할 수 있다(Hon and Gansecki, 2002; Hon et al., 2003). 만약 파호이호이와 아아 구조의 차이가 단순히 용암온도와 그에 따른 점성의 차이에 의한 것이라면, 용암동굴의 상류에서 상대적으로 온도가 높은 것을 고려했을 때(Helz et al., 2003), 동일선상의 동굴 내에서 바닥표면이 파호이호이에서 아아로, 다시 아아에서 파호이호이로 장소에 따라 변하는 것을 설명하기는 어려울 것이다. 뿐만 아니라 지형경사는 다층구조 형태에도 영향을 미쳤는데, 만장굴이나 카주무라의 경우 용암층이 위로 상승하거나 아래로 내려앉아 상위동굴의 바닥이 불규칙한 특징은 나타내는 반면, 수치옥 용암동굴에서는 벽면에서부터 형성되는 제방(선반)이 동굴 중앙부에서 서로 맞닿아 하나의 층을 형성하는 특징을 보인다. 이러한 특징은 동일한 화산지역 내에서 지형경사에 따라 서로 다른 용암동굴 형성과정이 관찰된 하와이의 푸오오-쿠파이아나하 화산활동에서의 예에 비추어 해석이 가능할 것으로 판단된다. 즉 Kauahikaua et al.(1998)은 하와이 푸오오-쿠파이아나하 화산지역에서 용암류의 흐름과 그 내부의 용암동굴의 형성과정을 관찰하고, 용암동굴이 형성되어지는 환경을 지형경사에 따라 두 부분으로 구분하였다. 하나는 경사가 급한 상류 고지대와 다른 하나는 경사가 2° 이하의 해안저지대로 나누었는데, 지형경사가 급한 전자의 경우 용암동굴은 주로 채널의 양쪽에서 생성되는 제방의 성장이나 채널 표면에 용암층 지붕이 만들어지면서 형성되는데 반해, 후자의 경우 초기에 얇은 용암층이 퍼져나가고

이후 그 아래에 용암이 계속해서 유입되면서 일제히 표면이 상승하고, 그 내부에 용암동굴이 형성된다고 보고하였다. 다층구조는 이미 형성된 동굴 내에 새로운 용암층이 형성되어 만들어진 구조(Allred and Allred, 1997)로 지표를 흘러가는 용암류와는 약간의 차이가 있을 수 있지만, 위에서 언급한 하와이의 푸오오-쿠파이아나하 화산지역에서의 경우에 비추어 보면, 멕시코의 수치옥 화산지역 용암동굴은 지형경사가 급한 곳에서 생성되는 용암동굴의 생성메커니즘과 유사하며, 만장굴이나 카주무라동굴의 경우는 경사가 완만한 하와이의 해안저지대에서 용암동굴이 형성되는 과정과 유사한 메커니즘으로 형성되었을 것으로 판단된다.

이러한 지형경사는 다층구조의 연장성에도 영향을 미칠 것으로 판단된다. 즉 지형경사가 급한 멕시코 수치옥의 경우 다층구조의 연장길이가 대체로 짧은데 반해, 지형경사가 완만한 만장굴이나 카주무라동굴의 경우 다층구조가 대체로 길게 발달한다. 이는 경사가 완만하면 완만할수록 용암수위가 일정하게 유지되는 구간의 길이가 길어지는 것과 관련이 있을 것으로 판단된다. 실제로 지형경사가 0.7° 보다 작은 만장굴(4.5 km: 최하위동굴의 측정거리)의 경우 다층구조가 상류구간에 약 1.1 km, 하류구간에 약 0.9 km로 총 4.5 km 중 2 km 구간에 발달해 있다. 이에 비해 만장굴과 아주 유사한 특징을 가지며 용암동굴 전구간 42 km(최하위동굴의 측정거리)에 걸친 평균 지형경사가 1.5° 인 카주무라 동굴의 경우, 다층구조가 가장 연장성 있게 발달한 구간은 평균 지형경사가 2° 인 올라아 구간으로 약 600 m의 연장을 보이지만, 이 밖에 다른 다층구조 구간들은 이보다 연장길이가 짧다(Allred and Allred, 2003; Allred, personal communication, 2009). 다층구조의 연장성은 다층구조를 형성하는데 가장 큰 영향을 미치는 일정용암수위 유지시간의 차이에 의해 달라질 수도 있다. 하지만 일정한 용암수위가 유지되는 시간이 거의 동일한 조건이라면, 만장굴과 카주무라의 비교에서 유추할 수 있는 바와 같이 지형경사가 더 완만한 곳에서 더 연장성 있게 발달할 가능성이 높은 것으로 판단된다.

6. 결론

제주도 북동부에 위치한 거문오름 용암동굴계의 만장굴에 대하여 무타킷광파측량기를 이용하여 정밀측량을 실시한 결과, 만장굴 3입구에서 1입구까지의 측정거리는 4.5 km, 지표의 고도차는 54 m이며, 지표의 평균경사는 0.7° , 용암동굴의 바닥경사는 0.4° 를 나타낸다. 1° 이하의 완만한 지형경사, 채널이나 제방의 흔적이 관찰되지 않는 지표특징 그리고 길쭉한 형태의 압력언덕 등을 종합해보면, 만장굴을 형성한 용암은 용암천의 형태로 흘러가기보다는 평평한 시트상으로 흘러 용암상승과 터짐현상을 반복하면서 흘렀으며, 이러한 흐름상태에서 용암류의 표면이 굳고 그 아래로 용암이 계속해서 흘러 초기 만장굴이 형성된 것으로 여겨진다.

만장굴의 최대 동굴높이와 최대 동굴폭의 비가 1.3으로 높이가 폭보다 크고, 동굴 내부에 용암침식을 지시하는 여러 내부구조들이 관찰되는 것으로 미루어, 초기에 형성된 용암동굴에 지속적으로 용암이 공급되면서 동굴바닥이 내부를 흘러가는 용암에 의한 침식으로 점점 성장해 간 것으로 추측된다. 이렇게 침식작용을 주로 받은 최하위동굴 바닥면은 평균 0.4° 의 경사를 보이며, 상대적으로 경사가 급한 구간이 0.7° 로 전체적으로 아주 완만하다. 이에 반해 용암동굴 천장의 높이는 최대 23 m에서 최소 2 m로 높이 차이가 크고 불규칙하다. 이는 동굴천장이나 벽면에서 관찰되는 용암부가와 붕괴의 증거에서 알 수 있듯이, 용암동굴 천장과 벽면에는 차별적 용암부가와 붕괴가 주로 일어났음을 암시한다.

최초 형성된 용암동굴은 그 내부를 흘러가는 용암에 의한 침식과 부가작용에 의해 서서히 성장해가게 되는데, 용암에 의한 침식정도는 용암동굴 내를 흘러가는 용암흐름 지속시간, 지형경사 등의 요인에 의해 크게 좌우되며, 다층구조와 같은 용암의 부가현상은 동굴 내의 용암수위가 일정하게 유지되는 기간과 지형경사 등에 의해 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

정밀측량과 내부구조에 대한 해석을 바탕으로 2층의 다층구조 갖는 만장굴의 형성과 성장과정을 구성해 보면 다음과 같다. 먼저 시트상의 용암류에서 초기형태의 용암동굴이 만들어진 후, 이미 생성된 초기형태의 용암동굴로 분출량이 대체로 일정한 용암이 지속적으로 흘러가면서 그 표면이 굳어 하위동굴 지붕 즉 상위동굴 바닥이 형성되었다. 이후에도 용암은 계속 흘러 동굴바닥은 더 깊게 침식되었으며, 천장에는 용암이 부가되어 현재와 같은 하위동굴이 형성되었다. 용암석주의 경우 하위동굴까지 완전히 형성된 이후 만장굴 상위 지표를 흘러가던 새로운 용암류가 천장창 혹은 창구조를 통해 만장굴 내로 흘러들어 와 독특한 구조물을 형성한 것으로 판단된다.

참고문헌

- 고기원, 박윤석, 박원배, 2004, 제주도 동부지경의 지하지질분포와 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대. 대한지질학회춘계학술답사, 제주도의 화산암과 화산활동, 29-50.
- 고기원, 박준범, 박윤석, 2008, 제주도의 지질과 화산활동에 관한 연구 (I): 동부지역 저지대 시추코어 화산암류의 암석화학 및 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대. 자원환경지질, 41, 93-113.
- 국립문화재연구소, 2007, UNESCO 세계자연유산 거문오름 용암동굴계의 신비. 100p.
- 농업진흥공사, 1971, 제주도 지하수 보고서. 381p, 1지질도, 4도면.
- 문화재청, 2003, 제주도 천연동굴 일제조사 보고서. 263p.
- 문화재청, 2005, 제주“용천동굴”기초학술조사보고서. 166p.
- 박기화, 안주성, 기원서, 박원배, 2006, 제주도지질여행. 한국지질자원연구원 · 제주발전연구원, 183p.
- 박기화, 이병주, 조등룡, 김정찬, 이승렬, 김유봉, 최현일, 황재하, 송교영, 최범영, 조병욱, 1998, 제주 · 애월 지질보고서). 제주도, 290p.
- 북제주군, 2003, 만장굴 실태(학술)조사 및 안전진단보고서. 100p.
- 북제주군, 2004, 재암천굴, 대림동굴 학술조사 및 안전진단보고서. (사)제주도 동굴연구소, 105p.
- 손인석, 2000, 제주화산동굴분포와 구조해석. 제주도 동굴보전을 위한 제주화산동굴학술발표회, 제주환경연구센터, 5월 20일, 9-40.
- 손인석, 2003, 제주도 천연동굴 분포: 제주도 동북사면을 중심으로. 제주도자연유산지구 국제학술세미나, 제주도 북제주군, 11월 10일, 57-78.
- 안웅산, 황상구, 2008, 정밀측량을 통한 만장굴 용암동굴의 형성과 성장과정에 대한 해석. 지질학회지, 44, 657-672.
- 안웅산, 황상구, 2009, 만장굴 용암동굴을 형성한 용암의 공급지에 관한 연구.

- 암석학회지, 18, 237-253.
- 원종관, 길영우, 이문원, 1998, 제주도 북동사면에 분포하는 화산암류의 암석학적 연구. 한국지구과학회지, 19, 329-342.
- 원종관, 이문원, 이동영, 손영관, 1993, 성산도폭지질도설명서. 건설부 · 제주도 · 한국지질자원공사, 104p.
- 이동영, 윤상규, 김주용, 김윤중, 1987, 제주도 제4기 지질조사연구. 한국동력자원연구소, 233-278.
- 이문원, 윤성효, 황상구, 2003, 제주화산지형 및 지질의 자연유산 가치. 제주도자연유산지구 국제학술세미나, 제주도 북제주군, 11월 10일, 81-134.
- 제주도동굴연구소, 2001, “선흘수직동굴 · 함몰구” 학술조사보고서. 매장문화재천연동굴 학술탐사연구 series 2, 18p.
- 제주특별자치도, 2009, 용천동굴 종합학술조사 보고서. (사)한국동굴연구소, 280p.
- 제주환경연구센터, 1998, 선흘벉뒤굴 학술조사보고서. 33p.
- 한국중부발전(주), 2007, 제주 덕천풍력발전 건설공사 동굴조사를 위한 물리탐사 및 시추. 동굴조사보고서, 89p.
- 황상구, 안웅산, 이문원, 윤성효, 2005, 제주도 북동부 거문오름 용암튜브계의 형성과 내부구조. 지질학회지, 41, 385-400.
- 황상구, 진 꾸, 안웅산, 2005, 중국 오대연지 라오헤이산과 후오샤오산의 화산형태와 분출 과정. 암석학회지, 14, 251-263.
- Allred, K. and Allred, C., 1997, Development and morphology of Kazumura cave. Hawaii. Journal of Cave and Karst Studies, 59(2), 67-80.
- Allred, K. and Allred, C., 2002, Kazumura cave atlas. Hawaii Speleological Survey, 82p.
- Atkinson, A. and Atkinson, V., 1995, Undara Volcano and its Lava Tubes. Undara Volcanic National Park, Anne and Vernon Atkinson,



- Brisbane, Queensland, 86p.
- Ball, M., Pinkerton, H., and Harris, A.J.L., 2008, Surface cooling, advection and the development of different surface textures on active lavas on Kilauea, Hawai'i. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 173, 148-156.
- Ballard, R.D., Holcomb, R.T. and van Andel, T.H., 1979, The Galapagos Rift at 86°W: 3. Sheet flows, collapse pits, and lava lakes of the rift valley. *Journal of Geophysical Research*, 84, 5407-5422.
- Bunnell, D., 2008, *Caves of Fires: Inside American's Lava Tubes*. National Speleological Society, Inc., Alabama, 124p.
- Calvari, S. and Pinkerton, H., 1998, Formation of Lava tube and extensive flow field during the 1991-1993 eruption of Mount Etna. *Journal of Geophysical Research*, 103, 27291-27301.
- Calvari, S. and Pinkerton, H., 1999, Lava tube morphology on Etna and evidence for lava flow emplacement mechanisms. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 90, 263-280
- Cas, R.A.F. and Wright, J.V., 1987, *Volcanic successions: modern and ancient*. Allen & Unwin Ltd., London, 528p.
- Coombs, C.R., Hawke, B.R. and Wilson, L., 1990. Terrestrial analogs to Lunar sinuous rilles: Kauhako Crater and Channel, Kalaupapa, Molokai and other Hawaiian lava tube conduit systems. *Proceedings of the 20th Lunar and Planetary Science Conference*, Lunar and Planetary Institute, Houston, 195-206.
- Espinasa-Perena, R., 2006, Lava tubes of the Suchiooc Volcano, Mexico. *Association for Mexican Cave Studies Bulletin* 17, 80p.
- Fagents, S.A. and Greeley, R., 2001, Factors influencing lava-substrate heat transfer and implications for thermomechanical erosion. *Bulletin*



- of Volcanology, 62(8), 519-532.
- Greeley, R., 1971, Geology of selected lava tubes in the Bend area, Oregon. Oregon Department of Geology and Mineral Industries Bulletin 71. 47p.
- Greeley, R., 1987, The role of Lava Tubes in Hawaiian Volcanoes. United State Geological Survey Professional Paper, 1350, 1589-1602.
- Greeley, R., Fagents, S.A., Harris, R.S., Kadel, S.D. and Williams, D.A., 1998, Erosion by flowing lava: Field evidence. Journal of Geophysical Research, 103, 27325-27345.
- Halliday, W.R., 2002, Caves of the Great Crack of Kilauea Volcano, Hawaii (abstract). Abstract volume, 10th International Symposium on Vulcanospeleology, Reykjavik, Iceland, September 9-15, 19p.
- Hallworth, M.A., Huppert, H.E. and Sparks, R.S.J., 1987, A laboratory simulation of basaltic lava flows. Modern Geology, 11, 93-107.
- Hazlett, R.W. and Hyndman, D.W., 2002, Roadside Geology of Hawaii. Mountain Press Publishing Company, Montana, 307p.
- Heliker, C.C., Mangan, M.T., Mottox, T., Kauahikaua, J. and Helz, R.T., 1998, The Character of long-term eruptions: Inferences from episodes 50-53 of the Pu'u 'O'o-Kupaianaha eruption of Kilauea Volcano. Bulletin of Volcanology, 59, 381-393.
- Heliker, C.C., Swanson, D.A., and Takahashi, T.J., 2003, The Puu Oo - Kupaianaha Eruption of Kilauea Volcano, Hawaii : The first 20 years. United State Geological Survey Professional Paper, 1676, 206p.
- Helz, R.T., Heliker, C.C., Hon, K. and Mangan, M.T., 2003, Thermal Efficiency of Lava Tubes in the Puu Oo-Kupaianaha Eruption. United State Geological Survey Professional Paper, 1676, 105-120.
- Helz, R.T. and Thornber, C.R., 1987, Geothermometry of Kilauea Iki

- lava lake, Hawaii. Bulletin of volcanology, 49, 651-668.
- Hon, K.A., and Gansecki, C.A., 2002, Lava flows and lava tubes; what they are, how they form: Volcano, Hawaii. Volcano video Productions, VHS videotape, 45min.
- Hon, K., Gansecki, C. and Kauahikaua, J., 2003, The Transition from 'A'ā to Pāhoehoe Crust on Flows Emplaced During the Pu'u 'O'ō-Kūpaianaha Eruption. United State Geological Survey Professional Paper, 1676, 89-103.
- Hon, K., Kauahikaua, J., Denlinger, R. and McKay, K., 1994, Emplacement and inflation of pahoehoe sheet flow-Observations and measurements of active lava flows on Kilauea Volcano, Hawaii. Geological Society of America Bulletin, 106, 351-370.
- Hon, K., 2007, New Insights on Basaltic Magma Chamber Dynamics and Lava flow Emplacement from Kilauea Volcano. Proceedings of the 5th International Symposium, Jeju Volcanological Institute, Jeju Island, Korea, May 25-26, 45-54.
- Kauahikaua, J., Mangan, M., Heliker, C. and Mattox, T., 1996, A quantitative look ta the demise of a basaltic vent: the death of Kupaianaha, Kilauea Volcano, Hawai'i. Bulletin of Volcanology, 57, 641-648.
- Kauahikaua, J., Cashman, K.V., Mattox, T.N, Heliker, C.C., Hon, K.A., Mangan, M.T. and Thornber, C.R., 1998, Observations on Basaltic lava streams in tubes from Kilauer Volcano, Island of Hawaii. Journal of Geophysical Research, 103(B11), 27303-27323.
- Kempe, S. and Henschel, H.V., 2006, Thurston Lava tube, the Most visited tube in the World. What Do We Know about it?. Proceedings of the XIII International Symposia on Vulcanospeleology, Tepoztlán,



- Morelos, Mexico, July 2-7, 219-228.
- Keszthelyi, L. and Denlinger, R., 1996. The initial cooling of pahoehoe flow lobes. *Bulletin of Volcanology*, 58, 5-18.
- Kilburn, C.R.J., 2004, Fracturing as a quantitative indicator of lava flow dynamics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 132, 209-224
- Larson, C.V., 1993, An illustrated glossary of lava tube features. *Western Speleological Survey Bulletin No.87*, 56p.
- Larson, C.V. and Larson, J., 1989, *Lava Beds Caves*. ABC Publishing, Vancouver, Washington, 56p.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745-750.
- Lee, M.W., 1982, Petrology and geochemistry of Jeju volcanic Island, Korea. *Science Report Tohoku University, Japan*, 15, 177-256.
- Macdonald, G.A. and Katsura, T., 1964 Chemical composition of Hawaiian Lavas. *Journal of Petrology*, 5, 82-133.
- Mackay, M.E., Rowland, S.K., Mougini-Mark, P.J. and Garbeil, H., 1998, Thick lava flows of Karisimbi Volcano, Rwanda: insights from SIR-C interferometric topography. *Bulletin of Volcanology*, 60, 239-251.
- Mattox, T.N., Heliker, C., Kauahikaua, J. and Hon, K., 1993, Development of the 1990 Kalapana Flow Field, Kilauea Volcano, Hawaii. *Bulletin of Volcanology*, 55, 407-413.
- Peterson, D.W., Holcomb, R.T., Tilling, R.I. and Christiansen, R.L., 1994, Development of lava tubes in the light of observations at Mauna Ulu, Kilauea Volcano, Hawaii. *Bulletin of Volcanology*, 56,

343-360.

- Peterson, D.W. and Swanson, D.A., 1974, Observed Formation of Lava Tubes During 1970-71 at Kilauea Volcano, Hawaii. *Studies in Speleology*, 2(6), 209-222.
- Pinkerton, H., James, M. and Jones, A., 2002, Surface temperature measurements of active lava flows on Kilauea volcano, Hawaii. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113, 159-176.
- Sawa, I. and Inoue, H., 1999, X-ray fluorescence analysis and K-Ar age determination of a lava bridge in Manjang-gul Cave, Korea. *Journal of Speleological Society of Japan*, 24, 57-63.
- Sawa, I., Murata, M., Hong, S.H. and Kashima, N., 1990, Analysis of the twin lava column sample in Manjang-gul Cave, Korea. *Journal of Speleological Society of Japan*, 15, 42-46.
- Swanson, D.A., 1973, Pahoehoe flows from the 1969-1971 Mauna Ula eruption, Kilauea Volcano, Hawai'i. *Geological Society of America Bulletin*, 84, 615-626.
- Takahashi, T.J., Heliker, C.C. and Diggles, M.F., 2003, Selected Images of the Puu Oo - Kupaianaha Eruption, 1983~1997. U.S. Department of the Interior, United State Geological Survey, 71p.
- Tilling, R.I., Christiansen, R.L., Duffield, W.A., Endo, E.T., Holcomb, R.T., Koyanagi, R.Y., Peterson, D.W. and Unger, J.D., 1987, The 1972-1974 Mauna-Ulu eruption, Kilauea Volcano: an example of quasi-steady-state magma transfer. In: Decker, R.W., Wright, T.L., Staufer, P.H.(Eds.), *Volcanism in Hawai'i, Volume 1*. United State Geological Survey Professional Paper, 1350, 405-469.
- Walker, G.P.L., 1991, Structure, and origin by injection of lava under surface crust, of tumuli, "lava rise", "lava-rise pits", and



- "lava-inflation clefts" in Hawaii. *Bulletin of Volcanology*, 53, 546-558.
- Waters, A.C., Donnelly-Nolan, J.M. and Rogers, B.W., 1990, Selected cave and lava-tube systems in and near Lava Beds National Monument, California. *United State Geological Survey Bulletin*, 1673, 102p.
- Weisel, D. and Heliker, C.C., 2003, *Kilauea The Newest Land on Earth*. Island Heritage Publishing, Hong Kong, 76p.
- Williams, D.A., Kadel, S.D., Greeley, R., Leshner, C.M. and Clyne, M.A., 2004, Erosion by flowing lava: geochemical evidence in the Cave Basalt, Mount St. Helens, Washington. *Bulletin of Volcanology*, 66, 168-181.



ABSTRACT

Lava source and Formation processes of the Manjanggul lava tube, Jeju Island, Korea

Ung-San Ahn

Department of Earth and Environmental Sciences
Graduate School, Andong National University, Andong, Korea
(Supervised by Professor Sang-Koo Hwang)

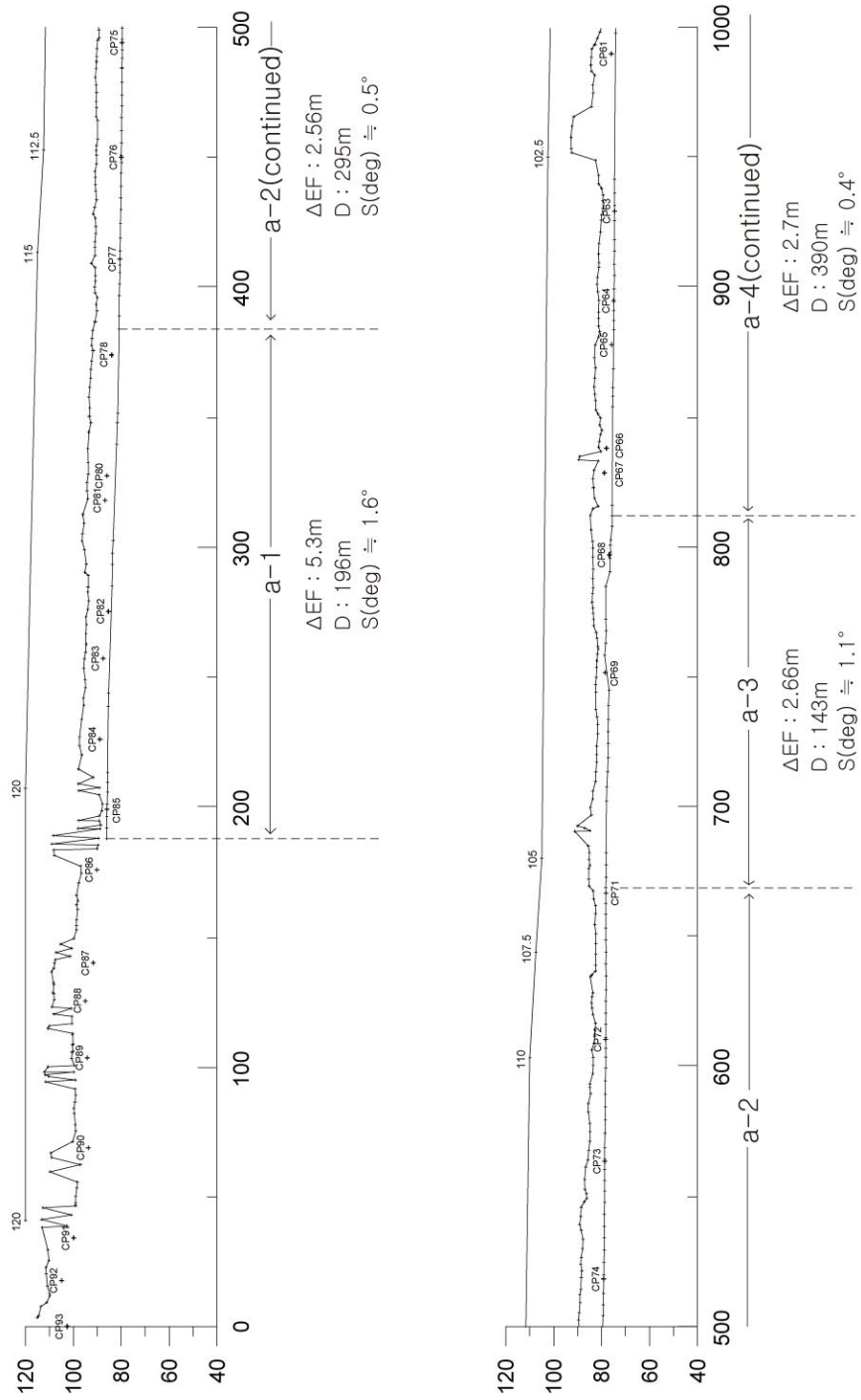
The lava flows forming the Manjanggul lava tube are commonly said to have a potential source from the Geomunoreum scoria cone. We inferred the source of lava flows with the Manjanggul lava tube, based on many studies about lava tubes within lava flows of active volcano in the world. We made a lava flow field map from lithofacies, features and latitude of lava surfaces in the northeastern part of Jeju Island, and then examined closely the distribution and mutual relation of lava tubes in each lava flow field. As result, the Geomunoreum lava tube system is divided into a series of master tubes(Utsanjeungul, Bukoreumgul, Daerimdonggul, Manjanggul, Gimnyeonggul, Yongcheon-donggul and Dangcheomuldonggul lava tube), a complicated networks of

small tubes(the Bengdwigul lava tube), and a series of unitary tubes (the Gimyeongbilemotgul ~ the Gaeusaemgul lava tube) in the Geomunoreum lava flows. Particularly a canyon, 2 km in length to NNE direction from the Geomunoreum scoria cone, is interpreted to be collapse trench of lava tube roof that belongs to an upflow part of the master tube in the Geomunoreum lava tube system, according to the location and direction. Accordingly, the source of lava flows, forming the Manjanggul lava tube, is the Geomunoreum scoria cone. In this study, a detailed survey by electronic total station and the description of internal structures were carried out on the Manjanggul lava tube(from 3rd entrance to 1st entrance), which is a well preserved portion of master tube line within the Geomunoreum lava tube system located in the northeastern Jeju Island. Based on the surveying data and internal structures, we interpretate formation and growth processes of the lava tube. According to this detailed survey, the horizontally surveyed distance of the lowest level tube in the Manjanggul lava tube from 1st to 3st entrance is about 4.5 km with about 54 m of a vertical extent, 0.4° of average tube floor slope, and 0.7° of average ground slope. The linear distance of lava tube from 1st and 3st entrance is about 3.4 km and the linear average ground slope is 0.9° . Here we can recognize that the Manjanggul lava tube is located in much less slope region as compared to the longest lava tube of the world, Kazumura Cave with 42 km of main passage length, 1,108 m of a vertical extent, 1.9° of linear average ground slope and 1.5° of average ground slope over lava tube passage. This lava tube is 2 m to 23 m high and 3 m to 21 m wide but it has generally 12 m to 15 m width in large passage and 4 m to 7 m width in small passage. The depth of highest

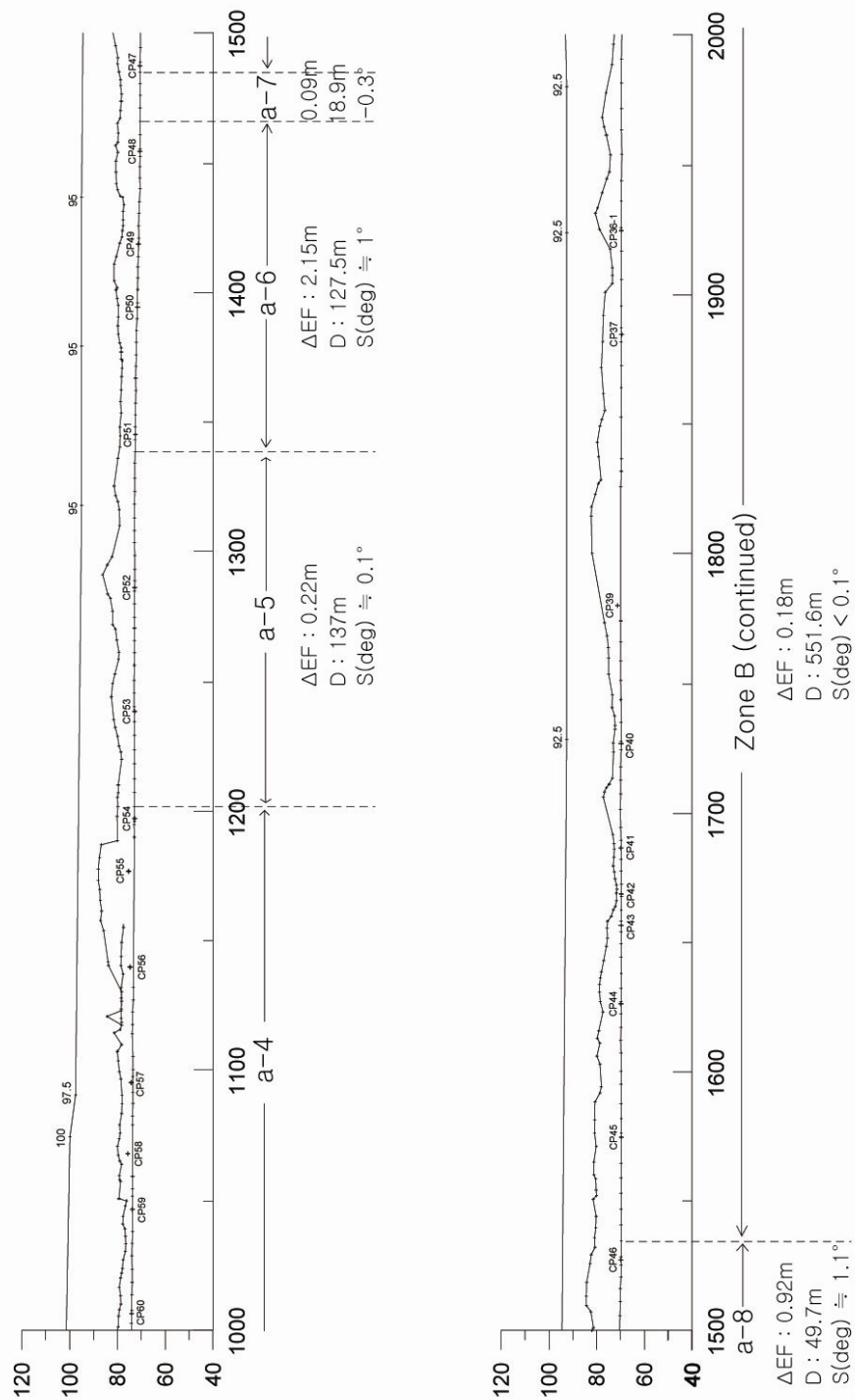
ceiling from surface is 3.4 m to 14 m and the depth of lowest level floor from surface is 14 m to 33 m, which is decreasing toward downflow. On the whole, maximum height to maximum width in the lava tube have 1.3 ratio, suggesting that the tube's height is taller than the width. And the tube floor is consistently sloped towards the downstream, while the ceiling height in the tube is extremely irregular without a consistency, ranging from 2 m to 23 m. Geometry and scale of this lava tube mentioned above is thought to be affected by thermal erosion and lava accretion(deposition) in the growth process of lava tube. There are many of internal structures to indicate such processes. Lava erosion is inferred by ① exposed clinker or paleosols in the wall of lava tube, ② asymmetric cross section of lava tube, ③ plan view showing lateral and downstream meander migration, ④ alcove or perched tube, and ⑤ skull or hourglass-shaped cross section, canyon-like passage so on. Internal structures indicating lava accretion are ① multi-level lava tube, ② lava shelf, ③ lining, ④ quartzite xenolith accreted at ceiling or wall of lava tube, and ⑤ lava injection into gaps between superposed linings so on. Interpreting the formation and growth processes of the Manjanggul lava based on its geometry and internal structures, the lava tube was formed from the continued sheet flows on a gently sloped topography. Then the outer crust of the sheet flows was first solidified and the inner fluidal lava drained out during a continuous flowing beneath the solidified crust to eventually form the initial stage of the lava tube. Later, the subsequent lava flows were continuously supplied into the tube to cause thermal erosion of the tube's floor, which gradually modified into the long-shaped tube that the height is taller than the width. Although the thermal erosions

were dominant in on the floor, there occurred dominant accretions of lava on the tube-ceiling to cause irregular height of the tube. It is guessed that the main factors affecting to the degree of erosion are duration of lava flow and slope, and lava accretion such as multi-level tube is controlled by duration of steady lava level in lava tube and slope. We can summarize the formation and growth processes of the Manjanggul lava tube, based on these interpretations. First, after the initial lava tube was formed, there were subsequent lava flows that passed through the initial tube. Then the surface of flowing lava became solidified to form the floor of the upper level tube, with drains of the residual liquid lava forming the lower level tube, which constructed a multi-level lava tube. The later lava flows that continually flow into the lower level tube caused deeper erosions of the tube's floor, and thicker lava accretions on the tube's ceilings. Finally, a new lava influxing from the ground surface fell down a ceiling of the lower level tube to flow on the floor, with a lava columns constructing in the tube.

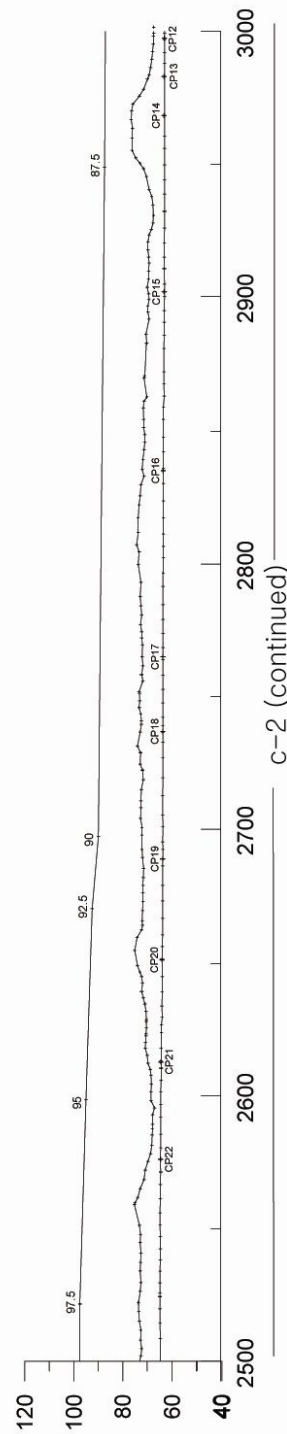
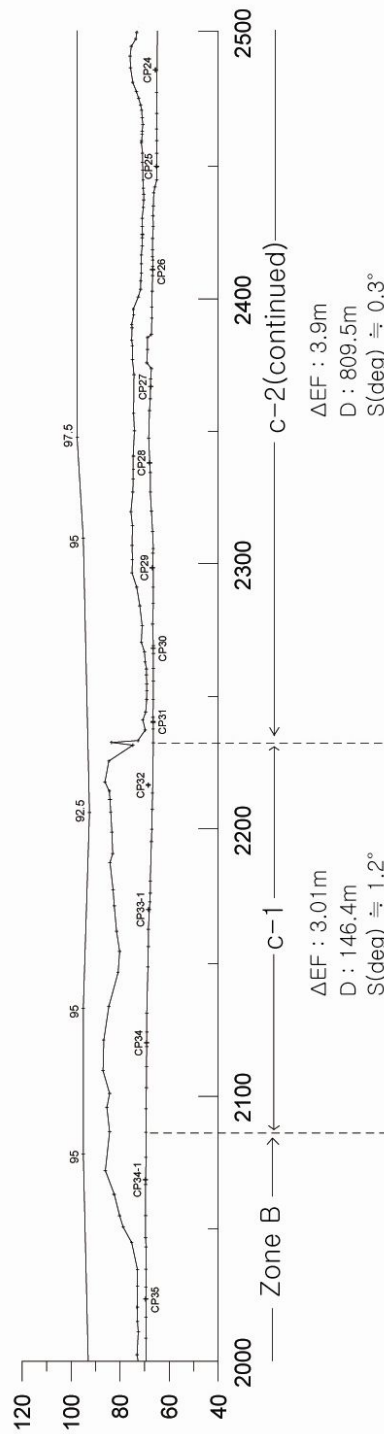
Appendix 1. Longitudinal profile of the Manjang lava tube from the 3th entrance to the 1st entrance.



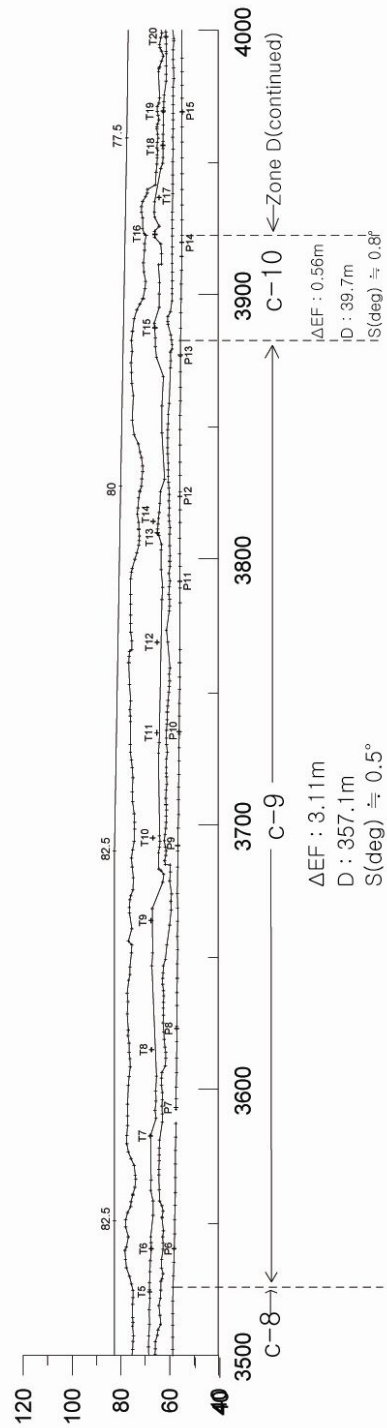
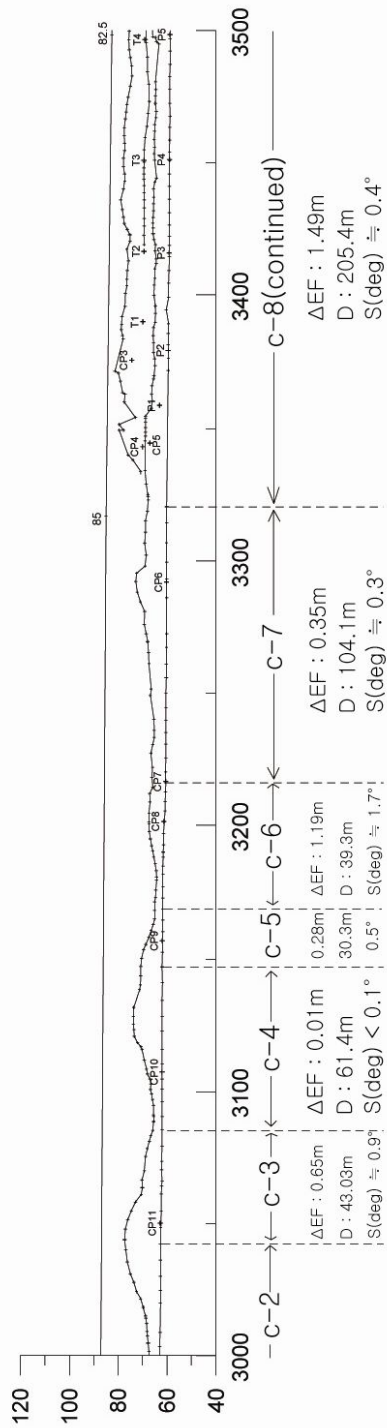
Appendix 1. Continued



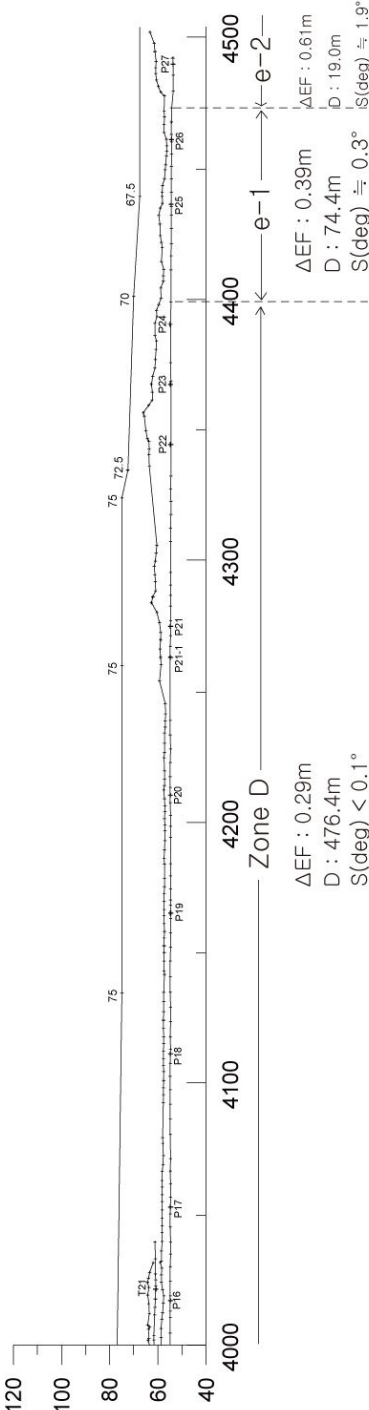
Appendix 1. Continued



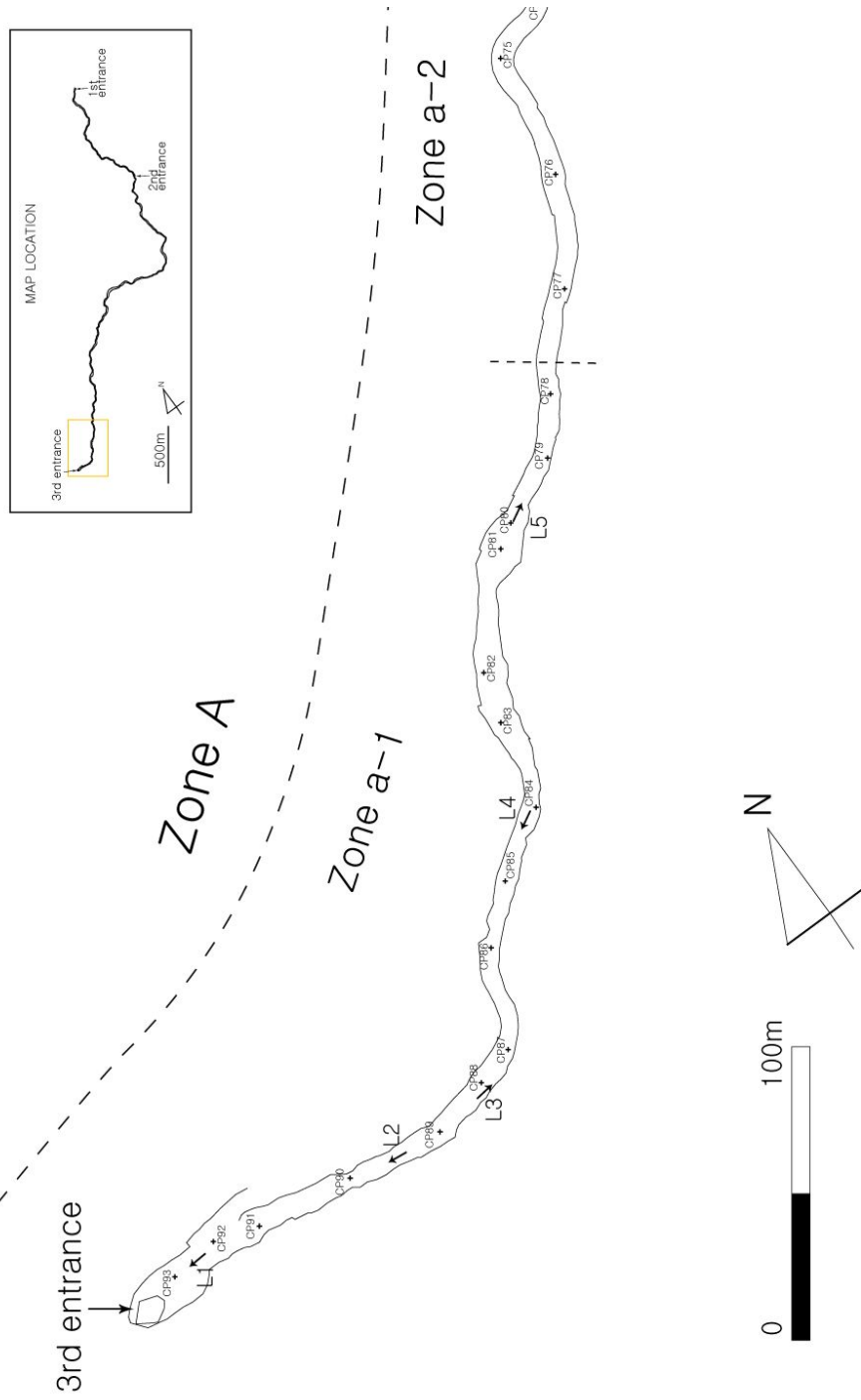
Appendix 1. Continued



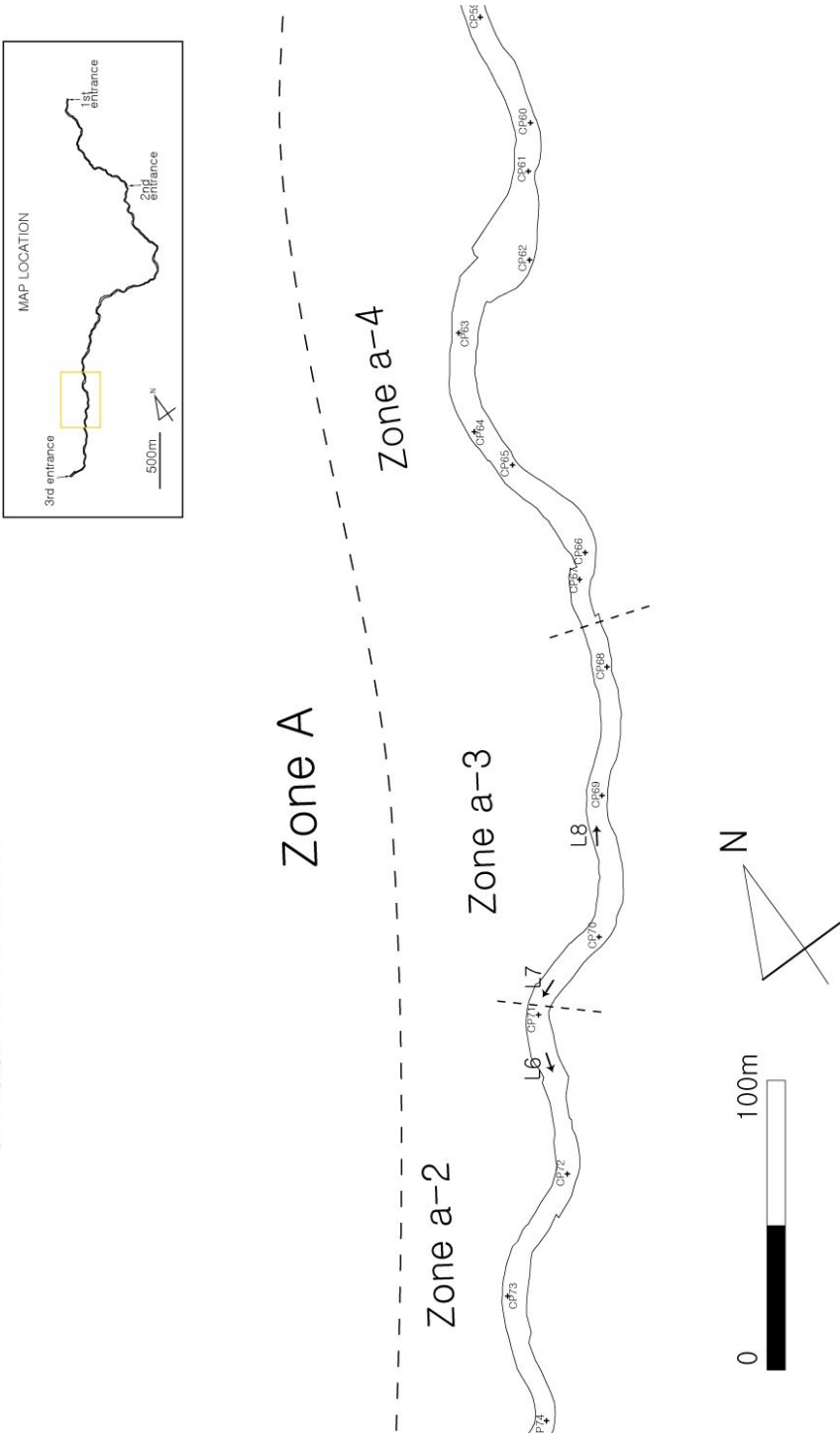
Appendix 1. Longitudinal profile of the Manjang lava tube from the 3th entrance to the 1st entrance.



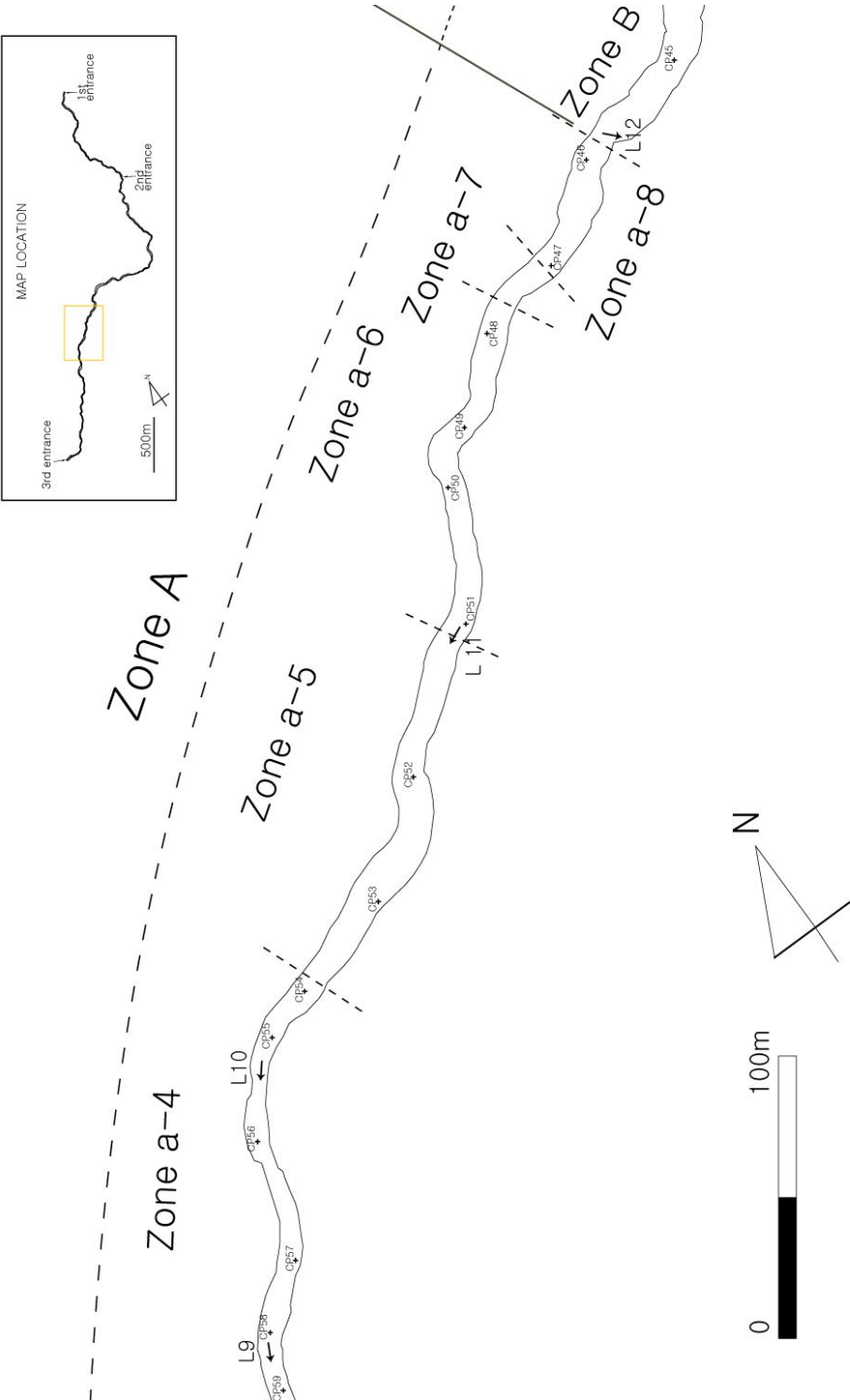
Appendix. 2-1. Location of description of internal features on plan of the Man-janggul lava tube.



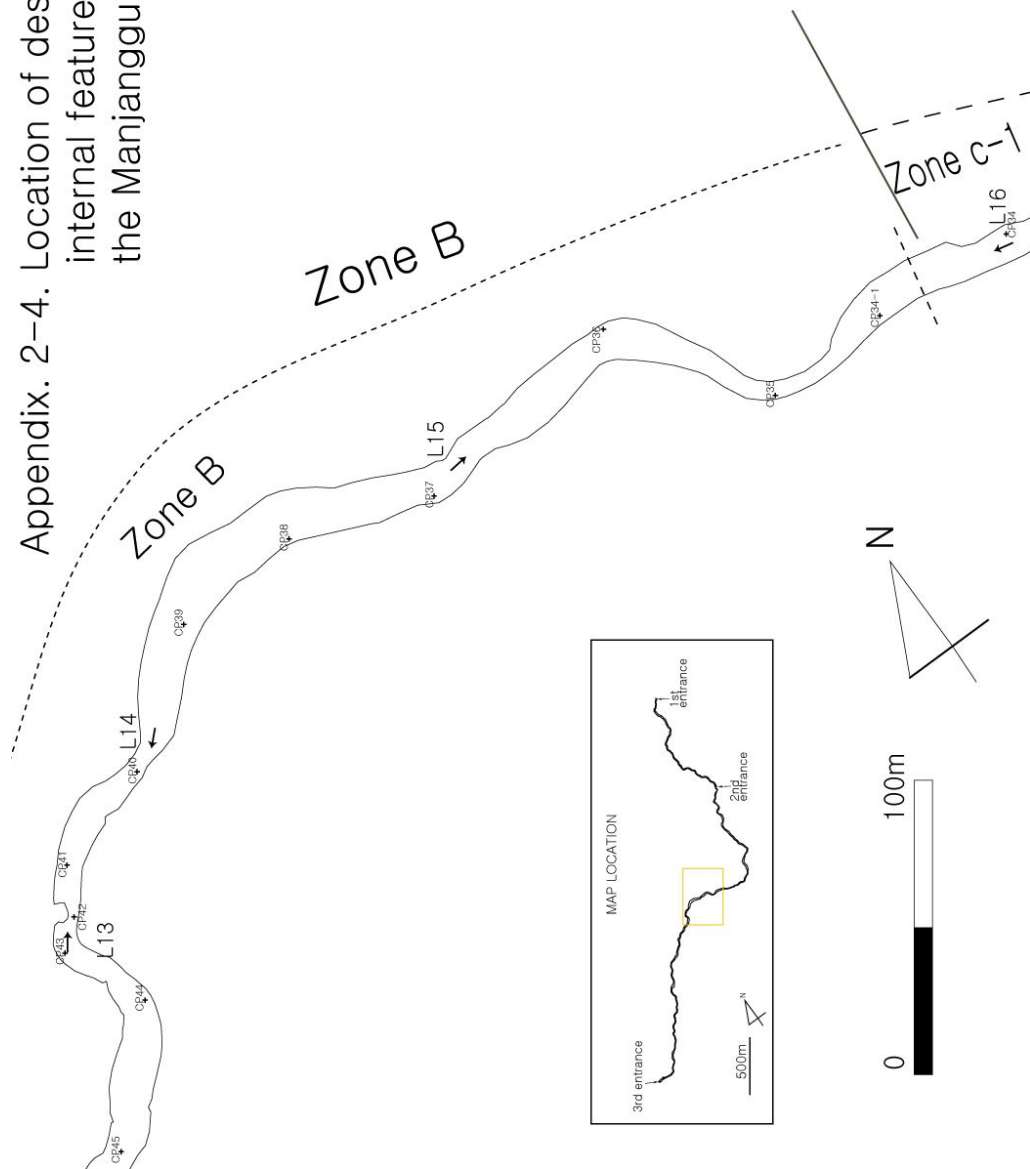
Appendix. 2-2. Location of description of internal features on plan of the Man-janggul lava tube.

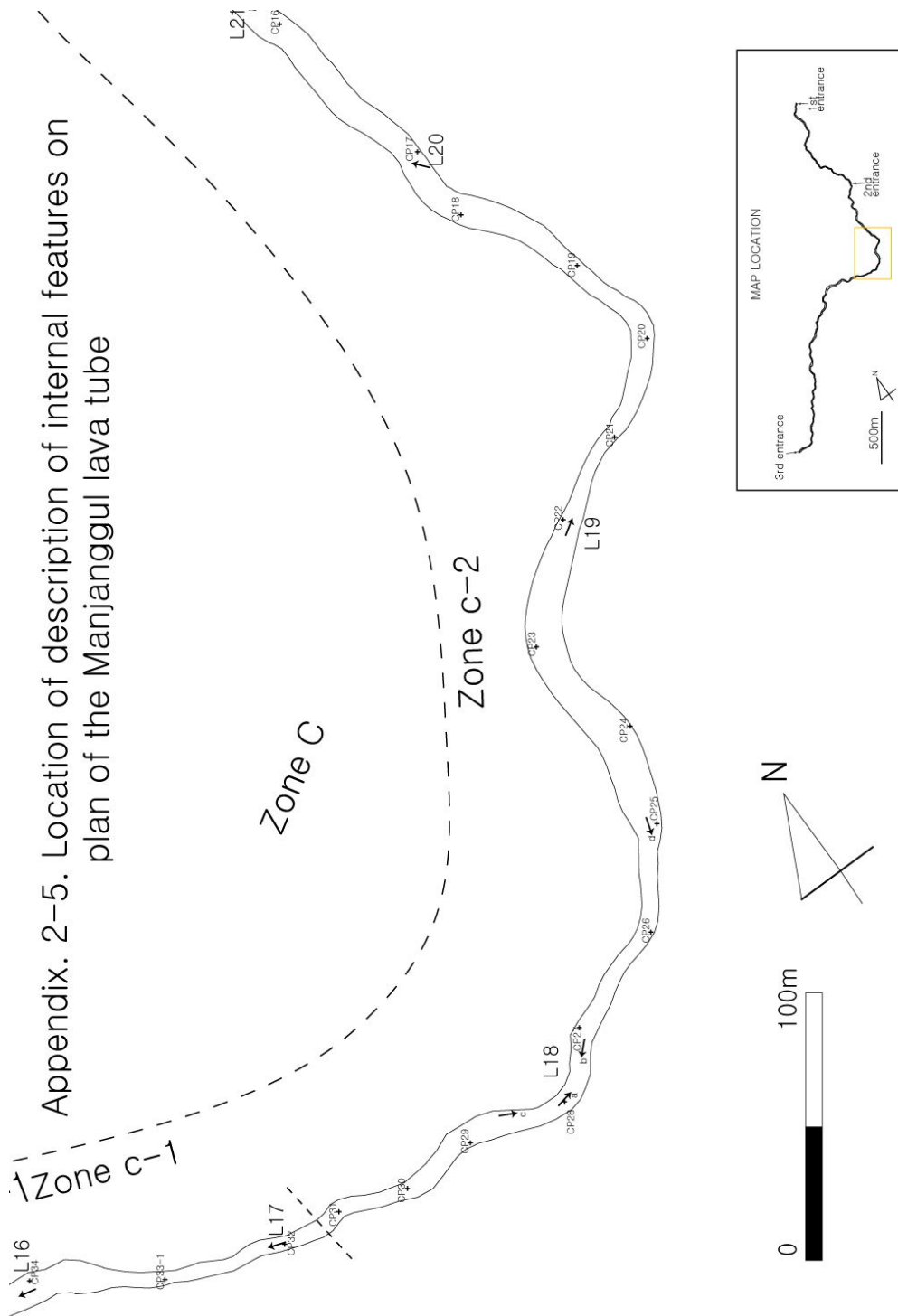


Appendix. 2-3. Location of description of internal features on plan of the Man-janggul lava tube.

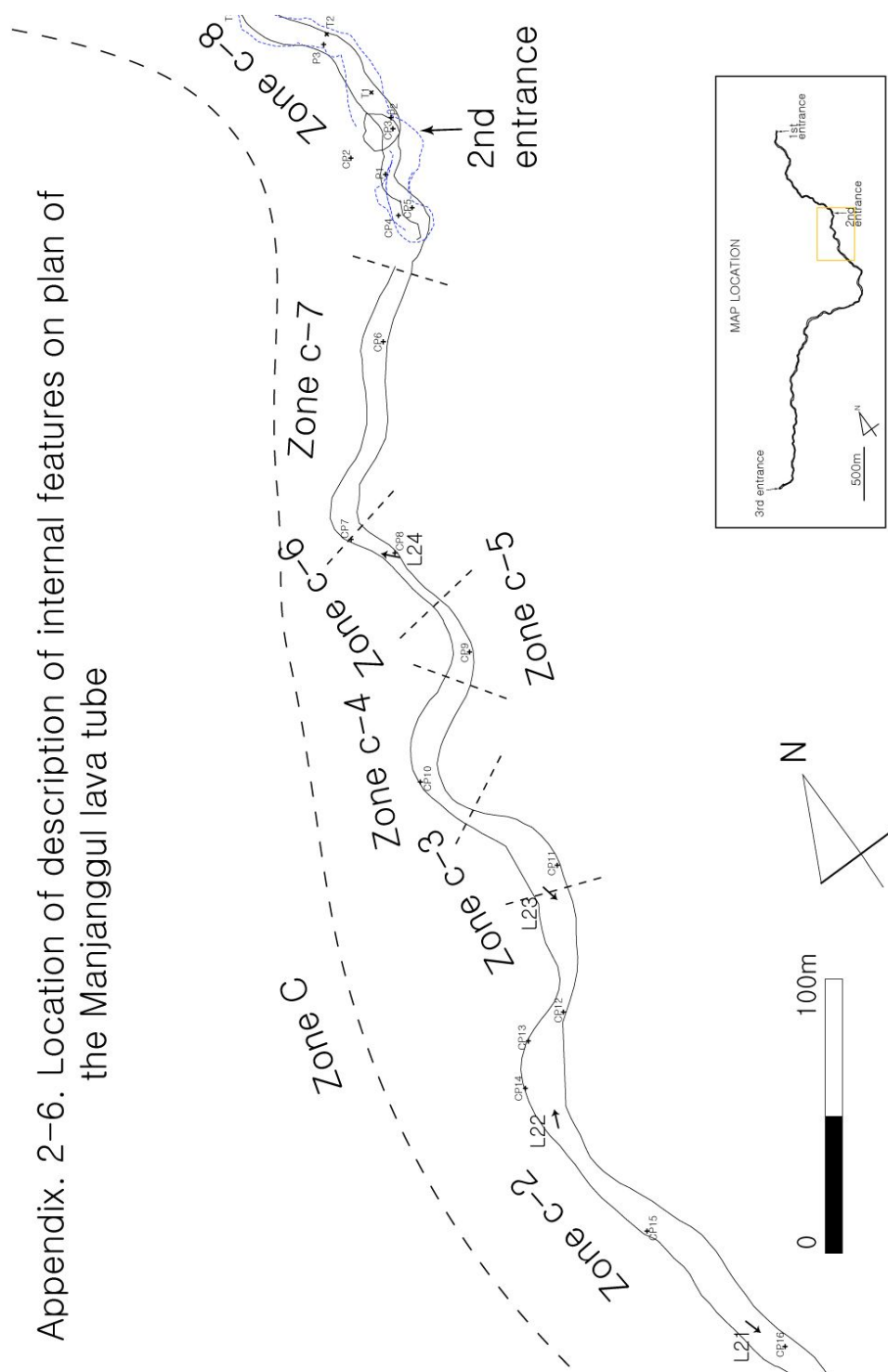


Appendix. 2-4. Location of description of internal features on plan of the Manjanggul lava tube.

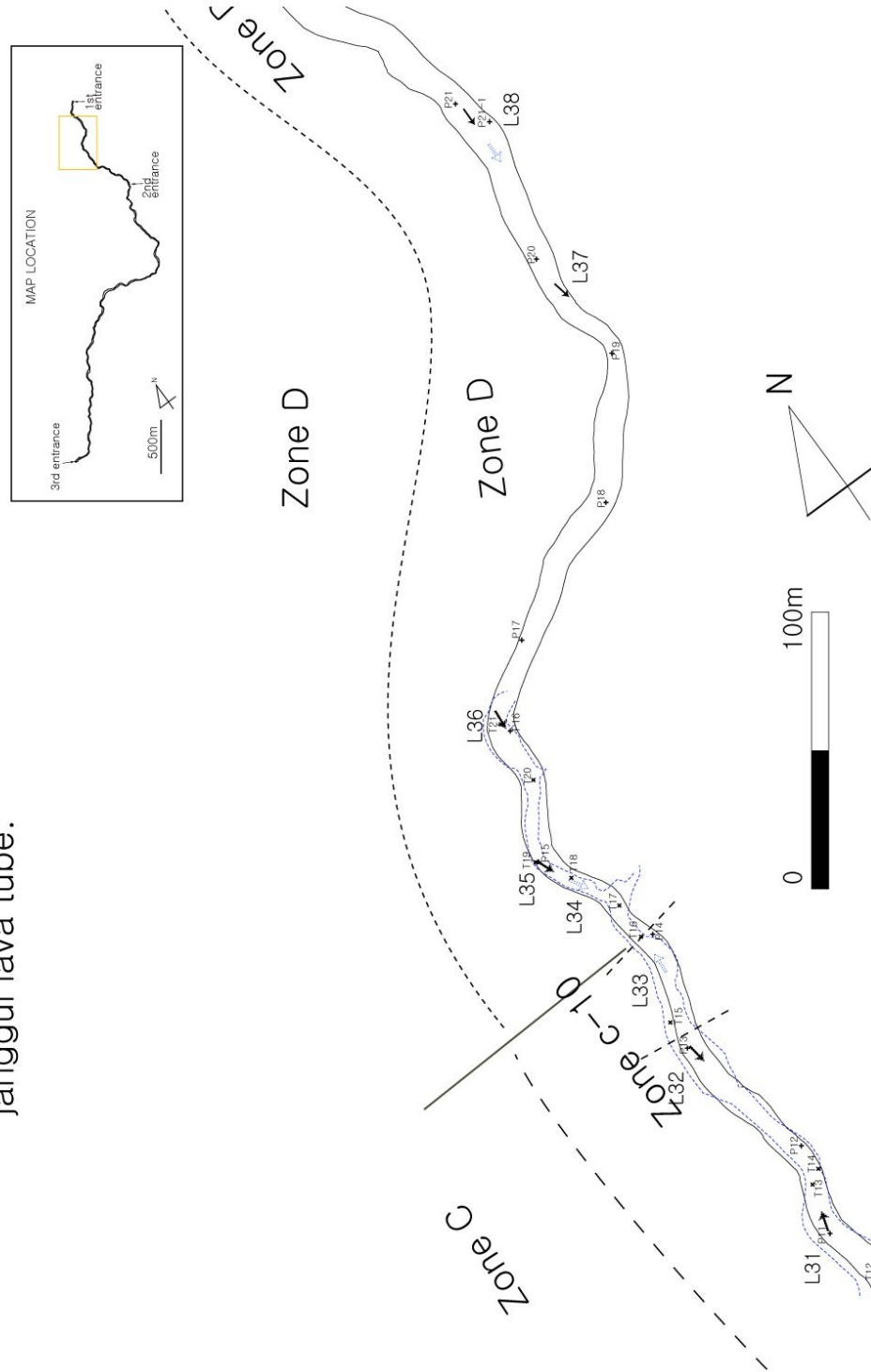




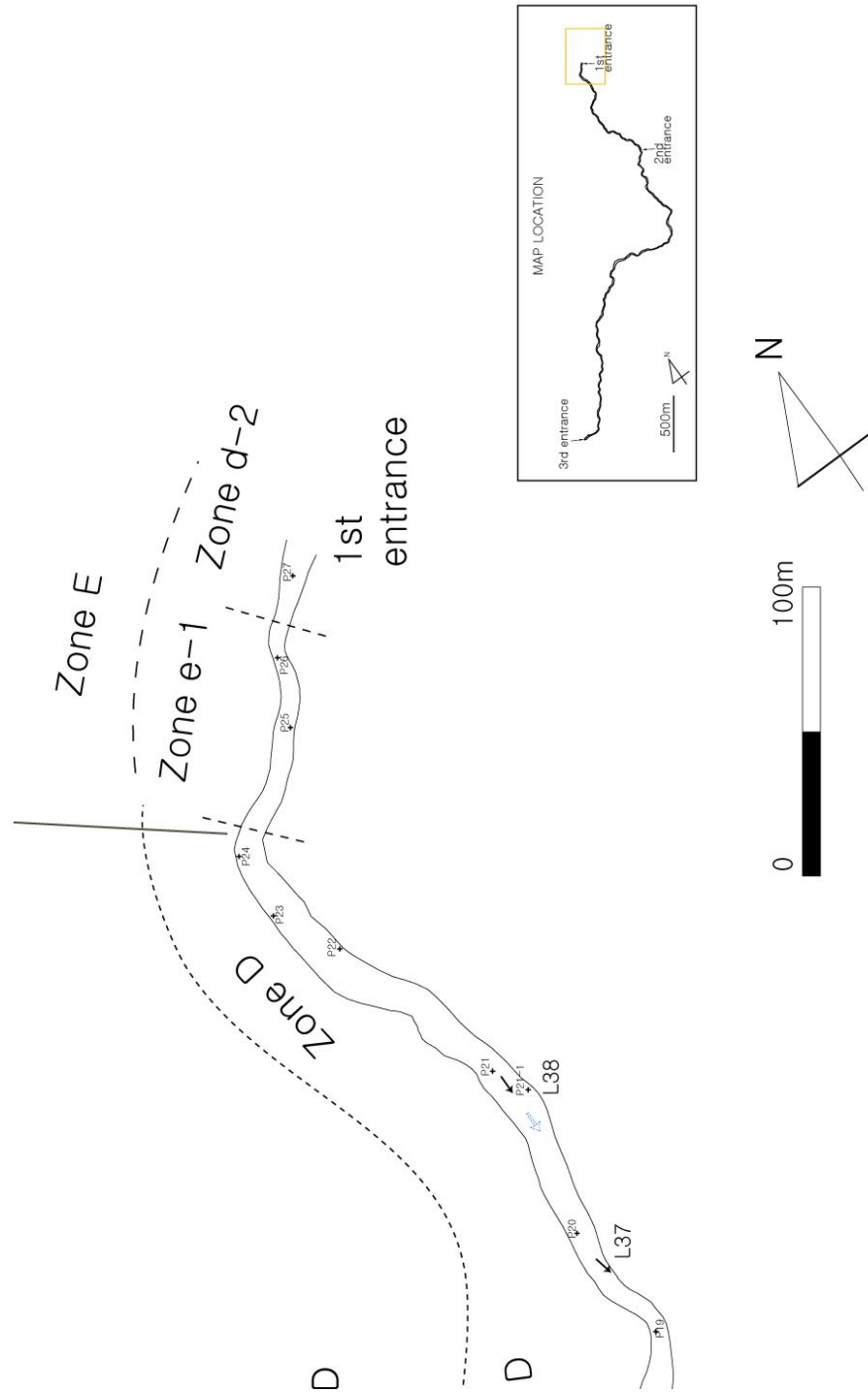
Appendix. 2-6. Location of description of internal features on plan of the Manjanggul lava tube



Appendix. 2–8. Location of description of internal features on plan of the Man-janggul lava tube.



Appendix. 2-9. Location of description of internal features on plan of the Man-janggul lava tube.



감사의 글

이 논문을 쓰기위해 만장굴에 들어가기 시작한지 7년이 넘었습니다. 일과 병행하여 연구를 계속할 수 있었던 건 지질학에 대한 열정과 항상 뒤에서 든든한 버팀목이 되어주신 황상구 교수님 덕분이라 생각하며, 늘 세심한 가르침과 끊임없는 격려에 깊은 감사를 드립니다. 학부와 대학원 재학시절 그리고 논문 심사과정에서 많은 관심과 가르침을 베풀어주신 이기동 교수님, 정기영 교수님, 강지훈 교수님과 학부와 대학원 재학시절의 은사이신 이동진, 정교철 교수님께도 감사드립니다. 그리고 제주도에서 살아온 7년간 학문적·정신적으로 많은 도움을 주시고 세심하게 논문을 검토해 주신 부산대학교 윤성효 교수님께 감사의 말씀을 전합니다.

이 논문의 일부를 학회지에 투고했을 때, 유익한 비평과 관심을 보여주신 이광춘 교수님, 손영관 교수님, 길영우 박사님께 사의를 표하며, 논문이 완성되기까지 야외조사, 술자리, 논문 등을 통해서 학문적 도움을 주신 원종관, 이문원, 우경식 교수님, 그리고 진명식, 박기화, 고기원, 송시대, 강순석, 박원배, 최돈원, 전용문 박사님, 한국동굴연구소 김련 부소장님께 감사드립니다.

박물관 학예사로서 관련 연구를 수행할 수 있도록 물심양면으로 배려해주신 김성언 소장님을 비롯하여 제주돌문화공원 모든 직원여러분들에게도 사의를 표합니다. 또한 원활한 연구수행에 도움을 주신 문화재청과 제주특별자치도 세계자연유산관리본부 그리고 거문오름탐방안내소 관계자분들께 감사드리며, 현장에서 새로운 연구주제를 생각나게 해주시는 문화관광해설사분들에게도 감사드립니다.

고교시절 사랑으로 감싸주신 김천고등학교 이종복 선생님과 석사동기 김상호 선배, 암석학 실험실 김성규 선배, 이보현, 조남식 그리고 후배들에게 감사의 뜻을 전합니다.

이 작은 결실이 맺어지기까지 늘 애정으로 지켜주시고 물심양면으로 도움을 주신 사랑하는 부모님과 장인어른을 비롯한 모든 가족들에게 깊은 감사를 드립니다. 끝으로 연구기간동안 늘 곁에서 인내하고 따스한 사랑으로 힘이 되어준 아내 보영과 두 아들(수현, 강현)에게 감사합니다.