

JP2013-013-2014

제주도 화산활동에서 제4기퇴적층의
지질학적 해석 예비 연구

Preliminary geological interpretation of
Quaternary deposits between volcanic
activities
in Jeju island

2014. 06. 30.

한국지질자원연구원

제 출 문

한국지질자원연구원장 귀하

본 보고서를 “제주도 화산활동에서 제4기 퇴적층의 지질학적 해석
예비 연구” 사업의 최종보고서로 제출합니다.

2014. 06. 30

주관연구기관명 : 한국지질자원연구
원

주관연구책임자 : 이 진 영

참 여 연 구 원 : 홍 세 선

” : 최 한 우

” : 남 욱 현

” : 임 재 수

” : 김 진 철

” : 카츠키 코우타

요 약 문

I. 제 목

제주도 화산활동에서 제4기 퇴적층의 지질학적 해석 예비 연구

II. 연구 목적 및 필요성

- 제주도 제4기 퇴적층에 대한 층서 및 고환경 해석기술 확보
- 제주도 화산활동 최종 시기와 관련한 제4기 퇴적층의 지질학적 의미 재조명
- 제주도 제4기 퇴적층에 대한 형성시기에 대한 정보 획득 및 해석
- 제주도 화산활동과 관련한 제4기 퇴적층의 고환경 분석과 지질학적 의미 해석

III. 연구 내용 및 범위

- 제주도에서 현무암 또는 응회암 사이에 협재하는 제4기퇴적층의 고환경 변화를 연구하기 위하여 퇴적층의 형성시기와 퇴적물의 물리적, 화학적 특성을 분석하였다.
- 이번 연구에서 조사된 퇴적층은 거문덕이 응회암 하부에 위치한 거문덕이 퇴적층, 교래리 퇴적층(물장울교 하부 및 교래교 하부), 당산봉 및 수월봉 응회암 하부에 위치한 고산층, 상창리에 위치한 상창리 퇴적층 등이며, 굴전동 역암층, 법호촌 역암층, 입석동 역암층 등의 지역은 형성시기에 대한 예비분석을 수행하였다.
- 제4기퇴적층의 연대분석은 주로 방사성탄소연대분석과 광여기루미네센스(OSL) 분석을 수행하였고, 베릴륨을 이용한 연대분석을 실험적으로 수행하였다.
- 제4기퇴적층의 고환경 변화를 분석하기 위하여 퇴적물의 입도분석과 대자율 측정, 탄소안정동위원소 분석, 주성분 분석과 광물조성 등을 분석하였다.

IV. 연구 결과 및 해석

- 제주도에 분포하는 제4기퇴적층은 화산활동과 화산활동 사이에 나타난 고환경의

변화기록을 포함하고 있으며, 제4기퇴적층의 형성시기는 화산활동 시기를 해석하는데 매우 유용하였다.

- 이번 연구에서 거문덕이 퇴적층, 교래리 퇴적층, 상창리 퇴적층 등 여러 지역의 제4기퇴적층은 다양한 퇴적환경에서 퇴적되어 각각의 고유한 퇴적환경에 대한 연구의 필요성이 제기되었으며, 또한 기후와 관련된 유사기록이 공통적으로 남아있는 것이 검토되었다.
- 이번 연구를 통해 형성시기가 구체적으로 파악된 제4기퇴적층들은 형성시기가 약 5 천년에서 3 만년에 이르는 것으로 나타났으며, 이 시기는 제4기(Quaternary) 동안 가장 많은 환경변화가 있었던 기간이다. 또한 이러한 화산활동 시기는 해안을 따라 확인된 최근의 화산활동과 달리 제주도 내륙에서의 화산활동에 대한 기록이라는 점에서 매우 중요한 연구결과이며, 지금까지 제주도 내륙에서 확인된 화산활동 시기보다 더 최근의 시기에 용암이 흘렀던 화산활동이 있었음을 확인하였다.

V. 연구 결과의 활용계획

- 제주도의 형성시기부터 현재에 이르기까지의 기간은 제4기(Quaternary)로 지질학적으로 급격한 환경변화가 있었던 시기로 화산활동을 포함한 기후환경의 변화 연구에 중요하게 활용될 수 있다.
- 향후 본 연구결과를 통해 제주도에 분포하는 제4기퇴적층을 이해하고, 제주도에 산재한 오름의 분출시기 해석과 같은 추가적인 연구가 수행된다면, 제주도의 화산활동과 미래 제주의 안전을 위하여 매우 중요한 연구결과로 활용될 것이다.

S U M M A R Y

I. Title

Preliminary geological interpretation of Quaternary deposits between volcanic activities in Jeju island.

II. Research objective and necessity

- To secure stratigraphy and paleoclimate interpretation techniques for Jeju Island quaternary deposits.
- Shedding new light on geological meanings for quaternary deposits related to Jeju Island volcanic activity.
- Formation period information acquisition and interpretation for Jeju Island quaternary deposits.
- Paleoclimate analysis and interpreting geological meanings for quaternary deposits related to Jeju island volcanic activity.

III. Research contents and scope

- Physical and chemical characteristics and formation period of deposits were analyzed to study paleoclimate change on quaternary sedimentary layers distributed between basalt or tuff in Jeju island.
- Investigated deposits in this research are Geomunduki deposit located on the lower part of Geomunduki tuff, Gyorae-ri deposit (bottom of Muljangol-gyo and Gyorae-ri), Gosan formation deposit located downmost of Dangsan-bong and Suwol-bong tuff, Sangchang-ri deposit located at Sangchang-ri and more.

Preparative analysis of formation period was performed for conglomerate beds located at Guljeon-dong, Bubho-chon and Ipseok-dong.

- Dating analysis for quaternary deposits were mostly conducted with radiocarbon dating and optically stimulated luminescence(OSL) dating methods. Also, dating with beryllium was experimentally carried on.
- Magnetic susceptibility was measured and particle size was analyzed along with carbon stable isotope, main component and mineral composition (XRD, XRF).

IV. Research result and interpretation

- Quaternary deposits distributed throughout Jeju island contain paleoclimate records which appear among volcanic events making interpretation of volcanic activities from quaternary deposits epoch extremely useful.
- Necessity of studying distinct sedimentary environments was emphasized from this research since each quaternary deposit from Geomunduki, Gyorae-ri, Sangchang-ri and other locations has diverse depositional environments. Also, it was examined that these deposits have similar climate related records.
- Quaternary deposits whose detailed formation periods identified through this research appeared to be from 5,000 years to 30,000 years to the past; this period that environmental change has most heavily occurred. Locating records of inland volcanic activity periods other than recently found cost volcanic activities highlights this research result. Moreover, the period of volcanic activity including lava flows identified through this research came out to

be earlier than the most recently verified activity.

V. Plan for research result application

- The Quaternary deposits which overlaps the date of rapid environmental changes recorded between the volcanic activities. And this finding can have an implication for climatic environmental change research including volcanic activity.
- Further understanding of the quaternary deposits of Jeju island through this research result and additional studies of volcanic cone spouting time interpretation will be used as an instrumental result for volcanic activity and future safety of Jeju island.

목 차

제 1 장 연구과제의 개요	1
제 1 절 연구 목적 및 필요성	1
1. 연구 목적	1
2. 연구 배경 및 필요성	1
제 2 절 연구 방법 및 조사 범위	3
1. 제4기 퇴적층의 연대분석 (C^{14} , OSL, Be^{10})	3
2. 제4기 퇴적층의 고환경 분석 (입도, 대자율, 동위원소, 지화학)	8
3. 제4기 퇴적층 조사 대상 및 범위	9
제 2 장 국내외 연구 현황	10
제 3 장 연구 내용 및 결과	13
제 1 절 제주 제4기퇴적층 분포 및 퇴적상	13
1. 거문덕이 퇴적층	13
2. 교래리 퇴적층 1 지점 (물장울교 퇴적층)	14
3. 교래리 퇴적층 2 지점 (교래교 퇴적층)	16
4. 고산층 및 수월봉 퇴적층	18
5. 상창리 퇴적층	19
6. 기타 지역 퇴적층의 분포현황	24
제 2 절 제주 제4기퇴적층의 형성시기 및 고환경 기록	32
1. 거문덕이 퇴적층	32
2. 교래리 퇴적층 1 지점 (물장울교 퇴적층)	41
3. 교래리 퇴적층 2 지점 (교래교 퇴적층)	54
4. 고산층 및 수월봉 퇴적층	66
5. 상창리 퇴적층	76
6. 기타 지역 제4기퇴적층의 형성시기	81

제 4 장 제주도 제4기퇴적층의 지질학적 해석	94
1. 지난 약 2만년 간의 전 지구적 기후변화.....	94
2. 마지막 최대 빙하기(Last Glacial Maximum; 약 23,000~18,000년전).....	96
3. 마지막 해빙기(Last Deglaciation; 약 18,000~11,000년전).....	99
3. 현 간빙기(Current Interglacial Period; 약 11,000년전~현재).....	101
4. 제주도 제4기퇴적층의 휴지기 고환경 변화.....	103
제 5 장 연구 결과의 활용계획	109
제 6 장 참고문헌	110
제 6 장 부 록.....	121
1. OSL 연대분석결과 표	122
2. 방사성탄소연대 분석결과표	124

그림 목 차

〈그림 1〉 Cosmogenic isotopes produced in-situ by the interaction of cosmic rays in the geological sample.....	5
〈그림 2〉 음이온 교환수지 분리	6
〈그림 3〉 양이온 교환수지 분리	6
〈그림 4〉 Precipitation washing of the Be sample.....	7
〈그림 5〉 Flow chart of the chemical pretreatment for in situ produced cosmogenic $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ measurement	7
〈그림 6〉 제주도 제4기퇴적층 분포 조사 및 확인 지역	9
〈그림 7〉 거문덕이 퇴적층 조사지점의 위치	13
〈그림 8〉 교래리 퇴적층 1 지점 (물장울교 퇴적층)의 위치	14
〈그림 9〉 교래리 퇴적층 1(물장울교 퇴적층)의 야외분포 양상	15
〈그림 10〉 교래리 퇴적층 1 지점 (교래교 퇴적층)의 위치	16
〈그림 11〉 교래리 퇴적층 2 (교래교 퇴적층)의 야외분포 양상	17
〈그림 12〉 당산봉 및 수월봉 하부의 고산층의 분포위치	18
〈그림 13〉 상창리 퇴적층의 분포위치	20
〈그림 14〉 상창리 퇴적층의 분포 위치 및 조사지점 위치	20
〈그림 15〉 상창리 퇴적층이 노두로 확인되는 세창산업의 채석장 전경	21
〈그림 16〉 현무암류 사이에서 확인되는 상창리 퇴적층 전경	22
〈그림 17〉 세창산업 채석장 진입로에 위치한 상창리 퇴적층 노두 전경	23
〈그림 18〉 굴전동역암층의 분포위치	24
〈그림 19〉 굴전동역암층의 야외분포 양상	25
〈그림 20〉 입석동역암층의 분포위치	26
〈그림 21〉 입석동역암층의 야외분포 양상	27
〈그림 22〉 성천포역암층의 분포위치	27
〈그림 23〉 성천포역암층의 야외 분포 양상	28
〈그림 24〉 법호촌역암층 1 지점 지역의 분포위치	29
〈그림 25〉 법호촌역암층 1지점의 야외 분포 양상	30

<그림 26> 법호촌역암층 2 지점의 분포위치	31
<그림 27> 법호촌역암층 2지점의 야외 분포 양상	31
<그림 28> 거문덕이 퇴적층의 신규 조사 당시의 전경 및 예비분석결과	32
<그림 29> 거문덕이 퇴적층 조사지역의 시료채취 위치	33
<그림 30> 거문덕이 퇴적층 조사지역의 퇴적단위 구분	34
<그림 31> 거문덕이 퇴적층의 탄소연대 분석결과	35
<그림 32> 거문덕이 퇴적층의 큐빅시료 채취 현황	36
<그림 33> 거문덕이 퇴적층 상부에 대한 탄소안정동위원소 분석결과	38
<그림 34> 거문덕이 퇴적층 상부에 대한 대자율 분석결과	38
<그림 36> 거문덕이 퇴적층 하부 Unit 3, 4, 5의 대자율분석 결과	39
<그림 35> 거문덕이 퇴적층 상부에 대한 입도분석결과	39
<그림 37> 거문덕이 퇴적층 하부 Unit 3, 4, 5의 탄소안정동위원소 분석결과	40
<그림 38> 거문덕이 퇴적층 하부 Unit 3, 4, 35 입도 분석결과	40
<그림 39> 교래리(물장울교) 퇴적층 야외 전경	41
<그림 40> 교래리(물장울교) 퇴적층 시료채취 단면 위치	42
<그림 41> 교래리(물장울교) 퇴적층 A 단면 1차 방사성탄소연대 분석결과	43
<그림 42> 교래리(물장울교) 퇴적층 B단면 1차 방사성탄소연대 분석결과	44
<그림 43> 교래리(물장울교) 퇴적층 B단면 2차 방사성탄소연대 분석결과	45
<그림 44> 교래리(물장울교) 퇴적층 B단면 큐빅시료 채취 위치	46
<그림 45> 교래리(물장울교) 퇴적층 B단면 큐빅시료 현황	46
<그림 46> 교래리(물장울교) 대자율 측정결과	47
<그림 47> 교래리(물장울교) 퇴적층의 입도분석결과	49
<그림 48> 교래리(물장울교) 퇴적층의 유기물총함량(%) 및 탄소안정동위원소 분석결과	50
<그림 49> 교래리(물장울교) 퇴적층 OSL 연대시료 채취 위치	51
<그림 50> 교래리(물장울교) 퇴적층의 B 지점 OSL 연대시료 분석결과	52
<그림 51> 교래리(물장울교) 퇴적층의 A 지점 OSL 연대시료 분석결과	52
<그림 52> 교래리(물장울교) 퇴적층의 OSL 연대시료 분석결과	53
<그림 53> 교래리(물장울교) 퇴적층의 퇴적층 형성시기 검토 결과	53
<그림 54> 교래리(교래교)퇴적층의 시료 채취 지점 및 채취 일시	54
<그림 55> 교래리(교래교)퇴적층 A 단면의 야외 암상	55

<그림 56> 교래리(교래교)퇴적층 A 단면 1차 예비조사 탄소연대분석결과...	56
<그림 57> 교래리(교래교)퇴적층 A 단면 2차 예비조사 탄소연대분석결과...	57
<그림 58> 교래리(교래교)퇴적층 A 단면 큐빅시료 채취 현황.....	58
<그림 59> 교래리(교래교)퇴적층 A 단면 대자율 측정결과.....	59
<그림 60> 교래리(교래교)퇴적층 A 단면 입도분석결과.....	60
<그림 61> 교래리(교래교)퇴적층 A 단면 총유기탄소 및 탄소안정동위원소분석결과...	61
<그림 62> 교래리(교래교)퇴적층 A 단면 XRF 분석결과.....	62
<그림 63> 교래리(교래교)퇴적층 B 단면 탄소연대분석용 시료채취 현황.....	63
<그림 64> 교래리(교래교)퇴적층 C 단면 탄소연대분석용 시료채취 현황.....	63
<그림 65> 교래리(교래교)퇴적층 확인단면1의 탄소연대분석결과	64
<그림 66> 교래리(교래교)퇴적층 Unit 1에서의 연대분석 검토결과.....	65
<그림 67> 교래리(교래교)퇴적층 확인단면2의 탄소연대분석결과	65
<그림 68> 당산봉 응회암층 인접지역에서 관찰되는 고산층 전경.....	66
<그림 69> 당산봉 응회암층 하부의 고산층에 대한 연대시료 분석결과.....	67
<그림 70> 당산봉 응회암층 하부의 고산층에서 채취된 큐빅시료 현황.....	67
<그림 71> 당산봉 응회암층 하부 고산층의 대자율 분석결과.....	68
<그림 72> 당산봉 응회암층 하부 고산층의 입도 분석결과.....	68
<그림 73> 당산봉 응회암층 하부 고산층의 유기탄소동위원소 분석결과.....	69
<그림 74> 수월봉 응회암층 하부의 고산층 분포 현황.....	69
<그림 75> 수월봉 응회암층 하부의 고산층에서 채취된 시료 현황.....	70
<그림 76> 수월봉 응회암층 하부의 고산층에서 채취된 큐빅시료 현황.....	71
<그림 77> 수월봉 응회암층 하부의 고산층의 대자율 분석결과.....	72
<그림 78> 수월봉 응회암층 하부의 고산층의 입도분석결과.....	72
<그림 79> 수월봉 응회암층 하부의 고산층에 포함된 석영의 실체현미경 관찰결과·	73
<그림 80> 수월봉 응회암층과 고산층의 OSL 시료채취 위치 및 연대분석결과·	75
<그림 81> 상창리 퇴적층 조사지점 1에서의 시료채취 위치 및 퇴적상.....	76
<그림 82> 상창리 퇴적층 조사단면 2지점의 퇴적상.....	77
<그림 83> 상창리 퇴적층 조사 1지점의 탄화목에 대한 방사성탄소연대 분석결과	78
<그림 84> 상창리 퇴적층 조사 2 지점의 방사성탄소연대 분석결과.....	79
<그림 85> 굴전동역암(동수교) (Qks) 시료채취 현황.....	81

<그림 86> 굴전동역암(동수교) (Qks) 지역 방사성탄소연대 분석결과.....	82
<그림 87> 입석동역암층의 전경.....	83
<그림 88> 입석동역암층 상류에서 새로 발견된 선돌교 퇴적층.....	84
<그림 89> 선돌교 퇴적층의 방사성탄소연대 분석결과.....	85
<그림 90> 성천포역암층의 시료채취 현황 및 방사성탄소연대 분석결과.....	86
<그림 91> 법호촌역암층의 시료채취 위치 및 방사성탄소연대 분석결과.....	87
<그림 92> 법호촌역암층 2 지점의 시료채취 현황 및 분석결과 1.....	88
<그림 93> 법호촌역암층 2 지점의 시료채취 현황 및 분석결과2.....	88
<그림 94> 송산동 역암층 전경 및 방사성탄소연대 분석결과.....	89
<그림 95> 서건도 퇴적층 시료채취 현황 및 방사성탄소연대 분석결과.....	90
<그림 96> 방선문 계곡 상부 퇴적층 분포 전경 및 방사성탄소연대 분석결과...	91
<그림 97> KIST 6MV tandem accelerator.....	92
<그림 98> Calculated result of the exposure age by ^{10}Be	93
<그림 99> 전 지구적 기후 변화.....	97
<그림 100> 마지막 해빙기 동안의 기후변화와 온실가스 농도의 기록.....	99
<그림 101> 그린란드와 캐나다 북극지역 빙하코어로부터 분석된 산소동위원소 기록.....	102
<그림 102> 거문덕이 퇴적층에서의 프록시별 분석결과 종합.....	104
<그림 103> 고산층에서의 프록시별 분석결과 종합.....	105
<그림 104> 고산층의 탄소동위원소 값과 환경지시자와의 비교.....	106
<그림 105> 교래교(물장울교) 퇴적층의 형성시기 검토 결과.....	107
<그림 106> 교래교에서의 프록시별 분석결과 종합.....	108
<그림 107> 물장울교에서의 프록시별 분석결과 종합.....	108

제 1 장 연구과제의 개요

제 1 절 연구 목적 및 필요성

1. 연구 목적

- 제주도 제4기 퇴적층에 대한 층서 및 고환경 해석기술 확보

2. 연구 배경 및 필요성

- 제주도 화산활동 최종 시기와 관련한 제4기 퇴적층의 지질학적 의미 재조명
 - 제주도에 지금까지 알려진 제4기 퇴적층은 50개소가 넘게 보고되고 있으며, 세부적인 연구내용이 보고된 적이 거의 없어, 기존의 조사지역 중에서 제4기층의 분포가 확인된 약 20개 지역에 대해 현지 조사 정보를 취득
- 제주도 제4기 퇴적층에 대한 형성시기에 대한 정보 획득 및 해석
 - 제주도 화산암류의 연대는 Ar-Ar, K-Ar 등 암석연대측정 방식에 의해 측정된 결과가 대부분이며, 제주도에서 현재까지 공식적으로 알려진 연대는 2만년 이상으로 이를 기준으로 사화산 범주로 관리
 - 그러나 화산암류와 화산암류 사이에 존재하는 제4기층의 연구에서 5천년 전후의 토양연대가 확인되어 제주도에 대한 종합적인 연구관리가 필요함
 - 또한 최근 비고화된 제4기 퇴적층을 중심으로 OSL 연대분석 결과가 도출되고 있으며, 1만년 이내의 연대측정 결과가 보고되고 있음
 - 화산암류 사이에 분포하는 퇴적층은 제4기 동안의 화산활동과 휴지기 그리고 화산활동의 지리적 분포를 설명할 수 있는 좋은 연구재료로 추정됨
- 제주도 화산활동과 관련한 제4기 퇴적층의 고환경 분석과 지질학적 의미 해석
 - 제주도에 분포하는 제4기 퇴적층은 화산암 flow들 사이에 분포하며, 지질도 상에는 퇴적층 혹은 역암층으로 명명되며, 고토양층, 국부적인 하성 혹은 해빈성 퇴적층, 스코리아성 풍화토, 재이동된 스코리아성 퇴적층 등으로 세분되고, 퇴적층 인근의 용암류 연대자료를 토대로 연대를 추정

- 시범 조사 대상지역 선정은 약 $4,800 \pm 60$ yr BP를 보이는 신양리 부근의 동남 토양층, 그리고 5만년에서 10만년 전으로 추정되는 굴전동역암, 송산동역암, 성천포역암, 교래교퇴적층 등, 15만년 내외로 추정되는 법호촌역암, 거로교퇴적층 등, 20만년 이전에 형성되었을 것으로 추정되는 월평동역암, 신영박물관 인근 퇴적층 등으로, 홀로세 퇴적층을 대상으로 연구가 필요함
- 화산암류 사이에 분포하는 퇴적층은 제4기 동안의 화산활동과 관련하여 화산활동 사이의 휴지기 동안의 고환경에 대한 정보를 기록하고 있어, 화산활동이 없는 시기의 제주도의 고환경 해석이 가능할 것으로 기대됨

○ 기술적 측면

- 제주도 제4기 퇴적층의 연대분석 및 층서해석 기술 확보 요구
- 제주도의 화산암류 사이에 분포하는 퇴적층에 대한 연대분석결과는 아직까지 공식적으로 알려진 바 없으며, 연대 측정이 시도된 경우가 없음
- OSL 연대측정 및 탄소연대측정 등의 기술적 적용에 대한 검토가 요구됨

○ 경제·산업적 측면

- 제주도의 제4기 퇴적층의 고환경 정보는 제주도의 화산활동과 관련한 부가적인 정보를 제공할 수 있으며, 관광 정보 보완과 관광 정책 수립을 위한 기초자료 활용이 기대됨

○ 사회·문화적 측면

- 제주도의 한라산에 대한 화산활동은 지역 사회의 중요한 관심사항으로 연구결과와 관련해 지질학적으로 의미 있는 정보제공 활용을 위해 연대 등의 명확한 결과 도출이 절실히 요구됨

제 2 절 연구 방법 및 조사 범위

1. 제4기 퇴적층의 연대분석 (^{14}C , OSL, ^{10}Be)

1) 방사성탄소연대(^{14}C) 측정 방법

- 방사성 탄소 연대 측정법(放射性炭素年代測定法, Radiocarbon dating)은 방사성 동위원소의 조성비를 측정하여 연대를 추정하는 연대측정방법의 하나로, 방사성 동위원소인 탄소14(^{14}C)의 조성비를 측정하여 연대를 추정하는 방법이다. 대기 중의 C14 의 비율이 일정하다고 가정하면, 식물은 광합성, 동물은 호흡을 통해 대기와 탄소를 주고 받는 과정에서 살아있는 동물과 식물이 가지고 있는 C14 의 비율은 대기 중의 비율과 일치한다. 그러나 동식물의 사후에는 대기와 교류하지 않기 때문에 동물과 식물이 가지고 있었던 C14 동위원소의 비가 감소하므로 반감기를 통해 시간의 추정이 가능해 진다.
- 일반적으로 사용하는 C14 의 반감기는 약 5,730년이며, 이를 이용하여 최근 6만년까지의 연대를 측정하기도 한다. 탄소연대측정 결과는 보정(calibration)을 거치지 않은 순 연대에 대해 흔히 1950년을 기준으로 거꾸로 올라가는 BP(Before Present)라는 단위를 쓰며, 여러 가지 보정을 통해 보정된 연대를 calibration BP(Cal. BP) 사용한다. 1950년의 기준은 핵실험에 의해 대기의 탄소가 급격히 변화한 시점을 적용한 것이며, 대기 중의 탄소동위원소비의 보정을 위하여 연륜연대 분석자료를 활용하기도 한다.
- C14 의 양을 실험적으로 측정하는 방법은 방사성 계측법과 가속기 질량 분석법이 이용되며 방사성 계측법은 시료 속에 포함된 C14 가 자연적으로 붕괴하면서 방출하는 전자의 수를 액체 섬광 검출기나 기체 비례 계수기와 같은 장비로 정밀 측정하여 탄소-14의 양을 역산하는 방법이다. 하지만 이 방법은 C14 의 반감기가 상대적으로 길기 때문에 적은 수의 전자만을 관찰할 수 있고, 이에 따라 상대적으로 큰 통계적 오차를 발생시킨다. 이에 비해 가속기 질량 분석법은 매우 적은 양의 시료로도 C14 의 비율을 정확히 알 수 있다. 가속기 질량 분석법은 시료속의 탄소 원자를 이온화 시킨 후, 입자 가속기로 가속한다. 가속된 이온을 자기장을 통과 시켜 질량 차이를 이용하여 C14 동위원소의 비율을 계산할 수 있다.
- 본 연구에서는 가속질량분석기(Accelerator Mass Spectrometer, AMS)를 이용한 ^{14}C 연대측정을 실시하였다. Cs 이온빔으로 graphite로 바뀌어진 탄소 시료를 조사하여 탄소를 음이온 상태로 만들고, 이를 가속하여 ^{14}C , ^{13}C , ^{12}C 원자의 수를 직

접 측정하는 방법으로 연대측정을 위한 시료는 주로 식물 파편과 sediment bulk 등이며, 한국지질자원연구원의 AMS 기기를 이용하였다.

2) 광여기루미네선스(OSL) 측정 방법

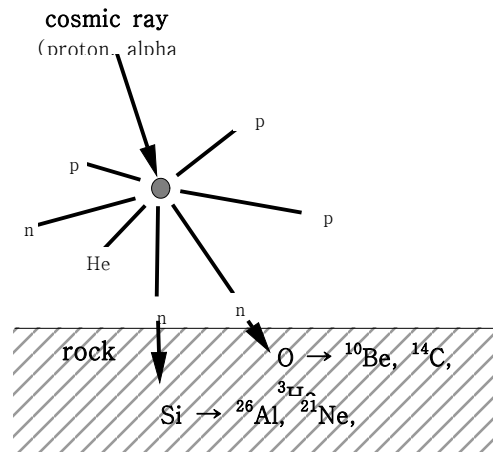
- 광여기루미네선스(OSL; Optically Stimulated Luminescence) 연대측정법은 1980년대부터 제 4기 퇴적층의 퇴적연대 측정에 활발히 이용되고 있는 방법이다. 이 방법은 석영과 장석 등을 포함한 퇴적물이 퇴적된 이후 주위 퇴적물로부터 자연방사선에 노출되면 전자 형태의 에너지가 축적되고 축적된 에너지는 빛(luminescence)의 형태로 다시 방출되는데 이를 연대측정에 활용하는 방법이다.
- OSL 연대측정법은 탄소 연대측정법의 한계 측정 범위인 5만년 이상부터 수십만년에 이르기까지 적용 가능한 연대측정법으로 연대범위가 넓은 장점을 갖는다. 또한 연대측정에 사용되는 대상 시료(석영과 장석)가 퇴적물의 조암광물로 흔하게 분포하기 때문에 시료의 획득이 용이한 장점이 있다.
- 하지만 아직까지 탄소연대측정법을 비롯한 다른 연대측정법에 비해 정확도와 신뢰도에 있어서 논쟁이 지속되고 있으며 여러 다양한 퇴적층에 적용이 미비한 상태이다. 제주도의 화산쇄설성 기원 퇴적층을 대상으로 루미네선스 연대측정을 적용한 사례가 매우 적어 세계적으로도 화산 기원 퇴적층에서 광여기루미네선스 연대측정 사례는 몇몇 연구에 국한된다.

3) 베릴륨(Be10) 연대측정 방법

○ 기본 원리

- 지구에는 고에너지 대전입자(양성자, 알파입자 등)인 일차 우주방사선(primary cosmic ray)이 연속적으로 입사되고 있다. 이러한 일차 입자들은 대기를 통과하면서 대기 중의 원자들과 반응하여 cascade 된 이차 입자들을 생성하게 된다. 이러한 이차 입자들이 지구의 표면에 도달하게 되며, 이차 입자들은 주로 중성자로 이루어져 있다. 이러한 입자들이 지표면에 도달하여 암석이나 다른 지질 물질에 조사되게 되면 대부분의 입자들은 조사된 물질과 반응을 하여 1 m 이내에 모두 흡수되고, 지표면의 원자들과 핵반응을 하여 우주선유발 동위원소(cosmogenic isotopes)를 생성하게 된다. 지표면에서 대부분의 이러한 핵종들은 중성자 파쇄(neutron spallation)에 의하여 만들어진다.

- 특정 우주선유발 동위원소를 사용하면 특정 표면의 노출 시기, 특정 지질 물질의 매장 시기 또는 침식 속도 등의 정보를 얻을 수 있다. 암석 시료에서 이러한 우주선유발 방사성 동위원소의 함량을 측정하면 우주방사선의 조사량(flux)과 방사성 동위원소의 반감기를 이용하여 시료가 얼마나 우주방사선에 오래 노출되었는지를 측정할 수 있다. 누적 조사된 우주방사선의 조사량은 지역에 따라 몇 가지 인자 즉, 위도, 지구 자기장의 세기, 태양풍의 세기, 공기 압력에 의한 차폐효과 등에 의하여 영향을 받는다. 그러므로 이러한 동위원소의 발생 속도는 일반적으로 연대를 다른 방법으로 확인하여 연대를 알고 있는 시료를 이용하여 만들어진 실험식을 이용한다.

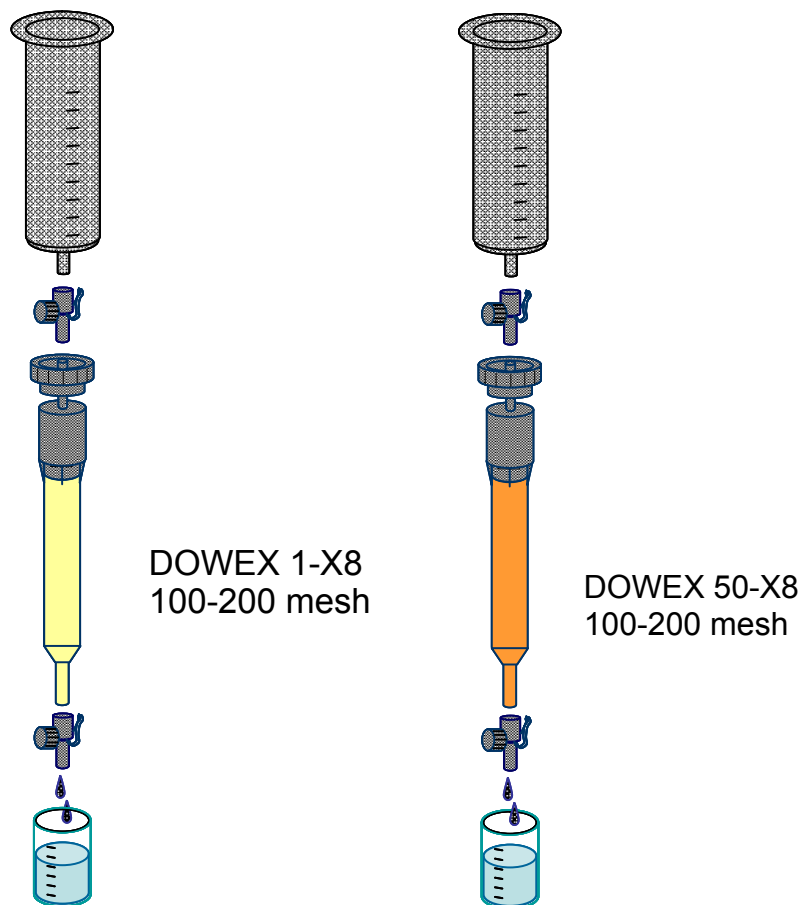


<그림 1> Cosmogenic isotopes produced in-situ by the interaction of cosmic rays in the geological sample

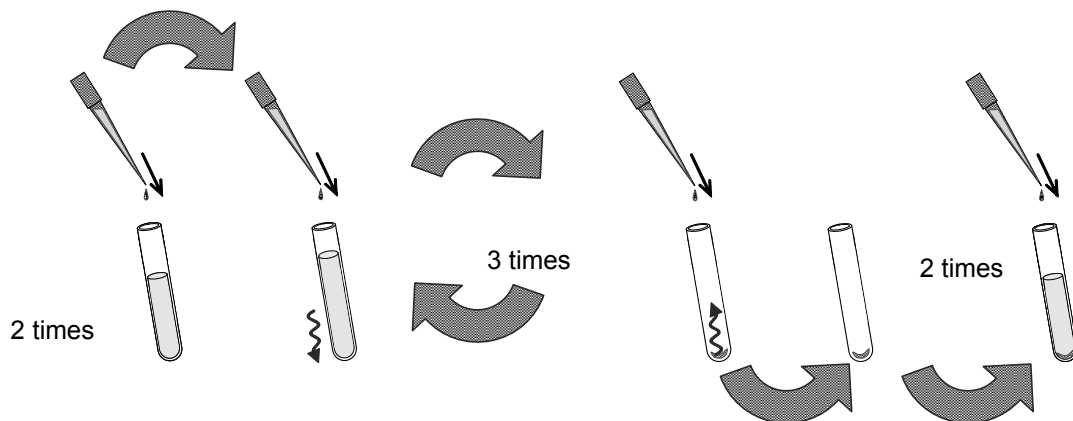
- 이러한 용도로 많이 사용되는 원소가 ^{10}Be 과 ^{27}Al 이다. 우주방사선이 석영 내부의 ^{16}O 와 ^{28}Si 과 반응하여 ^{10}Be 과 ^{27}Al 가 생성되게 된다. 그러므로 암석이나 지표면의 ^{10}Be 과 ^{27}Al 를 측정하게 되면 대상 시료가 얼마나 오랜 기간 대기 중에 노출 되었는지 측정할 수 있다. ^{10}Be 과 ^{27}Al 의 생성 속도가 일정하다고 가정하면 원소들의 함량은 노출된 시간에 비례하여 생성되는 원소의 양과 동위원소 반감기에 의하여 감소하는 양으로부터 대기 중 노출된 기간을 계산한다. ^{10}Be 의 경우 베타 방사성 붕괴를 하여 B이 되며, 반감기는 $1.51 \pm 0.06 \times 10^6$ 년이다. 또한 이 방법을 통하여 측정할 수 있는 연대는 약 10년 ~ 수백만년까지이다.
- 제주도의 응회암의 경우 다량의 석영이 검출된다. 이러한 석영은 화산 활동 시에 U-층에 있던 석영이 용암과 함께 올라 온 것으로 예상된다. U-층의 경우 수십 수 십 m 아래 있었으므로 이전에는 우주방사선에 노출되지 않았으나 지표에 나오면서 우주방사선에 노출되어 ^{10}Be 을 측정하게 되면 용암의 분출 시기를 측정할 수

있을 것으로 판단되며, ^{10}Be 의 경우 함량이 매우 적으므로 일반적인 분석 방법으로는 검출이 불가능하며 AMS(Accelerator Mass Spectrometry) 분석법으로만 분석이 가능하다. 그러므로 AMS 분석에 적합한 시료 전처리 방법을 확립하고, ^{10}Be 의 측정 가능성을 확인할 필요가 있었다.

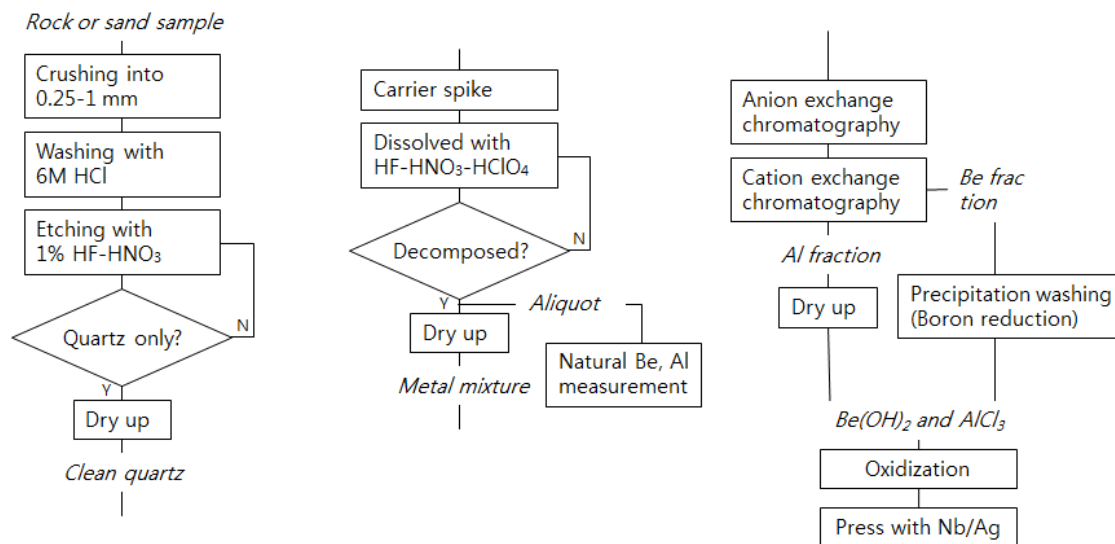
- 본 실험에서는 제주도에서 샘플링한 응회암 시료 중에서 OSL 측정을 위하여 준비된 석영을 2 종류 준비하였다. ^{10}Be 분석을 위해서는 석영만을 선택하여야 하므로, 암석 시료를 파쇄, 체질하여 일정 크기의 입자를 선정한 후, 염산으로 처리하여 탄산염, 철, 유기물들을 제거하고 HF로 리칭하여 다른 규산염 광물들을 제거한다.
- 시료 전처리를 위하여 시료를 20 g 준비하여 0.5 mg의 ^9Be 을 carrier 첨가한 후, HF로 완전하게 용해를 시킨다. 시료 용액 중에서 Fe 이온들을 착화합물 형태로 음이온 교환수지에 흡착시켜 제거한다. 9M HCl 용액을 1.2 컬럼부피만큼 흘려서 나오는 용액을 포집한다. 이 때 Fe 이온들은 컬럼에 흡착되어 제거되고, Be과 Al을 포함한 이온들이 용출되어 내려온다.



<그림 2> 음이온 교환수지 분리 <그림 3> 양이온 교환수지 분리



<그림 4> Precipitation washing of the Be sample



<그림 5> Flow chart of the chemical pretreatment for in situ produced cosmogenic $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ measurement

- 세정하여 준비된 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 시료를 산화시켜 BeO 형태로 만들어 준다. $400\text{ }^\circ\text{C}$ 이상에서 10분 정도 가열한다.
- BeO 시료를 사용하여 AMS 분석용 타겟을 제작한다. Nb 분말과 BeO 시료를 질량비로 1:1로 섞어서 AMS 분석용 음극 타겟에 채워준 후 프레스로 눌러 고형화 시킨다.

2. 제4기 퇴적층의 고환경 분석 (입도, 대자율, 동위원소, 지화학)

1) 입도분석 방법

- 퇴적물의 입도를 측정하기 위하여 0.02~2000 μ m의 측정범위를 갖는 Mastersizer 2000(Malvern Instruments, Ltd., Worcestershire, UK) 장비를 이용하여 Laser Diffraction 방법으로 입도분석을 실시하였다. 필요 구간에서 입도분석을 위한 부시료를 채취하여 2000 μ m 이하의 fraction만 선별하였으며, 이를 과산화수소수(H₂O₂)에 반응시켜 유기물을 제거하였다(Anderson, 1963). HCl 1M 용액과 반응시켜 탄산염을 제거하였다. 증류수로 시료를 세척한 후 교반 분산하여 입도분석을 실시하였다.

2) 대자율 측정 방법

- 고지자기학적 분석을 위해서 고지자기용 큐브에 퇴적물 부시료를 채취하였다. 큐브의 내부 부피는 약 7cc, 길이는 약 2.2cm이며, 아크릴 재질로서 형태 이방성이 최소화되도록 특수 제작된 것을 사용하였다. 큐브 시료채취 시에 주변 토양 단면에 수 mm 정도의 토양 변형을 수반하는 것을 고려하여, 큐브 사이는 약 1cm의 간격을 유지하였다. 따라서 이 연구에서 큐브 하나는 약 3cm의 간격을 대표하게 된다.
- 큐브 안에서 퇴적물 시료가 건조하여 파괴되거나 교란되는 것을 방지하기 위하여 박스를 밀봉하였다. 고지자기연구에서 가장 기본적인 데이터가 되는 초기 대자율 값을 얻기 위해 모든 시료에 대하여 Bartington 대자율 측정기(MS2 susceptibility meter, Bartington Instruments Ltd., UK)를 이용하여 χ LF를 측정하였다.

3) 탄소안정동위원소 측정 방법

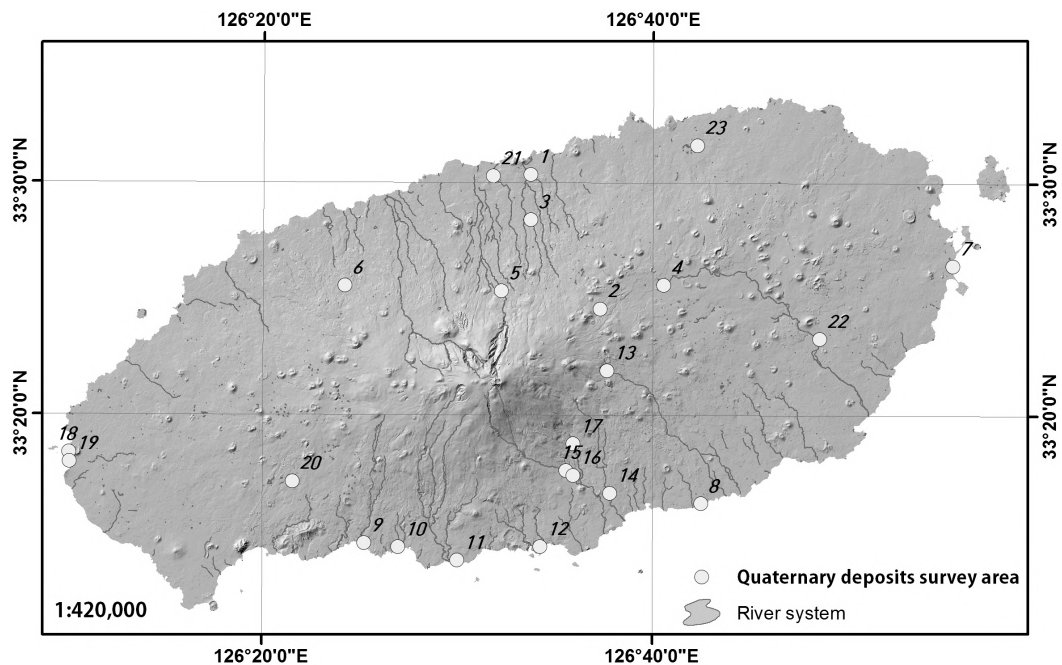
- 퇴적물 부시료(subsample)를 24시간 이상 동결건조시킨 후 균일하게 갈아 분말로 만들었다. 이 분말시료 5mg을 취하여 aluminum capsule에 넣고, 원소분석기를 이용하여 1100°C의 combustion 온도에서 TC, TN, TS를 측정하였다. 또 분말시료에 10% hydrochloric acid를 첨가하여 1일 이상 충분히 반응하도록 방치하여 탄산염을 제거한 뒤에, pH 6-7 정도가 될 때까지 증류수로 약 10회 정도 세척하여 chloride를 모두 제거하였다. 그리고 다시 원소분석기를 이용하여 TOC를 측정하였다. 각 함량의 단위는 weight %이다.
- 탄소동위원소 분석은 염산을 통해 탄산염을 제거한 퇴적물 부시료를 대상으로 Isoprime(GV Instrument, U.K.) 장비를 이용하여 측정하였다. 참고시료로는 IAEA의 CH6 (sucrose, $\delta^{13}\text{C} = -10.45 \pm 0.033\text{‰}$)을 사용하였다.

4) 주성분원소 및 광물조성 분석방법

○ 주 원소성분은 SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{t})$, CaO , MgO , K_2O , Na_2O , TiO_2 , MnO , P_2O_5 와 LOI 등 모두 11 개 성분이며, 이들 성분분석을 위하여 한국지질자원연구원이 보유하고 있는 X선 형광분석기(XRF, X-ray fluorescence spectrometer, Shimadzu MXF-2100)를 이용하였다. XRD는 X선의 파장이 원자 및 이온의 크기, 혹은 격자의 크기와 비슷한 상황에서 회절하는 현상을 이용하며, 분말 형태의 시료(Al_2O_3 ZnO_2 SiO_2 TiO_2 B_2O_3)를 임의의 조성으로 혼합한 뒤, X-Ray Diffraction 법으로 측정한다. 본 연구에 사용된 시료는 분말 처리 후 한국지질자원연구원에서 분석되었다.

3. 제4기 퇴적층 조사 대상 및 범위

○ 본 연구에서는 기존에 알려진 지역을 대상으로 확인조사를 수행하였으며, 그 중 위치가 명확하고, 상부에 현무암 또는 응회암층이 명확하게 피복된 지역을 대상으로 선정하였다. 다만 야외조사 과정에서 신규로 확인되는 지역에 대해서는 예비 분석된 결과만을 제시하였다.



<그림 6> 제주도 제4기퇴적층 분포 조사 및 확인 지역

제 2 장 국내외 연구 현황

- 제주도는 현재 섬이지만 근본적인 생성과정은 대륙붕 위에서 대륙지각내 화산활동(continental intraplate volcanism)으로 형성되어 울릉도, 독도와는 근본적인 차이를 지닌다. 특히 제주도에서의 화산활동은 제주도 형성과정을 이해하는데 매우 중요하다. 제주도 제4기 화산암류의 기반암은 지표에는 나타나지 않으나 심부 시추결과에서 제주도 하부에 응회암류와 화강암류가 분포하고 있음이 확인되었다.
- 특히 제주도에는 368개(Jeju Special Self-Governing Province, 1997)에서 455개(Lee and Yun, 2012)에 이르는 “오름”이라 불리는 작은 화산체가 산재하는데, 이들 대부분은 분석구(scoria cone 혹은 cinder cone)이고, 응회환(tuff ring), 응회구(tuff cone), 마르(maar), 용암돔(lava dome), 소순상화산(small shield volcano)으로 구성된다(Lee and Yun, 2012). 이러한 소화산체는 주로 규모가 큰 순상화산 혹은 성층화산의 주화도(main conduit)의 측방 이동 혹은 열극을 따라 만들어진 화산이란 의미에서 기생화산(parasitic volcano)이라 흔히 불리었다. 그러나 최근의 연구는 이들이 순상화산과 성층화산의 사면 분화(flank eruption) 활동과 관계없이, 현무암질 화산지대에서 독립적인 화산체로서도 만들어 질 수 있으므로(예: Settle, 1979; Riedel et al., 2003), 각각 단일 화산활동에 의해 만들어진 화산체라는 의미에서 단성화산(monogenetic volcano)으로 정의한다(Cas and Wright, 1987; Valentine and Gregg, 2008; Németh, 2010; Fornaciai et al., 2012).
- 지금까지 제주도의 화산활동은 Haraguchi (1931) 이후 여러 연구자들에 의해 단계별 모델이 제시되었으며(e.g., Won, 1976; Lee, 1982, 1994; Lee et al., 1994; Yoon et al., 1995; Son et al., 1998; Won et al., 1998; Oh et al., 2000; Kim et al., 2002; Yun, 2004), 최근까지 Lee (1982)의 네단계 형성 모델-(1) 기저현무암 분출기, (2) 용암대지 형성기, (3) 한라산체 형성기, (4) 기생화산 형성기-이 흔히 인용되고 있다(예: Kim and Choi, 2012). 또한 제주도 지질도폭 및 도폭설명서에서도 유사한 모델이 사용되었다(Won et al., 1993, 1995; Park et al., 1998, 2000a, 2000b, 2000c, 2008). 이들 전통적인 화산활동 모델은 첫째, 제주도 전체를 해양 화산도(특히 하와이섬)와 같은 하나의 순상화산체로 설정하고, 둘째, 시추공에서 얻어진 용암 시료를 통해 해석된 기저현무암을 제외하면 그 외의 화산활동으로 분출된 용암류는 대부분 지표에 노출되어 있는 것으로 전제하고 있다.

- 최근의 연구에 의하면 알칼리현무암질 용암이 약 1 Ma 전 최초 육상에서 분출하였으며, 화산활동은 홀로세까지도 진행되었다. 제주도의 화산활동은 서귀포층을 층준으로 크게 퇴적동시대 화산활동기(약 1.88~0.5 Ma)와 퇴적이후 화산활동기(0.5 Ma~홀로세)로 구분된다. 퇴적동시대 화산활동기는 약 1 Ma경 알칼리현무암질 용암의 육상 분출이 수반된 수성화산활동, 분화된 알칼리 계열 용암류의 돛상 분출, 알칼리 계열 용암류의 분출로 구분되는데, 이들은 서귀포층이 퇴적되는 동안 발생한 국지적이며 간헐적인 화산활동이었다. 퇴적이후 화산활동기는 서귀포층의 퇴적이 종료된 이후 전도에 걸친 활발한 육상화산활동으로 정의된다(Koh et al., 2013). 특히 약 0.3~0.1 Ma 동안의 활발한 화산활동은 제주도 지형의 골격을 형성하였고, 0.1 Ma이후 홀로세까지 이어진 화산활동은 한라산체를 포함한 제주도의 현재 지형을 만들었다. 기존 연구자들(Koh et al., 2013)의 연구는 제주도가 한라산체를 중심으로 하는 복성 복합화산체와 수많은 단성화산체로 부터 분출한 용암류 및 화산쇄설물이 층상으로 누적되어 형성된 것임을 의미한다. 또한 수성화산분출물과 연안 퇴적물로 구성된 서귀포층에 협재하거나 피복한다.
- 제주도의 형성과 관련한 현재까지의 연구는 암석의 연대에 근거한 것으로 현재까지 확인된 가장 젊은 연대의 용암분출기록은 백록담 조면암(K-Ar 절대연대, 25 ± 8 ka, Won et al., 1986)과 비양도 조면현무암($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대, 27 ± 9 ka, Koh et al., 2008)이다. 이 시기동안의 해수면 변동을 고려하면 이들은 육상 환경(Koh et al., 2008; Brenna et al., 2010)에서 분출되었음을 지시한다. 지금까지 확인된 암석연대 자료를 검토한 결과, 제주도 화산암류의 전암 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 측정법으로는 약 2만년에서 최근까지의 화산활동은 연대측정방법의 오차범위로 볼 때 정확한 연대를 측정하는 것은 매우 어렵다.
- 제주도에서 용암류 사이에 퇴적층이 분포하는 것은 국지적이거나 다수의 연구와 시추자료 기록을 통해 상당히 다양한 지역에서 분포하고 있음이 확인된다(Koh et al., 2008, Shon et al., 2008). 용암류 사이에 나타나는 퇴적층은 일반적으로 고토양층이라 명명되어왔으며 퇴적구조의 발달이 드물고 두께가 수십 cm 에서 수 m 로 주로 분급이 불량한 사질-역질 퇴적물로 구성되고, 암색은 대부분 황갈색 또는 적색을 띄는 것으로 알려져 왔다. 고토양층은 용암류의 휴지기 동안 대기중에 노출된 환경에서 지형기복을 따라 일시적으로 쌓인 퇴적물이 토양화작용을 받아 형성된 것으로 알려져 있다(Park et al., 2008). 반면 퇴적층은 단속적인 분포를 보이며, 피상 또는 층리가 발달한 사암과 이암 및 역암 등으로 구성되어 있다. 퇴적층은 주로 대기 중에 노출된 육성환경에서 간헐적인 하천작용에 의해 저지대 혹은 바닷가에서 형성된 것으로 알려져 있다(예, Park et al., 1998, Shon and

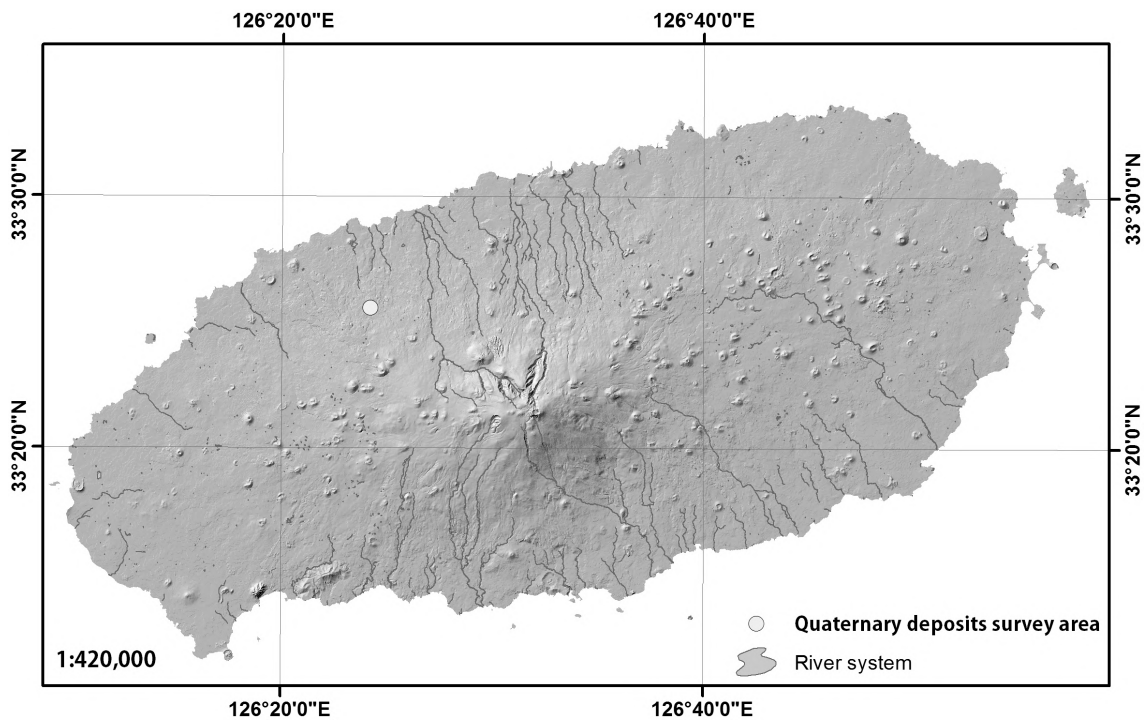
Park, 2004). 특히 별도의 층으로 활발한 기재 및 연구가 진행된 층은 신양리층과 하모리 층 정도이다. 신양리층은 제주도 동단의 신양리와 성산 일출봉 사이의 해안에 분포하며 퇴적층의 연체동물화석의 방사성 탄소동위원소 연대는 4780 ± 60 yr BP(Sameshima et al., 1988)로 보고되었다. 또한 하모리층은 제주도 서부 송악산 양측의 동서 해안을 따라 분포하는 재동된 화산재 퇴적층(Shon et al., 2002)으로 OSL 연대는 7.6 ± 0.5 ka 에서 6.8 ± 0.3 ka (Cho et al., 2005), 5.1 ± 0.3 ka (Cheong et al., 2007)으로 보고되었다.

- 기존 연구의 대부분의 용암류 사이의 퇴적층(고토양층)은 노두상의 기재를 통해 분포만 확인되고 있으며 이들의 형성시기와 퇴적환경에 대해서는 많은 연구가 진행되지 않고 있다(Park et al., 2008; 2000a, 2000b).
- 가까운 주변 국가인 일본의 경우 일본 열도에서 제4기 동안에 화산의 활동이 보고된 것은 약 456개소로 확인된다. 그 가운데 홀로세 기간에 분화활동이 확인된 화산은 약 110개소로 알려졌다(Geological survey of Japan DB, Volcanoes of Japan ver. 1.03). 2백만년 이전에 일본 열도에서 화산암과 심성암이 나타나는 화산활동 지역은 현재의 화산활동 지역과는 다른 지역으로 나타나지만 그 이후의 화산활동 지역은 현재와 거의 유사한 지역에서 나타난다. 2 Ma 이후의 서남 일본에서의 대규모 화산활동(VIE=6이상)의 빈도는 1.6–2.0 Ma 기간에 높은 빈도를 보이다가 0.4 Ma이후의 0.4–1.6 Ma기간에 낮은 빈도를 나타낸다. 또한 1.6 Ma 이전의 서남일본에서의 광역 테프라의 대부분은 중부산맥지역(히다산맥) 칼데라의 화산에서 유래한 것이며, 규수 지역의 경우 특히 0.5 Ma 이후의 화산활동이 증가하는 것으로 보인다. 화산 분출을 정리한 이력정보를 기초로 일본의 87개소의 활화산의 화산활동 빈도는 30 ka 이후 과거로 갈수록 분화빈도가 낮아지는 것으로 나타나는데, 이러한 원인은 실제 화산활동이 적어졌을 가능성과 풍화 등의 작용에 의해 오래된 화산활동의 기록이 사라지는 원인에 의해 적어졌을 가능성이 있다. 화산활동의 감소현상을 제외하면 각 화산에서의 분화시기가 일정한 양상을 보이지 않는다(General insurance Rating Organization of Japan, 2008). 다만 과거 2 ka 이후 100년마다 일본에서 중급(VIE=4이상) 규모 이상의 분화기록을 보면 9세기를 중심으로 화산활동이 증가하고, 19세기를 제외한 17세기 이후에 화산 활동이 증가하는 것으로 보인다(Hayakawa, 1999).

제 3 장 연구 내용 및 결과

제 1 절 제주 제4기퇴적층의 분포 및 퇴적상

1. 거문덕이 퇴적층

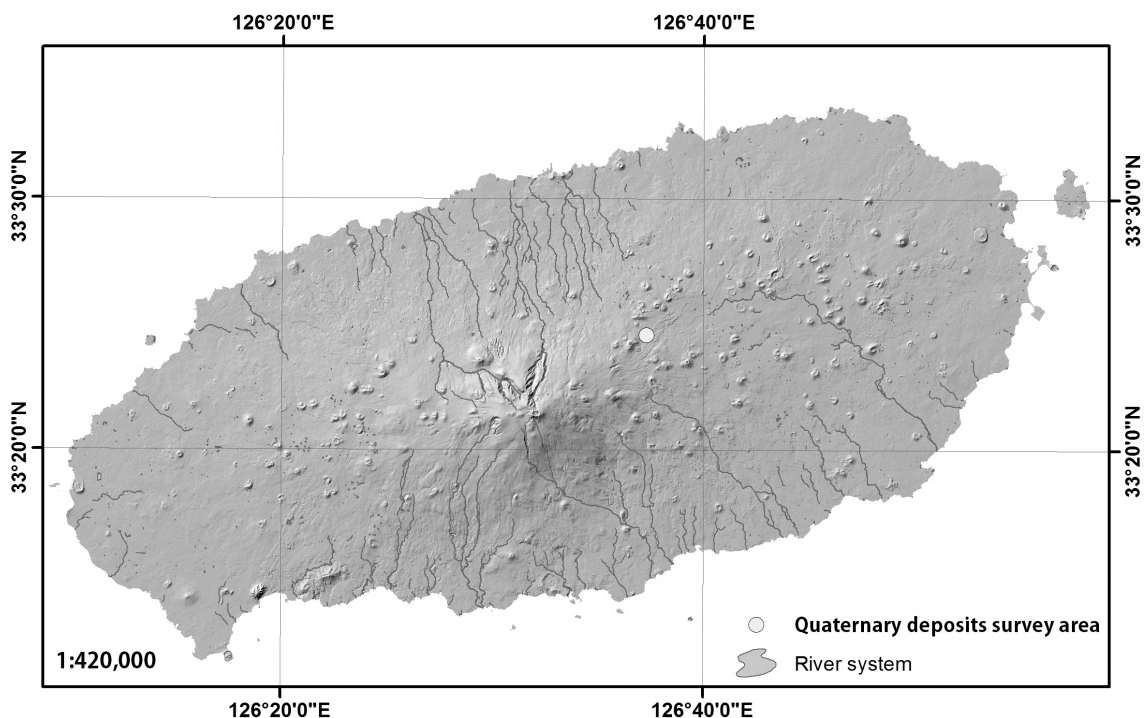


<그림 7> 거문덕이 퇴적층 조사지점의 위치

- 제주도 애월읍 금덕리 흐리물교 근처에 분포한다. 기존에 금덕리층으로 보고되어 있으나 과거의 위치에 대한 정확한 위치를 확인하기 어려워 거문덕이 퇴적층으로 명명하여 연구하였다. 과거 보고된 퇴적층은 금덕리층(N33°25'46.4", E126°24'04.2")이나, 현재의 연구는 과거 조사된 금덕리층 상부에서 확인되는 응회암층이 상부를 피복하고 있는 퇴적층이 해당된다.
- 퇴적층의 두께는 상부의 응회암층과 하부의 이질층을 포함하여 3m 이상이며 하부의 이질층은 1m 내외만 하천변에 노출된다. 하부의 현무암층은 금덕리 현무암으로 알려져 있다.
- 기존의 연구에 의하면 금덕리층의 표식지는 제주경마장 앞의 도로확장 공사장과 애월읍 금덕리 남동쪽 1111번 도로에서 작은오름 방향의 시멘트 도로변에 노출된

암석을 표식지로 한다. 작은오름에서부터 제주 경마장, 금덕리 거문덕이, 1117번 도로상의 외도천교를 잇는 약 5.5km 장경을 갖는 타원형체로 분포하고 있으며, 기존의 암체를 약 1~2.5m 두께로 덮고 있다. 제주지역의 애월도폭에서는 대부분이 금덕리현무암, 고성리현무암, 상전 현무암을 덮고 있으며, 원동현무암의 동쪽 일부와 한밭하와이아이트의 서쪽 일부를 덮고 있다. 애월도폭 내에서는 응회질 물질의 공급원을 찾을 수 없으나 아마도 남쪽 인접지역에 위치한 오름에서 제공하였을 것으로 생각된다. 이 응회암의 형성 메카니즘은 분화구에서 공중으로 분출되었다가 중력에 의해 낙하하여 형성된 강하응회암(fallout tuff)이다. 담갈색과 연갈색으로 지표에 노출되어 있어 고화가 되지 않았으며, 작은오름으로 갈수록 입자가 커지고 가장 멀리 있는 금덕리 거문덕이 부근에서는 세립이며, 제주경마장 앞의 공사장에서는 상향 세립화하는 점이층리가 발달되어 있다. 기존에는 금덕리층으로 불리기도 하면서 하성퇴적물로 알려져 왔으나 지질도폭조사과정에서 응회암으로 판명되었다.

2. 교래리 퇴적층 1 지점 (물장울교 퇴적층)



<그림 8> 교래리 퇴적층 1 지점 (물장울교 퇴적층)의 위치

- 제주도 봉개동 물장울교 아래에서 확인되며, 하천을 따라 상류까지 퇴적층이 확인된다. 층후는 0.5 m에서 5 m까지 하천변을 따라 노출되는 단면 형태로 나타나거

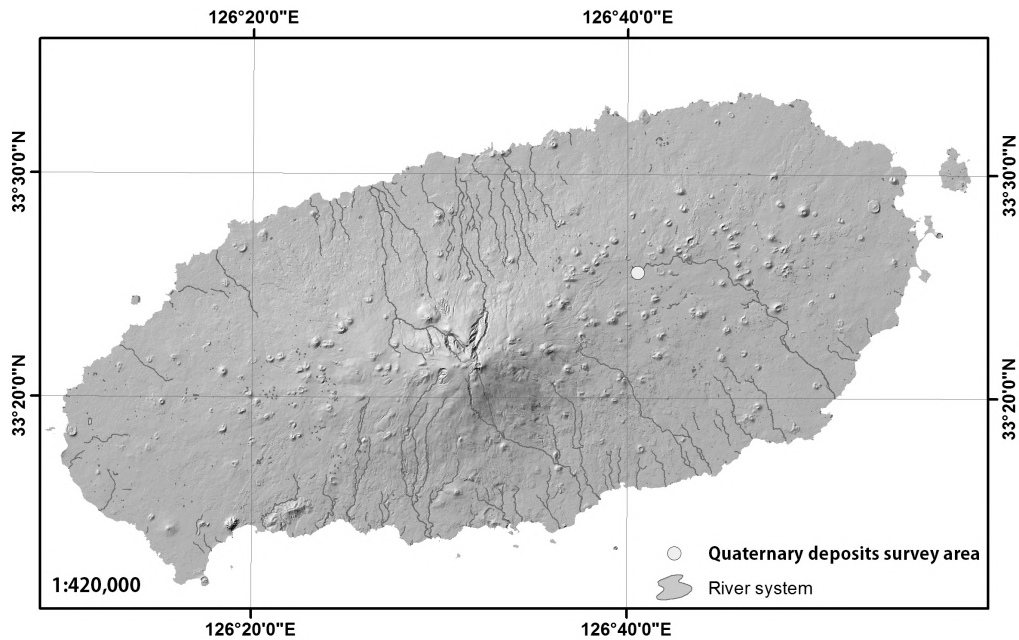
나 하천 바닥에 퇴적층이 노출된 형태로 나타난다. 퇴적층의 상부는 물장울교 현무암으로 알려져 있으며, 퇴적층은 교래리 퇴적층으로 명명되어 있다. 또한 그 하부는 교래리 현무암으로 추정된다.

- 야외에서 측정된 대자율은 퇴적층에서 3.27, 2.07, 1.59, 2.72, 2.66, 2.55, 퇴적층 내의 흑색 망간집적층 추정 위치에서 13.5, 4.91, 10.2로 나타났으며, 상부현무암에서는 16.2, 20.9, 14.7, 19.5, 14.0, 13.1, 11.3, 14.6, 16.0, 14.8, 하부현무암에서는 15.9, 11.2로 나타났다.
- 기존 연구 자료를 기초로 노두에서 약 1.3 km 남서쪽에 위치한 삼다수공 (SAMDS-1) 및 약 4.7 km 동쪽에 위치한 교래공 (GYOR)시추공에서 획득한 시추코어의 미발표 Ar/Ar 연대를 보면, 이 퇴적층은 하위의 현무암 용암 95 ± 9 ka (SAMDS-1, 고도 393 m), 97 ± 13 ka (GYOR, 고도 289 m)과 상위의 조면현무암 용암, 78 ± 10 ka (SAMDS-1, 고도 407 m), 71 ± 11 ka (GYOR, 고도 289 m)의 분출 사이에 퇴적된 것으로 추정된다. 퇴적시기는 최고 9만년으로 추정된다.
- 기존의 도폭조사 연구에 의하면 교래교퇴적층은 북제주군 조천읍 교래리 교래4교 (NG 42.8/169.5) 하부 하천 바닥에 0.3~2.0 m의 두께로 발달하며, 제3교래교까지 800 m의 연장을 갖는다. 북제주군 조천읍 교래리 물장울교 (NG 40.8/164.5) 밑 천미천 바닥에 1~3 m 두께의 퇴적암이 하천을 따라 약 1 km 연장을 갖고 분포한다. 교래4교와 물장울교는 5.5 km 떨어져 있으며, 이 사이에 퇴적암이 단속적으로 분포한다. 물장울교 부근에 분포해 있는 퇴적층의 상부 경계부에서는 폭 10~100 cm 정도의 페페라이트층이 형성되어 있는 것이 관찰되는데, 이는 물장울교현무암의 용암류가 함수상태의 미고결 퇴적층위로 분출·피복하였음을 의미한다.



<그림 9> 교래리 퇴적층 1(물장울교 퇴적층)의 야외분포 양상

3. 교래리 퇴적층 2 지점 (교래교 퇴적층)



<그림 10> 교래리 퇴적층 2 지점 (교래교 퇴적층)의 위치

- 제주도 조천읍 교래리 제4교래교 아래에서 확인되며, 하천을 따라 상류까지 퇴적층이 연장된다. 상류 지역에는 교래리 퇴적층 2 지점으로 명명한 물장울교 퇴적층이 분포한다.
- 교래리 퇴적층으로 조사된 지역은 지역에 따라 퇴적양상이 다르게 나타나기 때문에 본 연구에서는 교래리 퇴적층을 퇴적층 1 지점과 퇴적층 2로 구분하였으며, 교래교 퇴적층과 물장울교 퇴적층으로 구분하여 연구에 적용하였다.
- 3m 내외의 두께가 확인되며 하류지역은 상부 기반암인 물장울 현무암이 침식되어 퇴적층이 하천 저면에 노출된 형태로 나타나며, 상부의 현무암은 물장울 현무암으로 추정되며, 하부의 현무암은 교래리 현무암으로 추정된다.
- 퇴적층의 두께는 3 m 내외로 분포위치는 N33°25'49.3", E126°40'24.7"이다. 상부 현무암 하부에는 흑갈색의 점토질퇴적층이 나타나며 황갈색이 0.2~1 m 내외로 분포한다. 하부의 퇴적층은 5~30 cm 내외의 pebble을 포함한다. 교래교퇴적층 상부의 현무암에서 측정된 대자율은 4.53, 6.02, 5.17, 4.45, 5.32, 4.44, 5.51, 5.64, 5.52, 5.62이며, 하부의 현무암에서 측정된 대자율은 17.0, 11.9, 26.3, 12.9, 11.0로 나타난다.

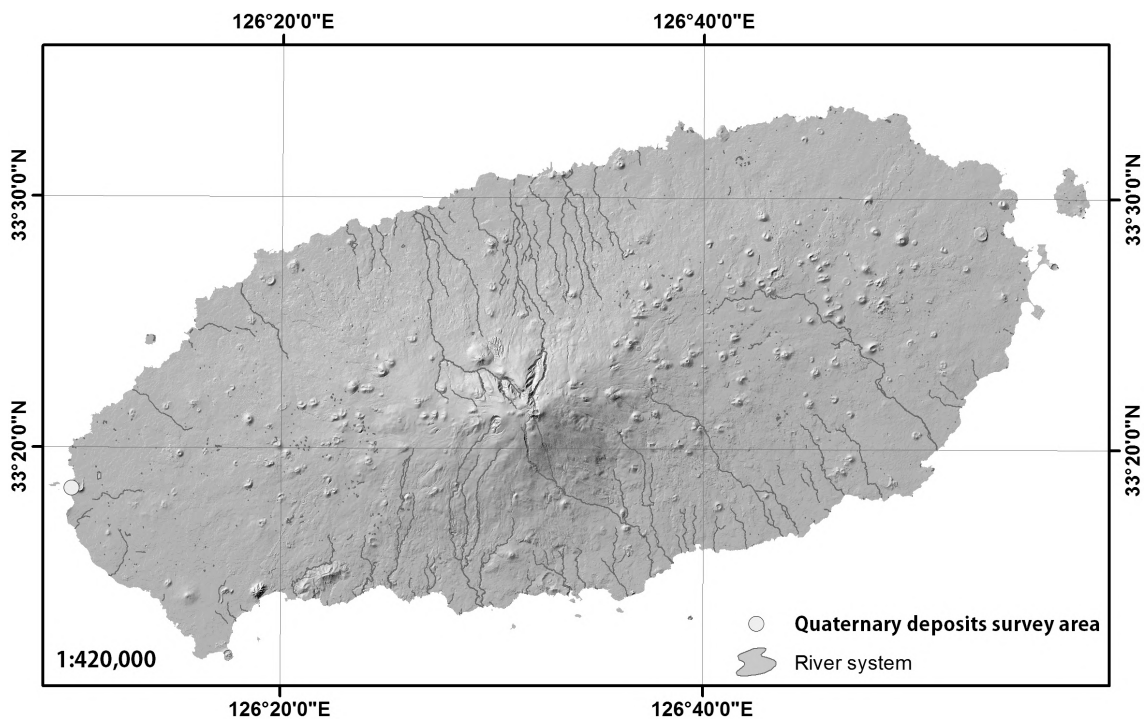
- 교래교퇴적층은 황갈색, 담갈색, 흑색, 담회색을 띠는 점토질, 사질, 역질로 구성된 준고결 퇴적층이다. 교래4교 부근에 분포한 교래교퇴적층은 사질 내지는 점토질로 구성되어 있고, 층리의 발달이 미약한 괴상으로 나타나며, 간혹 20~50cm 크기기의 원마도가 낮은 역을 함유하고 있다. 역은 하위의 교래리현무암에서 유래한 것으로 구성 성분이 일정하고 회색 내지 회흑색의 사장석-휘석 반정을 보여준다. 물장을 교 부근의 퇴적층은 점토질, 사질, 역질로 구성되어 있다. 하부에 형성되어 있는 역질의 퇴적층에는 각고 채운 하도 퇴적 현상이 있다. 중부에는 미약한 사층리를 보이는 암상에서 상부의 점토질 우세 암상으로 변한다. 상부는 상위에 피복한 암석에서 유래된 hyaloclastic 역암이 렌즈상으로 분포한다
- 기존의 연구결과에 따르면 노두 남서쪽에 위치한 삼다수공(SAMDS-1) 및 약 4.7km 동쪽에 위치한 교래(GYOR) 시추공에서 획득한 시추코어의 비공식 Ar/Ar 연대 자료에 따르면, 이들 고도양층은 하위의 현무암 용암, 95 ± 9 ka(SAMD-1, 고도 393 m), 97 ± 13 ka (GYOR, 고도 289 m)과 상위의 조면현무암 용암, 78 ± 10 ka(SAMD-1, 고도 407m), 71 ± 11 ka (GYOR, 고도 289 m)의 분출간에 퇴적된 것에 해당된다. 기존 연구자료를 토대로 추정되는 퇴적층의 퇴적시기는 최고 9만년으로 추정된다.



<그림 11> 교래리 퇴적층 2 (교래교 퇴적층)의 야외분포 양상

4. 고산층 및 수월봉 퇴적층

- 제주도 한경면 고산리 수월봉 퇴적층 하부에서 확인되며, 해안가를 따라 연장이 확인된다. 층의 두께는 0.5에서 3 m 이내로 지역에 따라 차이가 있으며, 최초 고산층으로 명명된 차귀도 선착장 지역은 상부에 당산봉 응회암이 분포하고 하부에 광해악 현무암이 분포하는 것으로 알려져 왔다. 그러나 금번 연구에서 고산층은 수월봉 하부까지 연장이 확인된다.



<그림 12> 당산봉 및 수월봉 하부의 고산층의 분포위치

- 당산봉 하부에서 관찰되는 고산층은 차귀도 선착장의 주차장 뒤편에 위치하는데, 제주시 한경면 고산리 지구내 해안에 인접한다. 조사된 당산봉 응회암층 하부의 고산층은 해발고도가 0.5 m 정도로 해수면의 영향을 현재에도 받는 것으로 확인된다. 현재 관찰되는 고산층의 노두 단면은 게 등의 해양생물이 서식하거나 지하수가 흘러 퇴적층의 표면이 녹회색 점토층으로 관찰된다. 그러나 노출된 단면에서 점토층을 제거하면 갈색에 가까운 사질 점토층이 나타난다. 차귀도 일대에서 관찰되는 고산층은 특별한 퇴적구조를 보이지 않고, 점토질 기질물로 굵은 모래와 1 cm 미

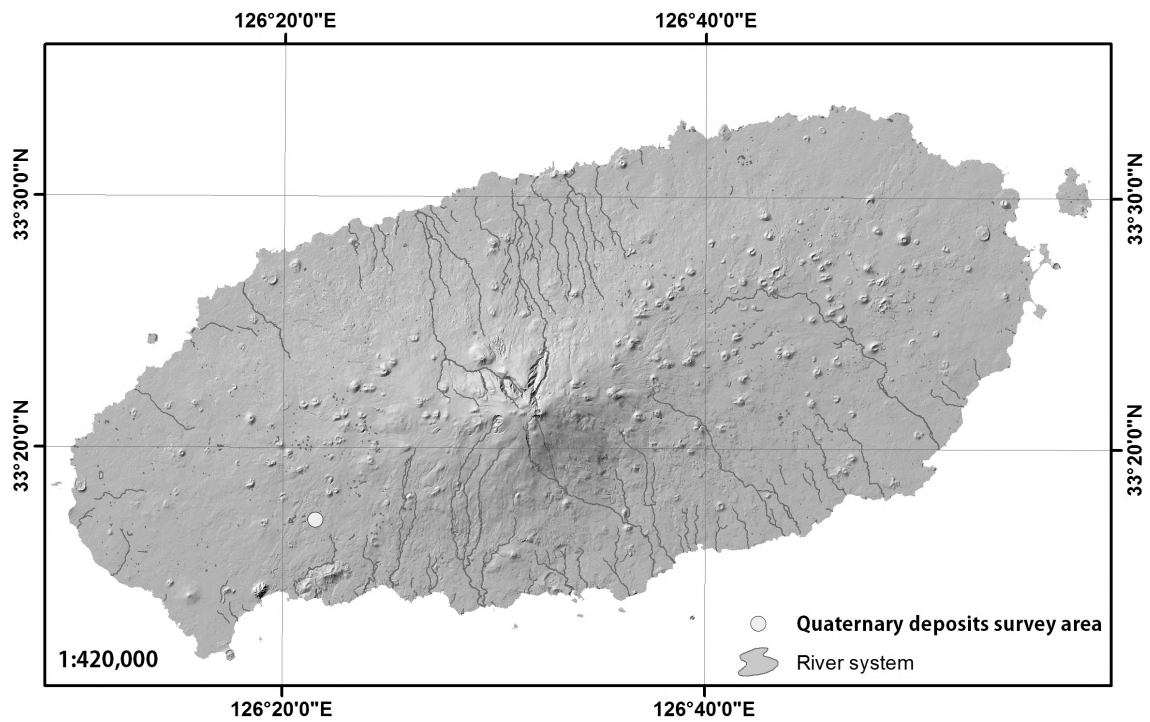
만의 잔자갈이 부분적으로 관찰된다. 퇴적층 상부를 피복하는 당산봉 응회암층은 고산층의 퇴적물을 공급원이며, 이후 수월봉 응회암이 당산봉 응회암층과 고산층을 피복하는 것으로 알려져 왔다. 기존의 고산층의 형성시기에 대한 연구는 고산층의 OSL 연대로서 23.2 ± 1.0 ka (Cheong et al., 2007)의 연대가 보고된 바 있다.

- 수월봉 하부에서 관찰되는 고산층은 하부의 현무암이 명확하게 구분되며 현무암질 암편이 기저에 깔려있고, 갈색 점토층에 사질 또는 잔자갈 크기의 역질 물질이 포함되어 나타난다. 상부로 갈수록 상대적으로 세립질이 우세해지며 하부로 갈수록 조립질이 우세하게 관찰된다.

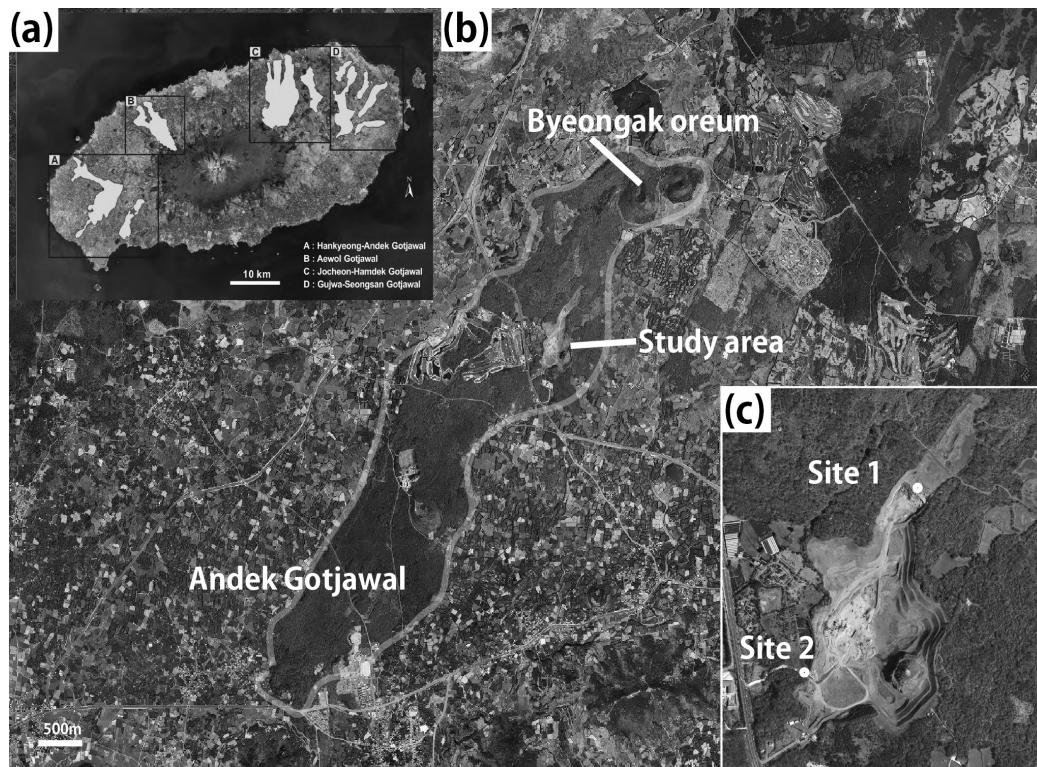
5. 상창리 퇴적층

○ 분포위치 및 용암류의 암석학적 특징

- 제주 서귀포시 안덕면 상창리 일대에 분포하는 상창리 퇴적층은 “안덕 꽃자왈 지대”로 조사된 용암층 사이에 분포한다. 안덕 꽃자왈 지대는 서귀포시 안덕면 일대를 일컫는데, 병악(혹은 대병악, 서귀포시 안덕면 상창리, 표고 492 m) 및 소병악(혹은 작은오름, 표고 473 m) 일대에서 부터 상창리를 지나 화순리 그리고 산방산(서귀포시 안덕면 사계리, 표고 396 m) 근처의 해안까지 최대 약 1.5 km의 폭으로 약 9 km에 걸쳐 분포한다.
- 지역에 따라 ‘상창 꽃자왈’과 ‘화순 꽃자왈’로 알려졌으며, 분출 추정지인 병악(소병악 포함)으로 부터 하류 용암 말단부까지의 현재 지형 경사도는 약 2°의 일정한 경사를 이룬다. 안덕 꽃자왈 지대 내에는 두 군데의 채석장과 골프장(테디벨리 CC)이 가행중이며 제주조각공원 및 화순꽃자왈 생태공원이 조성되어있다. 안덕 꽃자왈 지대의 중간 부분에 논오름(서귀포시 안덕면 상창리, 고도 158 m)이 존재하나 오름의 형태 및 주변 암상 변화(박기화 등, 2000)로 미루어 이 지역의 아아 용암 분출 이전에 존재하여 이후 아아 용암류에 의해 그 주변이 피복된 것으로 해석된다. 이 용암의 분출 추정지로는 병악(박기화 등, 2000; (사)꽃자왈사람들, <http://www.gotjawal.com/>) 혹은 소병악(송시태, 2003)이나, 이 연구에서는 두 개의 오름 모두를 분출지로 제안하며 이 용암류를 “병악 아아 용암”으로 명칭하고자 한다. 병악 아아 용암은 그 위치에 따라 다양한 산상을 지닌다.



<그림 13> 상창리 퇴적층의 분포위치



<그림 14> 상창리 퇴적층의 분포 위치 및 조사지점 위치



<그림 15> 상창리 퇴적층이 노두로 확인되는 세창산업의 채석장 전경. 멀리 중앙부의 오름이 병악오름에 해당된다.

- 병악 분화구 입구 부근에서는 2-3 m 두께의 용암단위가 상부는 다공질이며 급랭에 의한 유리질 표면을 가지는 커다란 암괴 형태로 남아 있고 그외 주변의 지표부는 평탄하여, 용암수로형 아아 용암의 상류 부분의 특징을 지닌다.
- 연구지역의 퇴적층이 확인되는 세창산업의 채석장은 병악 아아 용암의 특징을 가장 잘 보여준다. 이곳에서는 4 매의 용암단위에 대한 수직적인 구분, 기재가 가능하다. 가장 하부의 용암단위는 산화된 표면에 다공질이며 파호이호이 용암의 특징을 지닌다. 이를 30-50 cm 두께의 클링커와 약 8-10 m 두께의 치밀질 아아 용암이 피복하고, 이를 1-2 m 두께의 클링커와 약 5-8 m 두께의 치밀질 아아 용암이 피복한다. 최상부의 아아 용암단위는 50 cm-1 m 두께의 용암판이 약 50 cm 두께의 클링커와 서로 혼합된 형태로 산출하는데, 그 하부의 용암단위와 사이에 30-50 cm 두께의 자갈-사질층에 해당하는 고토양을 협재한다. 특히 용암판 하부 클링커와 접하는 고토양 상부에는 직경 1-2 cm 굵기(최대 10 cm 의 길이)의 탄화목편이 다량 산출하는데, 최상부 용암이 유동할 당시 지역에 따라 산불과 같은 화재가 선행되었을 것으로 추정할 수 있다. 간혹 시추조사과정 중 시추코어 시료에

서 탄화목편이 발견, 기재된 예는 있으나, 야외노두에서 발견, 보고된 경우는 처음이다. 그러나 이 노두는 채석장의 사면 안정화 사업이 병행되어 이후 매몰되었다.



<그림 16> 병악 아아 용암단위 4매 가운데 최상부 용암류와 두 번째 용암류 사이에서 확인되는 상창리 퇴적층

- 병악 아아 용암의 중간 부분에 해당하는 정한산업(구 대륙산업)채석장에서도 약 3매의 용암단위가 구분되는데, 특히 지표하에 분포하는 2매의 아아 용암단위는 대부분 5-10 m의 두께를 가지며, 그 사이에 존재하는 클링커도 비슷한 두께를 지니 상당한 두께의 용암이 하류로 유동되었음을 보여준다.
- 중하류 부분에 해당하는 화순곶자왓 생태공원 및 제주조각공원 주변에서는 약 1-2 m의 용암판과 다양한 크기의 클링커가 산재하여 산출하나, 그 지표 하부에서 7-8 m 두께의 아아 용암단위가 3매 확인되며 각각의 용암단위 사이에는 2-3 m 두께로 클링커가 분포한다.
- 최하류인 산방산 부근 도로 절개지에서는 약 1-2 m의 용암판이 다양한 크기의 클링커에 의해 덮혀 있으며, 말단부에서는 직경 1-2 m의 부가용암구와 클링커가 소규모 언덕을 이루고 있어 아아 용암류의 선단부의 특징을 지니고 있다.
- 용암단위의 상대적 위치와 암석성분 및 암상을 고려하면, 세창산업에 분포하는 최

하부의 파호이호이 용암은 상위 세 용암과는 다른 특징을 지닌다. 따라서 안덕 곳 자왈지대는 크게 3 회의 용암분출에 의해 유동된 병악 아아 용암류로 만들어졌음을 지시한다. 단, 최상부 용암과 두번째 용암사이에 협재하는 고토양층의 존재는 두 용암의 분출간에 휴지기가 있었음을 시사한다.

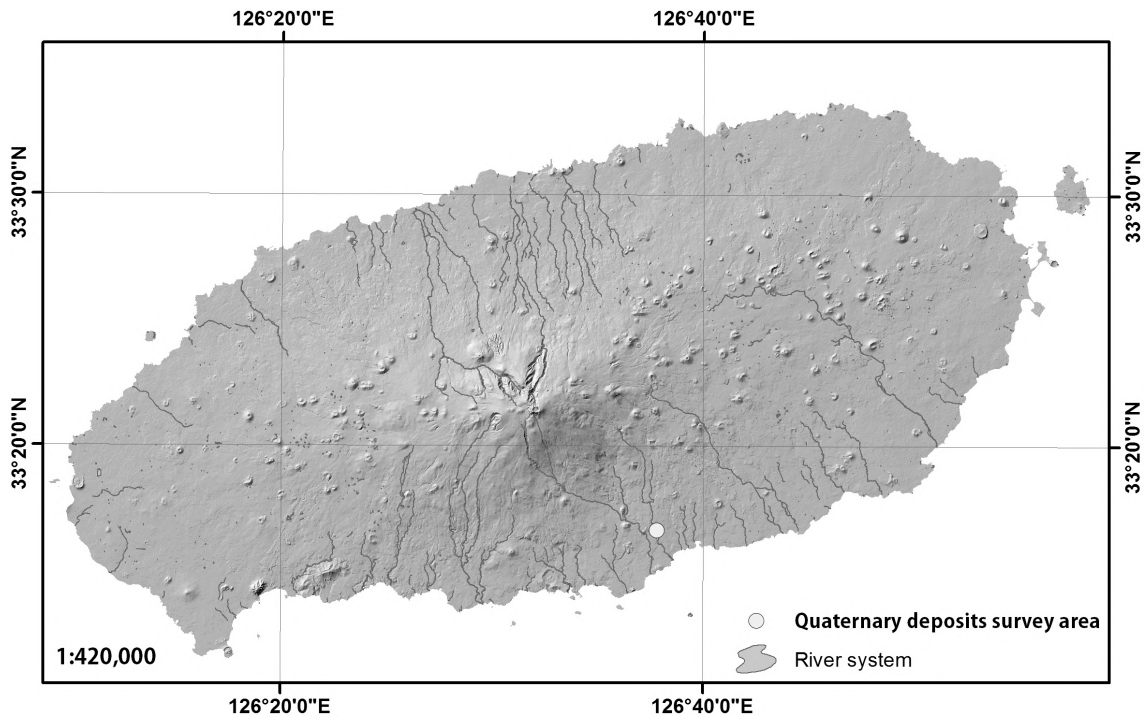


<그림 17> 세창산업 채석장 진입로에 위치한 상창리 퇴적층 노두 전경. 최상부 아아 용암 단위과 그 하부의 클링커층과 고토양층(탄화목편은 확인되지 않음)

- 기존에 알려진 병악 아아 용암의 연대는 정한산업채석장내(JE20)과 동광검문소 주변(SE05) 노두 시료에 해당하며(고기원 등, 2013), 이들의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대 연대는 각각 $34.5 \pm 17.1 \text{ ka}$ 와 $76.9 \pm 12.6 \text{ ka}$ 로서, 특히 병악 아아 용암은 그 동안 약 3 만 5 천년 전에 분출한 것으로 알려져 왔으나 (윤상규 등, 1987), 이 지역 지표를 구성하는 용암 분출이 최고 9 만년 전부터 최소 1 만 7 천년 전에 있었음을 의미한다. 그러나 이들 시료가 병악 아아 용암의 세 용암단위 중 어느 곳에 해당하는지 정확히 알 수 없었다.

6. 기타 지역 퇴적층의 분포현황

1) 굴전동역암층



<그림 18> 굴전동역암층의 분포위치

- 서귀포시 남원읍 신해리에 위치한 동수교 하부 하천변에서 확인되며, 동수교에서 상류 방향으로 100 m 지점(N33°22'08.2", E126°37'29.1")에 위치한다. 퇴적층의 두께는 2-3 m 로 황갈색을 띠며 각력질 역을 포함한다. 퇴적층의 대부분은 스코리아로 스코리아층의 풍화에 의해 생성된 퇴적층일 가능성이 있다. 퇴적층의 대자율은 8.2, 7.13, 3.88, 3.63 이며, 스코리아층의 대자율은 14.5, 21.9로 측정되었다. 퇴적층의 상부를 피복하고 있는 현무암에서 측정된 대자율은 13.0, 17.4, 14.6, 12.7, 20.5, 18.9, 24.1, 14.0, 8.13, 16.9, 20.6, 25.5, 23.7, 20.9, 9.85, 12.9, 22.4, 14.9, 16.1, 17.5 이다.
- 기존의 연구에 의하면 이 역암은 한라산조면암의 모든 역암을 포함한다. 이 역암은 평면상 분포가 단속적이며, 산출되는 지역에 따라 구성물질의 차이가 크다. 따라서 기재상 표식지의 암석을 중심으로 기재하고 다른 지역에 산출되는 역암은 간략히 기재하였다. 굴전동역암의 표식지는 서홍교(NG 24.3/158.4)에서 하천을 따라 북측으로 200 m 지점(NG 24.6/158.4)의 역암을 표식지로 한다. 이 지역에서 역암은 5 m 두께로 발달하며 수평 연장은 10 m에 이른다. 굴전동 마을 전체에 분포하는 것으로 해석된다. 따라서 표식지 일대의 분포면적은 0.5 km² 정도로 추정된다.

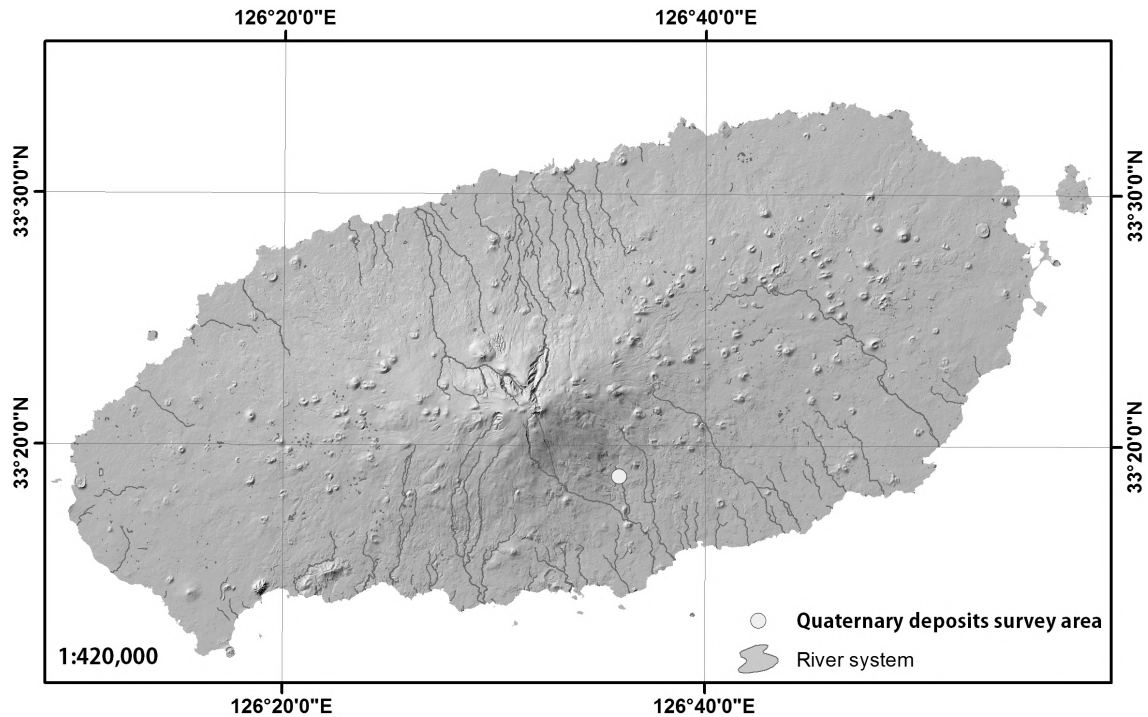
표식지에서 하위에는 보리악조면현무암이 분포하고, 3 m 두께의 한라산조면암에 의해 피복된다. 퇴적층은 회색 내지 암회색의 이 암석은 하천 바닥에서부터 수직으로 약 5 m 두께이며, 원마도가 양호한 역이 대부분이나 부분적으로 각력상으로 나타나기도 한다. 역은 현무암류와 조면암류로 구성되고 크기는 10~50 cm이다. 역은 비늘구조를 갖고 점이층을 형성하고 있다. 역암에는 수형에 가까운 면에 따라 갈철석이 침전되어 굳게 고결되어 있기도 하나 대부분은 준고결의 암층이다.



<그림 19> 굴전동역암층의 야외분포 양상

2) 입석동역암층(Qys)

- 입석동역암층은 서귀포시에 위치한 선덕사 근처의 남서교 아래에서 확인된다. 약 5 m 내외의 적갈색 내지 황갈색 퇴적층이 하천을 따라 상하류 방향으로 분포하며, 층리와 사층리가 발달한다. 퇴적층의 연장은 약 100 m로 하부 현무암층의 대자울 값은 2.95, 3.14, 2.65, 3.64, 3.09이고 퇴적층 내 황갈색 이질층에서는 6.06, 5.34, 5.55, 자갈이 포함된 이질층에서는 7.86, 4.03, 7.72의 대자울 값을 보였다. 퇴적층 상부에는 연장이 확인되는 1 m 내외의 갈색 역암층이 피복한다. 수성 유리질 응회암층, 재동된 응회암퇴적층 및 상부 역암층이 혼재된 것으로 추정된다.
- 노두에서 약 600 m 동쪽의 노두(SE19), 약 1.3 km 남쪽 노두(SE16)시료에서의 미발표 Ar/Ar 연대 자료에 따르면 조면현무암(54 ± 18 ka)과, 조면안산암(185 ± 5 ka)이다. 약 900 m 동남동에 위치한 시추공(BHC)의 지표를 구성하는 시추코어는 조면현무암으로 68 ± 21 ka(고도 230 m), 77 ± 21 ka(고도 220 m)이다. 따라서 국지적인 분포를 보이는 입석동 역암은 조면현무암 분출시 혹은 그 이전인 약 5~10 만년 전에 형성되었을 가능 성이 있다.



<그림 20> 입석동역암층의 분포위치

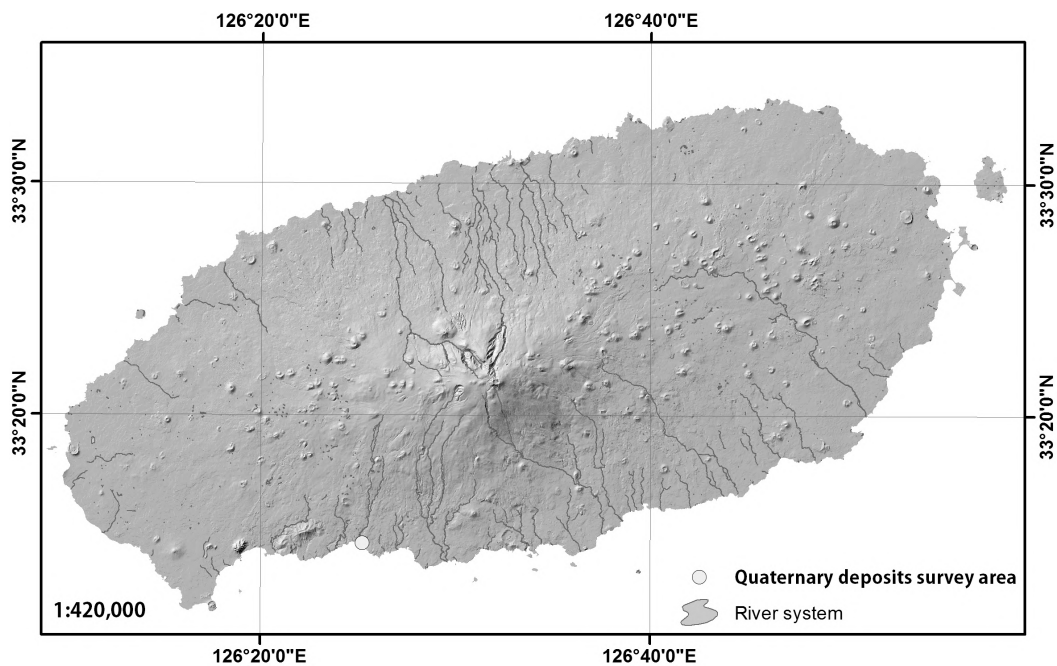
- 기존의 도폭조사 연구에 의하면 이 암석의 표식지는 남서교(NG 30.15/162.4)에서 10m 상부 하천 바닥에 노출되어 있는 퇴적암이다. 퇴적암의 두께는 5 m 정도이며 하천 바닥과 남서측 절벽을 따라 100 m 정도 연장 분포를 보이고 있다. 또한 윗세오름에서 등산로를 따라 한라산 정상부(NG 34.8/156.5)에는 두께 5 m 내외의 역암이 급경사면을 따라 분포하고 있다. 또한 망장포 해안의 포구(NG 23.5/165.8)의 수면 바닥에서도 약 10 cm 두께의 동일한 암상의 노두가 있으나 상하관계는 알 수 없다. 표식지 퇴적층은 담갈색 내지 흑색의 함력 사질층과 담황색의 니질층이 교호하여 역암을 형성하고 있다. 시질 엽층은 두께가 2~5 cm 정도이며, 엽층은 완경사를 이루거나 사층리를 이룬다. 또한 엽층 내에는 급경사의 사층리가 발달하고 있다. 사질의 엽층은 담황색의 각력상 암편과 흑색의 유리질 물질로 구성되어 있다. 담황색의 각력상 암편은 크기가 0.3~1.0 cm이며, 다른 암편에 비해 풍화가 심하여 쉽게 부서진다. 이들 각력은 점이층을 보여준다. 한라산 정상부에서는 점이층 및 역점이층리를 보인다. 이러한 양상으로 보아 담황색 암편은 근원지 가까이에서 유래되어 퇴적되었거나 각력화된 후 짧은 시간 내에 퇴적된 것으로 보이며, 암색과 사장석이 함유되어 있는 점을 고려할 때 조면암에 해당될 것으로 보인다. 흑색의 유리질 물질은 대부분이 미립 내지는 조립질이며 1 cm 크기의 암편으로도 함유되어 있다. 이들은 원마가 되지 않은 각력상으로 수성분출활동의 산물로 해석된다.

이질층은 미립의 화산회로 구성되어 있으며 층의 두께는 1 cm 내외이다. 이 층은 연속되거나 단속되기도 한다. 하천 바닥 뿐 아니라 사질층에 협재된 부위에서도 건열이 형성되어 있다.



<그림 21> 입석동역암층의 야외분포 양상

3) 성천포역암층



<그림 22> 성천포역암층의 분포위치

- 서귀포시 대포동 성천포구 천제2교 하부에서 확인된다. 야외에서 조사된 성천포역암층의 두께는 3 m 내외로 위치는 N33°14'38", E126°25'09"이다. 미고결의 갈색 역층으로 포함된 역의 크기는 1~30 cm 정도로 다양하며, 역의 원마도는 매우 높다. 성천포역암층의 노두는 현생의 식생이 점유하고 있어 탄소연대의 측정이 어렵다.

다. 퇴적층 상부의 현무암질 조면안산암 으로 아아 크링커가 상부에 확인된다. 현장에서 측정된 상부 현무암의 대자율은 7.06, 5.90, 6.16, 7.66이며, 대포동 주상절리대 암석과 비슷한 양상으로 나타난다.

- 상부의 용암층은 대포동조면현무암으로 추정되며, 하부는 서귀포층이 분포하는 것으로 추정된다. 기존의 연구(고정선 등, 2005)에 따르면 이 퇴적층을 피복하는 대포동현무암(알칼리현무암-조면현무암)의 K/Ar 연대를 0.25 ± 0.04 Ma로 보고하고 있으며, 노두에서 약 2.2 km 북북동에 위치한 노두(SE08)와 약 1.6 km 동남동 위치한 노두(SE18)의 전이질 현무암 시료의 미발표 Ar/Ar 연대는 각각 95 ± 25 ka, 53 ± 23 ka이다. 따라서 이 퇴적층의 형성 및 퇴적시기는 약 5~10만년 전으로 추정된다.
- 기존의 연구에 의하면 성천포역암의 표식지는 서귀포시 대포동 성천포 동측(NG 22.2/145.8) 끝부분이다. 제2중문교 동측 끝 도로변에서 이 역암은 높이 5 m에 약 10 m 연장 분포하여 전체적으로 낮은 구릉 형태를 이루고 있다. 제2중문교 하부에서는 크기가 1 m 내외의 현무암 거력을 함유한 역암층이 발달하고 있으며, 전체 두께는 약 50 m에 이를 것으로 해석된다. 하부는 고결 정도가 약한 함패류 서귀포층을 피복하며, 상부는 성천봉 스코리아층이 부정합으로 피복한다. 응회암과의 직접 접하는 부위가 없으나 구성물질과 응회물질은 인접한 응회암에서 유래되었을 것으로 해석되어 상위에 해당하는 것으로 하였다. 대포동조면현무암은 성천봉을 에워싸고 흘러 이 역암을 피복한다.

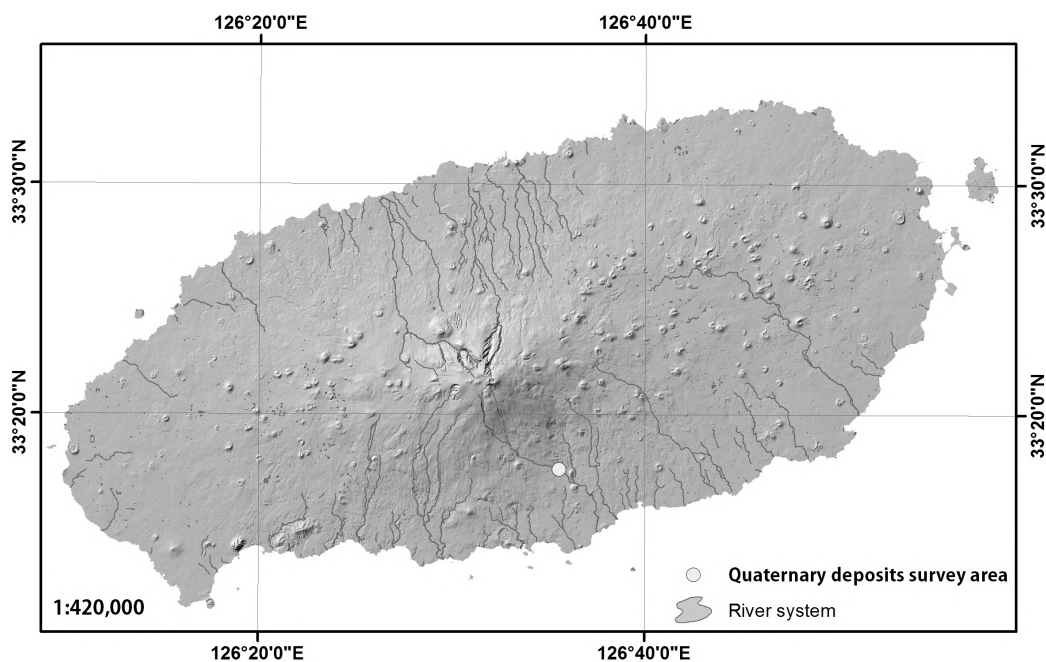


<그림 23> 성천포역암층의 야외 분포 양상

- 성천포역암층은 회색을 띠며, 고결된 사력층(gravelly sand deposits)으로 구성되어 있다. 역은 대체로 원마도가 높은 자갈 내지 잔자갈 크기이며, 부분적으로 각력상의 역이 함유되어 있기도 한다. 잔자갈은 흑색 내지 흑갈색을 띠고 부분적으로

기공이 많이 발달한 현무암질 암석과 스코리아로 이루어져 있으며, 그 외에도 규암, 퇴적암의 역이 혼합되어 산출된다. 퇴적암은 준고결 상태에서 포획되어 층리가 만곡된 형태로 산출되기도 한다. 또한 일부 역은 예리하게 절단된 양상으로 산출된다. 역과 역사이의 기질은 회색 내지 황갈색을 띄는 조립질 크기의 응회물질 내지는 미립 혹은 조립 크기의 석영으로 구성되어 있고 부분적으로 연속성이 미약한 수평층리 내지 사층리를 보인다.

4) 범호촌역암(Qbhs) 1 지점



<그림 24> 범호촌역암층 1 지역의 분포위치

- 서귀포시 상호동 영천악 서쪽 국립산림과학원난대림연구소 지나 돈내코교 근처에서 하천변에 노두로 확인된다. 상호동 범호촌 역암 내 퇴적층(N33o17'51.9", E126o35'24.3")은 상부에 시오름조면현무암으로 추정되는 현무암이 피복하고 하부에는 영천악스코리아층으로 추정되는 스코리아 층이 분포한다. 퇴적층은 사질의 적갈색층으로 층리가 발달하고 있으며, 상부로 갈수록 세립화하는 경향을 보인다. 사질층은 약 30~40 cm 두께를 보이며, 그 하부에 0.5~1 m 두께의 황갈색층이 분포하고 그 하부에는 4.5~40 cm 크기를 보이는 역을 함유하는 황갈색층이 확인된다. 퇴적층 상부를 피복하는 현무암의 대자율은 6.89, 8.14, 7.20, 5.81, 7.71, 5.89로 측정되었으며, 사질적갈색층에서 측정된 대자율은 3.48, 3.71, 3.07, 3.93, 4.57 이며, 황갈색층의 대자율은 2.86, 2.52, 2.62, 3.30, 2.62 측정된다.

- 노두에서 약 1 km 동쪽에 위치한 시추공(YCA)에서는 영천악스코리아층 하부에 역암층이 산출하여 도폭의 층서상 오류가 있음이 확인되었으며, 노두에서 약 500 m 서남서쪽에 위치한 시추공(DNK) 시료의 미발표 Ar/Ar 연대 자료에 따르면 고도 182 m, 174.5 m 지점에서 조면안산암(101 ± 7 ka, 148 ± 7 ka) 사이에 역암층(4 m 두께)이 나타나는데 이와 동일한 퇴적층일 가능성이 있다. 따라서 역암층은 약 10~15만년 전에 국지적으로 퇴적된 것으로 추정된다.

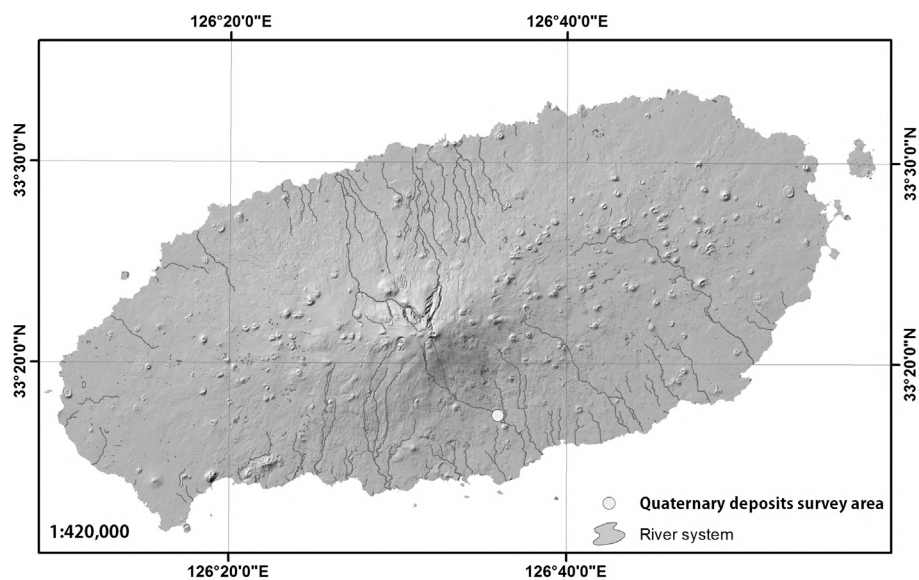


<그림 25> 범호촌역암층 1지점의 야외 분포 양상

5) 범호촌역암(Qbhs) 2 지점

- 서귀포시 상호동 영천악 남쪽의 상호교 아래쪽 소로를 따라 하천으로 진입되는 하천변에 노두가 확인된다. 하천의 이름은 영천으로 노두의 위치는 N33°17'28.0", E126°35'56.6"이다. 퇴적층의 두께는 5m 내외로 상부는 현무암이 피복하고 있다. 대체로 조립의 퇴적층이 발달하며 층리가 명확하게 확인된다. 부분적으로 점토질 퇴적층이 확인된다. 갈색 조립질 모래질 퇴적층에서 측정된 대자율은 2.91, 2.67, 2.57, 2.85, 3.32이며, 하부 현무암은 확인되지 않는다. 상부 현무암의 대자율은 6.43, 6.30, 7.39, 10.4, 12.7, 12.8으로 측정되었다. 위치상으로 판단하기에는 영천악의 스코리아층에 해당할 것으로 판단된다.
- 기존의 도폭조사에 의하면, 이 역암은 시오름조면현무암의 하부에 분포되어 있는 역암을 포함한다. 범호촌역암의 표식지는 영천악(NG 27.7/162.6)의 서쪽에 형성되어 있는 하천에 노출된 암석을 표식암석으로 한다. 표식지에서 이 암석은 남북의 하천을 따라 2 km 정도 노출되어 있으며 역암은 3~5 m의 두께로 발달해 있다. 이

암석의 연장은 영천악에서 용두암 입구(NG 28.2/161.7)에 이르는 구간의 지역의 담장은 대부분이 30~50 cm 크기의 원마도가 양호한 역으로 구성되어 있고, 지형적으로 평평한 개활지를 이루고 있는 점으로 보아 개활지 전체가 이 암석으로 구성된 것으로 보인다. 서귀포 중앙표(NG 23.3/159.5) 하부에 조면암질의 원마도가 양호하거나 각력으로 구성된 역암이 시오름조면현무암 사이에 협재되어 있다. 이 역암은 이 하천을 따라 약 500 m 연장 분포를 보이며, 두께는 약 3 m에 이른다. 표식지에서 영천악스코리아층을 피복하며 시오름조면현무암에 의해 피복된다. 회색 내지는 암회색의 이 암석은 하천 바닥에서부터 수직으로 약 5 m 두께이며, 원마도가 양호한 조면암질 역이 대부분이고, 역의 크기는 10~50 cm이다. 역은 비늘구조를 갖고 점이층을 형성하고 있다.



<그림 26> 범호촌역암층 2 지점의 분포위치



<그림 27> 범호촌역암층 2 지점의 야외 분포 양상

제 2 절 제주 제4기퇴적층의 형성시기 및 고환경 기록

1. 거문덕이 퇴적층

○ 퇴적 환경

- 거문덕이 응회암층 하부에 나타나는 퇴적층은 현재까지 알려지지 않았던 퇴적층이다. 하천변을 따라 분포가 확인되는데 하부의 경계는 확인하지 못한 상태로 하천변에서 확인 가능한 단면에서 시료를 채취하고 퇴적환경을 분석하였다.
- 하부에 나타나는 퇴적층과 상부의 응회암층 사이에는 역들을 포함하는 퇴적층이 분포하는데, 하부의 점토층과는 불연속적인 관계로 놓인다. 상부의 거문덕이 응회암층은 현생 식물이 피복하고 있으며, 현재에도 식물의 뿌리 등이 노출되어 나타난다. 점토층과 그 상부층의 경우에도 단면상에 식물이 피복하고 있어 시료 채취에 주의가 필요하였다.



<그림 28> 거문덕이 퇴적층의 신규 조사 당시의 전경 및 예비분석결과

- 거문덕이 지역의 1차 조사에서 거문덕이 응회암 하부의 점토층은 거문덕이 응회암 지역에서의 방사성탄소연대 분석가능성을 검토하기 위한 예비조사에서 시작되었는데, 거문덕이 응회암 하부의 사력층과 하부의 점토층에서 예비적으로 분석된 연대는 자갈층에서 $24,950 \pm 425$ yr BP와 $9,218 \pm 184$ yr BP, 점토층에서 $12,111 \pm 277$ yr BP로 나타났다. 따라서 거문덕이 응회암 하부의 자갈층과 점토층의 방사성탄소

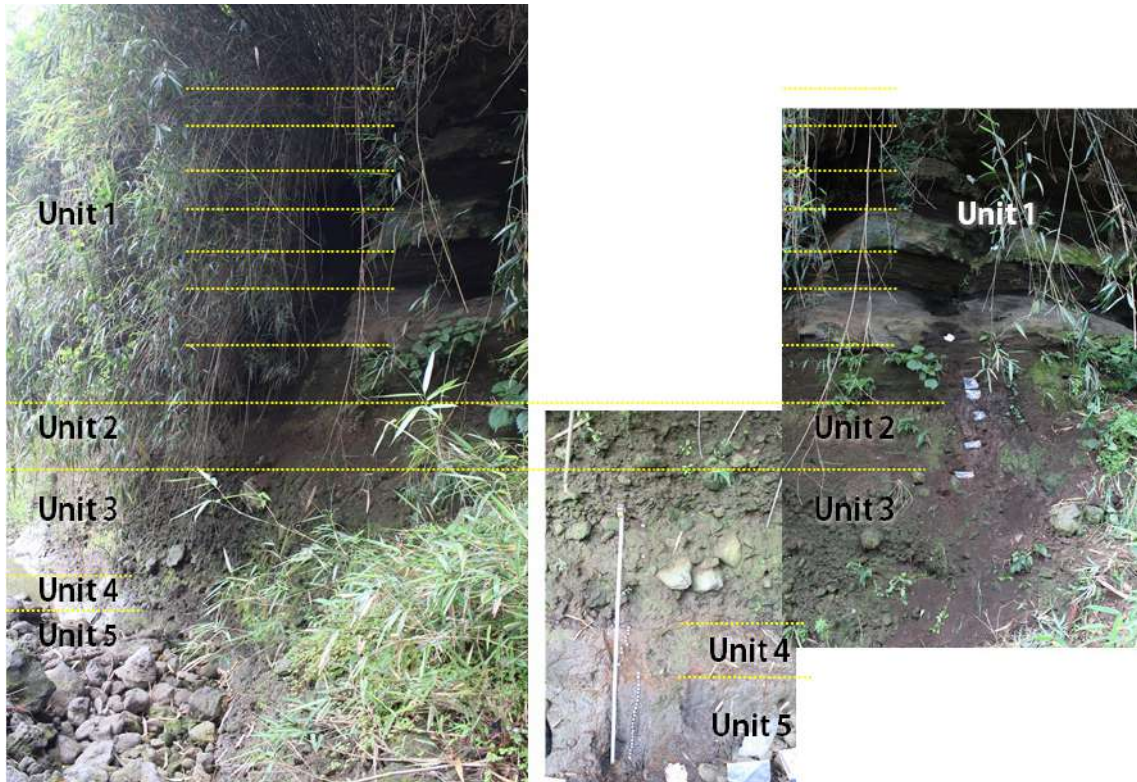
연대분석이 가능하다는 점을 확인하였고, 추가적인 정밀 분석을 수행하였다. 기존 예비조사 과정에서의 연대분석결과는 노출된 사면을 정리하지 않은 상태에서 채취된 결과로 퇴적층에서 사면을 따라 흘러내린 퇴적물을 대상으로 분석했을 가능성이 있어, 재 조사과정에서 예비조사 과정에서 제시된 연대는 배제하였다.



<그림 29> 거문덕이 퇴적층 조사지역의 시료채취 위치

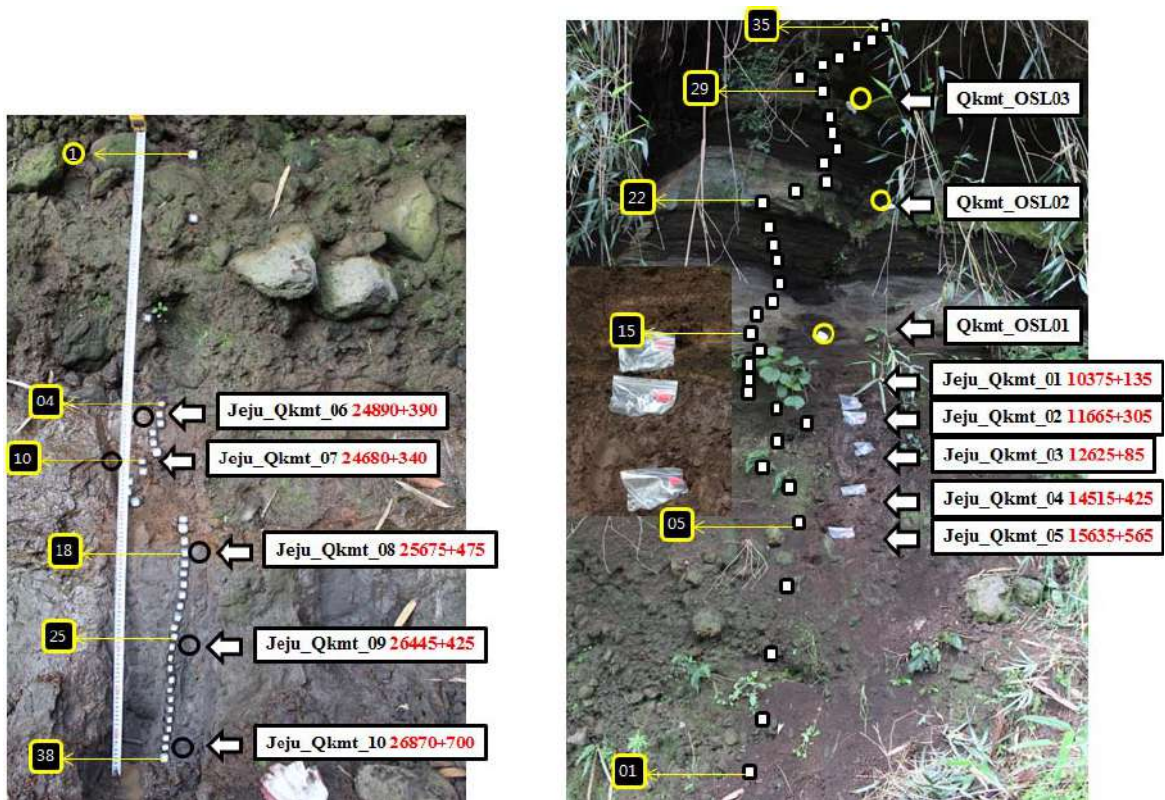
- 거문덕이 퇴적층의 구성을 보면 가장 하부는 실트층 또는 점토층의 형태로 하천 저면에서 약 70cm 정도 노출되어 있고, 그 상부에는 역이 많이 포함된 사력층이 분포하고, 그 상부에 다시 사질 점토층이 분포한다. 그리고 마지막으로 거문덕이 응회암이 이 퇴적층을 피복한다. 야외에서 관찰된 퇴적상을 중심으로 퇴적단위를 크게 5개로 구분하면, 가장 하부에 위치한 Unit 5는 암녹색 또는 회색으로 나타나며 주로 점토질 실트층에 해당된다. Unit 4는 Unit 5와 유사한 퇴적상을 보이나, 퇴적층의 색상이 황적색으로 Unit 5와 구분된다. Unit 4의 상부는 각력이 우세한 자갈층(Unit 3)으로 상부로 갈수록 포함된 역들의 크기가 작아진다. 포함된 각력들의 원마도는 불량하며 분급도 또한 불량하게 나타난다. 퇴적층은 갈색을 띠며, 기질은 모래와 실트 크기의 입자로 구성된다. 상부의 자갈층과의 경계부분은 30cm

두께의 황적색 층이 나타난다. Unit 2는 자갈층 상부에 적갈색 점토질 실트층이 위치하는데, 상부 Unit 1의 응회암 층과는 부정합적으로 놓인다. 상부에 피복하는 응회암층은 Unit 1로 총칭하였으나, 실제 6매의 층으로 구분되며, 현재까지는 거문덕이 응회암 층으로 알려져 있다.



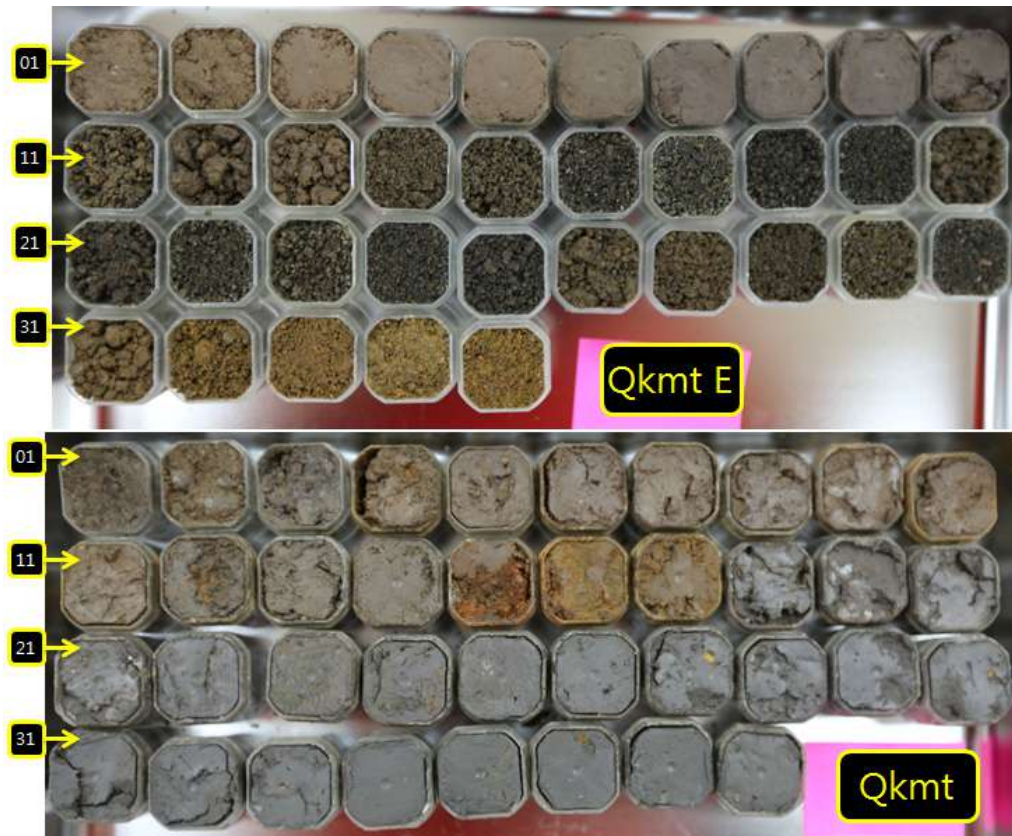
<그림 30> 거문덕이 퇴적층 조사지역의 퇴적단위 구분

- 거문덕이 퇴적층에서는 모두 10개의 연대시료가 추가로 채취되었는데, 가장 하부의 연대는 $26,870 \pm 700$ cal. yr BP로 나타났으며 상부 Unit 2층의 최상부 연대는 $10,375 \pm 135$ cal. yr BP로 나타났다. 가장 하부의 Unit 5의 연대는 가장 하부가 $26,870 \pm 700$ cal. yr BP이며 중간부분이 $26,445 \pm 425$ cal. yr BP, 그리고 상부 Unit 4와의 경계면이 $25,675 \pm 475$ cal. yr BP의 연대로 나타났다. 따라서 Unit 5의 퇴적시기는 약 26,800년 전부터 25,675년 까지로 해석된다.
- Unit 2 층의 경우 가장 하부 경계면의 $25,675 \pm 475$ cal. yr BP에서부터 중간부분과 최상부가 $24,680 \pm 340$ cal. yr BP, $24,890 \pm 390$ cal. yr BP의 연대로 오차범위 내에서 일치한다. 따라서 Unit 2의 퇴적시기는 25,600년 전부터 24,600년까지로 형성시기를 추정해 볼 수 있다.



<그림 31> 거문덕이 퇴적층의 탄소연대 분석결과

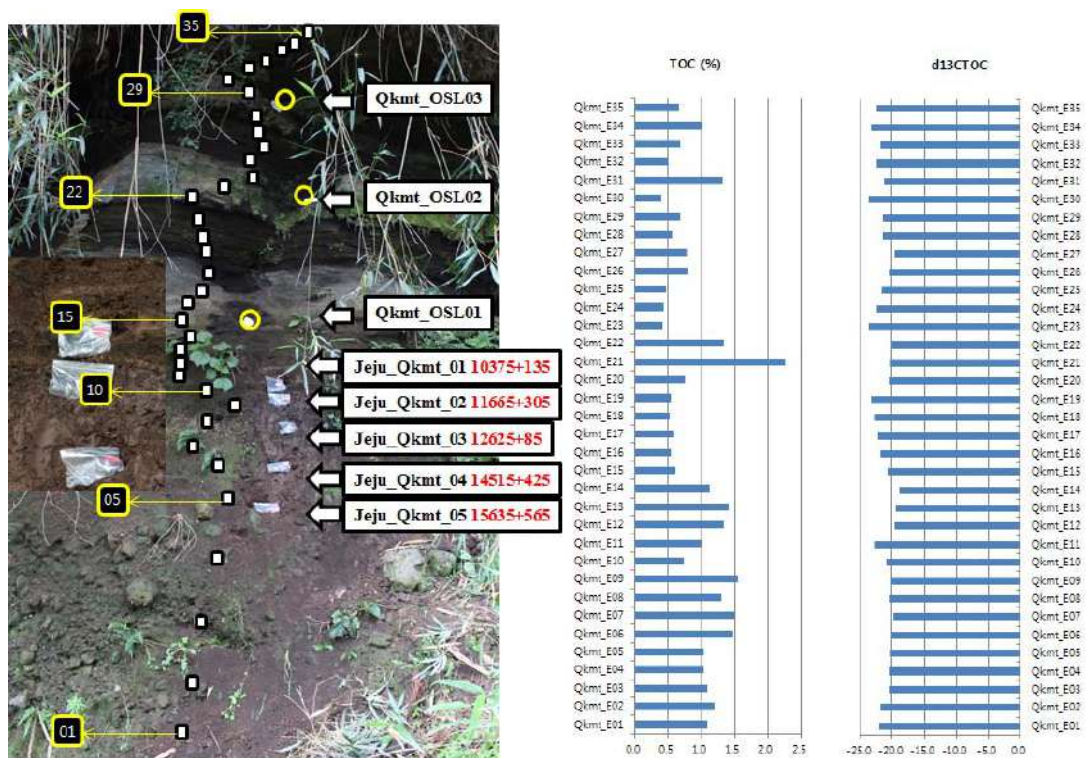
- Unit 3의 자갈층의 형성시기는 상부 Unit 2의 경계부에서 15635 ± 565 cal. yr BP으로 나타나 퇴적층의 형성시기를 24,600년부터 15,600년까지로 해석하였다. Unit 2의 형성시기는 총 5개의 토양시료로부터 방사성탄소연대분석을 통해 얻어진 연대를 사용하여 추정하였다. 구체적으로 하부의 경계부의 연대인 15635 ± 565 cal. yr BP부터 14515 ± 425 cal. yr BP, 12625 ± 85 cal. yr BP, 11665 ± 305 cal. yr BP, 10375 ± 135 cal. yr BP로 순차적으로 층이 퇴적되었음을 확인하였다.
- 상부의 Unit 1에 대한 연대는 OSL 분석을 수행하였으나, 석영 입자가 검출되지 않아 연대를 얻을 수 없었다. 다만 하부의 Unit 2의 경계면의 연대가 약 10,000년 인 점을 고려하면 검은덕이 응회암층의 분출 시기 또한 약 10,000년 이내로 제한 된다.
- 거문덕이 퇴적층을 대상으로 고환경의 변화를 분석하기 위해 84개의 큐빅시료를 채취하였는데, 하부 Unit 5와 unit 4 그리고 Unit 3의 하부까지를 하나의 연장선 상에서 채취하였고, Unit 3부터 Unit 2 그리고 Unit 1까지를 하나의 연장선 상에서 퇴적상을 고려하여 채취하였다.
- 채취된 큐빅시료는 대자율과 입도, 그리고 탄소안정동위원소 등을 분석하였다.



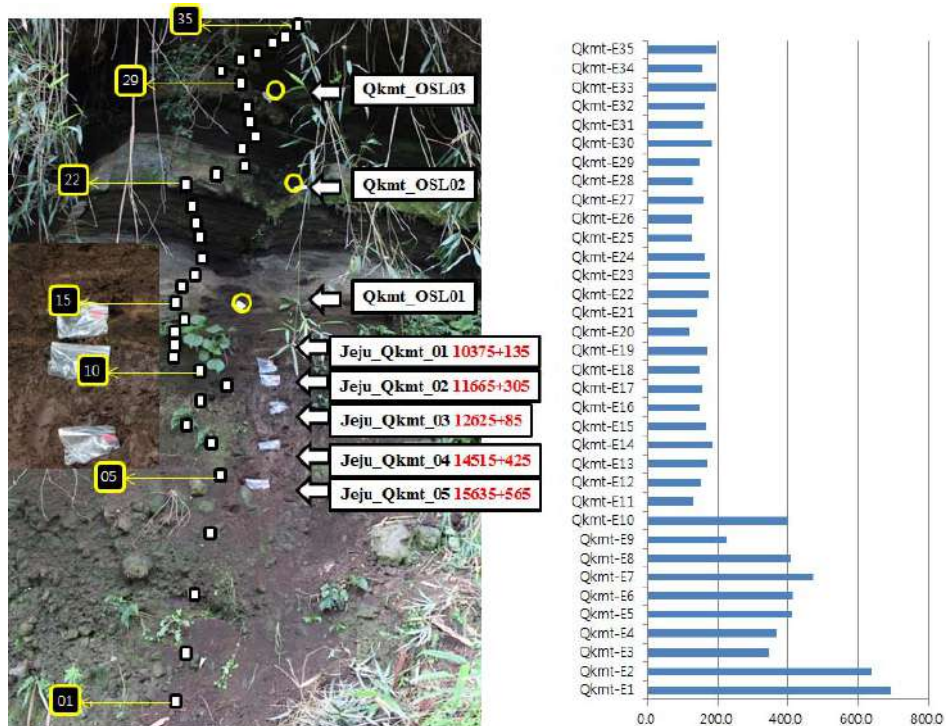
<그림 32> 거문덕이 퇴적층의 큐빅시료 채취 현황

- 거문덕이 퇴적층의 대자율 값은 최소값 ($5 \times 10^{-5} \text{SI}$)과 최대값($1000 \times 10^{-5} \text{SI}$)의 차이에서 볼 수 있듯이 상당한 변화를 보인다. Unit 5에서는 대자율값이 약 $500 \times 10^{-5} \text{SI}$ 에서 $50 \times 10^{-5} \text{SI}$ 로 점진적으로 감소하는 경향을 보이며 Unit 4와의 경계부근에서 최소값을 가진다. Unit 4에서는 Unit 5과의 경계부분에서 최소값에 해당되는 $50 \times 10^{-5} \text{SI}$ 값을 보인 후 점진적으로 증가하는 특징을 보인다. Unit 3에서는 거문덕이 퇴적층의 최대값인 약 $1000 \times 10^{-5} \text{SI}$ 값을 보인다. Unit 2에서는 약 $600 \times 10^{-5} \text{SI}$ 값을 보이며 Unit 1에서는 조립질 모래층과 세립질 모래층의 교호를 보이는 특징 있는 퇴적층임에도 불구하고 전체적으로 대자율 값은 약 $200 \times 10^{-5} \text{SI}$ 전후의 작은 변동을 보인다.
- 하부 Unit 5의 암회색 점토질 실트층에서는 Unit 5와 Unit 4의 경계까지 점차 낮아지는 경향을 보이고 Unit 4의 황적색 층에서는 하부에서 상부로 갈수록 대자율이 다시 높아지는 것으로 분석되었다. 이러한 경향은 상부 자갈층인 Unit 3까지 지속되어 높은 대자율을 유지하다가 Unit 2부터 급격히 낮은 대자율 값을 보인다. Unit 2와 Unit 1의 대자율은 낮은 대자율 값에서 특별한 변화를 보이지 않고 미세하게 변화하는 경향을 보인다.

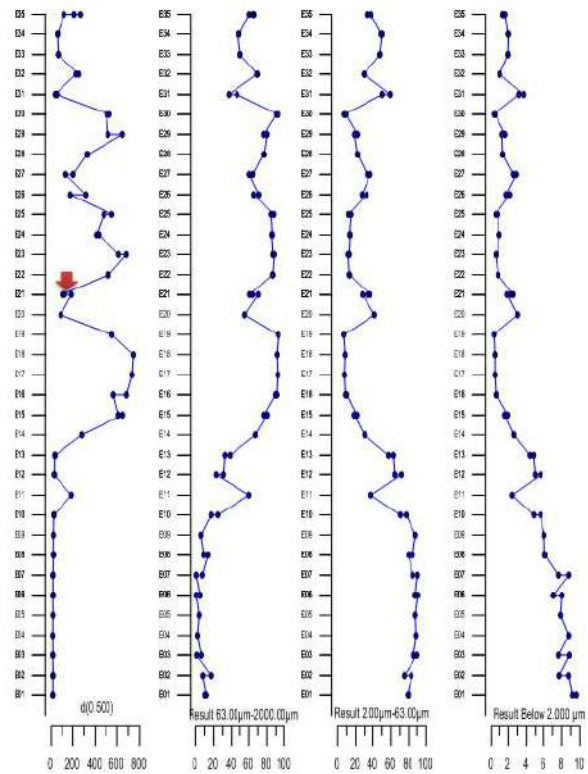
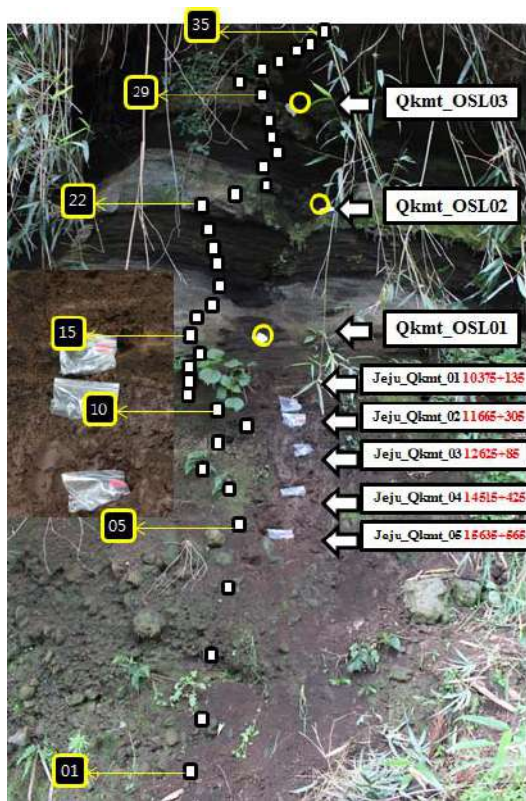
- 거문덕이 퇴적체를 구성하는 퇴적물의 입도는 화산쇄설기원 각력암들이 유수에 의해 이동된 것으로 보이는 Unit3을 제외하고 측정되었으며, Unit1은 조립질 실트와 조립질 모래로 구성되어 있으며, 나머지 Unit2, Unit4, Unit 5는 실트질 입자로 구성되어 있다.
- 입도 분석결과를 보면, 야외에서 분석된 암상과 유사하게 결과를 보이는데, 제일 하부층인 Unit 5는 입도의 변화가 거의 없이 안정적인 환경이 유지되다가 Unit 4층에서 점토의 함량에 변화가 나타난다. 다만 이러한 변화에도 Unit 4층의 평균 입도는 일정하게 유지되는 특성을 보인다. Unit 3의 자갈층의 경우 채취된 시료가 기질물질에 한정되므로 입도의 크기는 가장 큰 거력 또는 자갈에 해당되나, 기질물질을 구성하고 있는 퇴적물에서는 점토와 모래의 비율이 조금씩 변화하는 것으로 나타난다. Unit 2 층의 경우 점차 모래의 함량이 높아지는 것으로 상부로 갈수록 조립화되는 것으로 보인다. 최상부인 거문덕이 응회암의 경우 입도의 변화가 조립질 층과 세립질 층으로 구분되어 6개의 세부 층이 확인된다.
- 거문덕이 퇴적층에 나타나는 유기탄소 함유량(Total organic carbon content)은 약 2 %에서 0.5 % 사이의 값을 보인다. Unit 5에서는 약 1~1.3 %의 값을 보이며 Unit 4 구간에서는 그 값이 0.5 %까지 감소한다. Unit 3에서는 값이 증가하여 Unit 1에서 보이는 값과 비슷하며, Unit 2에서는 약 1.5%로 상당히 높은 값을 보인다. Unit 1에서는 유기탄소 함유량이 약 0.4~2.0 % 사이에서 큰 폭으로 변한다. 사질 응회암층에서 유기탄소 함유량이 약 0.5%로 낮은 값을 보여주었으며, 실트질 응회암층에서는 약 1.0 % 이상의 높은 값을 보였다.
- 유기탄소 안정동위원소 값($\delta^{13}C_{TOC}$)의 변화는 전체적으로 유기탄소 함량 변화와 비슷하다. Unit 5와 Unit 4에 걸쳐서 -23 ‰에서 -24 ‰로 감소하는 경향을 보인다. Unit 3과 Unit 2에서는 점진적으로 증가하는 경향을 보이며, Unit 2에서는 약 -20 ‰의 값을 보인다. Unit 1에서는 유기탄소 함유량 변화와 같이 큰 폭으로 변한다. 사질 응회암층에서는 약 -24.5 ‰의 최소값을 보이는 반면에 실트질 응회암층에서는 약 -21~-19 ‰의 높은 값을 보인다.



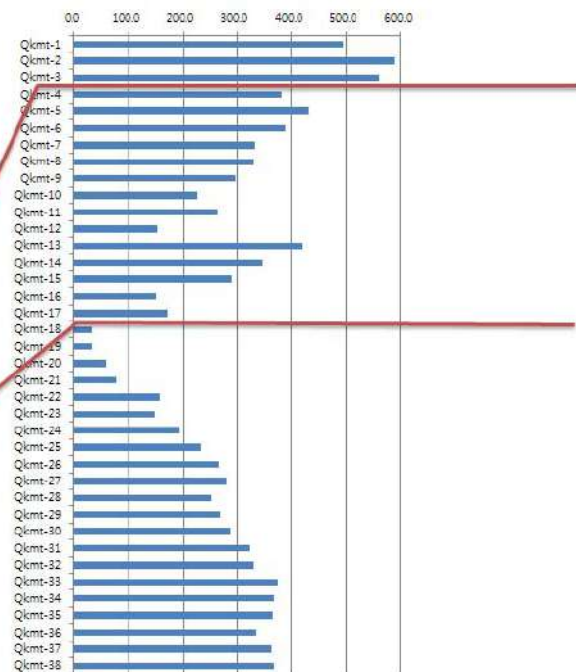
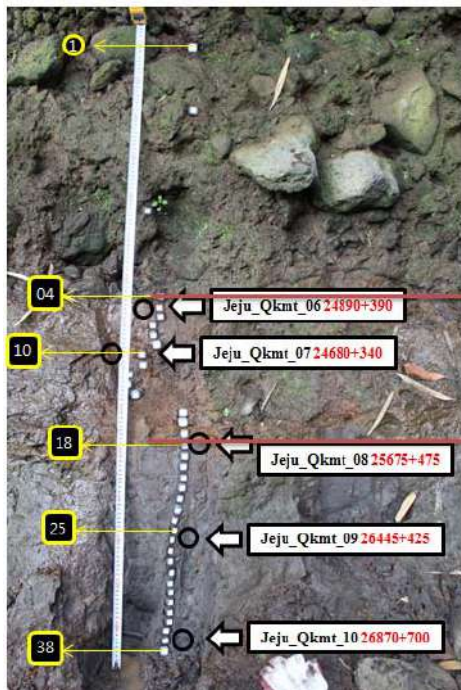
<그림 33> 거문덕이 퇴적층 상부(unit 3, 2) 및 응회층(unit 1)에 대한 탄소안정 동위원소 분석결과



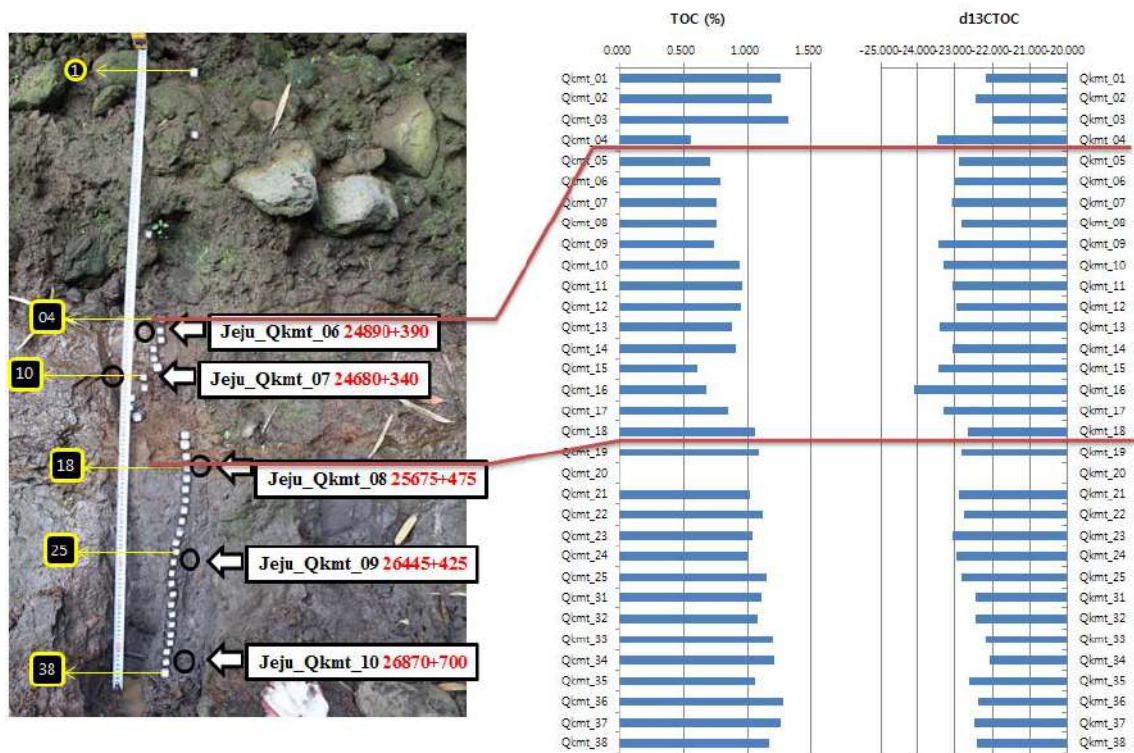
<그림 34> 거문덕이 퇴적층 상부(unit 3, 2) 및 응회층(unit 1)에 대한 대자율 분석결과



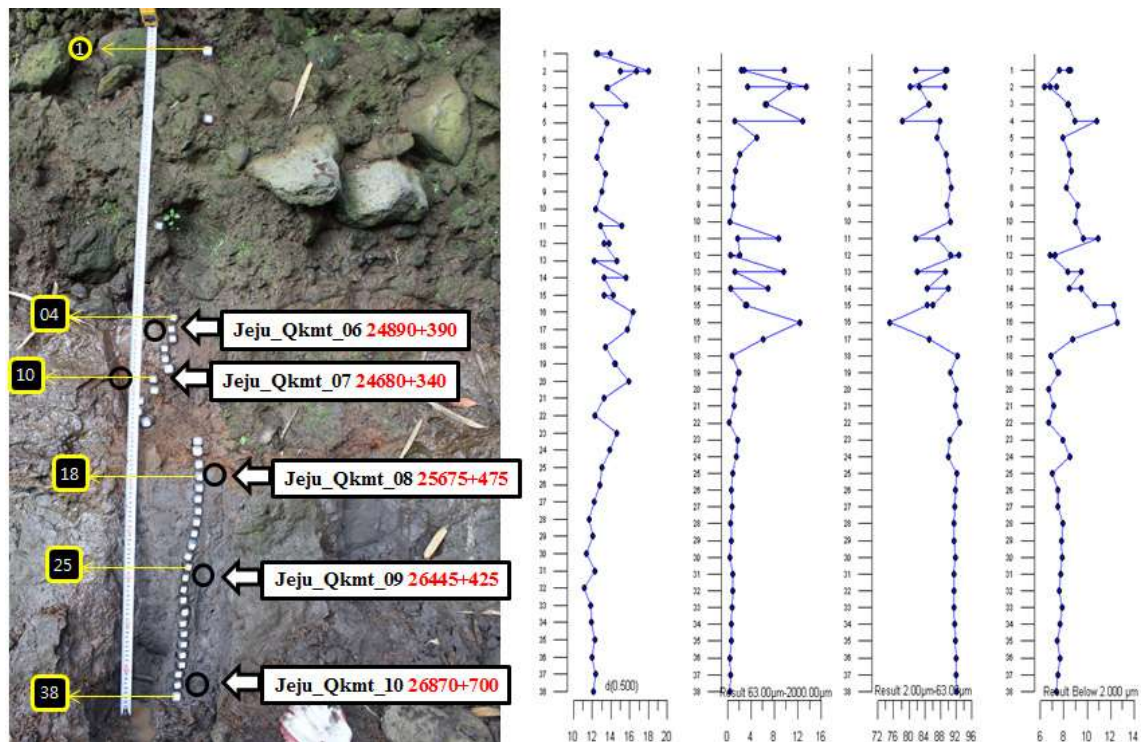
<그림 35> 거문덕이 퇴적층 상부(unit 3, 2) 및 응회층(unit 1)에 대한 입도분석결과



<그림 36> 거문덕이 퇴적층 하부 Unit 3, 4, 5의 대자율분석 결과



<그림 37> 거문덕이 퇴적층 하부 Unit 3, 4, 5의 탄소안정동위원소 분석결과



<그림 38> 거문덕이 퇴적층 하부 Unit 3, 4, 5 입도 분석결과

2. 교래리 퇴적층 1 지점 (물장울교 퇴적층)

○ 퇴적환경

- 교래리(물장울교)퇴적층은 교래리(교래교)퇴적층과 동일층으로 구분되었으나, 해발 고도상의 분포 위치와 퇴적환경은 커다란 차이를 보인다. 퇴적층의 상부는 현무암층이 피복하고 있으며, 부분적으로 클링커층과 용암구가 관찰된다.



<그림 39> 교래리(물장울교) 퇴적층 야외 전경

- 퇴적층은 크게 5개의 Unit 으로 구분되는데, 상부기반암은 불규칙한 두께로 분포하고, 사면의 경사 방향을 따라 경사면으로 분포한다.
- Unit 1의 경우 상부 현무암의 클링커와 용암구 등의 풍화에 의해 형성된 것으로 1 m 이내의 현무암 블록에서 수 cm 의 다양한 크기의 클링커 및 현무암역이 포함되어 나타난다. 색상은 짙은 갈색을 띄며, 두께가 일정하지 않다. 기질은 주로 점토 및 모래층으로 나타난다.
- Unit 2의 경우 점토질이며, 하부로 갈수록 조립화 경향을 보인다. 상부 클링커와 용암구 등에 의해 하중구조로 지층이 변형된 형태로 나타나기도 한다. 색상 또한 유기물을 포함하는 검은색 또는 짙은 회색이 부분적으로 관찰되며, 붉은 적색을 나타내기도 한다. 두 색상의 경계면은 점이적인 변화를 보이기도 하고, 일부 부분에

서는 명확한 경계를 보이기도 한다.

- Unit 3의 경우 상부층과의 경계가 점이적으로 관찰되는 짙은 갈색의 사질층 또는 잔자갈층으로 하천을 따라 지층의 연장이 명확히 관찰된다. 이 층은 상부의 점토층과 달리 비교적 층의 변형이 적게 나타나며 특별한 퇴적구조는 관찰되지 않는다.
- Unit 4의 경우 부분적으로 현무암질 자갈이 포함되는 점토층이며, 색상은 회색에서 연한 노랑색으로 상부 사질층과는 명확한 경계를 보인다. 점토층의 두께는 1 m 이상으로 나타나며 하부로 갈수록 자갈의 빈도가 높게 나타난다.
- Unit 5의 경우 자갈층으로 하부에 잔류된 역들이 분포한다. Unit 4하부의 기반암은 퇴적층이 관찰되는 단면에서는 확인이 어렵고 퇴적층의 반대쪽 사면에 노두가 기반암으로 노출된다.. 연한 노랑색으로 포함된 역들은 원마도가 매우 불량하게 나타난다.

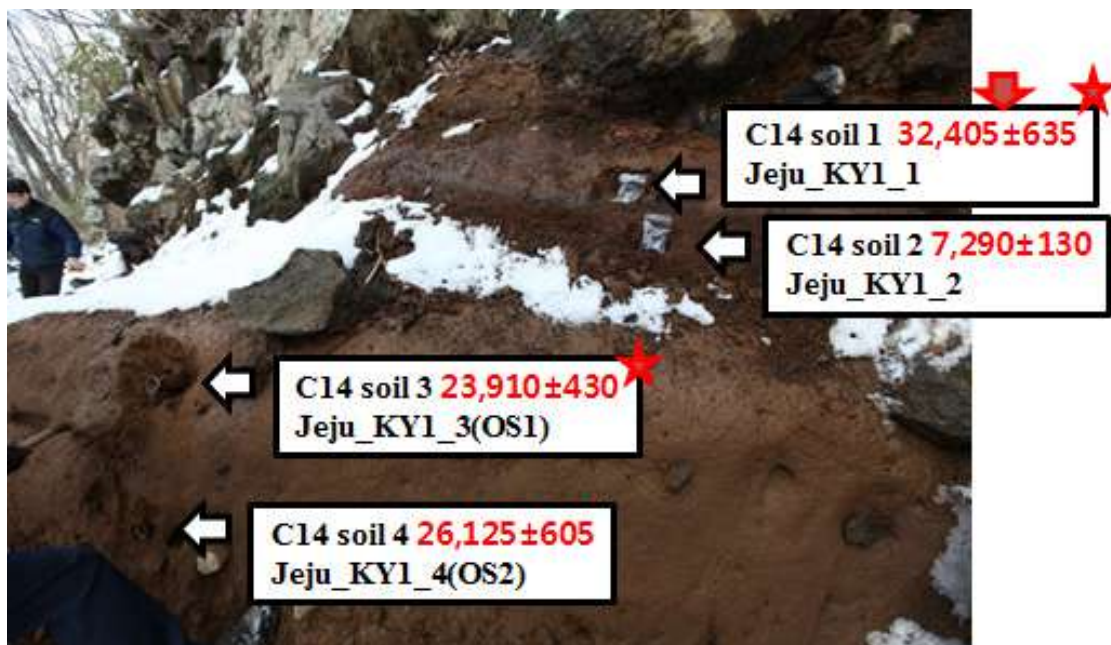


<그림 40> 교래리(물장울교) 퇴적층 시료채취 단면 위치

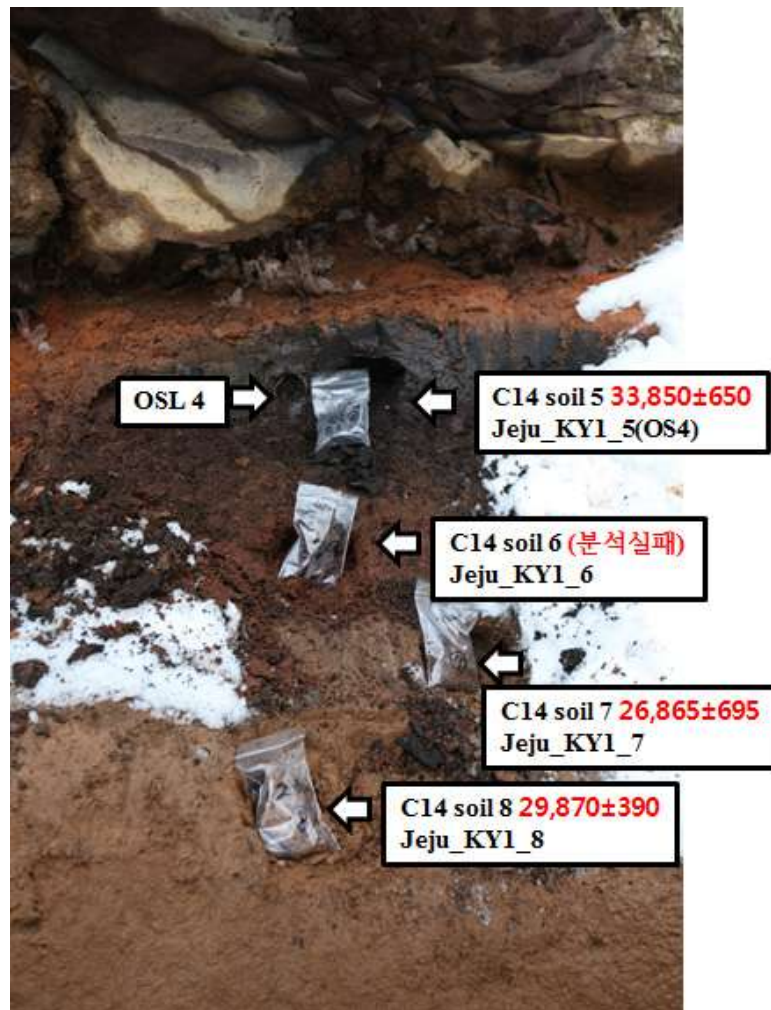
- 퇴적층에 대한 조사는 2차례 이상에 걸쳐 진행되었다. 1차 조사에서는 OSL 시료와 방사성탄소연대시료를 채취하였으며, 2차 조사에서는 고환경 분석을 위한 큐빅 시료와 상부 Unit 1과 Unit 2에서의 방사성탄소연대시료를 채취하였다.
- 방사성탄소연대 1차 분석결과 총 6 개의 시료에서 5 개의 연대측정결과를 획득하였다. A 단면에서 Unit 2에서의 연대 $32,405 \pm 635$ cal. yr BP와 Unit 3의 연대 $7,290 \pm 130$ cal. yr BP의 연대를 얻었으며, 이 가운데 $7,290 \pm 130$ cal. yr BP 연

대는 현생 식물 등에 의한 영향으로 판단된다. Unit 4에서의 연대는 $23,910 \pm 430$ cal. yr BP, $26,125 \pm 605$ cal. yr BP로 분석되었다. 이 가운데 $23,910 \pm 430$ cal. yr BP의 연대는 탄소안정동위원소의 비가 상당히 높게 나타났다. B 단면에서의 연대 분석결과는 유기물이 많이 함유되었을 것으로 추정되는 검은 색 층(unit 2)에서 채취된 시료에서 $33,850 \pm 650$ cal. yr BP의 연대 분석결과를 얻었고, unit 3층에서 채취된 시료는 유기물이 포함되지 않아 연대분석결과를 얻을 수 없었다. Unit 4의 시료에서는 $26,865 \pm 695$ cal. yr BP, $29,870 \pm 390$ cal. yr BP의 연대 분석결과를 얻었다.

- 방사성탄소연대 분석결과에 따라 가장 상부의 unit 2의 연대는 $32,405 \pm 635$ cal. yr BP과 $33,850 \pm 650$ cal. yr BP으로 33,000년 전후의 오래된 퇴적층으로 보이며, Unit 3의 연대는 분석결과가 좋지 않거나 분석에 필요한 유기물이 없는 관계로 형성시기에 대한 추정이 어렵다. 하부의 Unit 4의 연대는 Unit 2의 연대보다 젊은 $23,910 \pm 430$ cal. yr BP, $26,125 \pm 605$ cal. yr BP, $26,865 \pm 695$ cal. yr BP, $29,870 \pm 390$ cal. yr BP의 연대로 나타나는데, 23,000년에서 29,000년 사이에 퇴적된 퇴적층으로 판단된다. 이 경우 상부 Unit 2의 연대는 상류에서 유입된 오래된 시기의 퇴적물이 퇴적층의 형성연대에 영향을 주는 것으로 생각해 볼 수 있다.

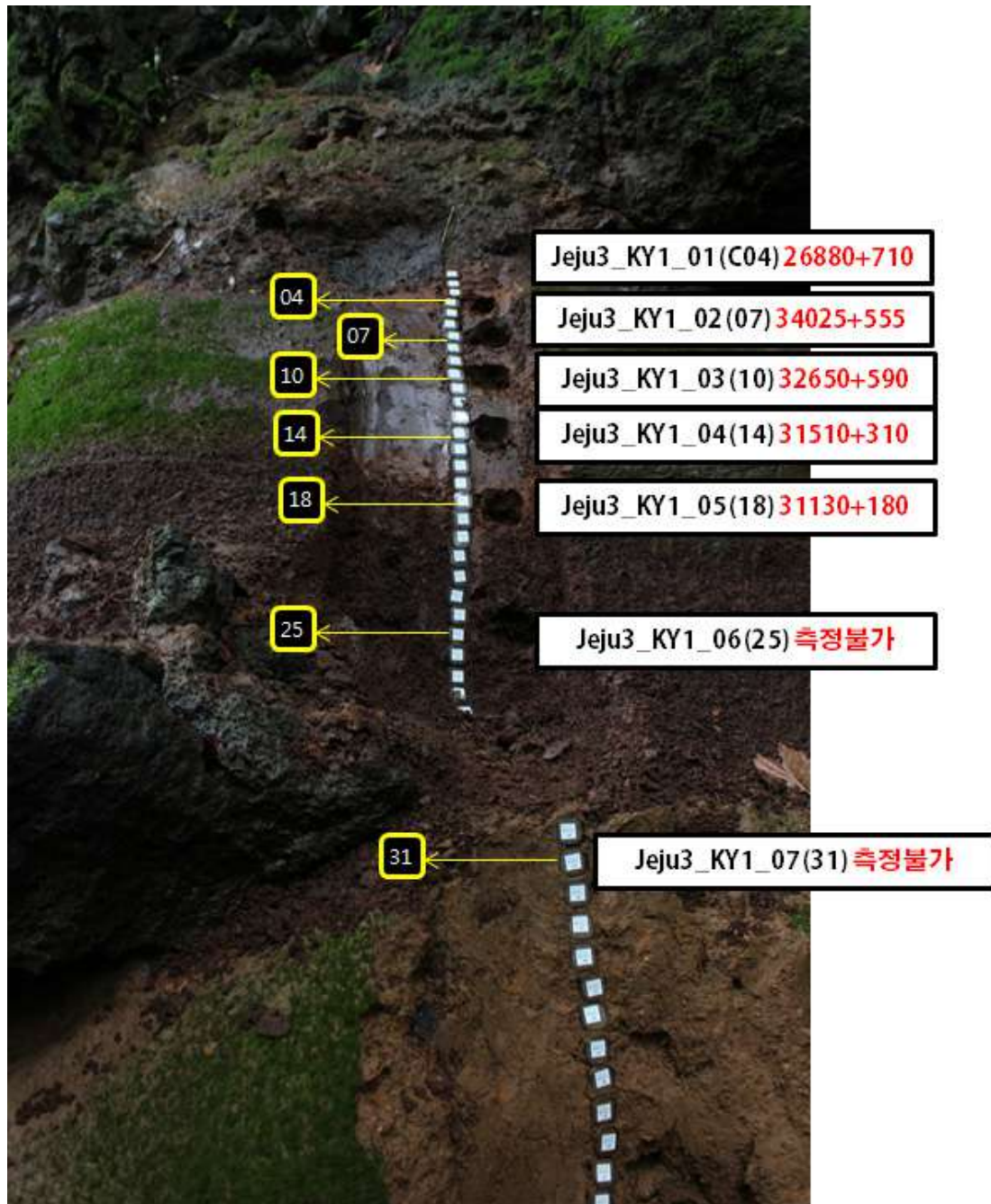


<그림 41> 교래리(물장울교) 퇴적층에 A 단면에 대한 1차 방사성탄소연대 분석결과



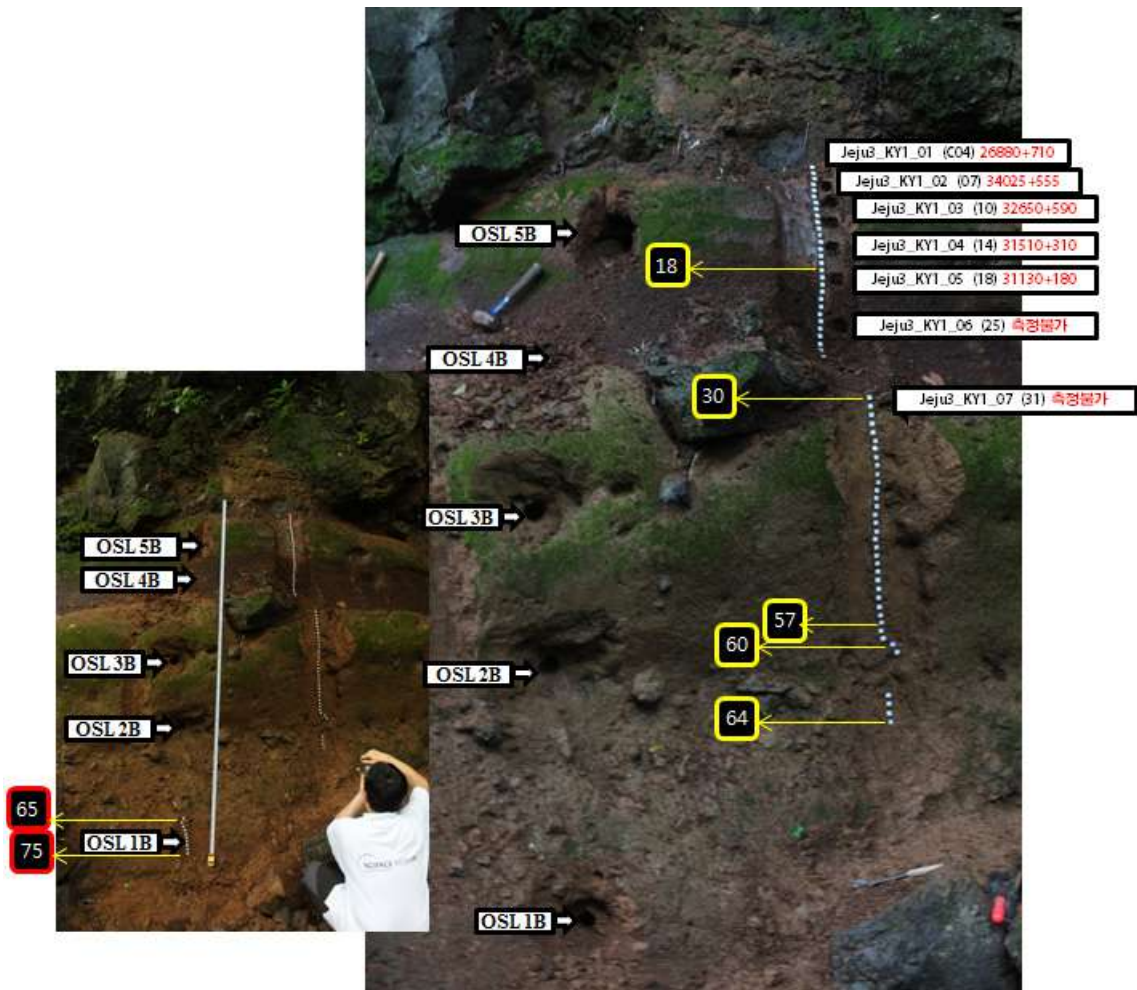
<그림 42> 교래리(물장울교) 퇴적층 B단면 1차 방사성탄소연대 분석결과

- Unit 2의 연대에 대한 명확한 해석을 위하여 2차 방사성탄소연대분석을 추가적으로 수행하였다. 연대분석을 위한 시료는 가장 상부층인 unit 1에서 1 개의 시료를 채취하였고, unit 2에서 4 개의 시료를 추가로 채취하였다. Unit 3에서 연대분석용 토양시료 1개와 Unit 4에서의 연대분석용 토양시료 1개를 추가로 분석하였다.
- 추가로 채취된 방사성탄소연대 분석결과 Unit 1에서의 연대는 $26,880 \pm 710$ cal. yr BP으로 나타났으며, Unit 2 구간의 시료는 $34,025 \pm 555$ cal. yr BP, $32,650 \pm 590$ cal. yr BP, $31,510 \pm 310$ cal. yr BP, $31,130 \pm 180$ cal. yr BP의 결과를 보였다. Unit 3와 Unit 4에서 채취된 시료는 유기물이 적어 연대를 얻을 수 없었다.



<그림 43> 교래리(물장울교) 퇴적층 B단면 2차 방사성탄소연대 분석결과

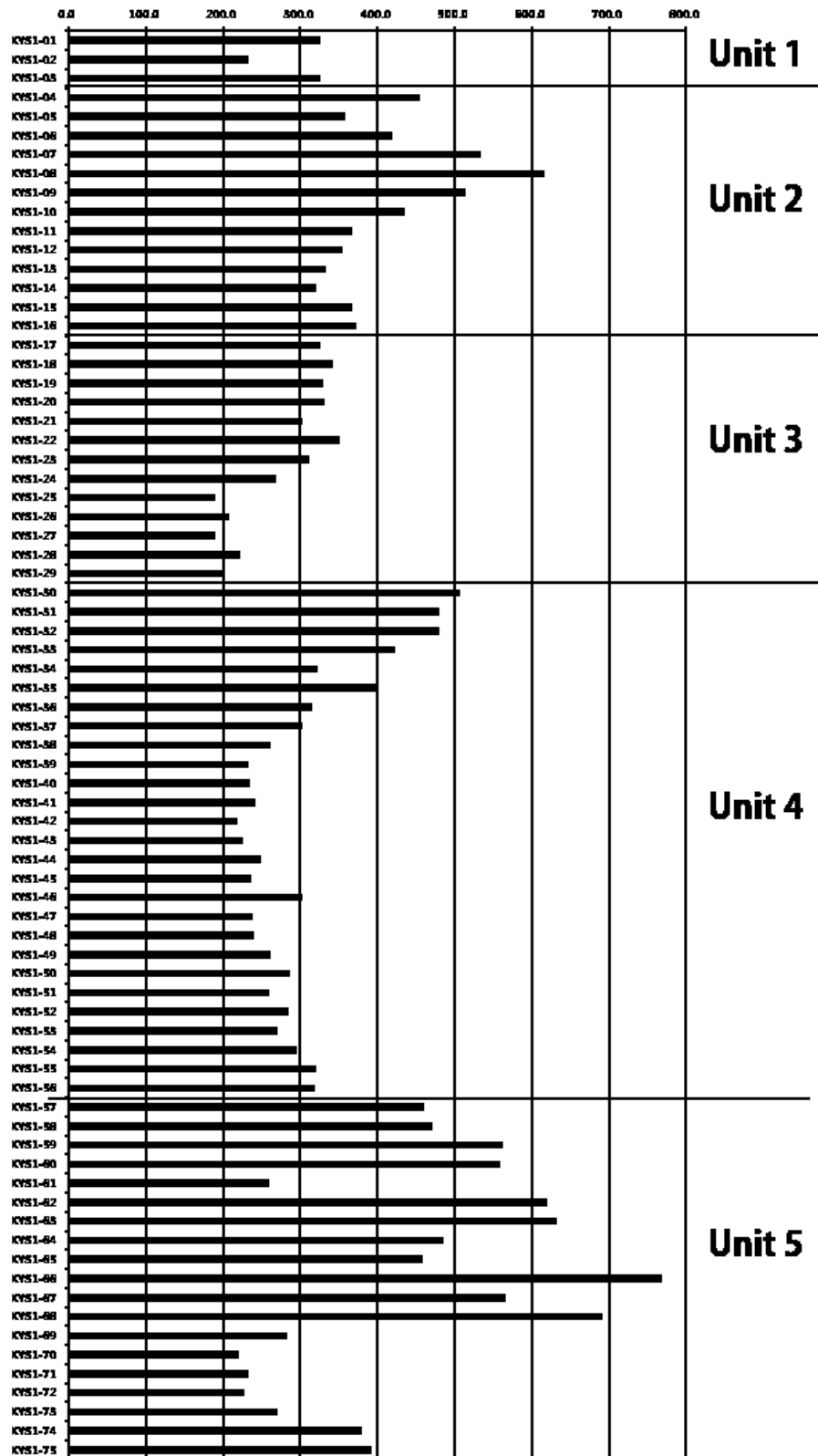
- 고환경 분석을 위한 큐빅시료는 총 75개가 채취되었다. 각각의 시료를 대상으로 대자율 측정과 입도분석 그리고 탄소안정동위원소 분석을 수행하였다. 가장 상부의 시료는 01번이며, 자장 하부의 시료는 75번에 해당된다. 하부의 시료는 기질 물질에 대한 시료로 실제 입도로 해석할 수 없고, 기질에 대한 입도로 해석할 필요가 있다. 큐빅시료는 01부터 03까지가 Unit 1에 해당되며 04부터 16번까지 Unit 2에 해당된다.



<그림 44> 교래리(물장울교) 퇴적층 B단면 큐빅시료 채취 위치



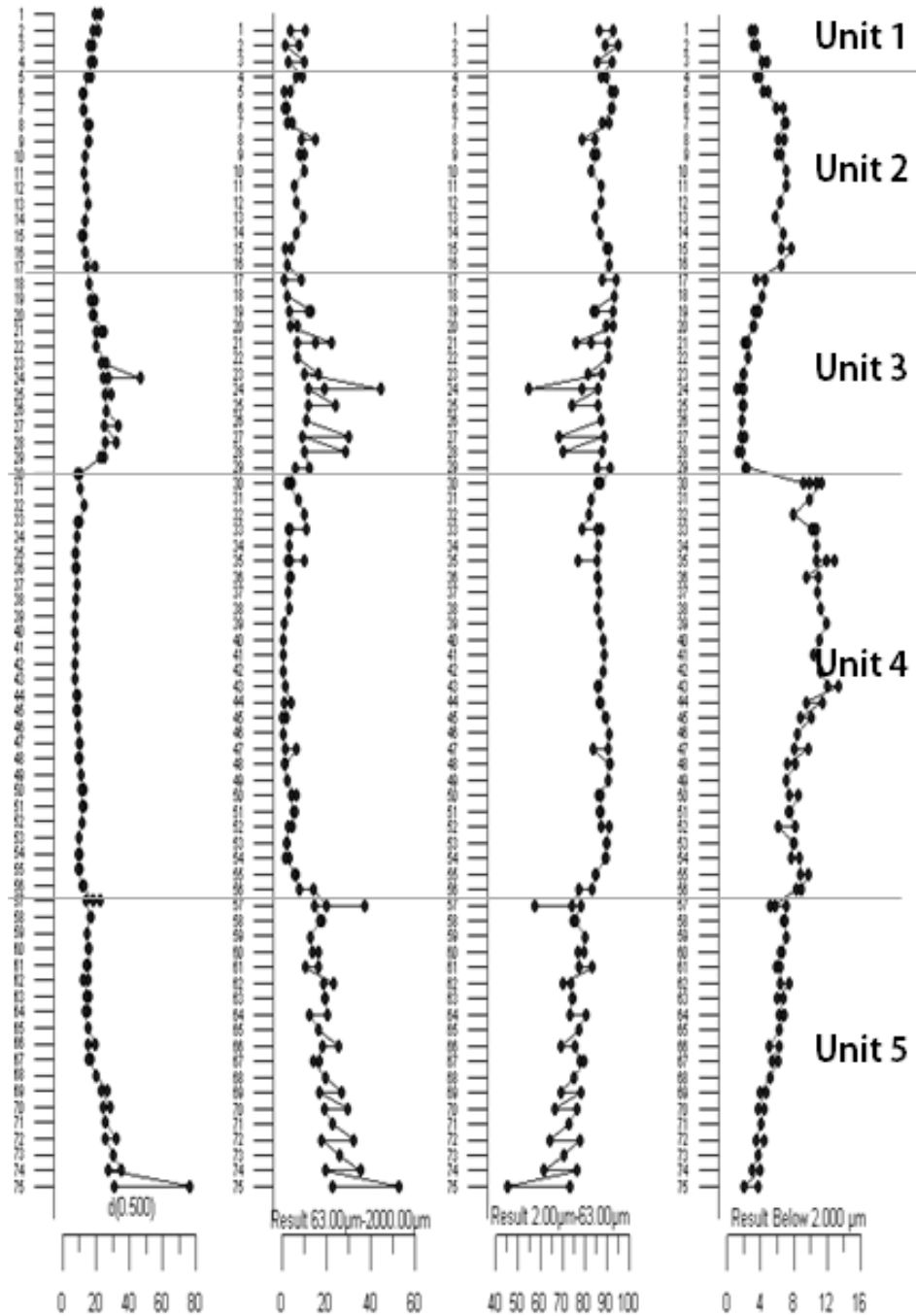
<그림 45> 교래리(물장울교) 퇴적층 B단면 큐빅시료 현황



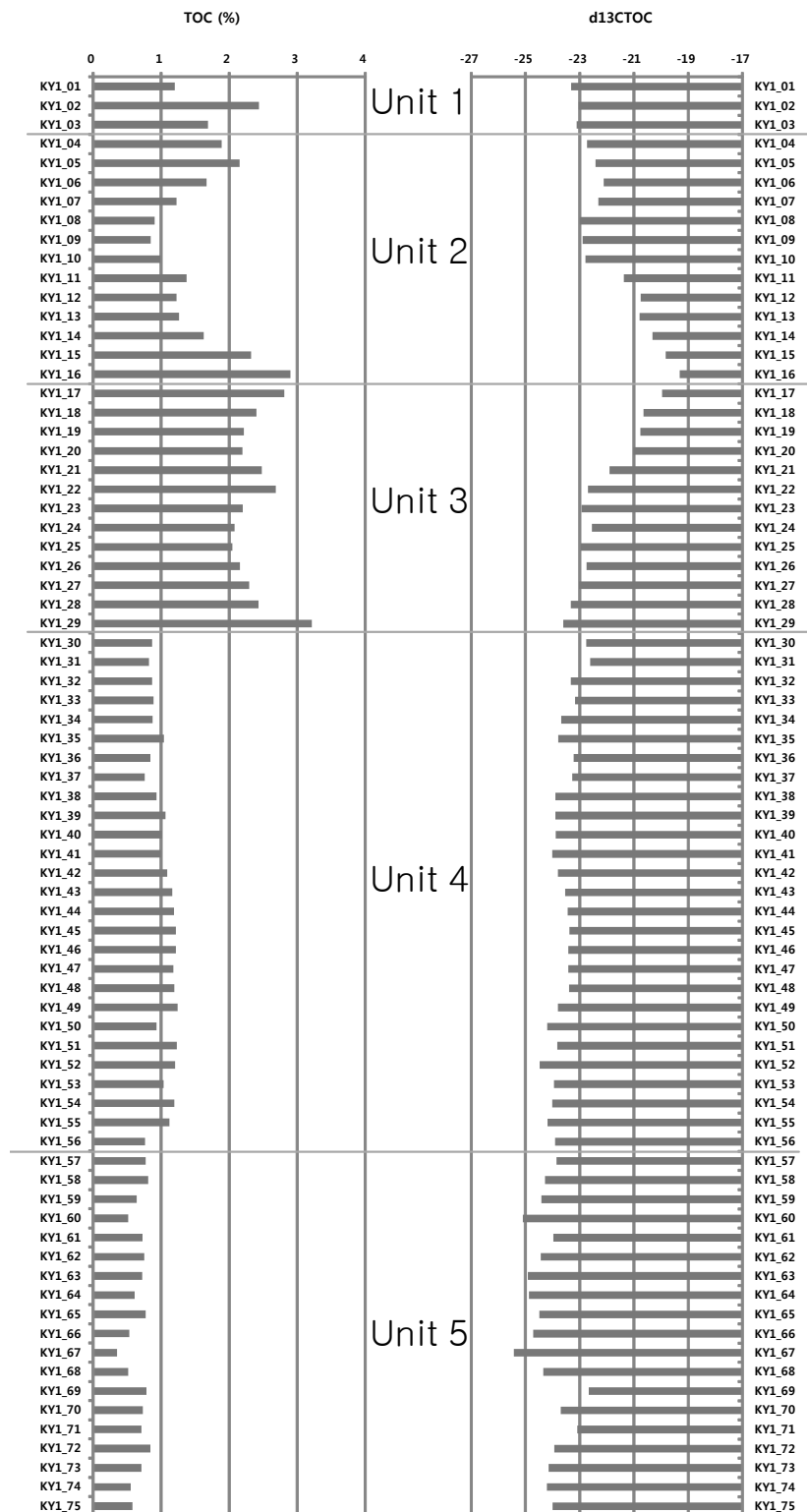
<그림 46> 교래리(물장울교) 대자울 측정결과

- Unit 3 는 17번 시료부터 29번까지의 시료에 해당되고, 30번 시료부터 56번 까지의 시료가 Unit 4 에 해당된다. Unit 5는 57번 시료부터 75번 시료까지로 가장 하부에 해당된다.
- 대자율 측정결과 Unit 5의 경우 대자율이 불규칙하게 확인되는데 Unit 5의 중간 부분이 상대적으로 가장 높게 나타난다. Unit 4의 경우 하부로부터 상부로 갈수록 점차 낮아지다가 높아지는 경향을 보이는데, Unit 3과의 경계면에서 대자율이 가장 높게 나타난다. Unit 3과 Unit 2의 경우 Unit 2 하부부터 Unit 2 상부까지 점진적으로 대자율값이 높게 나타난다. 단순히 토양화작용이나 지표면에 노출되어 대자율이 높아지는 경향을 보인다고 가정할 경우 Unit 5와 Unit 4그리고 Unit 2까지 지표면으로 노출되었던 시간이 3차례 정도 있었을 것으로 추정할 수 있다.
- 특히 Unit 3와 Unit 4의 경계면의 경우 퇴적상이나 입도, TOC 등을 고려할 때 급격한 환경변화가 있었을 것으로 판단된다.
- 총유기탄소(%)의 수직 분포 상에서도 Unit 4와 Unit 3의 경계에서 급격한 변화가 확인된다. Unit 4와 5의 경우 총유기탄소의 함량이 상부 Unit 들에 비해 상대적으로 매우 적게 나타나고, Unit 3에서 급격히 높아지는데, 이 시기에 외부로부터 유기탄소가 많이 유입되기 시작한 것으로 보인다. 특이하게도 Unit 3의 경우 조립질 모래층임을 감안하면 지하수의 유동과도 관련이 있을 것으로 보인다. 또한 이 층에서는 탄소연대가 매우 짧게 나타나거나 연대분석이 안되는 시료라는 점을 고려하면 이 퇴적층에 대해서는 추가적인 확인과 검토가 필요하다. Unit 2의 경우 중간 부분의 총 유기탄소(%)가 낮아지다가 점차 높아지는데, 층의 중간부분에 협재하는 열은 회색층이 원인일 것으로 판단된다. 이 Unit 2의 경우 연장은 확인되나 상부 현무암의 용암구 등에 의해 심하게 변형이 진행되고 부분적으로 짙은 검은 색에서 짙은 적색으로 색상의 변화가 급격히 나타내는 점에서 퇴적 이후의 환경변화 또는 외부에서 유입되는 퇴적물 공급원의 변화에 따라 여러 가지 형태의 퇴적물을 포함하는 것으로 판단된다.
- 탄소안정동위원소의 비율은 대체로 Unit 3의 중간부분까지 비교적 큰 변화가 없다가 Unit 3과 Unit 2의 경계부에서 급격한 변화가 나타나는데, 이는 기존의 공급된 유기물에 변화가 있음을 간접적으로 추론해 볼 수 있게 한다.
- 큐빅 시료에 대한 입도분석결과는 야외에서 관찰되는 퇴적상과 일치하고 있으며 Unit 4와 Unit 3 사이를 경계로 점토질에서 사질로 변화한다. 다만 하부 Unit 4와 Unit 5의 경우 포함된 거력과 자갈 등을 제외한 기질물에 대한 입도분석결과임을 고려한다면 전체적으로 하부에서 상부로 갈수록 입자의 크기는 작아지는 경향을 보인다.

- 그림에도 불구하고 Unit 4의 경우 점토의 함량이 매우 높게 나타나는데, 평균입도는 일정하게 확인되는 점을 고려하면 점토질 입자는 변화하고 있으나 그 밖의 실트질 모래질 입자는 변화가 없음을 나타낸다. 상부 Unit 3는 조립질이 우세하며, Unit 2와 Unit 1은 점토의 함량이 상대적으로 높고 실트입자와 모래 입자의 크기가 변화하는 것으로 나타난다.



<그림 47> 교래리(물장울교) 퇴적층의 입도분석결과



<그림 48> 교래리(물장울교) 퇴적층의 유기물총함량(%) 및 탄소안정동위원소 분석결과

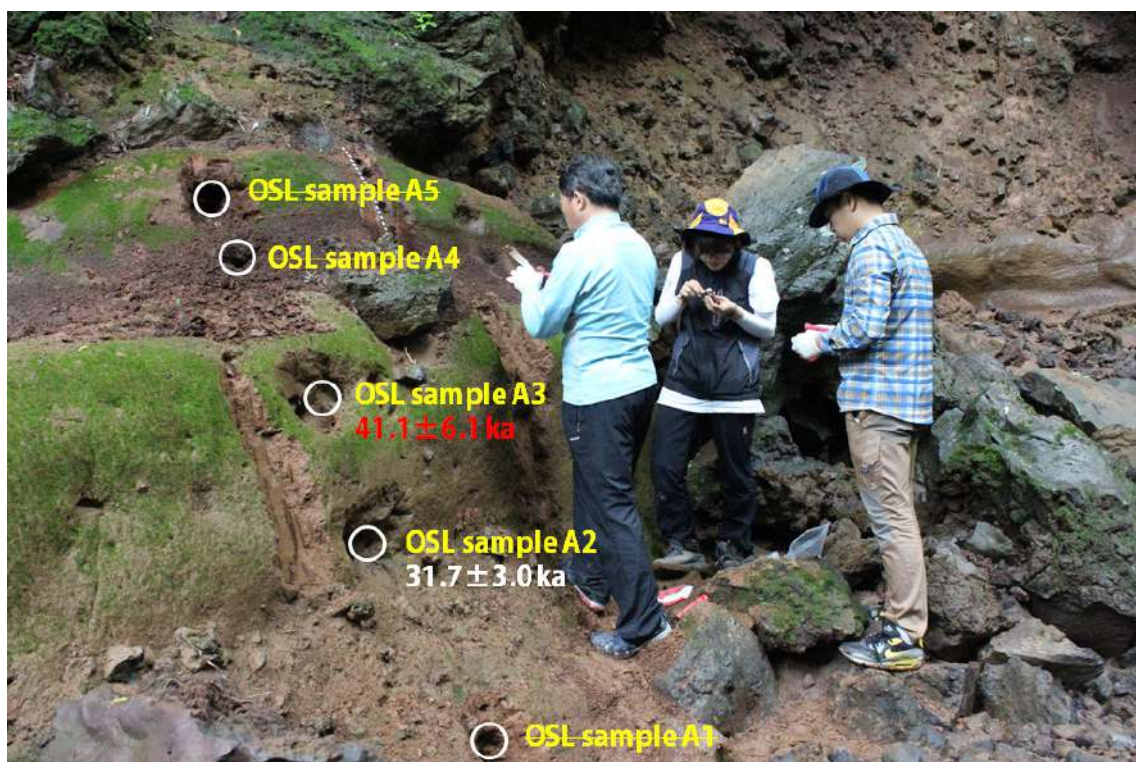


<그림 49> 교래리(물장울교) 퇴적층 OSL 연대시료 채취 위치

- 교래리(물장울교) 퇴적층에서 OSL 연대 측정을 위하여 A 와 B 지점에서 7개의 시료를 채취하였다. 야외에서 관찰되는 지층의 분포는 상부 용암 하부의 클링커에 접촉하는 최상위의 위치에 해당되는 시료가 B1 시료이며 B2 시료와 A5시료가 동일 층위에 분포하는 것으로 확인된다. 그리고 그 하부로 순차적으로 A4, A3, A2, A1 순서로 시료를 채취하였다.
- 교래리(물장울교) 퇴적층의 OSL 연대분석 결과 B1, B2, A3, A2 지점에서 연대분석 결과를 얻을 수 있었으며, A5, A4, A2의 시료는 석영의 함량이 극히 적어 OSL 분석 방법으로 결과를 얻을 수 없었다.
- 퇴적층의 OSL 연대분석 결과는 A 단면에서 5개의 시료가운데 2개의 시료에서 연대를 얻었으나, 시료의 처리과정과 분석과정에서 A3 시료는 신뢰도가 매우 낮은 것으로 나타났다. A3 시료의 분석결과는 $41,100 \pm 6,100$ 년으로 나타났으며 A2 시료의 연대분석결과는 $31,700 \pm 3,000$ 년으로 나타났다.
- 교래리(물장울교) 퇴적층 B 단면에서의 OSL 연대분석 결과 B1 시료는 $29,400 \pm 2,200$ 년, B2 시료는 $32,800 \pm 2,300$ 년으로 나타났다. 이러한 결과는 OSL 측정 방법으로 제주도에 분포하는 제4기 퇴적층의 연대분석이 가능하다는 점을 다시 한번 확인하는 계기가 되었으며, 분석된 결과를 방사성탄소연대 분석결과와 비교할 때 신뢰할 만한 결과를 제시하고 있다.



<그림 50> 교래리(물장울교) 퇴적층의 B 지점 OSL 연대시료 분석결과



<그림 51> 교래리(물장울교) 퇴적층의 A 지점 OSL 연대시료 분석결과



<그림 52> 교래리(물장울교) 퇴적층의 OSL 연대시료 분석결과



<그림 53> 교래리(물장울교) 퇴적층의 퇴적층 형성시기 검토 결과

- 교래리(물장울교) 퇴적층의 형성시기는 지금까지 확인된 연대 분석결과를 토대로 볼 때, 상부 Unit 1은 26,880년 전후까지 퇴적이 진행되었으며 Unit 2는 약 31,000에서 34,000년 사이에 상부의 퇴적층이 침식되면서 상부의 젊은 시기의 퇴적층이 먼저 쌓이고 침식이 진행되면서 점차 오래된 시기의 퇴적물이 유입되어 퇴적층이 역전된 형태로 퇴적되었으며, Unit 3는 약 26,000년에서 23000년까지 순차적으로 퇴적되었다. Unit 5는 제일 하부의 연대가 32,800년으로 확인되어 최소한 32,800년 전부터 26,000년까지 형성된 퇴적층으로 해석할 수 있다.

3. 교래리 퇴적층 2 지점 (교래교 퇴적층)

○ 교래리(교래교) 퇴적층의 퇴적환경

- 교래리 제4교래교 하부에서 관찰되는 교래교 퇴적층은 제4교래교 하류 방향으로 하천 저면에 퇴적층이 연속적으로 확인되며, 하류 방향으로 지속적으로 노출되어 나타난다.
- 교래리(교래교) 퇴적층은 여러 차례 야외조사와 자료수집을 통해 집중적으로 조사가 진행된 지역으로 조사된 단면은 A 단면, B 단면, C 단면, 그리고 확인단면 1과 확인단면 2이다. 교래리 퇴적층의 노두는 상부와 하부의 현무암층 사이에 협재하는 퇴적층으로 하천의 종단 변곡점에서 확인된다. 교래리(교래교) 퇴적층의 하부는 하부 기반암과 관련한 역들이 주로 분포하고 상부로 갈수록 세립질 모래 또는 점토질 퇴적층으로 변화한다. 다만 조사가 주로 진행된 A 단면은 상부에 하천작용으로 추정되는 하천 퇴적층이 발달하며, 하류 방향으로 하천 퇴적층의 연장이 확인되어 고 하천의 방향에 대한 추정도 가능한 상태이다.
- 교래교 퇴적층의 A 단면에서는 1차로 방사성탄소연대 측정을 수행하였으며, 그 후 2차 3차에 걸쳐 대자율 분석과 입도분석 그리고 OSL 연대 분석이 추가로 진행되었다. B 단면과 C 단면은 주로 형성시기를 교차 확인하기 위한 용도로 탄소연대 분석과 OSL 연대 분석이 수행되었다.

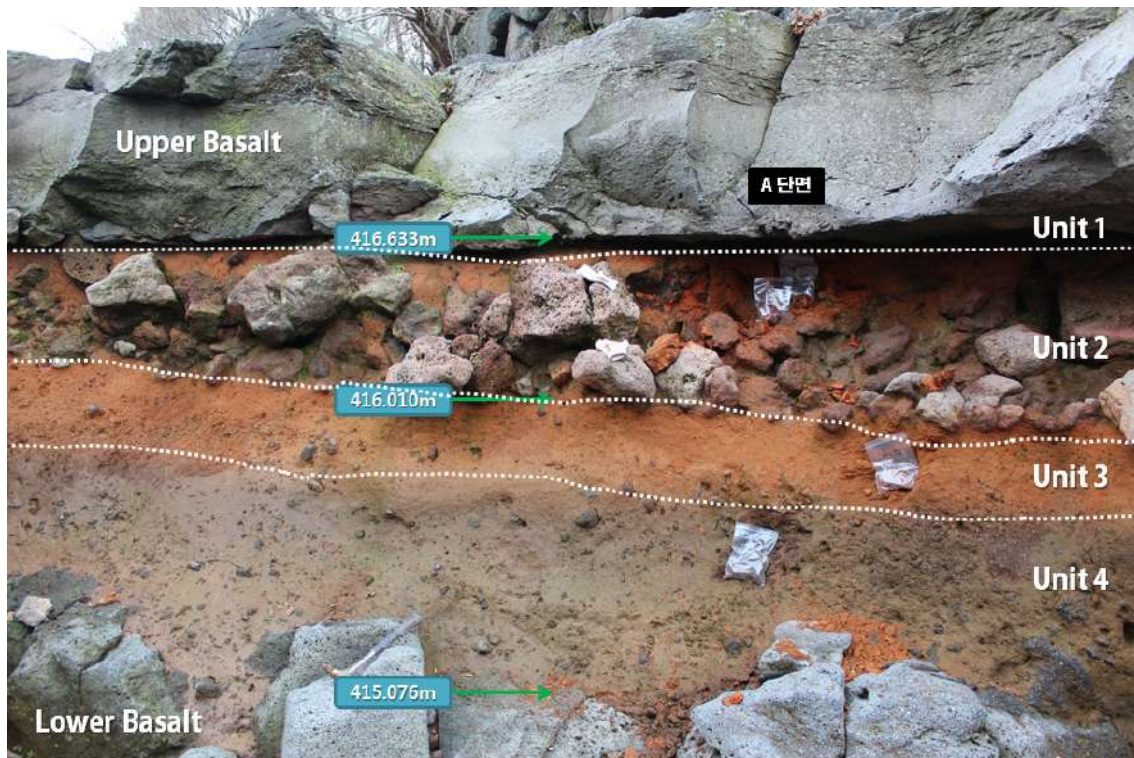


<그림 54> 시료 채취 지점 및 채취 일시

- 야외조사를 통해 A 단면은 4개의 Unit 으로 구분되었는데, 최하부의 Unit 4는 하부 기반암의 클링커와 암반 블록이 포함되는 자갈층으로 짙은 녹회색으로 나타난다. 특히 Unit 4의 경우 하부의 기반암을 부정합적으로 피복하고 있어, 암반을 점토질 자갈층이 피복하는데, 경계면이 불규칙하고, 하부로 갈수록 포함되는 역들의

크기도 커지고 빈도도 증가한다.

- Unit 4의 상부는 Unit 3와 색상에 의해 경계가 구분되는 퇴적상은 Unit 3가 Unit 4보다 포함되는 자갈의 빈도가 적고 상부로 갈수록 크기도 작아진다. Unit 3의 토색은 옅은 적황색으로 나타난다. Unit 2의 경우 Unit 3와 부정합적인 경계로 구분되는데, Unit 2와 Unit 3의 경계가 U 자 형의 하천 횡단면 형태를 보인다. 경계면을 따라 크기가 다양한 거력들이 분포하는데, Unit 2의 기질은 극 세립의 점토와 유사하다. Unit 2는 거력을 포함하는 적황색 또는 짙은 적색의 퇴적층으로 기질은 극세립의 점토로 구성된다. Unit 1은 Unit 2와 부정합적으로 만나고 층리의 연장이 전체 노두(A 단면, B 단면, C 단면 등)에서 확인된다.



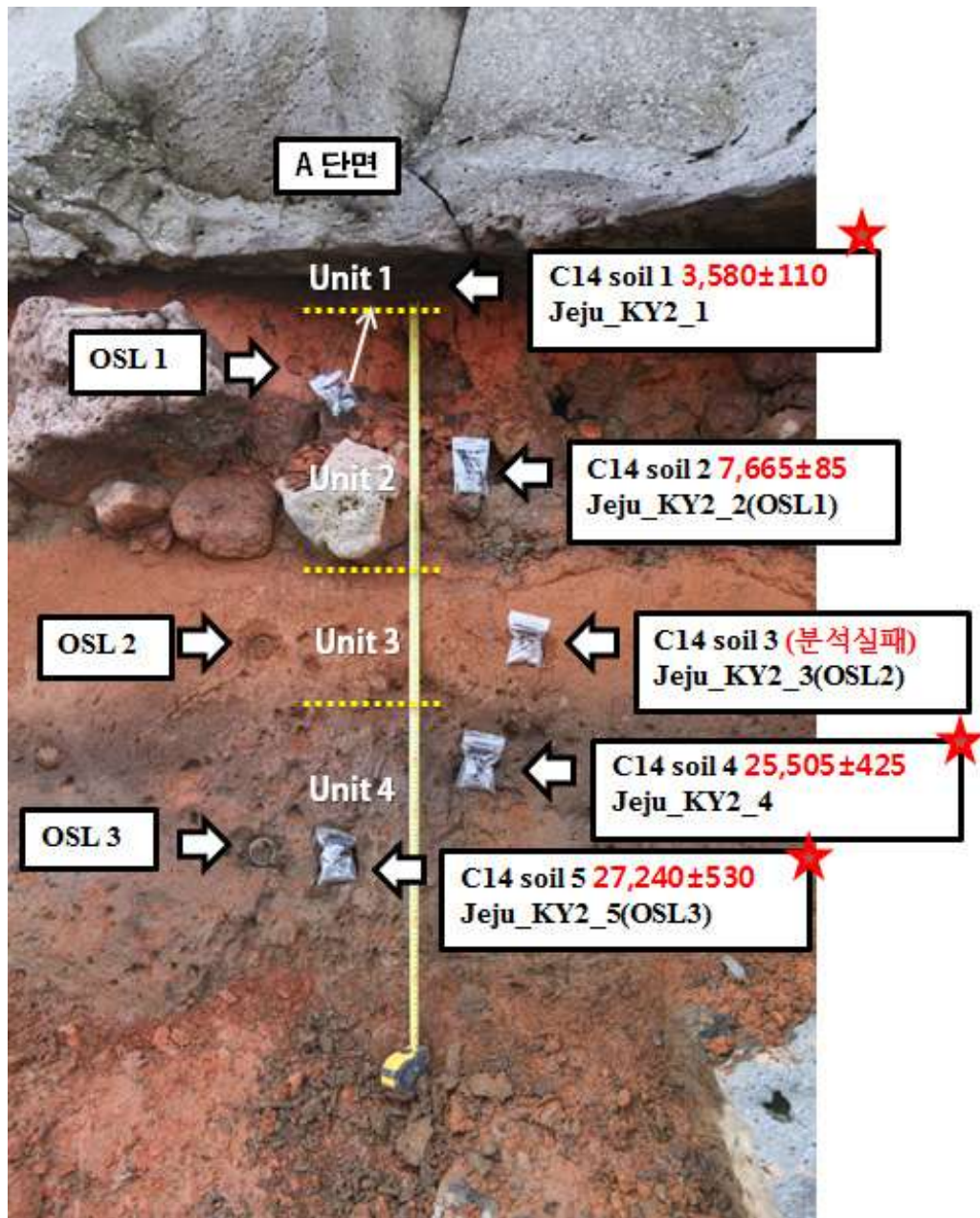
<그림 55> 교래리(교래교)퇴적층 A 단면의 야외 암상

- 1차 야외조사에서는 총 4개의 방사성탄소연대시료가 채취되었다. 가장 상부인 Unit 1에서의 연대는 $3,909 \pm 72$ cal. yr BP로 나타났으며, Unit 2와 Unit 3의 경우 연대분석결과를 얻을 수 없었다. 최하부층인 Unit 4의 경우 $24,119 \pm 277$ cal. yr BP의 연대를 얻었다. 방사성탄소연대 분석결과는 최상부층과 최하부층의 결과만으로 신뢰도를 확보하기 어려워 추가적인 조사를 수행하였다.



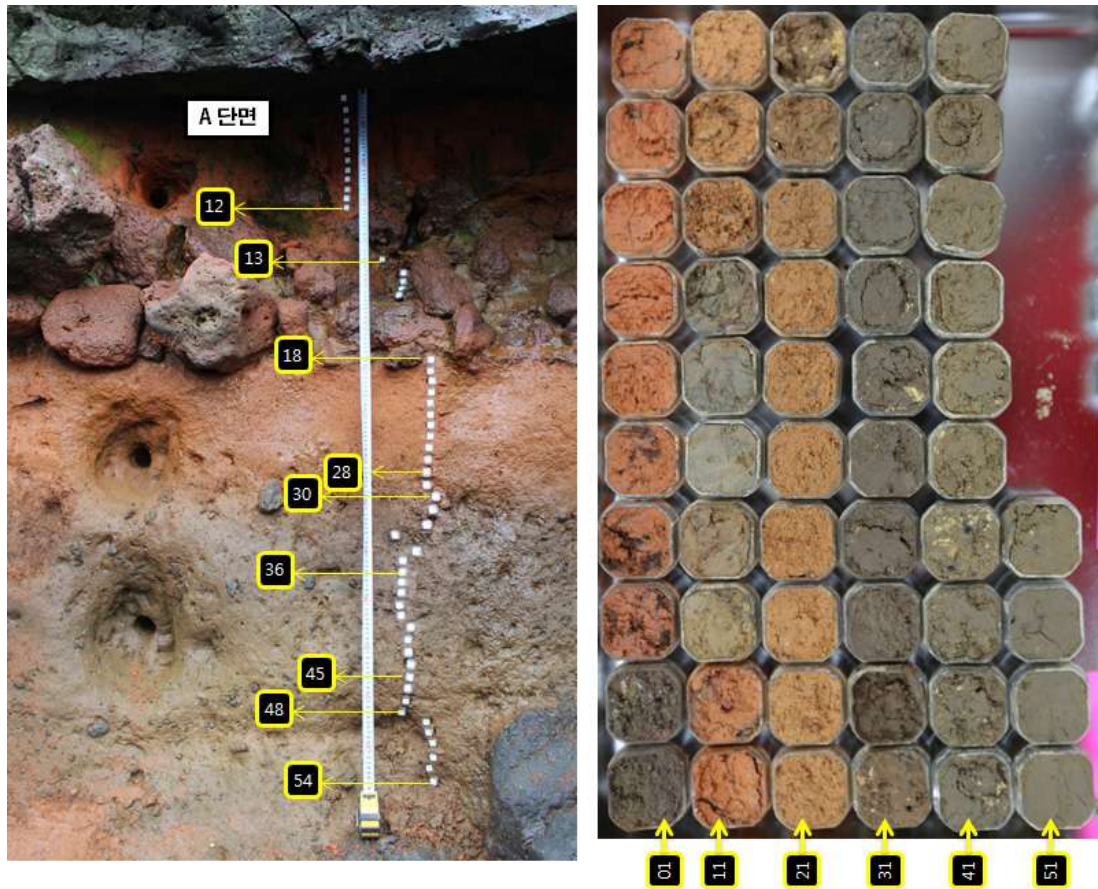
<그림 56> 교래리(교래교)퇴적층 A 단면 1차 예비조사 탄소연대분석결과

- 2차 야외조사에서는 총 5개의 방사성탄소연대시료가 채취되었다. 가장 상부인 Unit 1에서의 연대는 $3,580 \pm 110$ cal. yr BP로 나타났으며, Unit 2의 연대는 $7,665 \pm 85$ cal. yr BP로 나타났다. Unit 3의 경우 유기물 추출과정에서 유기물을 확보하지 못해 연대분석결과를 얻을 수 없었다. 최하부는 두 개의 연대를 얻었는데, $25,505 \pm 425$ cal. yr BP와 $27,240 \pm 530$ cal. yr BP로 나타났다. 이러한 방사성 탄소의 연대는 층서적으로도 안정적이어서 퇴적층의 퇴적연대로 활용하기에 적합한 것으로 판단되었다. 다만 추가적으로 OSL 분석을 통해 연대분석결과를 교차 검토하고자 3개의 OSL 연대 분석용 시료를 추가로 채취하였다.
- OSL 연대 분석용 시료의 분석결과 상부 Unit 2에서의 OSL 연대는 13.2 ± 1.0 ka 이며, Unit 3에서의 연대는 15.4 ± 1.1 ka, 그리고 가장 하부의 OSL 분석연대는 14.3 ± 1.3 ka로 분석되었다. 이러한 연대범위는 오차 범위 내에서는 일정시기에 중첩되는 것으로 보이는데, 기존의 방사성탄소연대 분석결과와 약 10,000년 정도의 차이가 발생하는데 이러한 원인에 대해서는 추가적인 연구와 검토가 필요하다.



<그림 57> 교래리(교래교)퇴적층 A 단면 2차 예비 조사 탄소연대분석결과

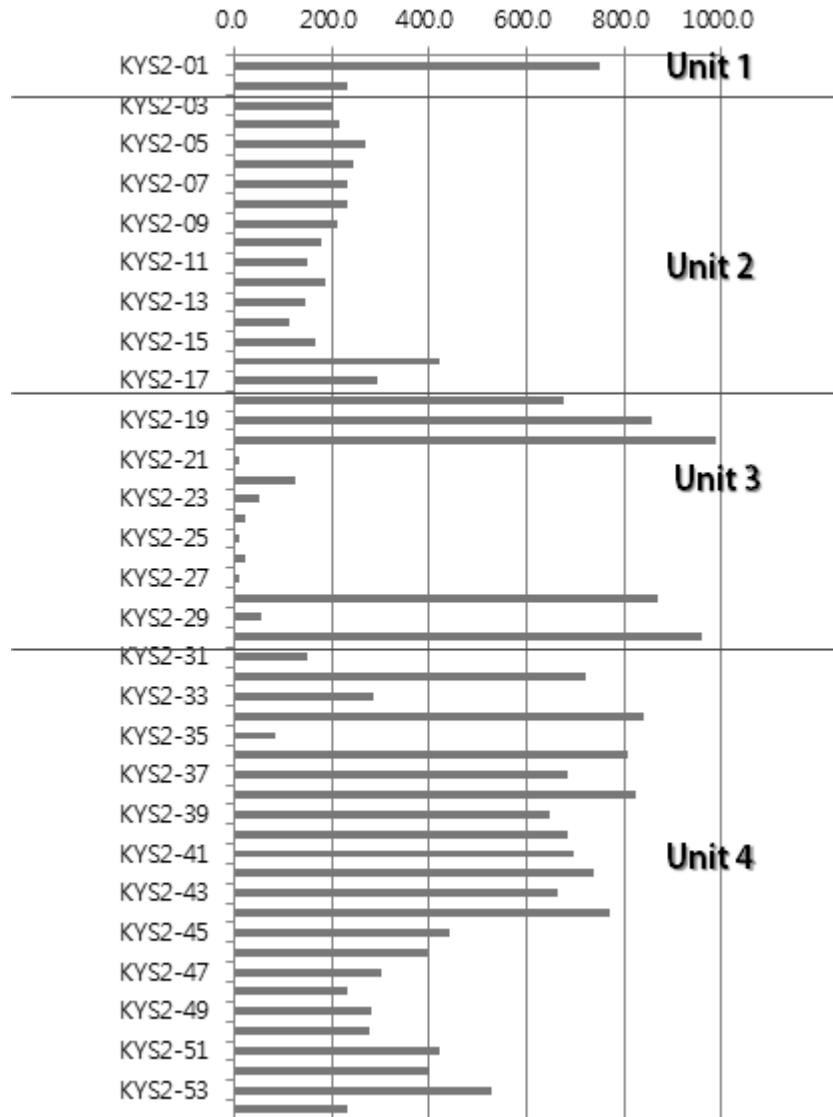
- 3차 야외조사에서는 고환경 분석을 위한 큐빅시료를 채취하였는데, 조사단면 A에서 등간격으로 시료 채취를 시도하였으나, 노두에 포함된 자갈층 등의 분포에 따라 부분적으로 위치를 옮겨 총 54개의 부시료를 채취하였다. Unit 1에는 1번과 2번시료가, Unit 2에는 3번부터 17번까지의 시료가, Unit 3에는 18번부터 30번까지의 시료가 Unit 4에는 31번부터 54번까지의 부시료가 해당된다. 채취된 부시료에서 입도분석과 대자율 측정, 탄소안정동위원소 분석 등을 수행하였다.



<그림 58> 교래리(교래교)퇴적층 A 단면 큐빅시료 채취 현황

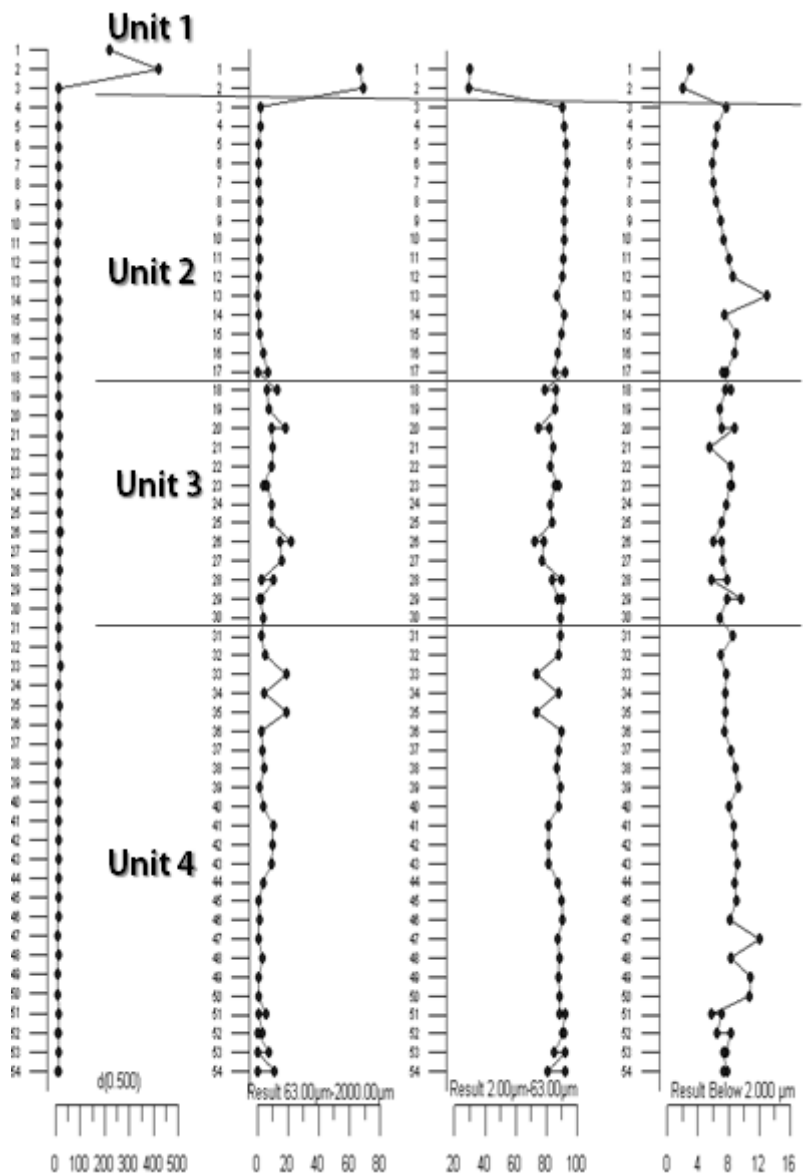
- 교래리(교래교) 퇴적층의 대자율 분석결과는 야외에서 구분된 암상을 기준으로 볼 때, Unit 1은 별도의 퇴적층으로 상부가 높은 대자율을 보였으며, Unit 2의 경우 하부는 높으나 상부로 갈수록 대자율 값이 낮아지는 경향을 보인다. 다만 Unit 3의 경우 중간부분에서 대자율 값이 거의 나타나지 않는데, 화산재와 같은 일차적 화산쇄설물로 추정된다. 하부의 Unit 4는 대자율 값이 상대적으로 높게 나타나 기존의 퇴적층이 풍화기간을 거친 것으로 판단된다.
- 교래리(교래교) 퇴적층의 입도분석결과는 시료 채취과정에서 하부의 거력 및 자갈을 제외한 기질 물질을 대상으로한 결과이다. 때문에 전반적인 단면 A의 입도는 하부의 거력을 포함한 자갈층에서 상부로 갈수록 세립화 되는 경향을 가지고 있다. Unit 1은 기질물질 자체가 매우 조립질로 나타났으며, 2 mm크기의 평균입자 크기를 보인다. Unit 4와 Unit 3은 기질 물질의 변화가 많은 지역으로 Unit 4의 경우 하부에서 점토크기의 입자가 증가하다가 Unit 4 상부에서 모래 크기의 입자가 부분적으로 유입된 것으로 관찰된다. 다만 Unit 3에서 나타나는 실트와 모래, 점토의 크기변화는 평균입자의 크기가 비록 일정하다 하더라도 수직적으로는 다양한

크기의 입자가 퇴적되었음을 알 수 있다.



<그림 59> 교래리(교래교)퇴적층 A 단면 대자율 측정결과

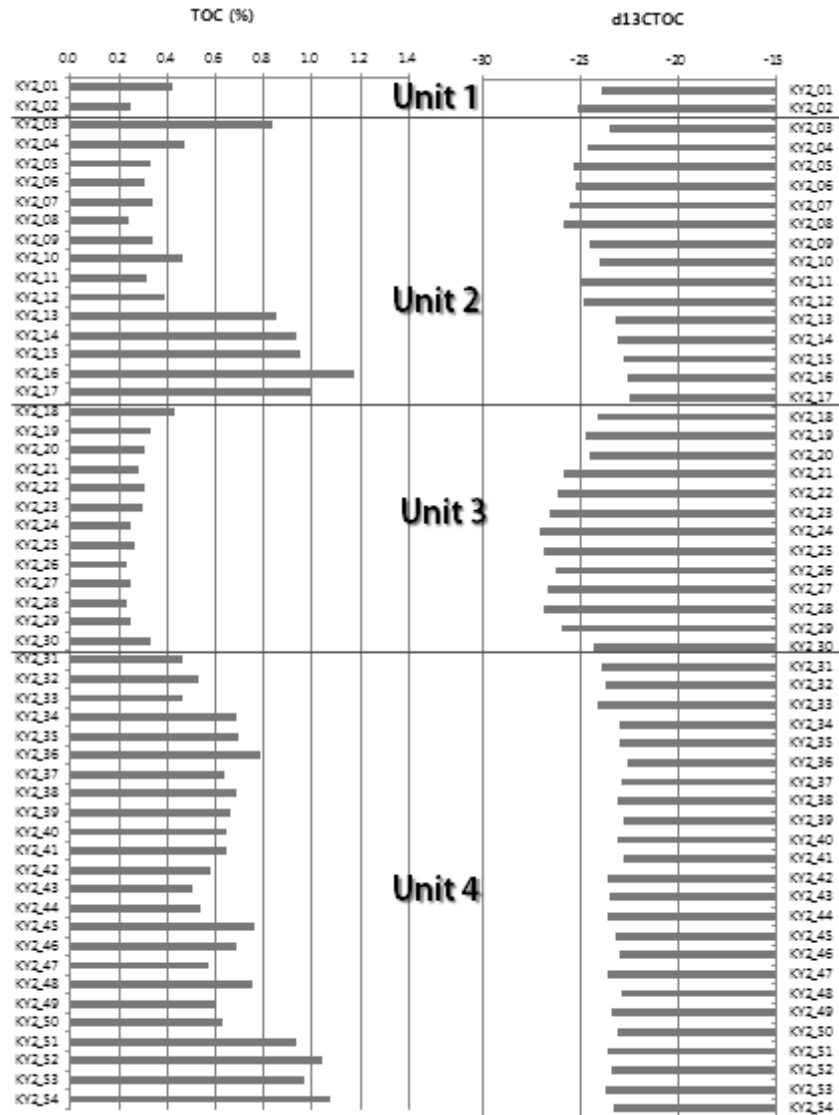
- 교래리(교래교) 퇴적층 단면 A의 특징은 Unit 3의 층의 변화인데, 대자율 값이 극히 낮게 나타나고 입도의 변화가 많으며, 유기물이 적어 초기에 연대분석이 안되는 점들을 고려할 때 Unit 3의 퇴적층이 화산기원 쇄설물로 급격히 퇴적된 것으로 해석될 수 있다. 다만 유층 유기탄소의 양이 적다 하더라도, 탄소안정동위원소의 비율이 변화하는 점은 유입되는 유기물의 기원에 변화가 있음을 의미한다는 점에서 단순히 화산기원 쇄설물질의 일차적 퇴적상으로 해석하기에는 무리가 있다.



<그림 60> 교래리(교래교)퇴적층 A 단면 입도분석결과

- 교래리(교래교) 퇴적층의 단면에서 나타나는 총유기탄소의 비율은 전반적으로 2%가 넘지 않는 매우 적은 유기물 함량을 보인다. 특히 Unit 3의 경우 유기물의 함량%가 0.2%로 매우 낮은 수치를 보인다. 가장 높은 유기물 함량을 보이는 구간은 Unit 4 구간과 Unit 2 구간이다. Unit 4 구간에서는 하부가 높고 상부로 갈수록 유기물의 함량이 적어지는 특징을 보이는데, 이에 비해 탄소안정동위원소의 비율은 비교적 일정하게 나타난다.
- Unit 2의 구간은 하부가 유기물의 함량이 높고 탄소동위원소의 비율이 변화하는

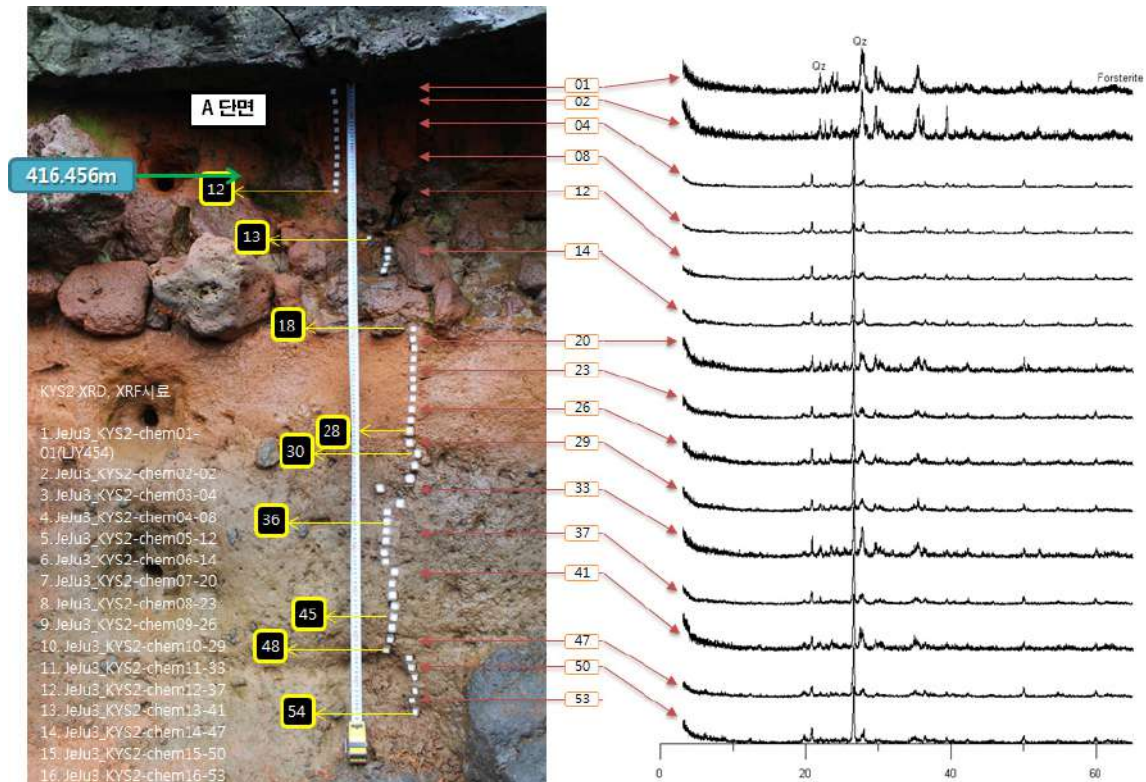
점등을 비추어 하천 등의 퇴적환경에 대한 추론의 여지가 있다.



<그림 61> 교래리(교래교)퇴적층 A 단면 총유기탄소 및 탄소안정동위원소 분석결과

- 교래리(교래교) 퇴적층 A 단면의 XRD 분석결과에서는 상부의 조립질 모래층(Unit 1)의 물질이 비정질 물질임을 보여주며, Unit 2의 경우 석영 광물이 명확하게 검출된다. Unit 3의 경우 광물의 종류가 다양하게 나타나지만 비정질 광물이 많이 포함된 것을 알 수 있다.
- 교래리(교래교) 퇴적층 단면 A의 Unit 4와 유사한 퇴적상을 보이는 B 단면에서는

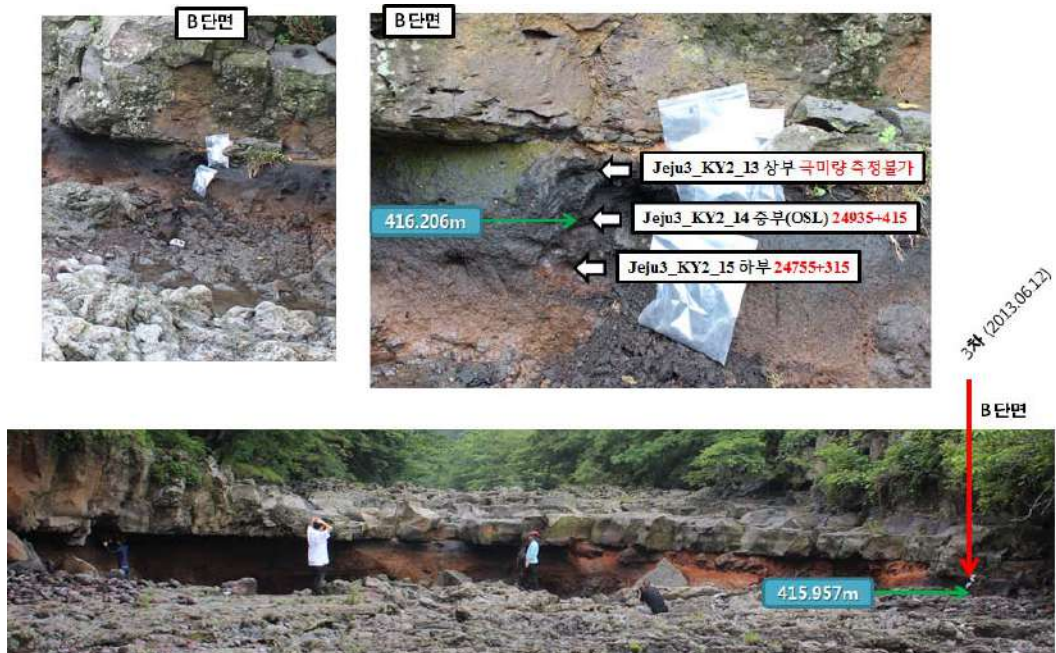
3개의 토양시료가 방사성탄소연대분석을 위하여 채취되었다. 채취된 시료의 가장 상부에 위치한 지점은 유기물이 극미량으로 분석에 적합하지 않은 것으로 나타났고, 중간 지점에서는 $24,935 \pm 415$ cal. yr BP의 연대가 확인되었고, 그 하부의 토양시료에서도 $24,755 \pm 755$ cal. yr BP의 연대가 확인되었다.



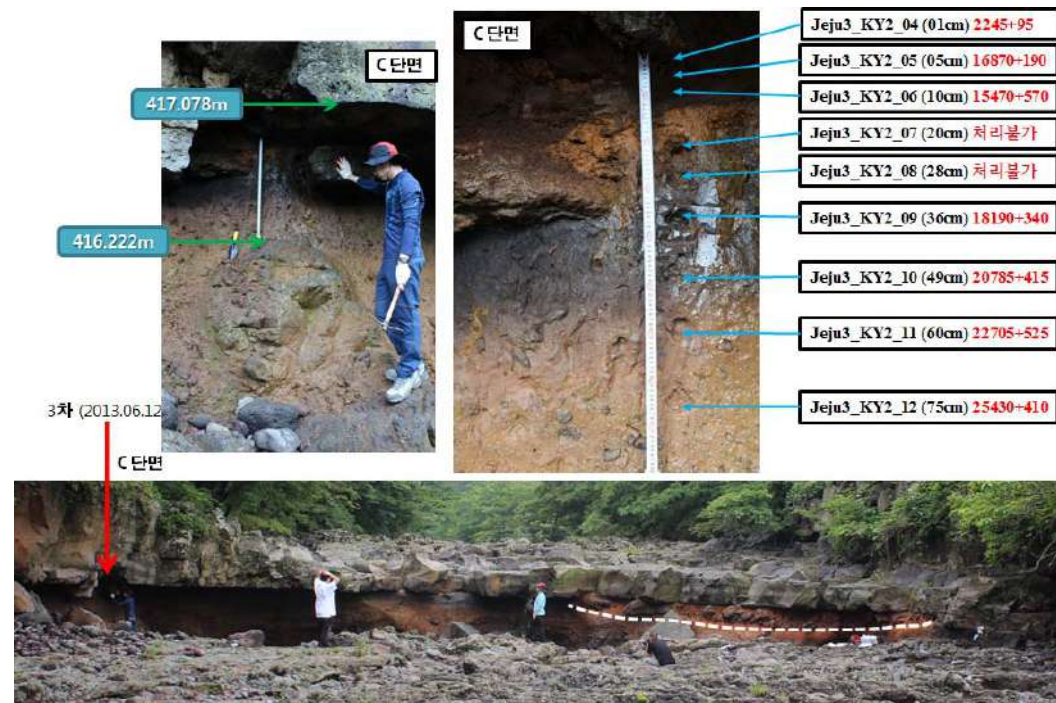
<그림 62> 교래리(교래교)퇴적층 A 단면 XRF 분석결과

－ 교래리(교래교) 퇴적층 단면 C에서는 단면 A와 같은 Unit 2가 유기물이 적은 황색층이 나타나고, Unit 1, Unit 2, Unit 3, 그리고 Unit 4의 층서배열로 나타난다. 다만 Unit 3에 해당되는 층의 상부에서는 연장성이 확인되는 유기물의 영향으로 추정되는 암회색 층이 발달한다. C 단면에서는 교래리 A 단면과 B 단면과의 층서적 연관성을 파악하기 위하여 약 10 cm 간격으로 12개의 토양시료를 방사성탄소 연대분석용으로 채취하였다. 그 결과 가장 상부의 조립질 모래층(Unit 1)에서는 2245 ± 95 cal. yr BP의 연대와 $16,870 \pm 190$ cal. yr BP, $15,470 \pm 570$ cal. yr BP의 연대가 확인되었으며, Unit 2에 해당되는 구간에서는 2개의 토양시료 모두에서 연대분석결과를 얻지 못하였다. Unit 3의 하부 경계면에서 확인되는 상부에서 하부로 가면서 18190 ± 755 cal. yr BP, $20,785 \pm 415$ cal. yr BP, $22,705 \pm 525$ cal. yr BP, $25,430 \pm 410$ cal. yr BP의 연대가 확인된다. 방사성탄소연대 결과값은 하부로부터 상부에 이르기까지 최상부 Unit 1을 제외하면 순차적으로 퇴적된 퇴적물

임을 의미한다.



<그림 63> 교래리(교래교)퇴적층 B 단면 탄소연대분석용 시료채취 현황

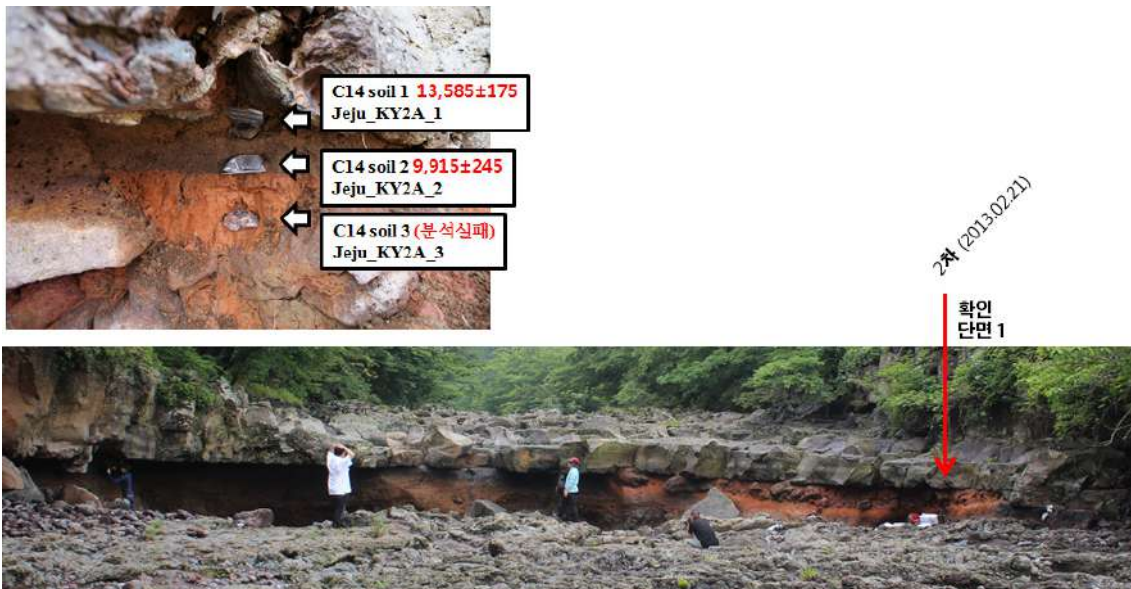


<그림 64> 교래리(교래교)퇴적층 C 단면 탄소연대분석용 시료채취 현황

- 따라서 단면 A와 단면 B 그리고 단면 C의 연대는 25,000년에서 15,000년 까지의

기간 동안에 현재의 퇴적층이 형성되었음을 의미한다. 가장 상부 Unit 1의 경우 모든 지점에서 하부와 상부의 연대가 역전되는 것으로 나타난다. 이러한 경우는 상부의 오래된 퇴적물이 침식되어 재동되면서 젊은 퇴적물이 먼저 쌓이고 침식이 진행됨에 따라 오래된 퇴적물이 상부에 쌓였을 가능성이 있음을 의미한다.

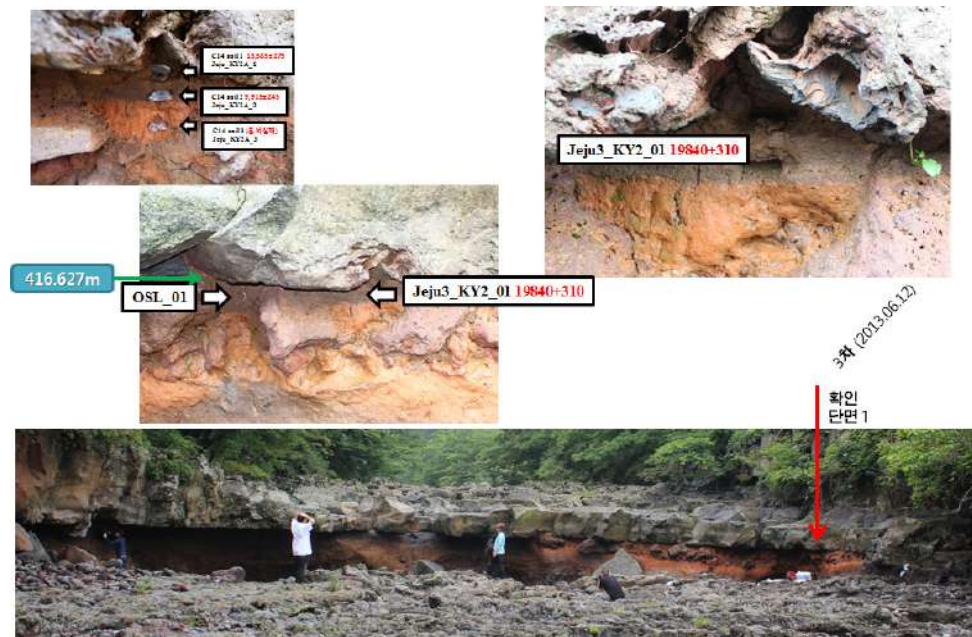
- 또하나의 가설은 상부 Unit 1의 경우 상부 현무암의 균열과 지하수의 이동에 따른 영향으로 유입된 유기물에 의해 영향을 받았을 가능성이다. 이 경우 상부 Unit의 연대는 신뢰도가 낮아 실제 퇴적층의 연대를 지시한다고 보기 어려워진다. 다만 Unit 2에서 나타나는 연대의 범위와 퇴적층이 역전되지 않은 결과를 보여주는 점에서 퇴적층의 연대를 25,000년에서 15,000년까지의 기간에 형성된 것으로 보는 것이 타당할 것으로 판단된다.



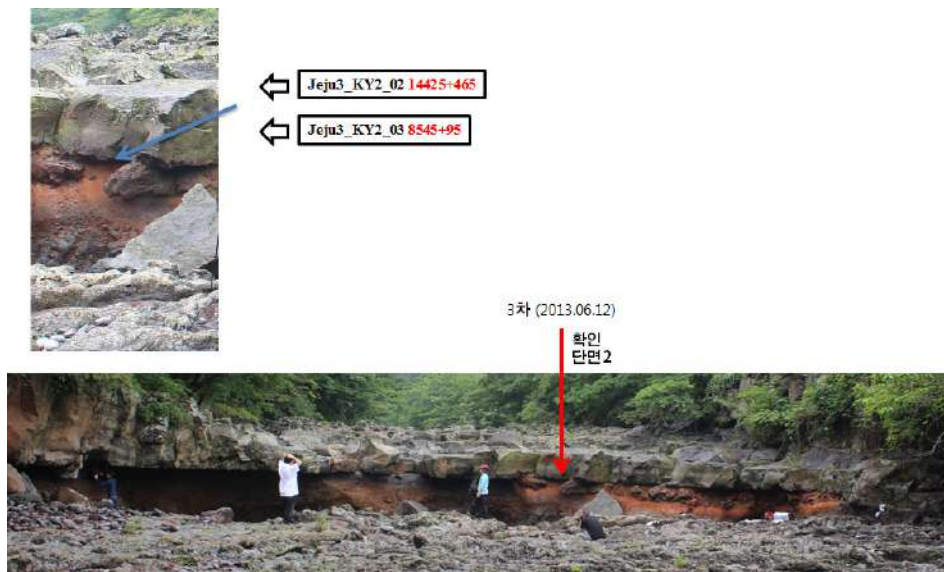
<그림 65> 교래리(교래교)퇴적층 연대분석 검토용 확인 단면1의 탄소연대분석결과

- Unit 1은 교래리(교래교) 퇴적층에서 전체적으로 연장이 확인되는 층으로서 상부 조립질 퇴적층의 연대를 교차 검토하기 위하여 추가적으로 토양시료를 채취하여 분석하였다. 확인단면 1에서 분석된 연대는 13,585±175 cal. yr BP, 9,915±245 cal. yr BP 그리고 19,480±310 cal. yr BP으로 Unit 1 상부에서 오래된 연대가 젊은 연대 상부에서 확인된다. 또한 확인단면 2에서도 14425±465 cal. yr BP의 연대가 상부에 나타나고, 그 하부에서 8,545±95 cal. yr BP의 연대가 확인된다. 따라서 Unit 1의 퇴적물은 화산쇄설성으로 퇴적된 것이 아니라 퇴적물의 기원물질이 오래된 것들이 먼저 쌓이고 침식이 진행된 이후에 젊은 연대를 갖는 퇴적물질이 공급되어 형성되었을 가능성이 더 높다. 다만 주변의 화산활동으로 기존의 지표면에 남아있는 퇴적물을 함께 분출하는 경우에도 퇴적층이 역전되어 나타날 가능

성이 있기 때문에 보다 심도 있는 논의가 필요할 것으로 판단된다.



<그림 66> 교래리(교래교)퇴적층 Unit 1에서의 연대분석 검토결과



<그림 67> 교래리(교래교)퇴적층 연대분석 검토용 확인 단면2 지점의 탄소연대분석결과

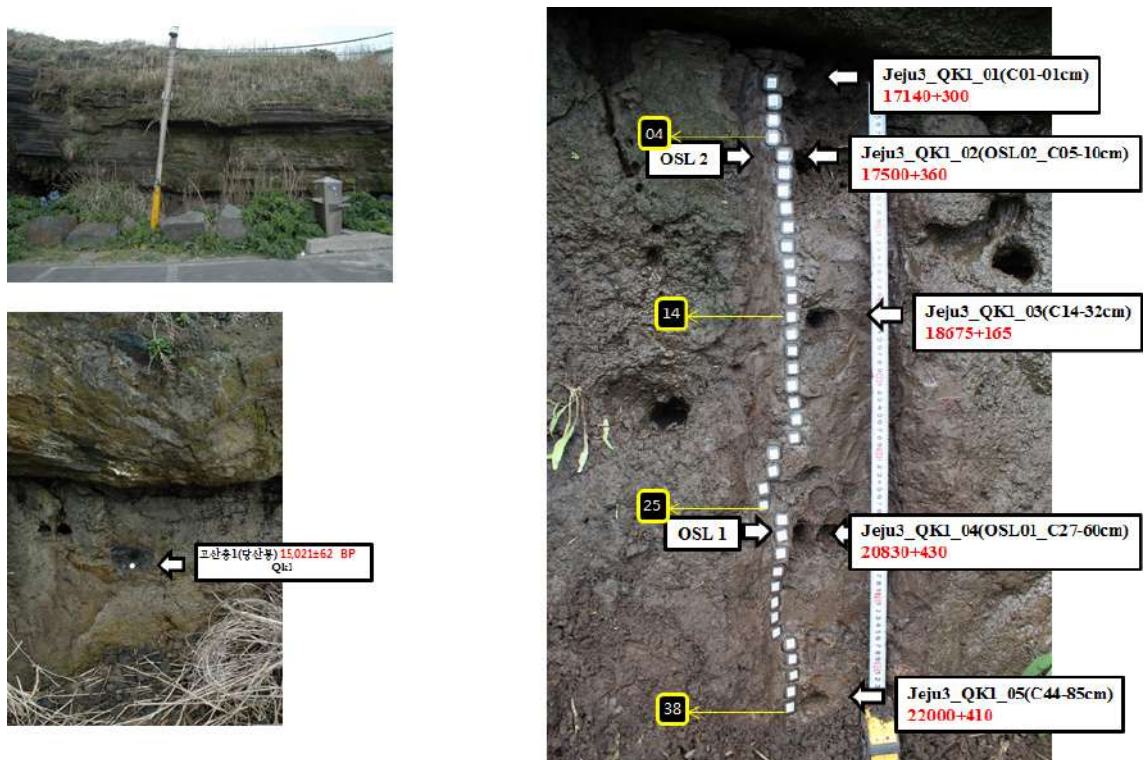
4. 고산층 및 수월봉 퇴적층

○ 퇴적환경



<그림 68> 당산봉 응회암층 인접지역에서 관찰되는 고산층 전경

- 제주도 고산리 일대에 분포하는 것으로 알려진 고산층은 당산봉 일대에서 수월봉 일대에 이르기 까지 비교적 넓은 지역에 퇴적층으로 분포한다. 특히 기존에 알려진 고산층의 연대는 약 23,000년으로 점토층에서 OSL 연대측정 방법으로 제시된 연대이다. 그러나 본 연구에서 사전 검토 단계로 채취한 토양시료에서 방사성 탄소동위원소의 연대는 $15,021 \pm 62$ cal. yr BP로 나타나 결과에 대한 검토와 추가적인 분석이 필요하였다. 따라서 당산봉 하부에 위치한 고산층의 퇴적층을 대상으로 추가적인 토양연대분석시료와 환경분석을 위한 큐빅시료를 채취하였다.
- 당산봉 응회암층 하부의 고산층에서 노출된 단면의 최상부의 침식된 부분을 제외하고 총 38개의 큐빅시료를 채취하였으며, 5개의 토양시료를 방사성탄소연대 분석용 시료로 채취하였다. 분석결과 당산봉 응회암 하부의 고산층에서의 연대는 상부로부터 $17,140 \pm 300$ cal. yr BP, $17,500 \pm 360$ cal. yr BP, $18,675 \pm 165$ cal. yr BP, $20,830 \pm 430$ cal. yr BP, $22,000 \pm 400$ cal. yr BP으로 하부에서 상부로 갈수록 최근의 연대로 순차적으로 퇴적된 퇴적층임을 확인하였다.



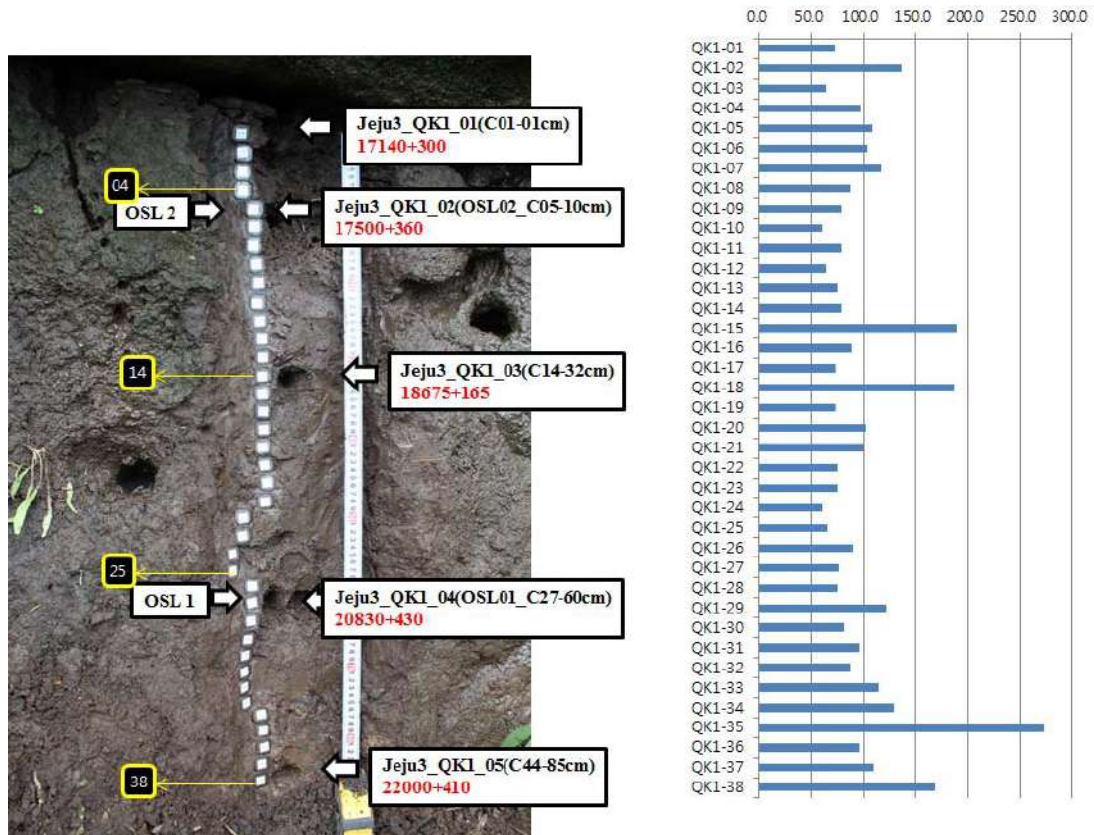
<그림 69> 당산봉 응회암층 하부의 고산층에 대한 연대시료 분석결과



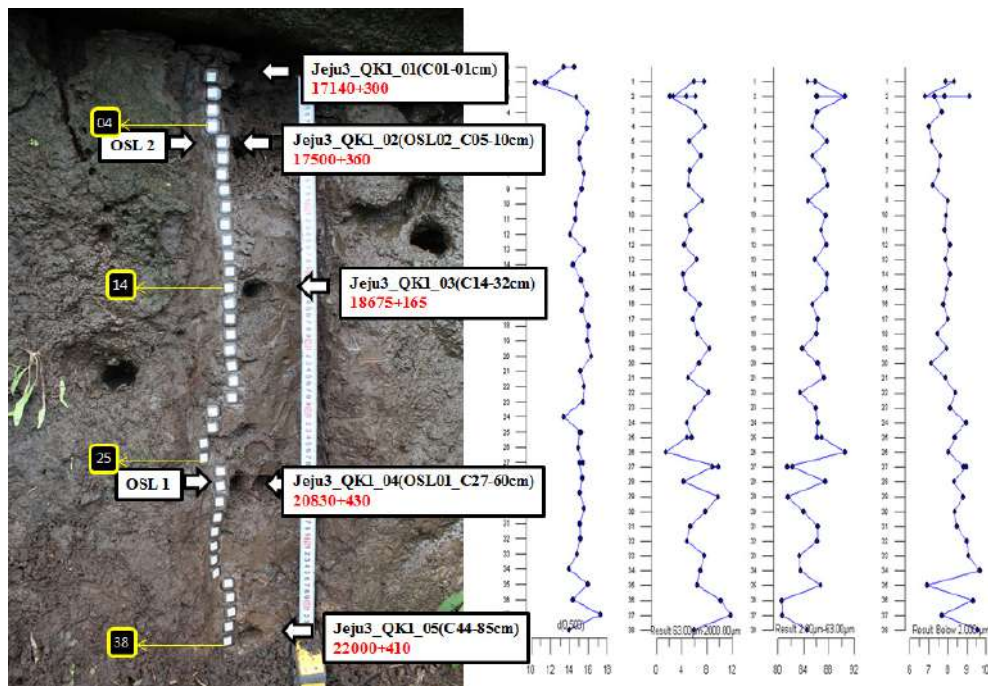
<그림 70> 당산봉 응회암층 하부의 고산층에서 채취된 큐빅시료 현황

- 당산봉 응회암층 하부에 위치한 고산층은 입도와 대자율의 변화가 부분적으로 피크가 확인되나 대체적으로 안정된 환경에서 퇴적된 퇴적층으로 해석된다. 또한 총 유기탄소(%)의 경우에 상부로 갈수록 점차 유기물 함량이 높아지는 점과, 탄소안정 동위원소의 비율이 변화하는 점을 고려하면 안정된 환경에서 기후 환경의 변화에 따라 유입되는 퇴적물의 기원물질에 변화가 있었음을 알 수 있다. 특히 피크가 확인되는 지점의 연대는 퇴적층의 퇴적당시의 기후 환경과 관련되었을 가능성이 있

는 시기이기 때문에 추가적인 논의가 필요하다.



<그림 71> 당산봉 응회암층 하부 고산층의 대자율 분석결과



<그림 72> 당산봉 응회암층 하부 고산층의 입도 분석결과



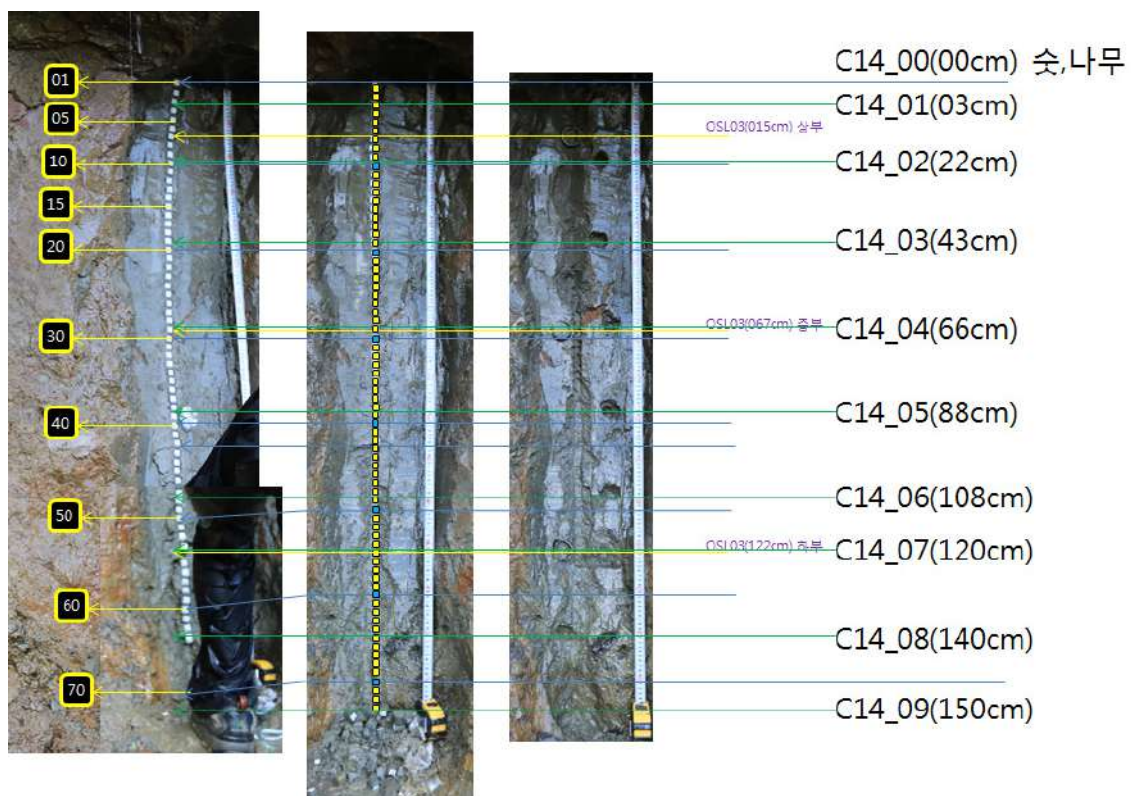
<그림 73> 당산봉 응회암층 하부 고산층의 유기탄소동위원소 분석결과

- 당산봉 응회암층 하부에 나타나는 고산층의 퇴적시기는 상부 침식면을 제외하면 22,000년부터 17140년 사이에 퇴적된 것으로 해석된다.



<그림 74> 수월봉 응회암층 하부의 고산층 분포 현황

- 수월봉 하부에서 확인되는 고산층은 당산봉 하부에서 확인되는 고산층의 교차검증 목적에서 연대분석시료의 채취와 큐빅시료의 채취가 진행되었다. 수월봉 하부의 고산층은 현재도 계 등의 해양생물이 퇴적층 내에 서식하고 있어 현생 생물에 의한 교란 가능성을 배제하기 위하여 가능한 표면을 많이 제거하였다.
- 수월봉 하부의 고산층은 표면제거 이전에는 황갈색을 띄다가 표면을 제거한 후 짙은 청회색으로 나타났다. 이 퇴적층에서 고환경 분석을 위한 큐빅시료와 OSL 연대 분석용 시료, 탄소연대 분석용 시료를 채취하였다. 이 과정에서 응회암층과 고산층 최상부의 접합부분에서 다량의 식물편이 채취되었다.
- 수월봉 하부의 고산층은 해발 고도 5.6 m 에서 7.2 m 사이에 위치하며, 큐빅시료는 72개가 채취되었다. 또한 방사성탄소연대분석을 위하여 5개 이상의 식물편을 채취하였고, 약 10 cm 간격으로 9개의 토양시료를 채취하였다. OSL을 이용한 연대분석을 위하여 추가적으로 3개의 토양시료를 채취하였다.

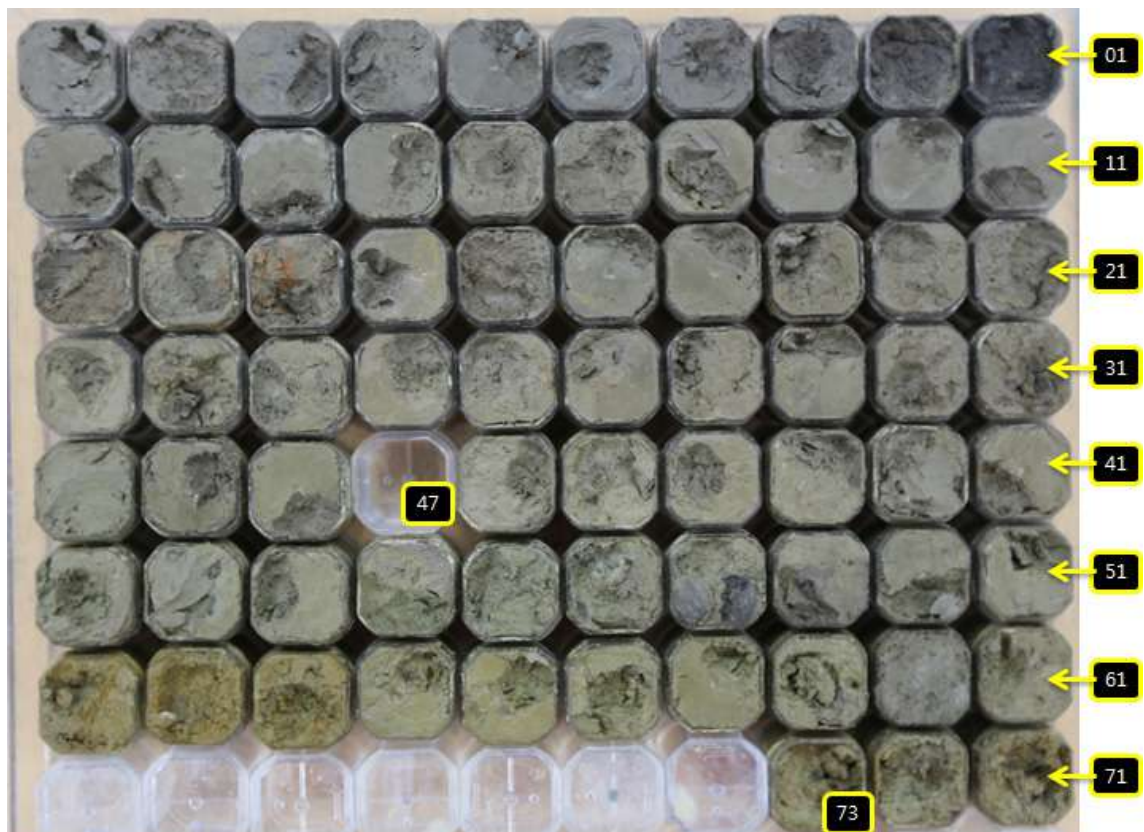


<그림 75> 수월봉 응회암층 하부의 고산층에서 채취된 시료 현황

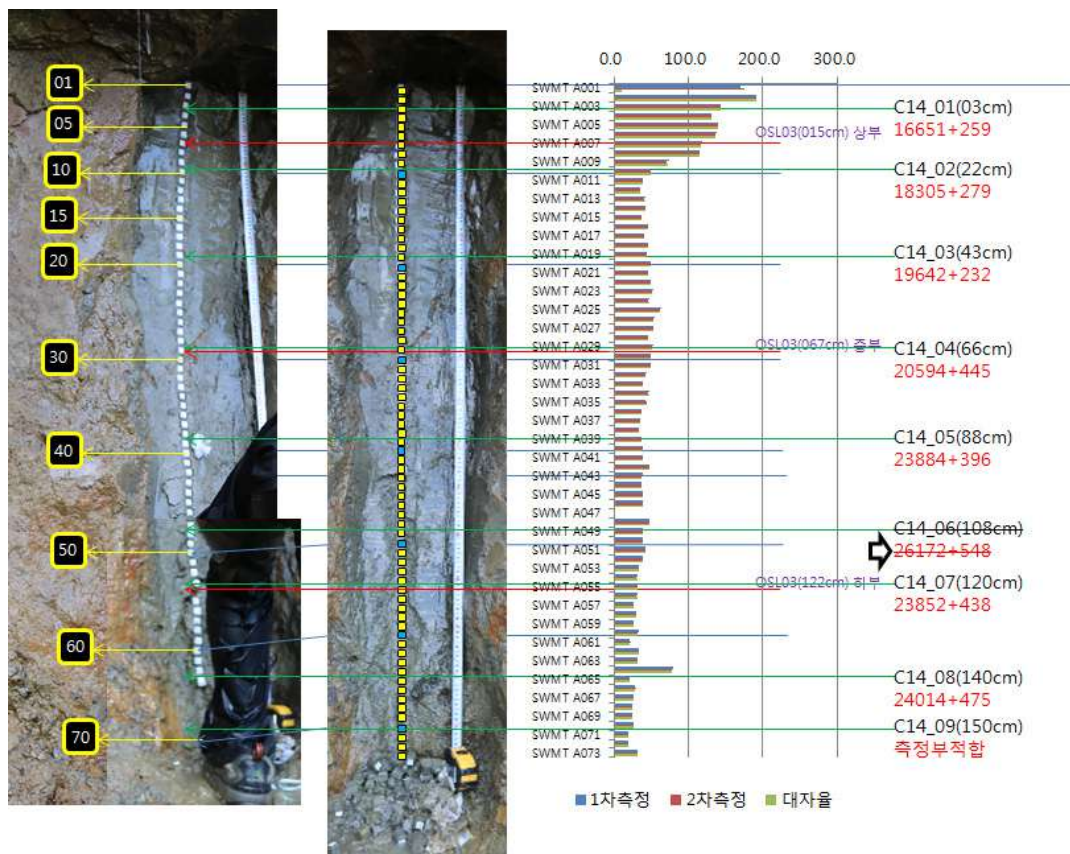
- 채취된 식물편 시료 5점의 연대는 $15,632 \pm 574$ cal. yr BP, $15,876 \pm 624$ cal. yr BP, $16,023 \pm 626$ cal. yr BP, $16,075 \pm 629$ cal. yr BP, $16,064 \pm 617$ cal. yr BP로 나타났으며, 이들 연대는 단순 평균으로 15,934년 약 16,000년에 해당된다. 이

연대자료는 방사성탄소연대로서 오염의 가능성이 매우 적고, 신뢰도가 높은 결과로서 상부 수월봉 응회암의 시기를 추정하는데 가장 중요한 결과라 하겠다. 특히 이 식물편이 확인된 지점의 토양에서의 연대 또한 $16,651 \pm 259$ cal. yr BP로서 결과의 신뢰도를 높여준다.

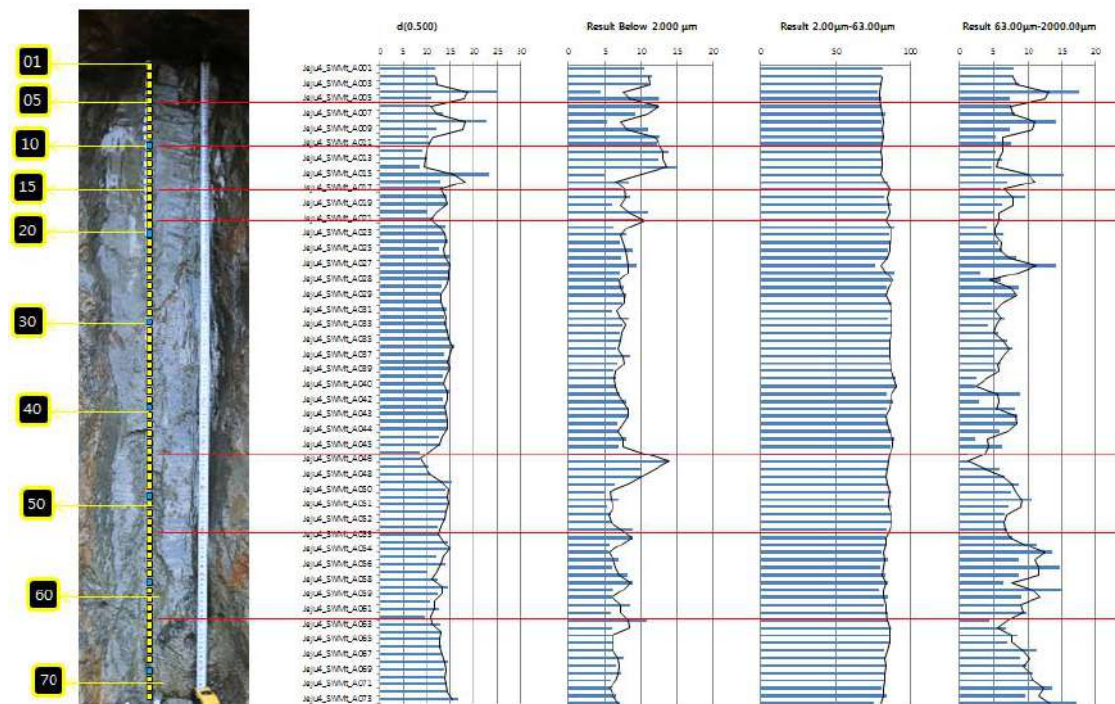
- 방사성 탄소연대분석결과 토양시료에서 확인되는 연대는 상부에서 하부로 가면서 각각 16651 ± 259 cal. yr BP, 18305 ± 279 cal. yr BP, 19642 ± 232 cal. yr BP, 20594 ± 445 cal. yr BP, 23884 ± 396 cal. yr BP, 26172 ± 548 cal. yr BP, 23852 ± 438 cal. yr BP, 24014 ± 475 cal. yr BP로 분석되었다. 약 1 m 깊이의 6번째 시료에서 26,000년의 시료 분석결과가 역전되는 것으로 나타난 것을 제외하면 나머지 연대분석결과는 신뢰할 만한 결과를 제시하고 있다. 또한 제일 하부 1.5 m 심도에서 채취된 시료는 분석결과를 얻지 못했다.
- 이러한 방사성 탄소연대분석 결과를 토대로 볼 때 수월봉하부의 고산층의 형성시기는 24,000년부터 16,000년 사이로 볼 수 있으며, 이 결과는 당산봉 응회암층 하부에서 확인된 시기와의 일치한다.



<그림 76> 수월봉 응회암층 하부의 고산층에서 채취된 큐빅시료 현황



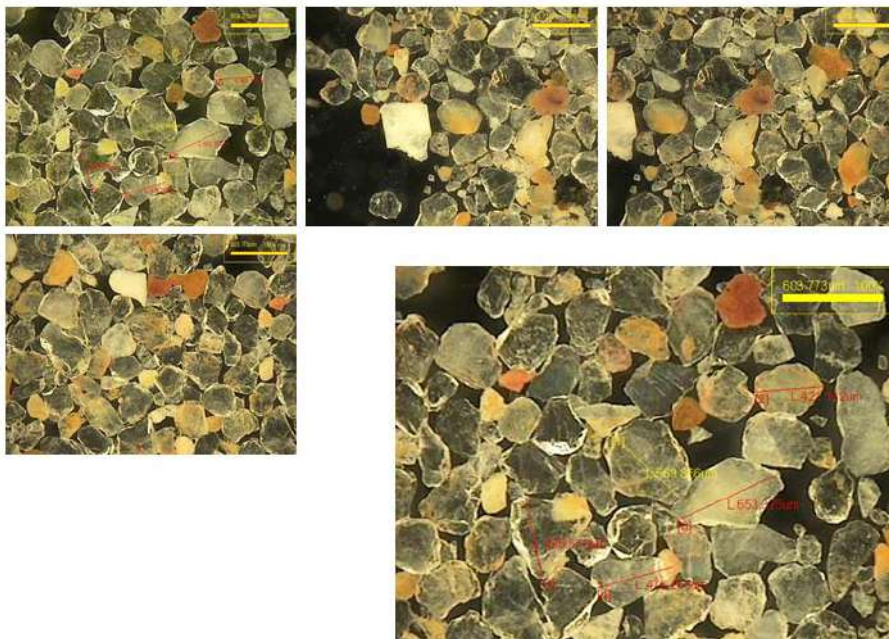
<그림 77> 수월봉 응회암층 하부의 고산층의 대자율 분석결과



<그림 78> 수월봉 응회암층 하부의 고산층의 입도분석결과

- 수월봉 응회암층 하부의 대자율 측정결과는 상부의 18000년부터 16000년 사이에 대자율이 급격히 증가하는 경향을 보인다. 특히 퇴적층 하부에서 상부로 갈수록 점차 높아지는 경향을 보이는데, 안정적인 환경이 유지되면서 형성된 퇴적층으로 해석된다.
- 입도의 변화 또한 평균입도 상에서는 커다란 변화가 보이지 않는데, 부분적으로는 실트질 또는 모래질 입자의 함량이 변화하는 것으로 나타나 환경적인 변화의 기록을 가지고 있는 것으로 보인다. 다만 점토 크기의 입자는 다양한 변화를 보이는데, 기후 환경에 대한 변화기록을 반영하는 것으로 판단된다.
- 수월봉 응회암층의 하부에서 분석된 OSL 연대는 퇴적층에 포함된 석영입자를 분석하여 얻게 되는데, 수월봉 응회암층에서는 다양한 크기의 석영입자가 관찰된다. 특히 1 mm 이상의 조립질 입자의 대다수는 석영입자로 판단된다.

Micro SEM 관찰결과 (2013.08.09) 100x

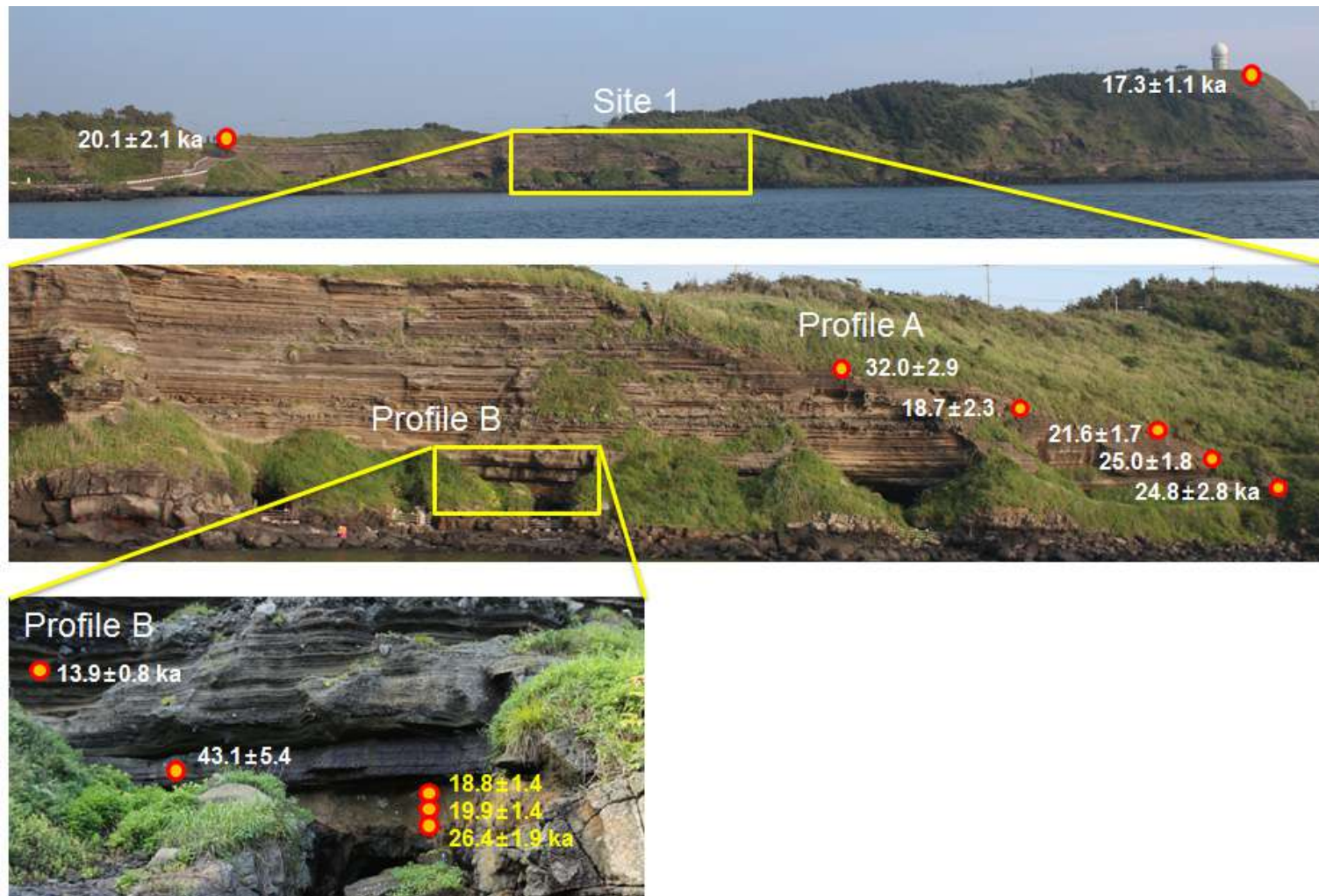


<그림 79> 수월봉 응회암층 하부의 고산층에 포함된 석영의 실체현미경 관찰결과

- 수월봉 응회암층의 분출시기에 대해서는 본 연구의 결과가 기존의 연구결과와 다른 결과를 도출하였다. 특히 지금까지 알려진 OSL 연대인 23,000년 보다 더 최근의 시기에 분출이 있었음을 확인하였다. 이는 탄소연대분석 대상인 식물편의 연대

가 분출시기의 하한을 제시하고 있으며, 추가로 분석된 OSL 결과에서 수월봉 응회암층의 분출시기를 새로이 제시하였다.

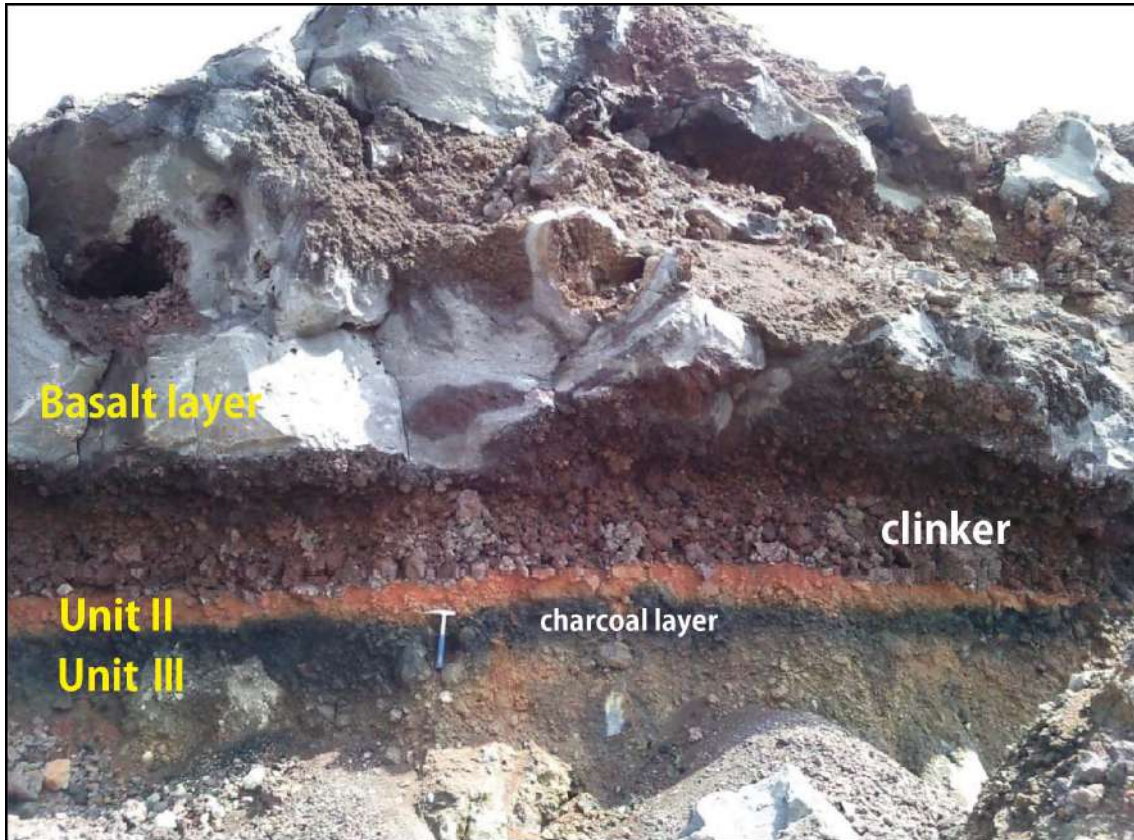
- 수월봉 응회암층 하부의 고산층에서 분석된 OSL의 연대는 26.4 ± 1.9 ka에서 18.8 ± 1.4 ka의 연대범위에 속하는데, 이 결과와 방사성탄소연대 분석결과는 일치하는 결과를 보인다.
- 새로이 수월봉 응회암층에서 분석된 OSL 결과는 수월봉 응회암이 단일 시기에 분출하여 형성된 퇴적층으로 정의할 때, 수월봉 최상부 전망대 일대에서 17.3 ± 1.1 ka 시기와, 수월봉 주차장 주변에서 채취된 시료를 분석한 결과인 20.1 ± 2.1 ka, 그리고 고산층 상부 B 단면에서 분석된 13.9 ± 0.8 ka, 43.1 ± 5.4 ka 등의 연대가 각각 다른 결과를 제시한다. 특히 단면 A에서 순차적으로 분석된 OSL 연대측정 결과는 하부로부터 상부로 가면서, 24.8 ± 2.8 ka, 25.0 ± 1.8 , 21.6 ± 1.7 , 18.7 ± 2.3 , 32 ± 2.9 로 연대가 나타난다. 즉 OSL 연대분석을 통해 얻어진 결과는 수월봉 응회암 분출 시기에 부분적으로 열적 변화를 받거나 빛에 노출이 부분적으로 이루어져 블리칭이 완전히 이루어지지 않아 이러한 결과를 제시하는 것으로 판단된다. 블리칭이 부분적으로 진행되면 과거의 오랜 연대를 포함하는 결과를 제시하기 때문에, 가장 이른 시기를 제시하는 결과가 가장 완벽히 블리칭 되었다고 하겠다.
- 따라서 수월봉 응회암층의 분출시기는 현재 도출된 OSL 분석결과 가운데 가장 최근의 시기를 지시하는 13.9 ± 0.8 ka의 연대보다 더 이후의 시기로 보는 것이 가장 합리적인 판단이라 하겠다.



<그림 80> 수월봉 응회암층과 고산층의 OSL 시료채취 위치 및 연대분석결과

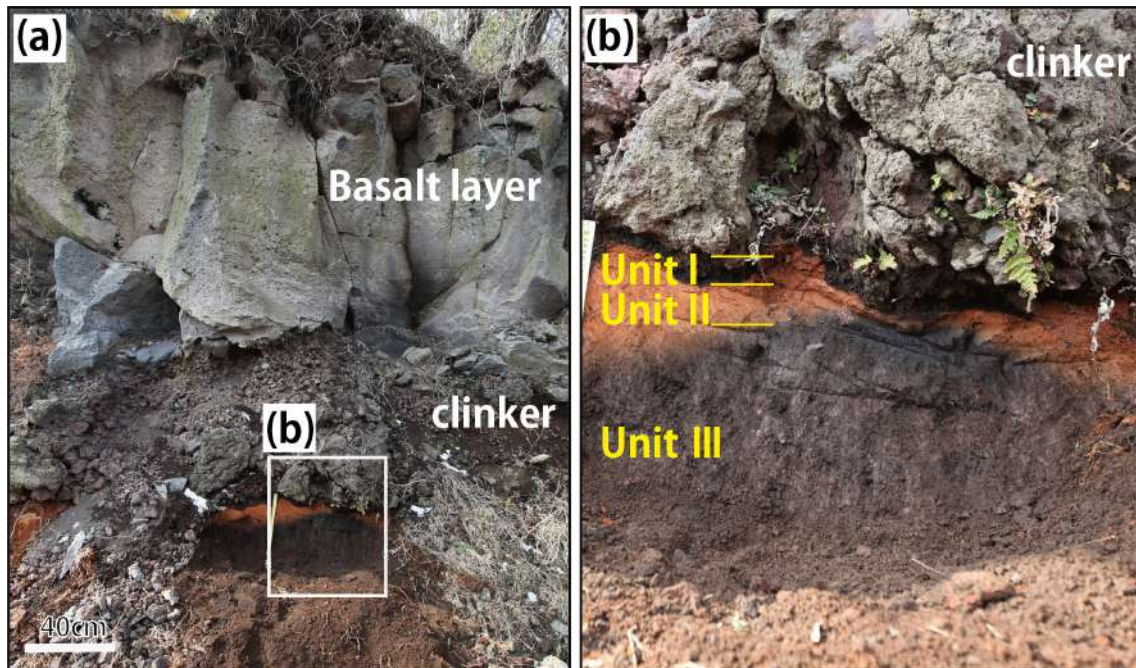
5. 상창리 퇴적층

○ 퇴적환경



<그림 81> 상창리 퇴적층 조사지점 1에서의 시료채취 위치 및 퇴적상

- 상창리 미고화 퇴적층의 상부에 위치한 현무암은 약 5~8 m 두께의 용암판과 하부 약 1~2 m 두께의 클링커로 구성된다. 부분적으로는 용암판과 클링커가 혼재되는 형태로 산출된다. 현무암 하부에는 두께가 일정하지 않은 1~2 m 두께의 미고화 퇴적층이 발달하며 퇴적층 하부에 하부 현무암이 분포한다. 조사 1 단면의 퇴적층은 30~50 cm 두께의 자갈층으로 클링커 하부에 적색을 띄는 5cm 이하의 자갈을 포함하는 사질의 적색층(unit II)이 분포하고, 그 하부에 토양색이 다른 흑색 또는 회색층(III)이 분포한다. 특히 조사 1 단면에서 상부 현무암 하부의 클링커와 접하는 퇴적층에서 직경 1~2 cm 크기(최대 10cm 길이)의 탄화목편이 다량 산출된다.

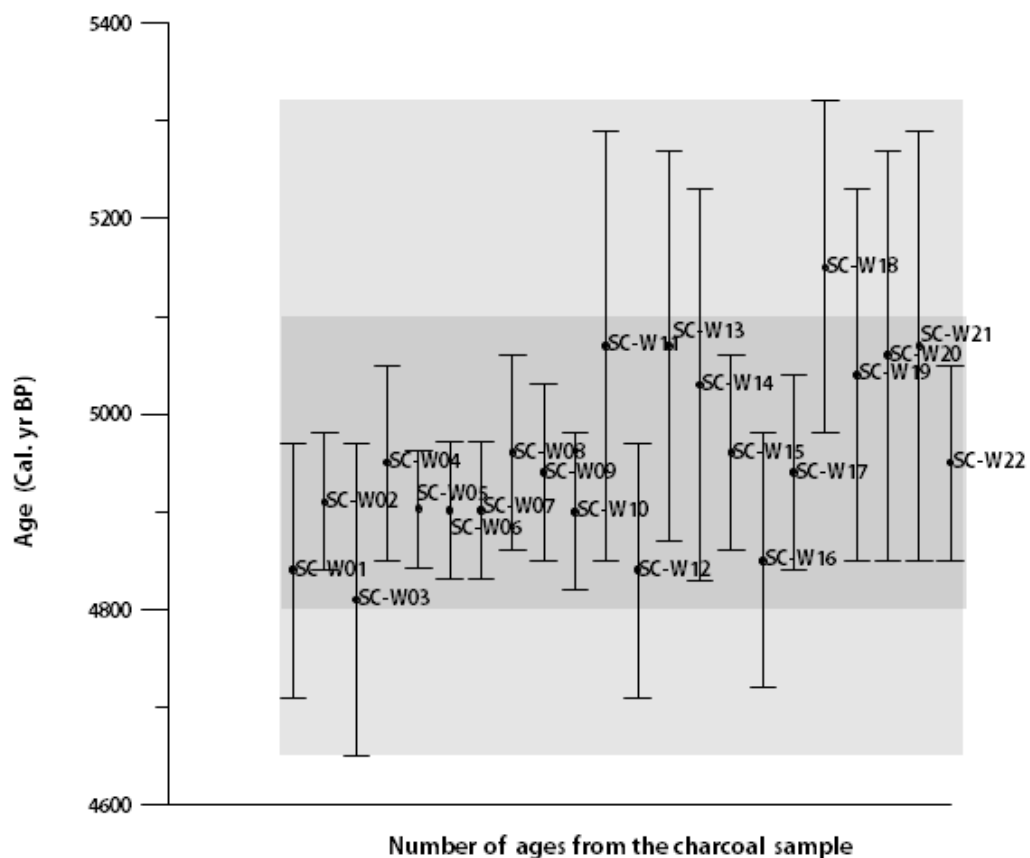


<그림 82> 상창리 퇴적층 조사단면 2지점의 퇴적상

- 세창산업 채석장 입구에 위치한 조사 2 단면은 상부 현무암과 클링커가 발달하며 하부 현무암 사이에 미고화 퇴적층이 1m 이내로 발달한다. 조사 2 단면의 미고화 퇴적층은 클링커 바로 아래에 1~10 cm 두께로 얇은 검은색 층(unit I)이 발달하며 유기물을 많이 포함하는 비정질의 세립 퇴적물로 구성된다. 적색 산화층(unit II)은 상부 검은색 층과 색상 및 퇴적물 조성 차이로 뚜렷한 경계가 관찰된다. 하부로 갈수록 점이적으로 흑갈색(unit III) 세립질 퇴적층으로 변화한다. 조사 2 단면의 퇴적층은 주로 실트 크기의 세립 입자로 구성되나 하부로 갈수록 잔자갈 크기의 화산쇄설물 입자가 드물게 포함된다.
- 연구지역 퇴적층은 세립질 입자가 상부에 우세하게 분포하며 하부로 갈수록 조립 입자의 빈도와 크기가 점진적으로 증가하는 경향을 보인다. 퇴적물의 주된 기원은 화산 분출물로 추정되는데, 그 이유는 제주도 자체에서 공급되는 주된 퇴적물이 주로 화산분출에 의한 화산쇄설성 기원으로써 화산분출 과정에서 퇴적되었거나 퇴적된 이후 재동된 경우에도 그 기원물질에는 큰 차이가 없다. 다만, 이 퇴적층에는 황사 등과 같은 소량의 풍성기원의 퇴적물이 혼재될 가능성 또는 제주도 화산 분출 이전에 분포하던 U층(미고결 퇴적층: Unconsolidated Formation)이 혼합되어 유입되었을 가능성도 있다(cf. Lim et al., 2005; 유층관련 논문추가). 연구지역 퇴적층 내에는 퇴적구조의 관찰이 매우 힘들다. 이는 세립의 화산쇄설물이 퇴적된 이후 지표에 노출되어 풍화를 받았을 경우 퇴적구조가 남아있을 가능성이 매우 낮다.
- 상창리 퇴적층 하부의 적색 산화층(unit III)은 화산 분출 과정이나 재이동 과정에

서 형성된 화산쇄설퇴적층(cf. Manville et al., 2009; Gatti et al., 2013)이 상부 용암류의 높은 온도에 의해 산화되었을 가능성(cf. Rodriguez-Gonzalez et al. 2009)과 장시간 대기중에 노출되어 산화되었을 가능성 등이 존재한다.

- 전체적인 연구지역 미고화 퇴적층의 퇴적환경은 하부의 현무암이 쌓인 이후 주변의 지속적인 화산활동에 의해 화산쇄설물이 피복되거나 주변에 쌓인 화산쇄설물이 재동 되어 퇴적층을 형성한 것으로 해석된다. 마지막으로 퇴적층 상부에 다시 용암이 흐르면서 미고화 퇴적층을 피복하여 현재의 층서가 형성된 것으로 해석된다.

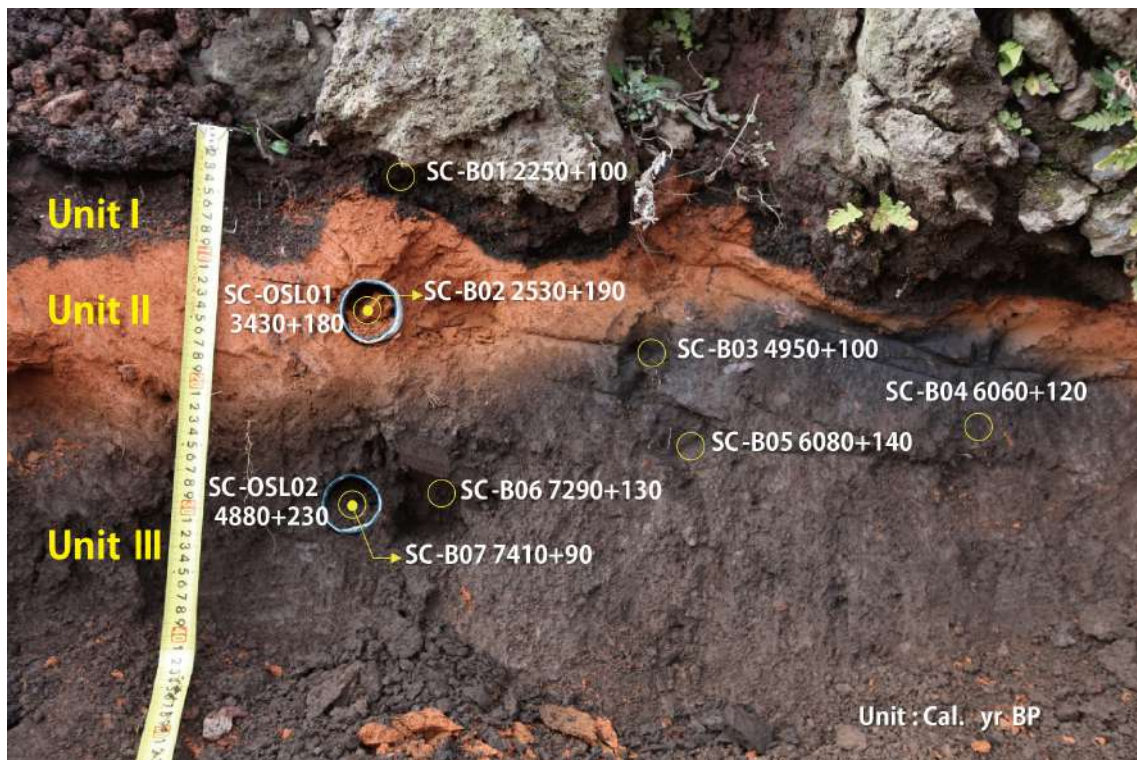


<그림 83> 상창리 퇴적층 조사 1지점의 탄화목에 대한 방사성탄소연대 분석결과

○ 형성시기

- 연구지역 현무암 및 미고화 퇴적층은 모두 제주도의 화산활동과 관련해서 해석될 수 있다. 기존 연구에 의하면 상창리 퇴적층이 확인된 지역은 안덕 꽃자왈에 해당되는 지역(송시태, 2003)에 위치하는데, 안덕 꽃자왈 지대는 병악(혹은 대병악, 서귀포시 안덕면 상창리, 표고 492 m) 및 소병악(혹은 죽은오름, 표고 473 m) 일대에서 부터 상창리를 지나 화순리 그리고 산방산(서귀포시 안덕면 사계리, 표고 396

m) 근처의 해안까지 최대 약 1.5 km 의 폭으로 약 9 km 에 걸쳐 분포하며, 분출 추정지인 병악(소병악 포함)으로 부터 하류 용암 말단부까지의 현재 지형 경사도는 약 2°의 일정한 경사를 이룬다. 특히 상창리 퇴적층이 분포하는 지역에서는 상창-화순 곳자왓용암(송시태, 2000) 혹은 병악 곳자왓용암(송시태, 2003)으로 불리우는 아아 용암류가 분포하는 지역으로, “병악 현무암질 조면안산암”에 해당하고 병악 현무암질 조면안산암은 주변의 파호이호이 용암의 특징을 지니는 광해악현무암을 피복하고 있다(박기화 등, 2000).



<그림 84> 상창리 퇴적층 조사 2지점의 방사성탄소연대 분석결과

- 상창리 퇴적층이 확인되는 지역의 병악 아아 용암은 고기원 등(2013)의 연구에서 정한산업채석장내(JE20)과 동광검문소 주변(SE05) 노두에 해당하는데 이들의 $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ 절대 연대는 각각 $34.5 \pm 17.1 \text{ ka}$ 와 $76.9 \pm 12.6 \text{ ka}$ 로서, 특히 병악 아아 용암은 그 동안 약 3 만 5 천년 전에 분출한 것으로 알려져 왔으나 (윤상규 등, 1987), 이 지역 지표층을 구성하는 용암 분출이 오차 범위를 고려할 때 최고 9 만년 전 부터 최소 1 만 7 천년 전에 있었음을 의미한다. 그러나 이러한 연대가 가장 상부의 현무암층과 동일한 위치의 층에서 분석된 결과에 해당되는지 여부는 현재로서는 확인하기 어렵다. 조사 1 단면에서의 평균 5,000 년의 탄소 연대를 갖

는 탄화된 목편의 채취위치는 적색층(unit II)의 바로 아래(unit III)이며 조사 2 단면에서의 적색층(unit II)과 흑갈색 층(unit III)의 경계 부 연대가 5,000 년 전후로 나타나는 점은 두 지점에서 적색층이 나타나기 이전 동일 시기의 퇴적 환경조건에서 형성되었을 가능성을 제시한다. 이러한 측면에서 방사성탄소연대 결과는 하부의 흑갈색 층(unit III)이 상부 적색층(unit II)이 형성되기 이전에 쌓여진 퇴적층임을 지시한다. 따라서 상창리 퇴적층의 흑갈색 층(III)이 퇴적된 시기인 7000년에서 5000년까지의 방사성탄소연대가 상창리 퇴적층의 퇴적시기로 해석된다.

- 연구지역 미고화 퇴적층에 포함된 석영입자가 햇빛과 열에 의해 완전한 블리칭이 일어났을 경우 OSL 연대가 퇴적층의 퇴적시기를 지시할 가능성이 있다. 그러나 부분적인 블리칭이 있었다면 OSL 연대가 기존에 가지고 있는 연대를 포함하여 실제 연대보다 오래된 연대를 지시할 가능성이 매우 높다. 조사 1 단면에서 획득된 탄화된 목편 시료의 연대를 제외한 나머지 시료들은 토양에 잔류된 유기물을 대상으로 분석된 연대로써 직접적인 퇴적시기를 지시하지 않을 가능성이 있다. 특히 검은색 층(unit I)의 경우 지하수 접촉에 따른 외부 오염 등의 가능성 때문에 방사성탄소 연대만을 절대적으로 신뢰하기 어렵다. 토양을 대상으로 분석된 OSL 연대와 동일 구간의 탄소연대가 서로 다르게 나타나는 것은 각 연대분석 방법에서 나타날 수 있는 환경적 상황에 대한 해석이 필요함을 의미한다. 적색층(unit II)의 OSL 분석연대는 3430년이며 동일 구간의 탄소연대는 2530년으로 OSL 분석연대가 오차 범위를 넘어서 더 높게 나타난다. 이는 퇴적 과정에서 부분적으로 블리칭이 일어나 오래된 연대를 가지고 있었던 영향으로 해석될 수 있다. 하부 퇴적층에서의 연대는 오히려 OSL 연대가 4882년으로 나타나고 방사성 탄소연대가 7400년으로 나타나는데, 퇴적과정에서 주위의 오래된 유기물이 탄소연대에 영향을 미쳤을 가능성도 있다.

- 검은색 층(unit I)과 적색층(unit II)의 경계면으로부터 상대적으로 하부로 갈수록 탄소의 연대가 더 높게 나타나는 점은 탄소연대를 만든 퇴적층에서 유기물이 생성되는 시기의 지표 상황이 불규칙한 지면을 가지고 있었을 가능성을 포함한다. 그럼에도 불구하고 토양시료와 OSL 절대연대는 흑갈색 층(unit III)에서 5000년을 전후로 탄소연대와 일치된 결과를 보인다. 이는 조사 1 단면에서 분석된 탄화된 목편의 방사성 탄소연대와도 잘 부합되기 때문에 검은색 층(unit I)과 붉은색 층(unit II)의 연대를 제외하더라도 5000 년 보다 최근에 상부 현무암이 생성되었음은 분명하다. 이는 지금까지 알려진 것과 달리 제주도 내부에서 용암분출을 동반하는 화산 활동이 25,000 년 전 보다 최근인 5,000 년 이후에도 있었음을 제시한다.

- 더 나아가 상창리 퇴적층의 절대연대 측정결과가 갖는 중요한 의미는 지금까지 절

대연대 측정이 불가하였던 상부 현무암의 상대적 연대 추정을 통하여 최근 2 만년 이내의 제주도 화산활동에 대한 시기규명이 가능하다는 점이다. 따라서 제주도에 분포하는 제 4 기 퇴적층에 대한 연대측정 및 퇴적환경 연구는 앞으로도 지속적으로 진행되어야 할 것이다.

6. 기타 지역 퇴적층의 형성시기

1) 굴전동역암층

○ 시료채취 위치 및 연대분석 결과

- 굴전동역암층의 분포지역에서 확인된 단면은 상부 현무암과 하부의 현무암이 확인되며, 두 현무암층 사이에 역암층이 분포한다. 굴전동역암층에서의 방사성탄소연대 분석을 위하여 토양시료 1점을 채취하였으며 방사성탄소연대 분석결과는 $21,636 \pm 100$ yr BP로 확인되었다.



<그림 85> 굴전동역암(동수교) (Qks) 시료채취 현황



<그림 86> 굴전동역암(동수교) (Qks) 지역 방사성탄소연대 분석결과

- 현재 분석된 연대는 단일 토양시료의 연대로 상부와 하부의 퇴적기간을 산정하기에는 무리가 있으며, 굴전동 동수교 하부에 분포하는 퇴적층의 정확한 연대를 추정하기 위해서는 추가적인 연대분석이 필요한 것으로 판단된다.

2) 입석동역암층

○ 시료채취 위치 및 연대분석 결과

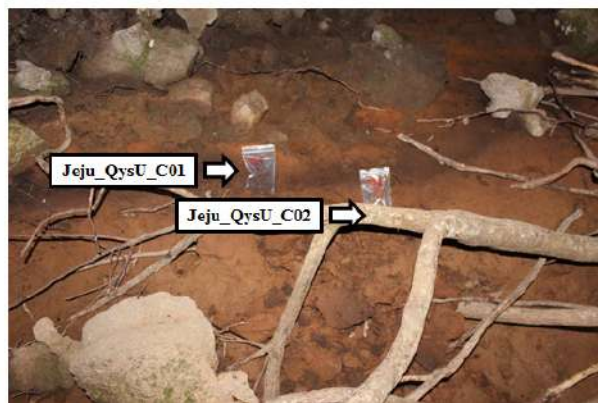
- 입석동역암층은 현재까지 지질조사 상에서 조사된 것은 하부의 퇴적층이 아닌 상부에 형성되어 남아있는 역암층을 말한다. 즉 상부의 역암층이 제4기퇴적층으로 현재 보고되어 있으나, 하부의 퇴적층 또한 화산쇄설성 퇴적물이 주요 공급물질인 퇴적층으로 확인된다.
- 선덕사 입구에 위치한 하천변에 퇴적층이 노출되어 나타나며 하부의 퇴적층은 주로 하천에 의해 형성된 퇴적층으로 판단되며, 하천퇴적에 따른 사층리와 층리 구조가 잘 발달되어 나타난다. 상부의 자갈층을 구성하는 자갈은 원마도가 매우 높고 하천의 영향으로 와상구조를 잘 나타낸다.
- 퇴적층의 형성 연대를 추정하기 위한 시료채취와 분석이 진행되고 있으나 현재까지 분석된 결과가 없어 시기 추정이 어렵다. 다만 상부에서 새로이 확인되는 퇴적층

은 기존에 알려진 역암층과 달리 상부에 현무암이 피복하고 있는 퇴적층으로 이번 조사과정에서 새로이 확인되었다.

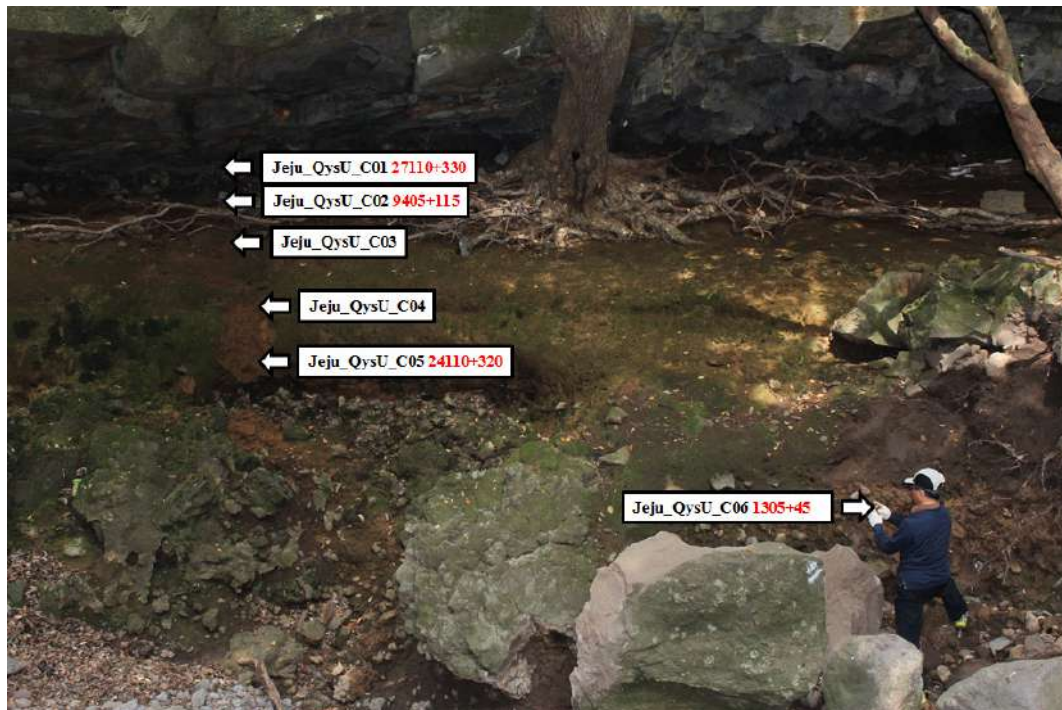
- 새로이 확인된 퇴적층은 현무암 층 사이에 협재된 형태로 확인되는데, 하부의 현무암은 하천 퇴적물로 인해 식별이 어렵다. 다만 입석동역암층과 매우 가까운 거리에서 확인되었기 때문에 하부의 현무암은 동일한 것으로 추정된다.
- 입석동 상부의 선돌교 퇴적층은 상부 현무암 접촉면에 클링커가 발달하지 않고 주로 퇴적층으로 확인되는데, 부분적으로 다양한 크기의 역들을 포함하고 있다. 퇴적층의 색상은 적갈색으로 상부 50 cm 하부에 유기물 층으로 보이는 짙은 회색 층이 협재된다. 시료는 협재된 유기물 층에서 토양시료로 6개를 연대측정목적으로 채취하였다.



<그림 87> 입석동역암층의 전경



<그림 88> 입석동역암층 상류에서 새로 발견되는 선돌교 퇴적층



<그림 89> 선돌교 퇴적층의 방사성탄소연대 분석결과

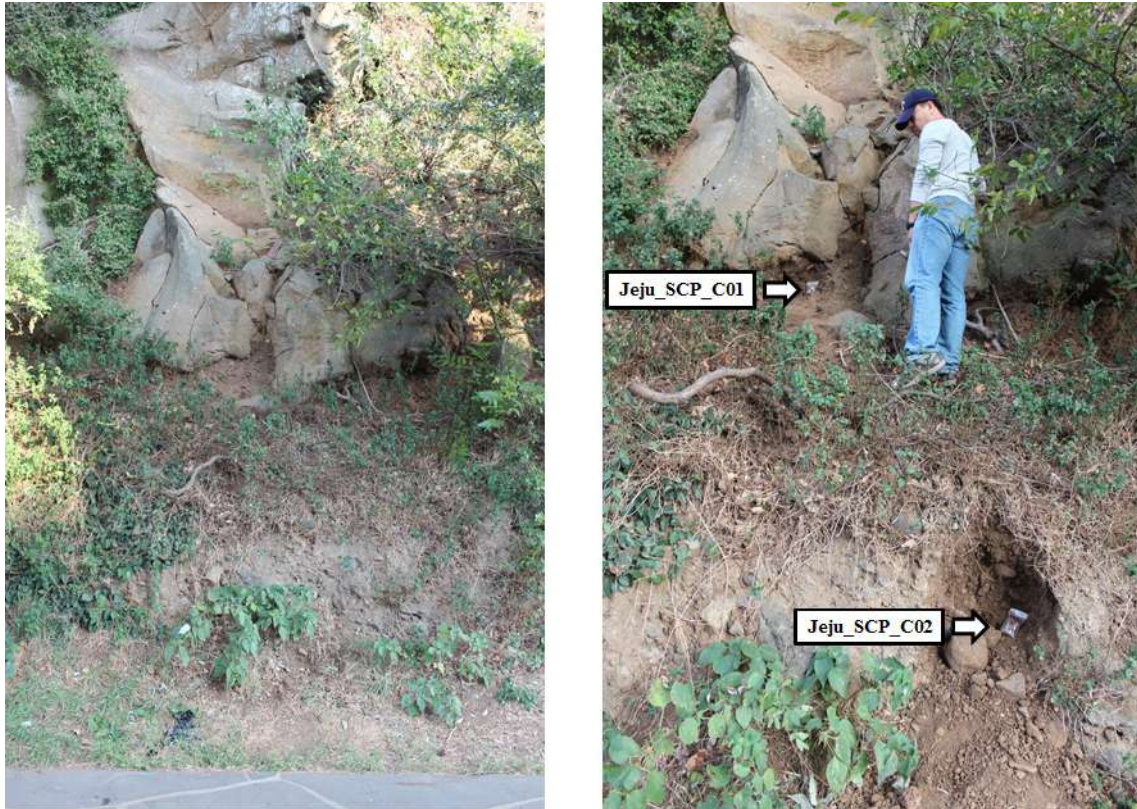
- 선돌교 퇴적층의 방사성탄소연대 분석결과 상부의 토양시료 2개에서 $27,110 \pm 330$ yr BP와 9405 ± 115 yr BP의 연대측정결과를 얻었으며, 가장 하부 층으로 판단되는 토양시료에서 $24,110 \pm 320$ yr BP의 연대를 확인할 수 있었다. 그 밖에 중간 지점에서 채취한 토양시료에서는 유기물이 확인되지 않아 연대를 얻을 수 없었으며, 추가로 측면에서 채취한 시료에서는 $1,305 \pm 45$ yr BP의 연대를 얻었으나 이는 현생 유기물에 의한 연대로 해석된다.
- 따라서 새로 확인된 입석동 선돌교 퇴적층의 연대는 상부 시료에서 역전된 결과를 보이는 점에서 명확한 결론을 내리기 어렵지만 분석결과를 토대로 27000년에서 9400년 사이에 형성되었을 가능성이 있다.

3) 성천포역암층

○ 시료채취 위치 및 연대분석 결과

- 기존에 조사된 성천포역암층은 현장에서 시료채취 과정에서 많은 현생식물의 뿌리를 확인할 수 있었다. 성천포역암층 제일 하부까지 현생 식생에 의해 영향을 받고 있어 방사성탄소연대의 취득이 매우 어려운 상황이다.
- 시료 채취는 상부 현무암과 인접하여 퇴적층 상부에서 1개의 시료를 채취하였으며, 추가로 퇴적층 중간부분에서 1개의 토양시료를 채취하였다.

- 분석된 결과는 모두 현생으로 나타났으며, 이는 과거의 퇴적층이 현재의 식생으로 인해 교란되거나 현생 식물의 연대를 분석한 것으로 판단된다. 따라서 향후 성천포역암층의 정확한 형성연대를 추정하기 위해서는 시료 채취를 위해 사면을 절개하여 새로이 분석을 시도할 필요가 있다.



<그림 90> 성천포역암층 시료채취 현황 및 방사성탄소연대 분석결과

4) 법호촌역암층 1 지점

○ 시료채취 위치 및 연대분석 결과

- 법호촌역암층 1지점은 현재까지 현무암 사이에 협재한 역암층으로 알려져 있으며, 역암층 상부에는 짙은 갈색을 띠는 조립질 모래 또는 잔자갈 크기의 사질층이 피복한다. 법호촌역암층은 현무암 하부의 조립질 모래층 하부에 부정합으로 놓이는데, 옅은 갈색을 띠며 크기가 다양한 역들을 포함한다.
- 법호촌역암층의 형성시기 분석을 위한 방사성탄소연대시료는 상부의 모래층과 하부의 자갈층에서 각각 1개씩 채취되었다. 방사성탄소연대 분석결과 상부의 사질층에서는 유기물이 거의 없어 연대를 측정할 수 없었으며, 하부에서는

15,364±81 yr BP의 연대분석결과를 얻었다. 다만 15000년 전후에 퇴적층이 형성되었을 것으로 추정할 수 있으나, 이 결과는 단일 시료를 분석한 결과이기 때문에 연대분석결과의 신뢰도를 높이기 위해서는 추가적인 연대시료의 확보와 분석이 필요하다.

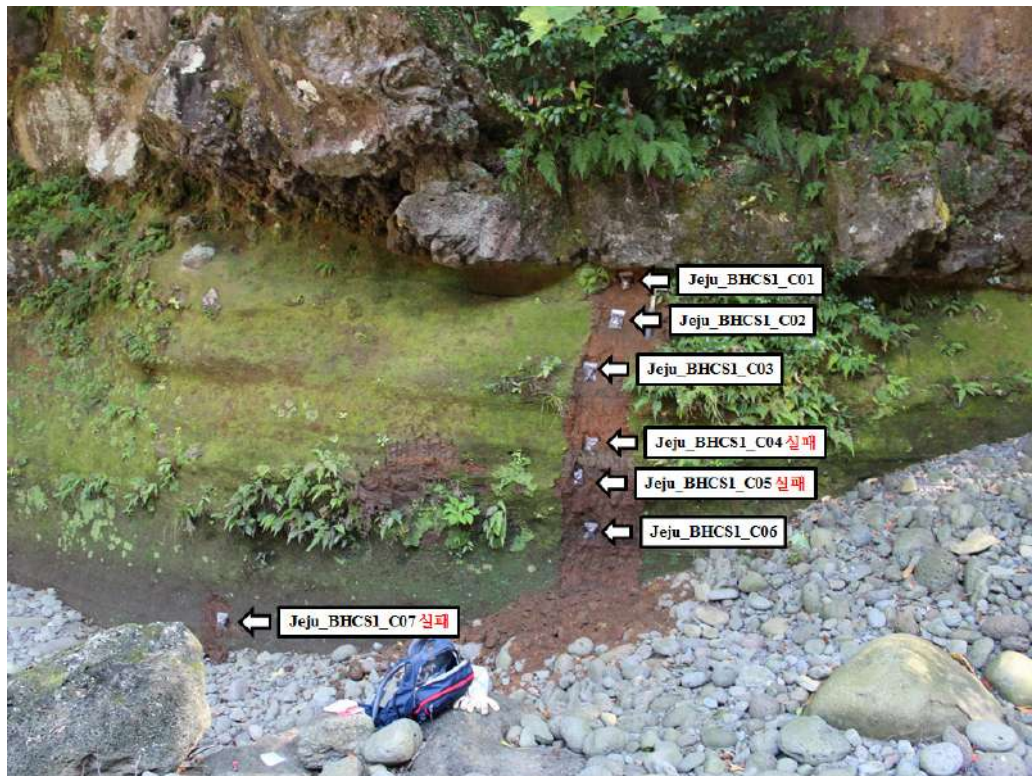


<그림 91> 법호촌역암층의 시료채취 위치 및 방사성탄소연대분석 결과

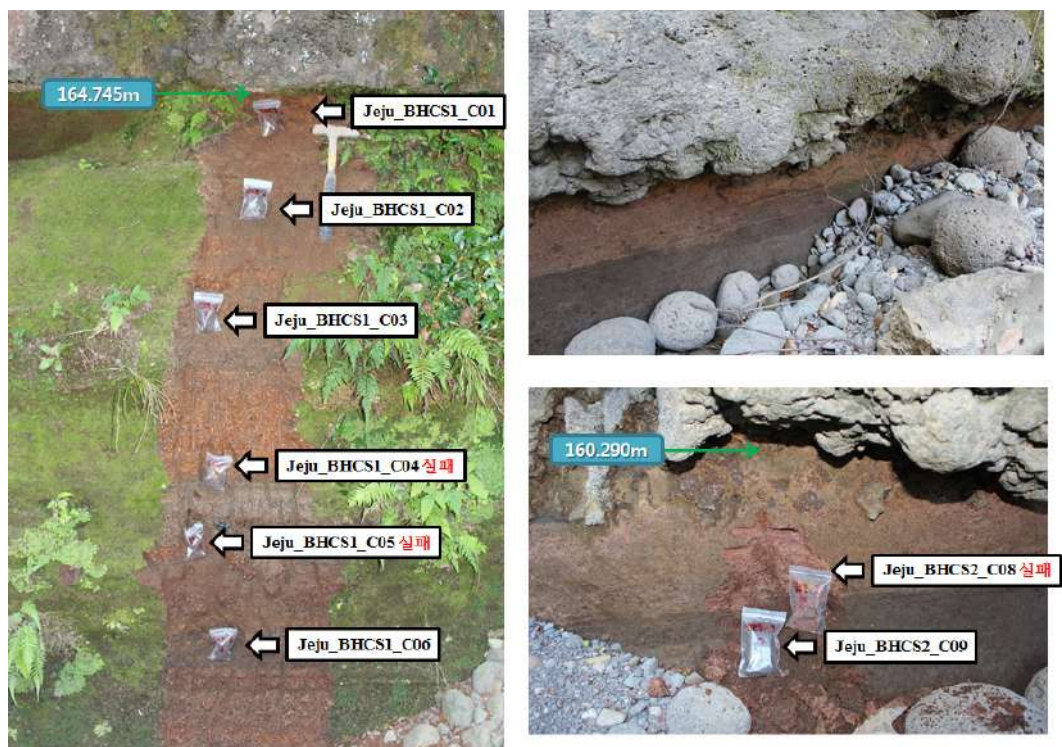
5) 법호촌역암층 2 지점

○ 시료채취 위치 및 연대분석 결과

- 법호촌역암층 2지점은 주로 스코리아성 또는 쇄설성으로 형성되었을 것으로 추정되는 응회암층을 지칭하는 것으로 판단되다. 현무암 하부에 위치한 응회암층은 층리가 잘 발달되어 있으며 경사진 층리를 보인다.
- 하천을 따라 연장이 확인되며 하천 반대쪽 사면의 하부에서 법호촌역암층의 연장으로 보이는 퇴적층이 관찰된다.
- 퇴적구조상 입자의 크기가 서로 다른 층들이 교호하는 형태로 나타나며, 연대분석을 위해 토양시료를 각 계층의 유기물이 많을 것으로 판단되는 층을 대상으로 9개의 시료를 채취하였다.



<그림 92> 범호촌역암층 2 지점의 시료채취 현황 및 분석결과 1



<그림 93> 범호촌역암층 2 지점의 시료채취 현황 및 분석결과2

- 방사성탄소연대 분석결과 일부 시료에서는 현생의 연대를 취득하였으나, 다수의 시료에서 유기물이 극히 적어 연대분석결과를 얻을 수 없었다. 이는 현재 노출된 퇴적층의 단면이 하천활동의 직접적인 영향을 받고 있으며, 조사 시점에서도 현생식물이 노두에 자생하고 있는 점 등을 고려하면, 토양내의 유기물은 거의 대부분이 현생식물에 의해 유입되었을 것으로 판단된다. 따라서 범호촌역암층 2 지점에서의 방사성탄소동위원소분석은 매우 어려울 것으로 판단된다.

6) 송산동 역암층

○ 시료채취 위치 및 연대분석 결과



<그림 94> 송산동 역암층 전경 및 방사성탄소연대 분석결과

- 송산동 역암층은 상부의 현무암이 확인되는 현무암 사이의 협재된 퇴적층으로 색상이 밝은 갈색으로 기질은 모래입자이다. 크기가 불규칙하고 원마도가 불량한

력들이 퇴적층에 포함되며, 퇴적구조 등은 관찰되지 않는다. 방사성탄소연대분석을 위하여 토양시료 1개를 채취하였으나, 유기물이 극히 적어 결과를 얻지 못했다.

7) 서건도 퇴적층(신규)

○ 시료채취 위치 및 연대분석 결과

- 서건도가 위치한 지역의 해안을 따라 퇴적층이 확인되는데, 상부 현무암의 하부에 퇴적층이 확인된다. 현재에도 해수의 영향을 받고 있는 것으로 관찰되며, 색상은 밝은 적색을 띤다.



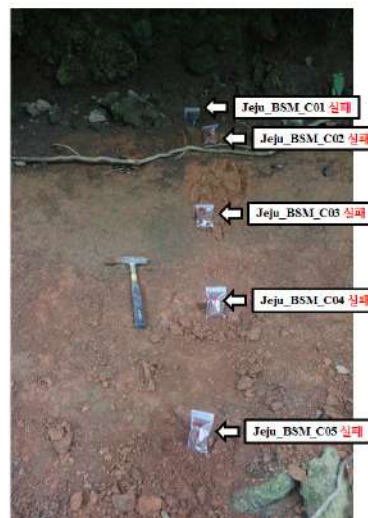
<그림 95> 서건도 퇴적층 시료채취 현황 및 방사성탄소연대 분석결과

- 현재 이 퇴적층은 고화가 일부 진행되어 매우 단단한 상태였으며 서건도 퇴적층의 형성시기를 분석하기 위하여 해수의 영향이 가장 적을 것으로 보이는 지점에서 2

개의 토양시료를 채취하였다.

- 방사성탄소연대 분석결과 두 개의 시료 모두 유기물이 매우 적어 형성시기를 추정하지 못했다.

8) 방선문 계곡 퇴적층 (신규)



<그림 96> 방선문 계곡 상부 퇴적층 분포 전경 및 방사성탄소연대 분석결과

○ 시료채취 위치 및 연대분석 결과

- 제주 방선문 계곡의 상류에서 확인되는 퇴적층은 현재까지 보고되지 않은 퇴적층으로 등산객의 블로그에서 위치가 확인되었다. 상부에 현무암이 피복하고 있으며, 밝은 적갈색의 점토층으로 확인된다.

- 퇴적층의 형성시기를 분석하기 위해 채취된 5개의 시료 모두에서 유기물이 확인되지 않았으며, 연대분석결과를 얻지 못했다. 방선문 퇴적층의 경우 탄소연대분석을 위한 유기물이 확인되지 않으면 OSL 등의 다른 방법을 통해 형성시기의 분석이 필요하다.

9) 베릴륨 연대분석에 따른 퇴적층의 노출시기 분석

○ 베릴륨(Be10) 시료의 AMS 분석 테스트 결과



<그림 97> KIST 6MV tandem accelerator

- 극미량의 ^{10}Be 을 분석하기 위해서는 AMS 분석이 필수로 KIST의 6MV tandem 가속기를 이용하였다. 측정치의 보정을 위한 표준물질로는 ICN 표준물질 중에서 $^{10}\text{Be}-1-5-2$ ($^{10}\text{Be} / ^9\text{Be} = 9.718 \times 10^{-13}$)와 $^{10}\text{Be}-1-6-1$ ($^{10}\text{Be} / ^9\text{Be} = 9.718 \times 10^{-13}$)를 사용하였으며, 보정값은 0.543 ± 0.029 이었다. 이 보정값을 이용하여 측정된 PH-MS 070224-1 시료와 PH-MS 070224-5 시료의 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 값은 각각 $7.94 \pm 1.29 \times 10^{-14}$ 과 $8.17 \pm 0.79 \times 10^{-14}$ 이었으며, ^{10}Be 의 함량으로 계산하면 PH-MS 070224-1의 경우 $1.22 \pm 0.20 \times 10^5 \text{ atoms/g}$, PH-MS 070224-5의 경우 $1.17 \pm 0.11 \times 10^5 \text{ atoms/g}$ 의 값을 얻었다.
- 이와 같이 얻은 ^{10}Be 의 함량으로부터 노출 시간을 계산하는 방법은 워싱턴대학교의 Comogenic Nuclide Lab.에서 제공하는 온라인 $^{10}\text{Be} - ^{26}\text{Al}$ exposure age calculator (<http://hess.ess.washington.edu>)를 사용하였다. 노출 시간의 정확한 계산을 위해서는 시료의 경도, 위도와 고도 그리고 차폐율의 값이 필요하며, 또한 시료의 두께와 밀도, 부식 속도를 입력하여야 한다. 대략적인 입력값을 사용하여 계산하였을 때 계산 모델에 따라서 27,000 ~ 30,000 년의 노출 시간을 계산할 수 있었으며, 이 때 부식 속도를 알 수 없어서 부식을 무시하고 계산한 값이므로 최소 27,000년 이상 노출 된 것을 알 수 있었다.

CRONUS-Earth ^{10}Be - ^{26}Al exposure age calculator -- results

Version information --

Component	Version
Wrapper script:	2.2
Main calculator:	2.1
Constants:	2.2.1
Muons:	1.1

Comments:

Production rate calibration information:	Using default calibration data set
--	------------------------------------

¹⁰Be results:

Results not dependent on spallogenic production rate model:					Exposure ages -- constant production rate model:		
					Scaling scheme for spallation: Lal(1991) / Stone(2000)		
Sample name	Thickness scaling factor	Shielding factor	Production rate (muons) (atoms/g/yr)	Internal uncertainty (yr)	Exposure age (yr)	External uncertainty (yr)	Production rate (spallation) (atoms/g/yr)
PH-MS070224-1	0.9697	1.0000	0.180	4637	27489	5135	3.88

Exposure ages -- time-varying production models:							
	Scaling scheme for spallation:	Desilets and others (2003,2006)		Dunai (2001)	Lifton and others (2006)		Time-dependent Lal (1991)/Stone (2000)
Sample name		Exposure age (yr)	External uncertainty (yr)	Exposure age (yr)	External uncertainty (yr)	Exposure age (yr)	External uncertainty (yr)
PH-MS070224-1		29960	6095	29348	5961	29484	5682
					Time-dependent Lal (1991)/Stone (2000)		
Sample name		Exposure age (yr)	External uncertainty (yr)	Exposure age (yr)	External uncertainty (yr)	Exposure age (yr)	External uncertainty (yr)
PH-MS070224-1		29960	6095	29348	5961	29484	5682

²⁶Al results:

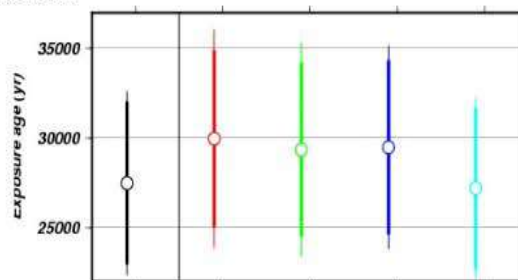
Results not dependent on spallogenic production rate model:					Exposure ages -- constant production rate model:		
					Scaling scheme for spallation: Lal(1991) / Stone(2000)		
Sample name	Thickness scaling factor	Shielding factor	Production rate (muons) (atoms/g/yr)	Internal uncertainty (yr)	Exposure age (yr)	External uncertainty (yr)	Production rate (spallation) (atoms/g/yr)
PH-MS070224-1	--	--	--	--	--	--	--

Exposure ages -- time-varying production models:							
	Scaling scheme for spallation:	Desilets and others (2003,2006)		Dunai (2001)	Lifton and others (2006)		Time-dependent Lal (1991)/Stone (2000)
Sample name		Exposure age (yr)	External uncertainty (yr)	Exposure age (yr)	External uncertainty (yr)	Exposure age (yr)	External uncertainty (yr)
PH-MS070224-1		--	--	--	--	--	--

(No Al-26 / Be-10 plot)

²⁶Al/¹⁰Be ratios (relative to 07KNSTD!):

Sample	²⁶ Al/ ¹⁰ Be ratio
PH-MS070224-1	--

(No Al-26 / Be-10 plot)**Scaling factor comparison:**

Comparison of exposure ages generated from various scaling schemes. Leftmost, constant production rate: Lal(1991)/Stone(2000) scaling scheme (black). Others, time-dependent production: red, Desilets and others(2003,2006); green, Dunai (2001); blue, Lifton and others (2006); cyan, time-dependent adaptation of Lal (1991)/Stone(2000). Circles denote Be-10 exposure ages; triangles denote Al-26 exposure ages. The thick line shows the 1-sigma internal uncertainty, the thin line shows the 1-sigma external uncertainty.

[GMT code for this plot \(includes the x,y data points\)](#) - [Postscript version of this plot](#)

<그림 98> Calculated result of the exposure age by ^{10}Be

제 4 장 제주도 제4기 퇴적층의 지질학적 해석

1. 지난 약 2만년 간의 전 지구적 기후변화

- 제주도 고토양층 형성과 과거 고환경 변화와의 관계에 대한 토론을 위해 한반도를 포함하는 동아시아 지역에 중대한 영향을 미친 전 지구적인 고기후 변화를 시기 별로 크게 1) 마지막 최대 빙하기(Last Glacial Maximum; 약 23,000~18,000년 전), 2) 마지막 해빙기(Last Deglaciation; 약 18,000~11,000년전), 3) 현 간빙기(Current Interglacial Period; 약 11,000년전~현재)로 나누어 고찰하였다. 기본자료는 주로 2007년 발간된 IPCC 보고서를 참고로 작성하였다.
- 전 지구적인 고기후 변화를 추정하기 위해서 고기후 연구자들은 세계 각지에서 획득한 매우 다양한 특성을 지니는 프록시(proxy) 자료를 활용한다. 따라서 시기 별 고기후 변화를 다루기 전에 반드시 이러한 고기후 자료의 특성을 파악하는 것이 반드시 선행되어야 한다. 현대 고기후학의 발전을 다지는 데에는 주로 극지역의 빙하 내에 포획되어 있는 기체 또는 에어로솔(aerosol)을 추출하는 기술이 대표적인 역할을 해왔으며, 이를 통해 과거 약 65만 년 전부터 현재까지의 대기 중 가스와 에어로솔의 농도변화가 매우 높은 정확도(accuracy)로 복원되어 있다. 이 외에도 빙하를 통해 복원된 기록보다는 그 정확도 측면에서 부족하지만, 과거 수백만년 내지 수만년 간의 대기 중 CO₂ 농도를 추정할 수 있는 프록시 자료들이 발표된 바 있다. 단일 프록시 자료의 불완전성을 극복하기 위해 고기후학자들은 대체로 다양한 프록시 혹은 분석기술을 활용하여 최종적인 고기후 환경을 유추하게 된다. 지난 수십 년 동안 고기후학적 연구방법은 크게 발전하여 성숙단계에 도달하였다. 고기후 변화 연구방법은 지하수 온도, 빙하코어(ice core) 기포 내 기체함량, 해양퇴적물 공극수 변화 및 빙하 분포 변화와 같은 정량적 복원에서부터 물리화학적 및 생물학적 프록시 변수들의 상대적인 변화를 통한 정성적 복원에 이르기까지 매우 다양하다. 이와 같이 지표물질을 활용한 연구방법들과 더불어, 최근세에 대해서는 과거의 문헌자료 역시 활용되기도 한다. 프록시 자료로서 전통적으로 활발히 이용되어 온 지구물질들을 열거하면 나무(나이테), 산호, 곤충 및 기타 미생물들의 성장과 군집 등이다. 이중 나무나이테, 바다와 호수의 플랑크톤(plankton) 및 화분은 수백 년 내지 수천년 단위의 기후변화를 연구하기에 적합하다. 나무나이테의 폭과 밀도는 과거의 온도와 습도를 유추하는데 사용되는데, 이 경우 실제 기기 계측 자료를 이용하여 현재의 나무나이테가 기후변화를 효율적으로 지시하고 있는 지에 대해

충분한 검증 및 보정연구를 거친 후 수행된다. 해양 및 호수퇴적물 코어 내 화분과 플랑크톤 군집의 분포는 온도, 염도 및 강수량 등 과거 기후변화의 정량적인 평가에 사용될 수 있는데, 이러한 평가법 역시 현재 발생되고 있는 변화와 통계적 기법을 함께 적용하여 이루어진다. 특히 바다에 서식하며 CaCO_3 각질을 형성하는 동물성 플랑크톤의 일종인 유공충과 같은 미고생물을 활용하면 이들의 안정동위원소 조성을 포함한 화학조성과 온도 사이의 열역학적 상관성을 이용해 온도변화를 직접 확인할 수 있다. 과거의 온도와 염도를 평가하기 위해서는 주로 산호나 유공충의 산소동위원소 비, Mg/Ca 및 Sr/Ca 비가 활용된다. 과거의 해수 수온을 알 수 있는 또 다른 방법으로 코코리스 등 나노(nano) 미생물 기원의 알케논 포화지수를 들 수 있다.

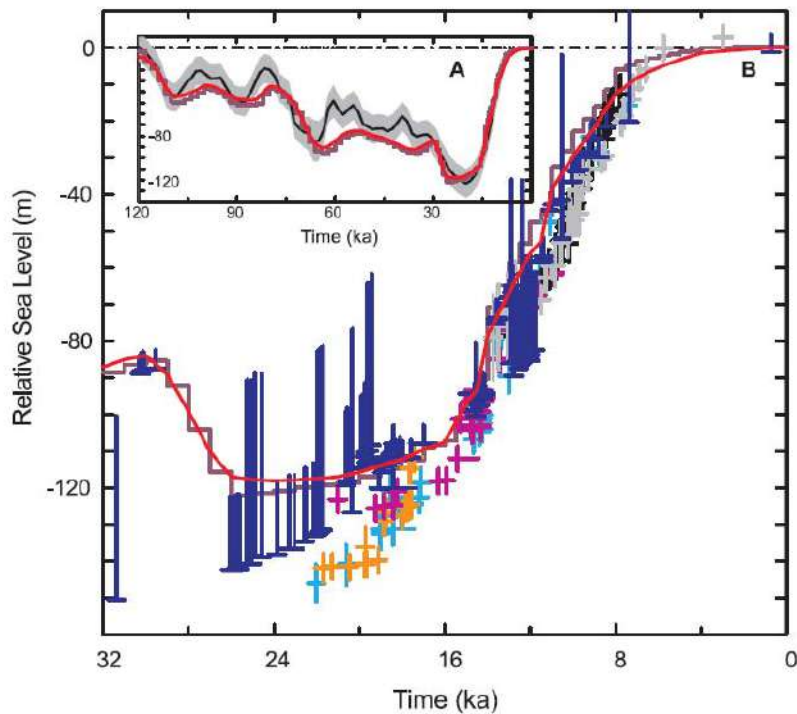
- 고기후 변화를 추정하기 위해 프록시를 연구하는 것과는 별도로, 변화의 시기를 특정하기 위해 필수적인 기술이 연대측정법이다. 각 연대측정법에 따라 매우 다른 장단점을 내포하지만 일반적으로 시기가 오래될수록 연대측정 결과의 정확도는 떨어지고 적용 가능한 시간 범위를 초과하는 경우가 많다. 나이테 카운팅법(counting)은 가장 정확한 연대측정법으로 알려져 있으며, 최대 수천 년 이전까지 1년 단위 내지 계절 단위의 연대를 계산할 수 있다. 이와 유사하게 성장(또는 퇴적)선 또는 띠를 남기는 기타 지질물질의 예로는 산호, 호수퇴적물, 동굴생물, 빙하를 들 수 있다. 일반적으로 고기후학자들은 연대측정 기법의 불확실성(uncertainty)을 줄이기 위해 한 가지 프록시를 대상으로 여러 다양한 기법의 연대측정법을 적용하기도 한다. 방사성 연대측정분야는 각 세부 기법에 따라 개발 이후 현재까지 많은 진보가 이루어졌다. 방사성 연대측정은 각각 방사성 동위원소의 시스템에 따라 다르며, 첨단 분석기기를 통한 동위원소 측정이라는 특성으로 인해 필연적으로 오차범위가 함께 표기된다. 이외에도 측정 기법에 따라 다양한 가정을 필요로 하므로, 연대측정 결과의 정확성을 검토하기 위해 그 가정의 유효성을 우선적으로 확인하는 연구결과도 보고되고 있다. 예를 들어, 방사성 탄소 연대측정의 기본 가정 중 첫 번째 가정인 대기 중 방사성 탄소 농도는 지난 12,000년에 대해서는 확실하게 규명되어 있으며, 여전히 불완전한 측면은 있지만 지난 35,000년에 대해서도 상당 부분 잘 알려져 있다. 이러한 대기 중 방사성 탄소 농도의 변화는 일부의 잘 형성된 나무나이테, 산호, 호수퇴적물로부터 ^{14}C 연대와 절대연대 사이의 모델을 만들고, 이와는 독립적으로 일부 탄산염 성분의 프록시를 활용하여 우라늄 계열 연대측정법과 함께 대기 중 ^{14}C 농도를 계산한 결과를 비교하여 평가할 수 있다.

○ 고기후 수치모델은 과거 기후변화의 메커니즘(mechanism)을 이해하는데 활용되며, 과거의 특정 기후사건 또는 시기를 모의하는 데에도 사용된다. 기후모델은 밀란코비치(Milankovitch) 가설 등 주요 고기후학적 가설을 정량적으로 검증하는데 특히 중요한 역할을 한다. 또한 이들을 통해 연구대상이 되는 과거 기후변화의 원인과 결과를 확인하기도 한다. 고기후 프록시 자료는 그 결과에 있어 시공간적으로 불완전한 경우가 많고 특정 계절 또는 기후 요인에 따른 편향성이 내포되어 있기 때문에, 고기후 수치모델을 통해 이러한 불완전성을 해결하기 위한 연구가 시도되고 있다. 무엇보다도 미래의 기후변화를 예측하기 위해 고기후 프록시 자료와 수치모델을 근거로 기후변화 메커니즘에 대한 정량적 이해를 높이는 것이 필수적이다. 고기후 복원자료는 기후모델을 검증할 수 있는 기회를 제공하는데, 특히 기후를 조절하는 주요 강제요인(forcing factor)이 잘 알려져 있고 이에 따른 반응이 충분히 제한되어 있을 경우 보다 정확한 검증이 가능하다. 기후변화가 기본적으로 장기적인 변화라는 관점에서 수치모델을 현대 기기로 측정된 기후자료로 확인하는 것은 어려우며, 고기후 자료를 이용하여 기후 모델을 검증하는 것이 매우 중요하다. 예를 들어 만약 현재 대기 중의 CO₂ 농도를 기준으로 현재의 기후 조건을 성공적으로 모사했다고 하더라도 이것은 CO₂에 대한 실제적 민감도에 대한 최종결과가 될 수는 없다. 왜냐하면 CO₂에 대한 실제적 민감도를 테스트하기 위해서는 여러 CO₂ 농도 하에서의 고기후 조건 모사가 동시에 이루어져야하기 때문이다. 무엇보다도, 최초 기후모델 구성 시 구름변수와 혼합체제 등 매개변수들의 상호 수식화는 현재의 관측 결과만을 통해서 개발되었기 때문이다. 따라서 모델 개발 시의 기후조건과 서로 다른 기후 조건은 완성된 모델을 테스트하는데 중요한 기준을 제공한다. 일반적으로 현재 또는 미래 기후변화 시나리오를 구성하는데 활용되는 기후모델이 고기후 모사에도 사용되는데, 이 경우 해당 시기의 강제요인 차와 바다 및 육지의 분포양상 차를 고려하여 모사를 진행하게 된다.

2. 마지막 최대 빙하기(Last Glacial Maximum; 약 23,000~18,000년전)

○ 밀란코비치 이론에 의하면, 현재 빙하기-간빙기 순환 중 빙하기는 북반구 고위도 지역에서의 여름철 일사량(insolation) 감소로부터 여름 기온이 하강하기 때문에 시작된다. 뒤 이어 고위도 지역을 중심으로 겨울철 강설이 연중 녹지 못하고 유지 및 축적되는 작용이 반복되면서 북반구 극지 및 고위도 지역에 빙상이 형성되었고 곧 빙하기로 이어졌다. 육상의 빙상 확장과 연관된 큰 규모의 해수면 하강은 북반구 고위도 지역의 여름철 일사량 최소 시기와 일치하는 약 116,000년경에 발생되

었다(Waelbroeck et al., 2002; 그림 1). 고기후 모델을 활용한 연구에서는 일사량 변화만을 고려하였을 때에는 고위도 강설 및 유지 현상을 재현하는데 실패하였으나, 이후 수목 북방한계선의 이동, 고위도의 해빙확장, 빙상 형성을 위한 수분 공급의 기원인 저위도 대양의 수온 상승을 고려하면 이러한 기후 상황이 잘 확인된다(e.g., Risebrobakken et al., 2005). 이러한 일련의 결과들은 저위도에서의 대기-해양 순환 현상이 고위도 지역의 일사량 강제력과 연결 및 증폭시키고 빙상의 성장을 확산시키는 피드백(feedback)을 제공한다는 가설을 증명하고 있다(e.g., Jo et al., 2014). 이러한 빙하기-간빙기 순환은 지난 65만년 동안 지속된 것으로 알려져 있다. 빙하 시추코어로부터 획득한 자료에 의하면 이 기간 동안의 대기 중 이산화탄소의 농도는 180~300 ppm, 메탄가스는 320~790 ppb의 범위를 보인다.

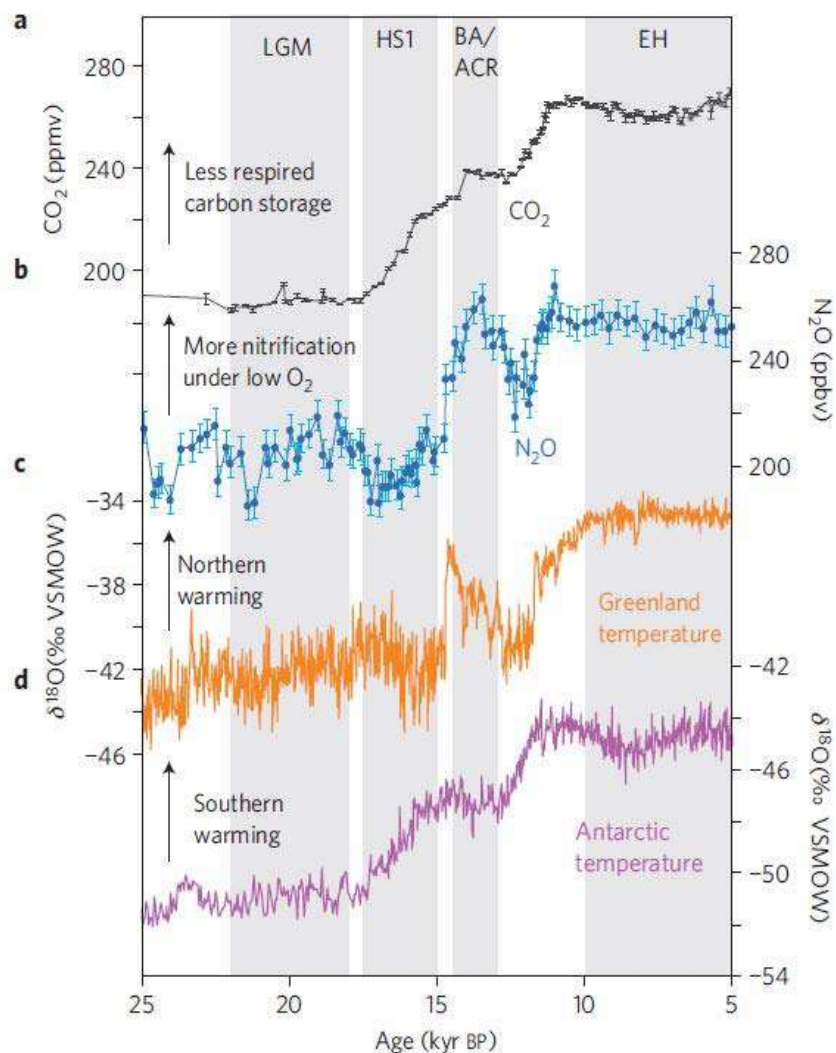


<그림 99> (A) 빙기-간빙기 순환에 걸친 빙상의 크기에 따라 변하는 전 지구적 해수면 변화(Waelbroeck et al., 2002; From IPCC, 2007). 저서성 유공충의 산소동위원소 비를 통해 계산된 상대 해수면 높이의 중간값(검은색 실선)과 오차범위(회색부분). 붉은색 실선은 바바도스 지역 산호연구를 통해 추정된 해수면 변화 ICE-5G(VM2)모델의 예측값. (B) 과거 32,000년전부터 현재까지의 카리브해 바바도스 섬에서 산호로부터 획득한 RSL기록에 대한 ICE-5G(VM2) 모델 예측 결과(붉은색 실선)과 이외 지역의 결과(다양한 색으로 표시된 십자 및 오차막대 심볼)의 비교.

- 빙하기-간빙기 순환 중 약 23,000~18,000년전에 해당하는 마지막 최대 빙하기는 지질학적 증거가 매우 풍부하고 현재와 가장 가까운 빙하기라는 점으로 인해 수많은 연구가 진행되고 있으며, 이에 따라 다양한 후속 기후 모델 적용 연구가 수행된 바 있다. 이 시기는 대륙 빙상이 최대의 부피로 확장되었던 시기로서 현재의 북유럽(Fennoscandian 빙상)과 북미 대륙(Laurentide 빙상) 미국 북부에 이르기까지 수천 m 두께의 대규모 대륙 빙하가 전진한 시기이다. 이러한 빙하의 중위도 지역으로의 전진은 해수면 변동과 직접 연결되는데 이 시기에는 현재에 비해 약 120 m 내외의 해수면 하강이 이루어진 것으로 연구결과 밝혀져 있다.
- 마지막 최대 빙하기 직전 약 30,000년 전까지는 북대서양 지역을 중심으로 최대 약 16도까지 급격한 온난화와 한랭화가 반복적으로 일어난 것으로 그린란드의 빙하코어 기록으로부터 보고되었다. 이러한 급격한 기후변동은 일명 Dansgaard-Oeschger (D-O) cycles 라고 불리며, 그 영향권이 전 지구적 규모였을 것으로 보인다. 또한 이러한 변화와 직접적으로 연관된 것이 우리나라를 포함하여 동아시아 지역에 중대한 영향을 미치는 동아시아 몬순의 변화이다. 따라서 그린란드에서의 기온변동과 열대 및 아열대 지역(일부의 중위도 지역 포함) 강우현상의 심각한 변화가 서로 연관되어 있는 것으로 알려져 있다.
- 기후모델링 결과에 의하면 마지막 최대 빙하기 동안에는 현재와는 다른 온실가스 농도와 빙하 분포 면적 때문에 대기의 평균 기온이 현재보다 3~5도 정도 낮았던 것으로 알려져 있다. 아직 많은 의문점이 존재하지만 대기 중 분진의 양과 식생 변화의 영향을 고려하면 추가로 전 지구의 기온이 1~2도 정도 더 낮았을 것으로 추정된다. 따라서 마지막 최대 빙하기와 현재의 전 지구적인 평균 기온은 약 4~7도 정도의 차이를 보이는 것으로 보인다. 반면 과거 해양 환경을 유추할 수 있는 유공충과 산호의 산소동위원소 및 Mg/Ca 비 연구결과들에 의하면 열대지역의 경우 마지막 최대 빙하기 동안 해수온도가 현재에 비해 평균 약 2~3도 정도만 낮았을 것으로 추정하고 있다. 따라서 고위도 지역의 해양 환경에서 보다 높은 수온 변화를 겪었으며, 해빙에 의해 바다가 덮혔던 면적 등 추가적인 현상들로 인해 변화의 정도가 보다 큰 경향을 보였을 것으로 평가된다. 육상 자료도 해양의 자료와 유사한 경향을 나타내는데, 마지막 최대 빙하기 동안 열대지역 기온이 약 5도 가량 낮았던 반면, 고위도 지역의 기온은 이보다 큰 폭으로 떨어졌을 것으로 보고되었다. 기후모델 연구에 의하면 이러한 마지막 최대 빙하기와 현재 기후 사이의 위도 별 온도변화 차이는 모델의 종류에 따라 다른 결과를 보이고 있다.

3. 마지막 해빙기(Last Deglaciation; 약 18,000~11,000년전)

○ 마지막 최대 빙하기 이후 홀로세 간빙기 이전까지는 마지막 빙하기-간빙기 순환 내에서 가장 빠르고 뚜렷한 온난화가 진행되는데, 이를 흔히 마지막 해빙기라고 칭하며 이 마지막 해빙기의 중간점을 빙하기 종료시점(glacial termination) 1이라 한다. 마지막 해빙기의 시작은 지역에 따라 다소 차이가 있는데 빙하코어 연구결과에 의하면 약 14,000년전 비교적 급격한 변화와 함께 시작된 것으로 보고되었다. 이에 반해 남극 빙하코어에 의해 복원된 남극지역에서의 마지막 해빙기의 시작은 약 18,000년전으로 상대적으로 점진적인 양상을 보인다.



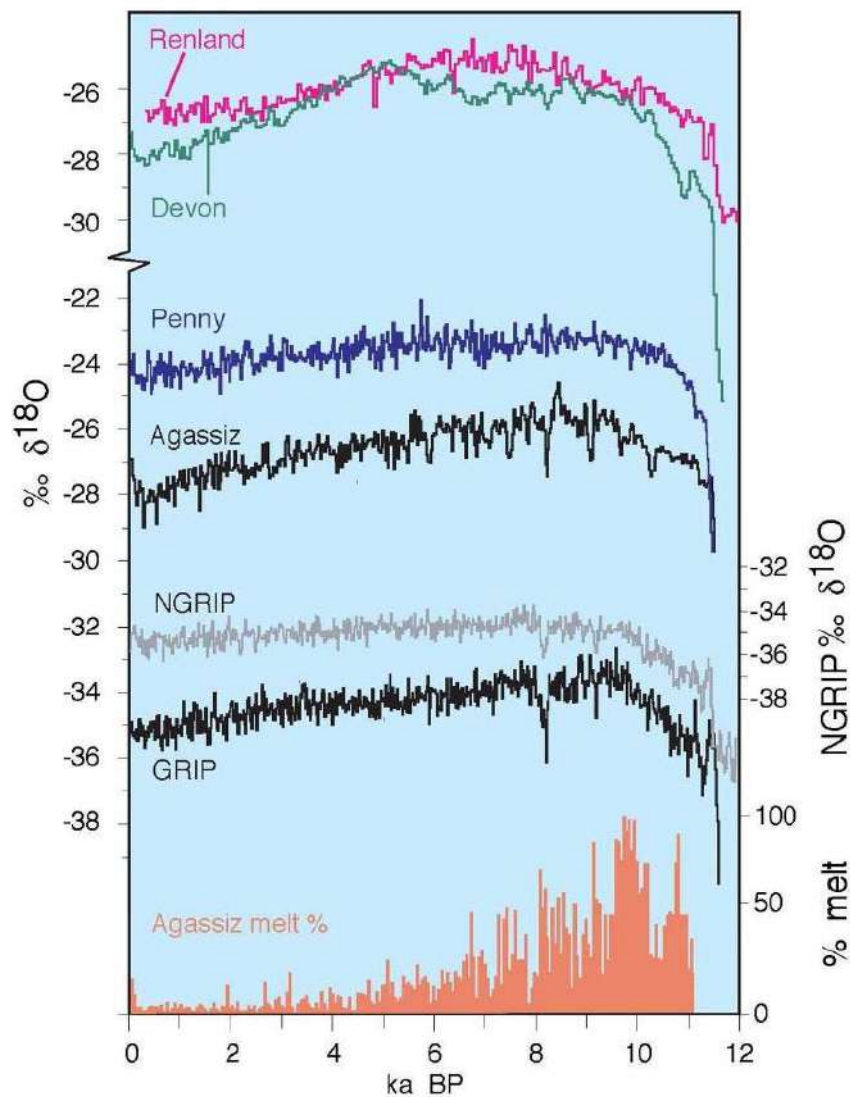
<그림 100> 마지막 해빙기 동안의 기후변화와 온실가스 농도의 기록(From Jaccard and Galbraith, 2012). (a) 남극 빙하코어로부터 분석된 대기 이산화탄소 농도. (b) 대기 아산화질소 농도. (c) 그린란드 빙하코어의 산소동위원소 비. (d) 남극 EDML 빙하코어로부터 분석된 산소동위원소 비.

- 빙하코어 내 기체 분석 결과는 대기 중 이산화탄소, 메탄 등과 같은 온실가스의 농도가 전 지구적인 온도변화 및 남극지역에서의 온도변화와 전반적으로 매우 유사한 경향을 보여준다(Petit et al., 1999). 마지막 해빙기 동안에는 약 54×10^6 km³의 대륙빙하가 소멸되었던 것으로 보고되었으며(Yokoyama et al., 2000), 이와 같은 대륙빙하의 부피는 약 121 m의 해수면 상승을 의미한다. 또한 이 해빙기를 거치면서 발생한 전 지구적 평균온도 상승은 약 4~7도 정도였으며, 지역에 따라 최대 약 20도의 기온 하강을 보고한 연구결과도 있다.
- 주변 동아시아 지역의 연구결과에 의하면 한반도의 경우 약 8도 내외의 온도변화를 겪었을 것으로 추정되지만, 현재까지 정량적 기온변동을 제시한 프록시 연구결과가 보고된 바가 없다.
- 마지막 해빙기 중 매우 뚜렷하고 특징적인 급격한 기후변동이 보고되었다. 이 시기를 Younger Dryas 사건이라고 명명하였는데, 고기후학자들로부터 마지막 해빙기 중 가장 중요한 기후변동 사건으로 인식되고 있다. 북대서양 및 북유럽에서 매우 다양한 프록시 기록에 의해 처음 보고된 이 시기는 특히 그린란드 빙하코어에서 명확하게 보고되었다. 중국 동굴생성물의 우라늄계열 연대측정으로부터 재정립된 Younger Dryas 시기는 마지막 해빙기최후기에 해당하는 약 12,800년전부터 11,500년까지이며, 따라서 이와 같은 매우 급격한 기후변동이 중국의 아열대 지역에서도 발견됨에 따라 그 범위가 적어도 반구 규모 이상이었음이 확인되었다. 이외에도 카리브해와 에티오피아 등의 열대지역의 연구결과에서도 보고된 바 있다. 그러나 남극 빙하코어 자료를 비롯하여 호주 및 뉴질랜드 등지의 연구결과들에 의하면 남반구 지역에서는 그 실체가 뚜렷하지 않거나 전혀 기록되지 않은 경우가 대부분이다.
- 이 해빙기의 급격한 기후변동의 원인에 대해서는 아직까지 다양한 이론이 적용되었으나 가장 대표적인 학설은 북대서양 심층수 형성과 관련이 있다. 즉, 마지막 해빙기 최후기에 그동안 진행되었던 대륙빙하 용빙수의 대륙 내 축적과 이 용빙수의 폭발적인 바다로의 유입으로 인해 북대서양 표층수의 밀도를 급격히 떨어뜨렸으며, 최종적으로 북대서양 심층수 형성의 약화와 북대서양 적도의 열에너지 수송이 원활하게 진행되지 못해 해당 지역에 급격한 한랭화가 진행되었다는 학설이다. 이러한 북대서양 지역의 급격한 온도하강은 동아시아 지역에 다량의 열에너지와 강수를 공급하는 몬순을 크게 약화시키는 것으로 알려져 있기 때문에 한반도를 비롯한 주변 지역에도 중대한 영향을 미쳤을 것으로 추정할 수 있다.

3. 현 간빙기(Current Interglacial Period; 약 11,000년전~현재)

- 마지막 해빙기 이후 진행된 현 간빙기의 기후변화는 크게 인간간섭으로 인한 급격한 지구온난화가 진행된 약 200년 전을 기준으로 이전과 이후의 시기로 나눌 수 있다. 지난 약 10,000년 동안을 100년 단위로 분석한 고기후 기록을 보면 인간간섭 이전인 산업혁명 이전에도 지역에 따라 일시적으로 온난했던 시기들이 있었다는 증거는 매우 많다. 그러나 이러한 시기들은 전 지구적으로 동시에 발생하지는 않은 것으로 보고되고 있다. 마찬가지로 여러 지역에서 10년 단위로 분석된 현 간빙기의 고해상도 고기후 기록도 지역에 따라 주기적 또는 준주기적인 기후변동이 있었다는 증거를 잘 제시하고 있다.
- 현 간빙기의 최초기인 약 11,000~10,000년 전까지는 마지막 해빙기의 연장에 해당하며 해빙기에 비해 변화율이 상대적으로 낮지만 지속적인 온도 상승이 발생한 시기이다. 북반구의 여러 산악지역에 있는 빙하는 지난 약 10,000~5,000년 사이에 지구궤도운동과 이에 의한 지역적인 온난화 현상 때문에 지속적으로 후퇴하였으며, 5,000년전 이전에는 현재에 비해 빙하의 크기가 훨씬 더 작았거나 혹은 거의 없었던 시기도 있었던 것으로 알려져 있다. 최근 기후모델 연구에서 중요한 요인으로 평가되고 있는 수문학적 변화(hydrological change)와 관련하여 열대 및 아열대 지역의 몬순은 약 8,000~7,000년 전에 최대치를 보였던 것으로 보고되었다.
- 기후 및 식생복원을 위한 수치모델들은 아한대 북방 수목한계선(boreal treeline)이 현 간빙기 전기의 온난화에 의해 현재에 비해 고위도 지역으로 이동했다는 사실을 보여준다. 이외의 고기후 기록도 이러한 북방 수목한계선의 이동이 온난화를 더욱 촉진하는 방향으로 유도했다는 점을 제시하고 있다. 대순환모델(General Circulation Models; GCMs)의 결과에 의하면 홀로세 중기 즉, 약 6,000년전에는 전 지구 평균기온은 지역에 따라 현재에 비해 약 2~3도 가량 높았던 것으로 보고되었으며, 고기후 프록시 연구결과에 의하면 전기 및 중기에 비해 말기로 진행되면서 지역적으로 큰 편차가 있으나 전반적으로 기온과 강수량의 감소가 진행된 것으로 알려져 있다.
- 지역적으로 발생한 열대지역의 태풍, 홍수, 수십 년 단위의 가뭄, 아프리카/아시아 여름 몬순의 강도와 같은 10~100년 규모의 급격한 기후현상은 지난 10,000년 동안에도 지속적으로 일어났을 가능성이 매우 높다. 해수면 변화의 경우 기후변화와는 다소 다른 양상을 보이고 프록시 기록과 지역에 따라 그 결과가 다르게 보고되고 있으나, 전반적으로 약 11,000~6,000년전까지는 점진적인 해수면 상승이 보고되어 왔으며, 이후 현재의 해수면과 유사한 수준으로 유지된 것으로 알려져 있다.

- 인간간섭으로 인해 진행되고 있는 것으로 받아들여지고 있는 지난 200년 내 현재의 지구온난화의 경우 현 간빙기 내에서는 전례를 찾아볼 수 없는 온실가스 농도를 나타내고 있으며, 가장 빠른 기온 상승률을 기록하고 있다. 이에 따라 해수면 상승과 극지 빙하 후퇴가 급격하게 발생되고 있는 시기이다.

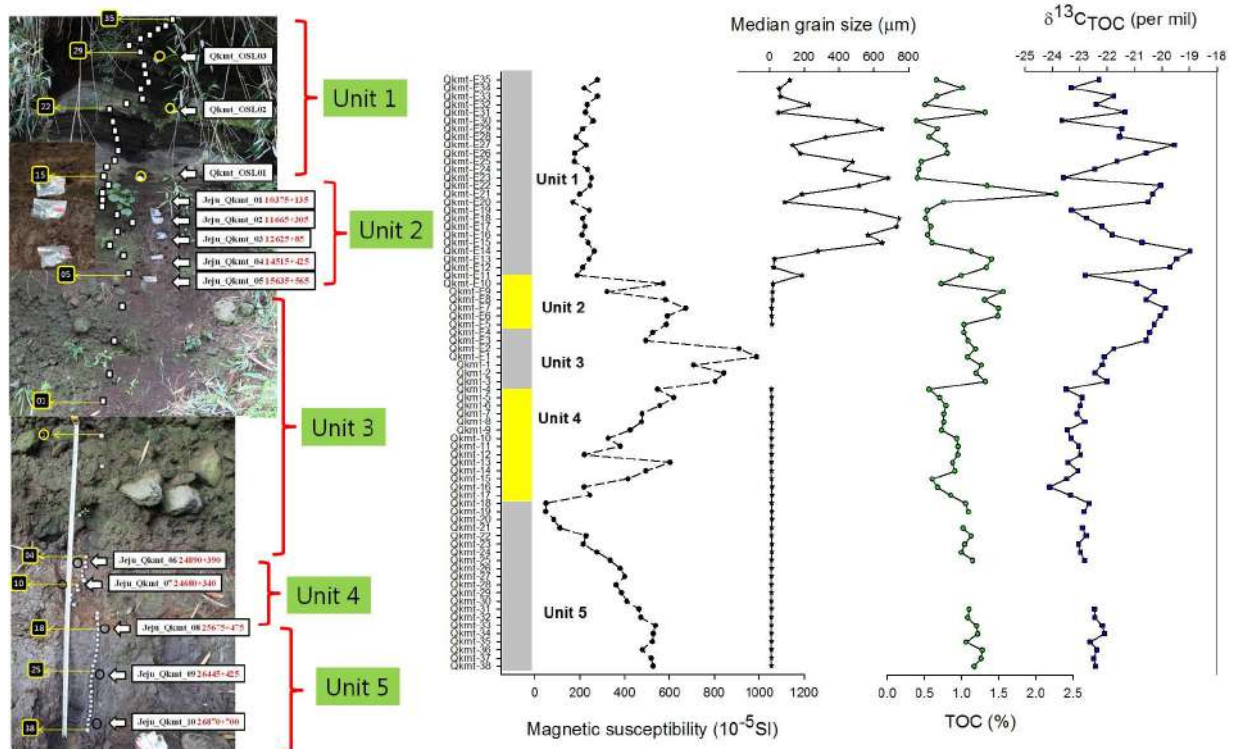


<그림 101> 그린란드와 캐나다 북극지역 빙하코어로부터 분석된 산소동위원소 기록 (From Fisher and Koerner, 2002).

4. 제주도 제4기퇴적층의 휴지기 고환경 변화

- 거문덕이 퇴적층의 형성과 관련된 고환경 변화는 연대분석 결과와 지화학 분석 결과의 해석을 통해서 추정될 수 있다. Unit 5과 Unit 4는 후기 플라이스토세 중에서 최후빙기에 해당되는 26,900~24,900년 전에 형성되었다. Unit 3은 각력암층으로 약 24,900년과 15,640년 전 사이에 유수에 의해서 운반되어 쌓인 것으로 추정된다. Unit 2는 약 15640~10400년 전에 쌓인 퇴적층이며, Unit 1은 최대 1만 년 전에 형성된 응회암임을 알 수 있다. 이러한 Unit들이 형성된 당시의 환경은 유기탄소 동위원소 값의 변화를 통해서 엿볼 수 있다. 유기탄소 동위원소 값은 그 당시 육상식물들의 분포에 대한 정보를 제공한다.
- 탄소고정 방법에 따라서 육상 식물을 크게 C3식물과 C4식물로 나눌 수 있으며, 이러한 식물의 탄소동위원소비 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$)는 큰 차이를 나타낸다. 일반적으로 수목에 해당되는 C3식물은 -32‰ 에서 -21‰ 의 범위를 가지며 평균값은 약 -27‰ 이다. 주로 잡초류로 구성된 C4식물의 경우는 -17‰ 에서 -9‰ 의 변동폭을 가지며 평균은 약 -13‰ 의 값을 가진다 (O'Leary, 1981, 1988; Tieszen, 1991; Meyers, 1997). 이러한 식물의 탄소동위원소 값은 퇴적 후 그 값이 크게 변하지 않기에 퇴적물 속에 포함된 유기 탄소동위원소 값은 과거에 분포했었던 식생에 대한 귀한 정보를 제공하게 된다(Meyers, 1997; An et al., 2005). 일반적으로 대기 중 탄소 농도가 낮을 때 C3식물보다 C4식물이 더 잘 자라며, 또 C4 식물은 C3식물에 비해 수분 활용(water-use efficiency) 기능이 뛰어나기 때문에 건조한 기후에 강한 것으로 알려져 있지만 (Cerling et al., 1997; Collatz et al., 1998; Schefuß et al., 2003; Zhang et al., 2003; Huang et al., 2006), Huang et al. (2001)은 이러한 식생의 생리적인 반응과 더불어 그 당시의 기후변화 즉 온도, 강수량, 건조도, 계절성 강우 등의 변동이 지역에 따라 크게 영향을 미친다고 보고하였다.
- 강남기와 이성규(1983a)에 따르면, 현재 우리나라에 생육하고 있는 C4식물은 포아과 67종, 사초과 2종, 비름과 7종, 대극과 3종, 명아주과 9종, 쇠비름과 2종, 돌나물과 2종 및 남가새과 1종 등으로 7과 92종이 분포하고 있다. 한국의 C3식물과 C4식물의 분포에 대해서는 이들의 분포가 위도와는 관계없이 지역의 생육조건에 따라 많은 영향을 받고 있다는 것이 밝혀졌으며, 비교적 온도가 높고 건조한 지대에서 C4식물의 비율이 높았고, 수분이 많거나 삼림이 발달된 곳에서는 C4식물의 비율이 낮은 것으로 보고되었다 (강남기와 이성규, 1983b). 예를 들어 철원지역의 야초지에서는 새(*Arundinella hirta*)와 억새(*Miscanthus sinensis*)를 주요한 종으로 하는 C4식물이 32~42%의 점유율을 보였다. 공주 지역에 있는 한 야초지

(grassland)에서는 새(*A. hirta*), 개억새(*Eulia speciosa*), 억새(*Miscanthus sinensis* var. *purpurascens*), 큰기름새(*Spodiopogon sibiricus*) 등으로 구성된 C4식물이 14%의 점유율을 보였다. 제주도의 야초지에서는 새(*A. hirta*), 개솔새(*Cymbopogon tortillis*), 개억새(*E. speciosa*), 억새(*Miscanthus sinensis* var. *purpurascens*), 귀꼬리새(*Muhlenbergia japonica*), 솔새(*Themada japonicus*) 등으로 구성된 C4식물의 점유율이 10-20%를 차지하고 있다고 보고되었다. 이러한 일련의 연구 결과는 C4식물의 분포(또는 지표 점유율)가 특정 지역의 건조도 영향을 많이 받고 있음을 나타낸다고 할 수 있겠다. 따라서 과거의 C4식물 분포 또는 C4식물의 지표 점유율은 그 당시의 건조도의 영향으로 판단된다.

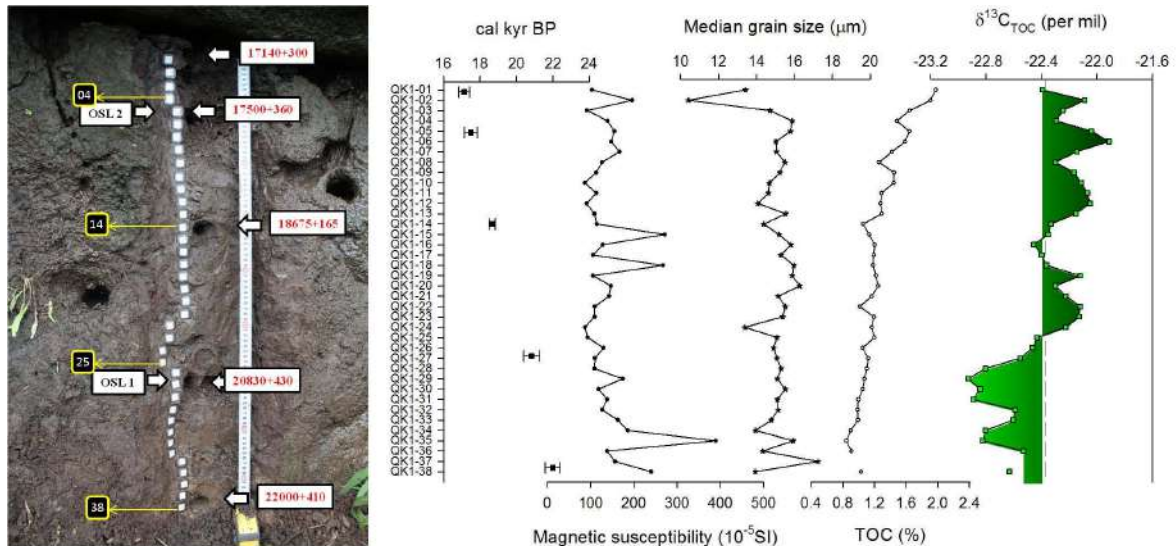


<그림 102> 거문덕이 퇴적층에서의 대자율(Magnetic susceptibility), 입도(Median grain size), 유기탄소 함유량(TOC%), 유기탄소 동위원소($\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$)분석 결과

- 거문덕이 퇴적층의 유기탄소 동위원소 값의 변화를 보면 Unit 5와 Unit 4에 걸쳐서 탄소 동위원소 값이 -22.5 ‰에서 -23.5 ‰로 소폭 감소하는 것을 보여준다. 먼저 이러한 탄소동위원소 값들은 거문덕이 연구지역에서 과거 약 27,000~24,900 cal. yr BP 동안 C3 식물이 C4 식물보다 더 많이 우점하고 있었음을 보여준다. 또한 이 시기에 C3 식물의 점유율이 증가하였으며, 이것은 이시기 동안의 건조도가 감소하였음을 시사한다. 최종빙기를 지나 해빙기에 포함되는 Unit 2의 탄소동위원소 값은 상당히 증가한 값인 -21~-20 ‰의 값을 보여준다. 이러한 증가는 최

중빙기에 속하는 Unit 5와 Unit 4와 비교할 때 해빙기에 포함되는 Unit 2 기간 (15,640~10,400 cal yr BP) 동안 C4 식물이 증가하였으며, 상대적으로 기후가 온도가 상승하면서 건조하게 되었다는 것을 의미한다. 또한 최상부층에 나타나는 거문덕이 응회암층의 형성은 최대 1만년 전 간빙기 시작에 해당되는 홀로세 초기에 이루어졌을 것으로 추정된다.

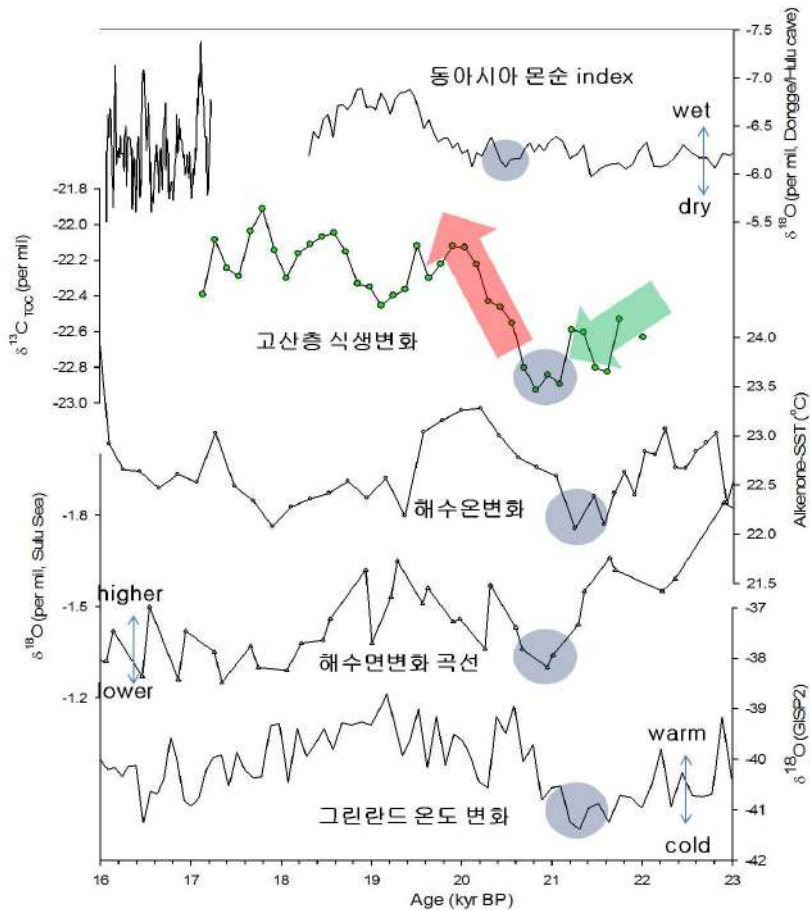
- 당산봉 응회암층 밑에 나타나는 고산층의 연대측정 결과는 상부로부터 17,140±300 cal. yr BP, 17,500±360 cal. yr BP, 18,675±165 cal. yr BP, 20,830±430 cal. yr BP, 22,000±400 cal. yr BP으로 하부에서 상부로 갈수록 최근의 연대로 순차적으로 퇴적된 퇴적층임을 보여준다. 따라서 고산층 시료로부터 분석된 탄소동위원소 값의 변화는 과거 22,000~17,000 cal yr BP 기간에 해당되는 약 5000년 동안의 환경변화에 대한 정보를 제공할 수 있다.



<그림 103> 고산층에서의 연대측정, 대자율(Magnetic susceptibility), 입도(Median grain size), 유기탄소 함유량(TOC%), 유기탄소 동위원소($\delta^{13}C_{TOC}$)분석 결과

- 고산층에 기록된 탄소동위원소 값의 가장 큰 변화는 약 21,000 cal yr BP 전후로 나타나는데, 탄소동위원소 값이 감소하다가 이때를 기점으로 증가추세로 바뀐다. 즉 C4식물이 감소하다가 이때를 지나면서 점진적으로 증가하게 된다. 유기탄소 동위원소 값의 변화를 야기한 요인을 찾기 위해서 여러 지역에서 복원된 기후/환경 지시자와 비교해 보았다.
- 고산층의 기록과 동아시아지역의 동아시아 몬순변화와의 비교를 보면, 정확한 관련성을 찾기가 어렵다. 오히려 고산층에 기록된 탄소동위원소 값의 변화는 해수면 변화와 해수면 변화에 더 크게 영향을 받은 것으로 보인다. 21,000 cal yr BP 이

전까지는 해수면이 감소하다가 이때를 지나면서 해수면이 상승하는 것을 알 수 있다. 또한 해수온 변화도 비슷한 양상을 보인다. 약 21,000 cal yr BP 이후로 해수온의 상승과 함께 C4 식물의 지표 점유율이 증가하는 것으로 나타난다. 이것은 제주도에서의 과거 환경 및 기후변화가 해양성 기후인자에 민감하게 반응하고 있는 것을 해석될 가능성이 있다.



<그림 104> 고산층의 탄소동위원소 값의 변화와 다른 지역에서 복원된 환경지시자와의 비교. 동아시아몬순 index (Wang et al., 2001; Dykoski et al., 2005), 해수면 변동 (또는 대륙 빙하량) 복원(Linsley, 1996), 해수온 변화 (Alkenone-SST record from the middle Okinawa Trough, Yu et al., 2010).

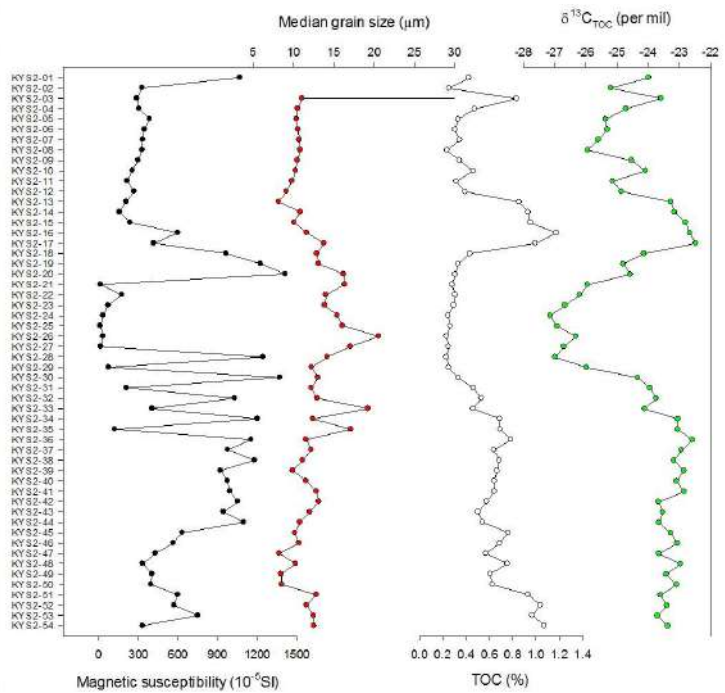
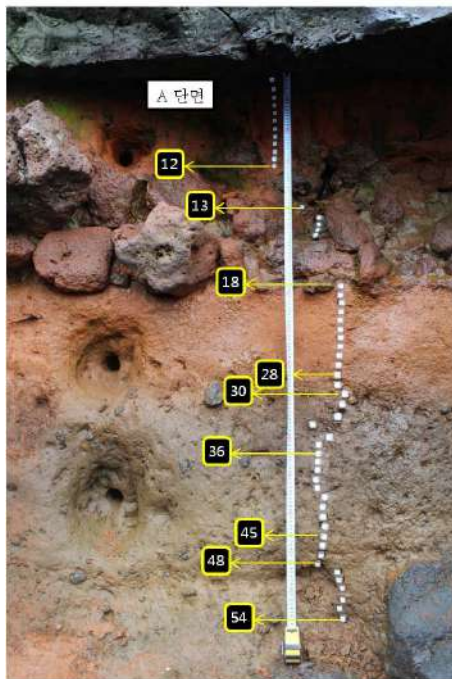
- 또한 고산층의 환경변화는 고위도 기후변화를 보여주는 그린란드 빙상코어의 산소동위원소 값의 변화와도 상당히 유사함을 알 수 있다. 빙상코어의 산소동위원소 값이 낮을 때 즉 고위도의 기온이 낮을 때 고산층에서도 C4 식물의 점유율이 최소값을 나타내고 있으며, 21,000 cal yr BP 이후 고위도의 기온이 증가함에 따라 C4 식물의 점유율이 증가하였다. 이러한 사실로 미루어볼 때 제주도의 기후변화는 고

위도 내륙과 저위도 해양과의 원격상관에 의해서 영향을 받아 변해왔을 것으로 생각된다.

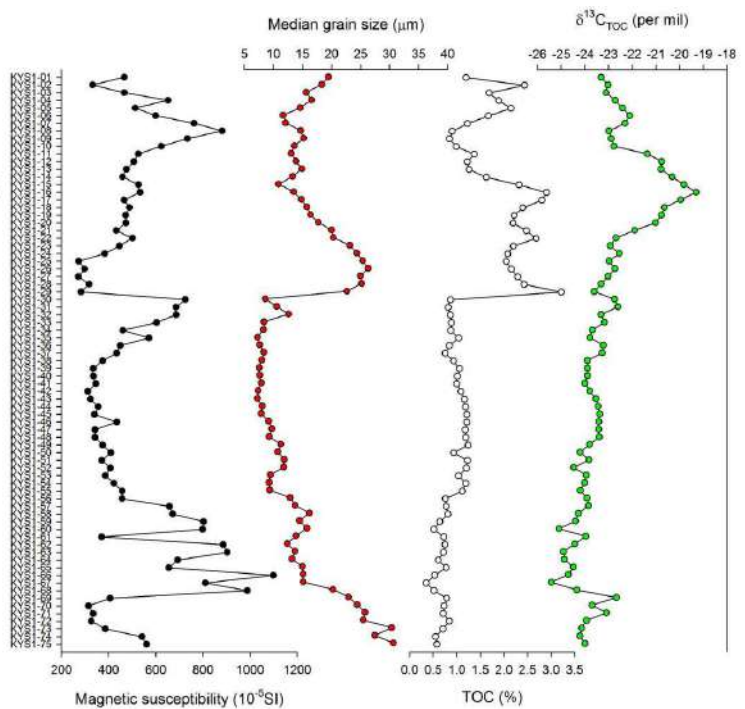
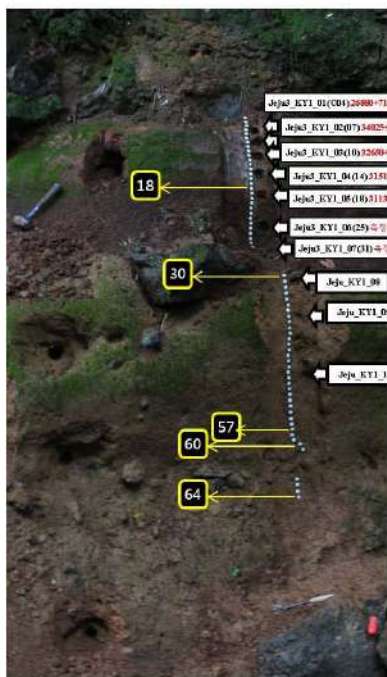
- 상창리 미고화 퇴적층 상하부의 현무암질 화산암의 분출 시기는 암석연대 분석방식으로는 확인하기 어렵지만, 미고화 퇴적층에서 분석된 절대 연대를 통하여 유추할 수 있다. 상창리 일대 현무암 사이의 미고화 퇴적층에서 탄화된 목편과 토양시료에 대한 탄소연대측정과 OSL 연대측정을 수행한 결과 미고화 퇴적층의 형성 시기는 약 5,000 년 전(cal. yr BP)으로 확인되었다.
- 미고화 퇴적층 상부에 퇴적된 현무암은 이보다 후기에 분출된 화산활동의 결과물으로써 지금까지 보고된 제주도 내륙의 용암분출을 동반한 화산활동 시기보다 훨씬 더 최근까지 제주도 내륙에서 화산활동이 진행되었음을 지시한다.
- 특히 상창리 퇴적층의 절대연대 측정결과가 갖는 중요한 의미는 현무암 사이에 협재된 미고화 퇴적층의 연대측정을 통하여 2 만년 이내의 화산활동에 대한 시기구명이 가능하다는 것이다.



<그림 105> 교래교(물장울교) 퇴적층의 형성시기 검토 결과



<그림 106> 교래교에서의 연대측정, 대자율(Magnetic susceptibility), 입도(Median grain size), 유기탄소 함유량(TOC%), 유기탄소 동위원소($\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$)분석 결과



<그림 107> 물장울교에서의 연대측정, 대자율(Magnetic susceptibility), 입도(Median grain size), 유기탄소 함유량(TOC%), 유기탄소 동위원소($\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$)분석 결과

제 5 장 연구 결과의 활용계획

- 본 연구에서 검토된 제주도의 제4기퇴적층은 기존의 지질조사과정에서 조사된 지역과 본 연구 과정에서 새롭게 확인된 조사지역에 대한 연구결과를 포함한다. 이러한 연구결과와 가장 중요한 시사점은 제주도의 제4기퇴적층에 대한 연구가 아직까지 매우 초보적이거나 미진하여 제4기퇴적층의 형성환경과 시기에 대해 논의가 진전되기 위해서는 보다 많은 연구가 선행되어야 한다는 점이다.
- 특히 제주도의 형성시기부터 현재에 이르기까지의 기간은 제4기(Quaternary)에 해당되며 이 시기는 지질학적으로 급격한 환경의 변화를 동반하는 시기이다. 때문에 제주도의 연구는 기후환경의 변화와 관련한 접근이 매우 중요한데, 이러한 기록은 제주도에 분포하는 제4기퇴적층에서 찾을 수 있다.
- 따라서 지금까지 알려진 암석학적 연구와 더불어 제4기 동안의 제주도에서 일어나는 환경의 변화, 즉 기후 변화에 대한 연구가 필수적으로 요구된다. 이러한 점을 고려할 때 아래와 같은 연구결과와 활용이 기대된다.
 - 현재까지 알려진 화산활동의 최후기에 대한 연구를 발전시킬 수 있다.
 - 제주도의 제4기 후기 동안에 일어난 화산활동과 관련한 퇴적층의 기록을 통해 화산활동 휴지기 동안의 고환경 변화에 대한 정보를 제공할 수 있다.
 - 제주도의 퇴적층에 대한 다양한 연대 분석 방식을 활용할 수 있다.
 - 제주도의 환경 변화 해석에 필요한 다양한 프록시를 활용할 수 있다.
- 향후 본 연구결과를 통해 제주도에 분포하는 제4기퇴적층에 대한 추가적인 조사와 특히, 오름 등의 분출시기 분석 등은 제주도의 화산활동과 미래 제주의 안전을 위하여 매우 중요한 연구주제로 다루어질 필요가 있겠다.

제 6 장 참고문헌

- Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E.M., Sohn, Y.K. and Németh, K., 2010, Mechanisms driving polymagmatic activity at a monogenetic volcano, Udo, Jeju Island, South Korea. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160, 931–950.
- Cas, R.A.F. and Wright, J.V., 1987, *Volcanic Successions*. Allen and Unwin, London, 528 p.
- Cerling, T.E., Harris, J.M., MacFadden, B.J., Leakey, M.G., Quade, J., Eisenmann, V., and Ehleringer, J.M., 1997. Global vegetation change through the Miocene/Pliocene boundary. *Nature* 389, 153–158.
- Chang, N.-K. and Lee, S.-K., 1983a. Studies on the Classification, Productivity and Distribution of C3, C4 and CAM Plants in Vegetations of Korea I. C3 and C4 type plants. *Korean Journal of Ecology* 6, 62–69.
- Chang, N.-K. and Lee, S.-K., 1983a. Studies on the Classification, Productivity and Distribution of C3, C4 and CAM Plants in Vegetations of Korea III. The distribution of C3 and C4 type plants. *Korean Journal of Ecology* 6, 128–141.
- Cheong, C.S., Choi, J.H., Sohn Y.K., Kim, J.C., and Jeong, G.Y., 2007, Optical dating of hydromagmatic volcanoes on the southwestern coast of jeju Island. Korea. *Quaternary Geochronology*, 2, 266–271.
- Cheong, C.S., Choi, J.H., Sohn, Y.K., Kim, J.C. and Jeong, G.Y., 2007, Optical dating of hydromagmatic volcanoes on the southwestern coast of Jeju Island, Korea. 2, 266–271.
- Cheong, C.-S., Jeong, Y.-J, Sohn, Y.K., Choi, M.S. and Park, B.-K., 2006, Introduction to sample preparation and thermal ionization mass spectrometry for ^{238}U – ^{230}Th dating of Quaternary volcanic rocks. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 455–465 (in Korean with English abstract).
- Cho, D.Y., Park, K-H., Jin, J.H. and Hong, W., 2005, Age Constraints on Human Footmarks in Hamori Formation, Jeju Island. Korea. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, v.14, p. 149–156 (in Korean with English abstract).

- Collatz, G.J., Berry, J.A., Clark, J.S., 1998. Effect of climate and atmospheric CO₂ partial pressure on the global distribution of C₄ grasses: present, past, and future. *Oecologia* 114, 441–454.
- Dykoski, C.A., Edwards, R.L., Cheng, H., Yuan, D., Cai, Y., Zhang, M., Lin, Y., Qing, J., An, Z., Revenaugh, J., 2005. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. *Earth and Planetary Science Letters* 233, 71–86.
- Fisher, D.A. and Koerner, R.M., 2002. Holocene ice core climate history: a multi-variable approach. In: Mackay, A.W., Battarbee, R.W., Birks, H.J.B. and Oldfield, F. (eds.), *Global Change in the Holocene: approaches to reconstructing fine-resolution climate change*. Arnold, London.
- Fornaciai, A., Favalli, M., Karaton, D., Tarquini, S. and Boschi, E., 2012, Morphometry of scoria cones, and their relation to geodynamic setting: A DEM-based analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 217–218, 56–72.
- Gatti, E., Mokhtar, S., Talib, K., Rashidi, N., Gibbard, P. and Oppenheimer, C., 2013, Depositional processes of reworked tephra from the late pleistocene youngest Toba tuff deposits in the Lenggong valley, Malaysia. *Quaternary Research*, 79, 228–241.
- Haraguchi, K., 1931, Geology of Saishu (Jeju) Island. *Bulletin of Geological Survey of Korea*. 10, 1–34 (in Japanese).
- Huang, Y., Shuman, B., Wang, Y., Webb, T., Grimm, E.C., Jacobson, G.L., 2006. Climatic and environmental controls on the variation of C₃ and C₄ plant abundances in central Florida for the past 62,000 years. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeocology* 237, 428–435.
- Huang, Y., Street-Perrott, F.A., Metcalfe, S.E., Brenner, M., Moreland, M., and Freeman, K.H., 2001, Climate change as the dominant control on glacial–interglacial variations in C₃ and C₄ plant abundance. *Science* 293, 1647–1651.
- Jaccard, S.L. and Galbraith, E.D., 2012. Large climate-driven changes of oceanic oxygen concentrations during the last deglaciation. *Nature Geoscience* 5, 151–156.
- Jansen, E., Overpeck, J., Briffa, K.R., Duplessy, J.-C., Joos, F., Masson

- Delmotte, V., Olago, D., Otto–Bliesner, B., Peltier, W.R., Rahmstorf, S., Ramesh, R., Raynaud, D., Rind, D., Solomina, O., Villalba, R. and Zhang, D., 2007. Paleoclimate. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. and Miller, H.L. (eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jo, K., Woo, K.S., Yi, S., Yang, D.Y., Lim, H.S., Wang, Y., Cheng, H., Edwards, R.L., 2014. Mid–latitude interhemispheric hydrologic seesaw over the past 550,000 years. *Nature* 508, 378–382.
- Kim, K.H., Tanaka, T., Suzuki, K., Nagao, K. and Park, E.J., 2002, Evidence of the presence of old continental basement in Cheju volcanic island, South Korea, re– vealed by radiometric ages and Nd–Sr isotopes of gran– itic rocks. *Geochemical Journal*, 36, 421–441.
- Kim, Y.S. and Choi, S.H., 2012, Plagioclase–rich nodules in Taeheungri basalt from Namwon, Jeju Island and its implications for tholeiitic magmatism. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48, 313–324 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W. and Park, J.–B., 2010a, The Study on Geology and Volcanism in Jeju Island (II): Petrochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Absolute ages of the Volcanic Rocks in Gapado–Marado, Jeju Island. *Economic and Environmental Geology*, 43, 53–66 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W. and Park, J.–B., 2010a, The Study on Geology and Volcanism in Jeju Island (II): Petrochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Absolute ages of the Volcanic Rocks in Gapado–Marado, Jeju Island. *Economic and Environmental Geology*, 43, 53–66 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W. and Park, J.B., 2010b, The study on geology and volcanism in Jeju Island (III): early lava effusion records in Jeju Island on the basis of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ absolute ages of lava samples. *Economic and Environmental Geology*, 43, 163–176 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W. and Park, J.B., 2010b, The study on geology and volcanism in

- Jeju Island (III): early lava effusion records in Jeju Island on the basis of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ absolute ages of lava samples. *Economic and Environmental Geology*, 43, 163–176 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W. and Park, J.B., Kang, B.-R., Kim, G.-P. and Moon, D.C., 2013, Volcanism in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*. 49, 209–230 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W., 1997, Characteristics of the groundwater and hydrogeologic implications of the Seoguipo Formation in Cheju Island. (unpublished Ph.D. thesis), Pusan National University, Pusan, 326 p (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W., Park, J.B. and Park, Y.S., 2008, The study on geology and volcanism in Jeju Island (I): Petrochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ absolute ages of the subsurface volcanic rock cores from boreholes in the eastern lowland of Jeju Island. *Economic and Environmental Geology*, 41, 93–113 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W., Park, J.B. and Park, Y.S., 2008, The study on geology and volcanism in Jeju Island (I): Petrochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ absolute ages of the subsurface volcanic rock cores from boreholes in the eastern lowland of Jeju Island. *Economic and Environmental Geology*, 41, 93–113 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W., Park, J.B., Kang, B.-R., Kim, K.-P. and Moon, D.C., 2013, Volcanism in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 209–230 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W., Park, K.H., Park, J.B. and Park, W.B., 2008, Interpretation on volcanic activities in Biyangdo, western Jeju Island. *Annual conference of the Geological Society of Korea (Abstracts)*, Jeju, 27–28 (in Korean, title translated).
- Koh, G.W., Park, Y.S. and Park, W.B., 2004, Subsurface stratigraphy and ^{40}Ar – ^{39}Ar absolute age in the eastern area of Jeju Island. *Volcanic rocks and Volcanic activities in Jeju Island. Field Trip Guide, Spring Excursion of the Geological Society of Korea*, Jeju, 29–50 (in Korean, title translated).

- Koh, J.-S., Yun, S.-H. and Hong, H.-C., 2005a, Morphology and petrology of Jisagae columnar joint on the Daepodong basalt in Jeju Island, Korea. Journal of Petrological Society of Korea, 14, 212-225 (in Korean with English abstract).
- Koh, J.S., Yun, S.H. and Kang, S.S., 2003, Petrology of the volcanic rocks in the Paekrogdam crater area, Mt. Halla, Jeju Island. Journal of Petrological Society of Korea, 12, 1-15 (in Korean with English abstract).
- Koh, J.-S., Yun, S.-H., Hyeon, G.B., Lee, M.W. and Gil, Y.-W., 2005, Petrology of the basalt in the Udo mono- genetic volcano, Jeju Island. Journal of Petrological Society of Korea, 14, 45-60 (in Korean with English abstract).
- Lee, D.Y., Yun, S.K., Kim, J.Y. and Kim, Y.J., 1988, Quaternary geology of the Jeju Island. Korea Institute Energy & Resources Rpt 87-29, 233-278 (in Korean).
- Lee, J.H. and Yun, S.H., 2012, Morphological analysis of Quaternary monogenetic volcanoes in Jeju island. Journal of the Geological Society of Korea, 48, 383-400 (in Korean with English abstract).
- Lee, M.W., 1982, Petrology and Petrochemistry of Jeju volcanic island, Korea. Sci Rep., Tohoku Univ., Ser., 315, 521-541.
- Lee, M.W., 1994, Formation History and geologic structures of Jeju Volcanic Island. Symposium of environ- mental conservation, development and use of ground- water resources in Jeju Island (Abstracts), Korean Society of Soil and Groundwater Environment, Jeju, 54-74 (in Korean, title translated).
- Lee, M.W., Won, C.K., Lee, D.Y., Park, G.H. and Kim, M.S., 1994, Stratigraphy and petrology of volcanic rocks in Southern Cheju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. 30, 521-541 (in Korean with English abstract).
- Lee, M.W., Won, J.K., Lee, D.Y., Park, G.H. and Kim, M.S., 1994, Stratigraphy petrology of volcanic rocks in southern Cheju island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 30, 521-541 (in Korean with English abstract).

- Lee, S.-K. and Chang, N.-K., 1983. Studies on the Classification, Productivity and Distribution of C3, C4 and CAM Plants in Vegetations of Korea II. Production and Productivity of C3 and C4 type plants. *Korean Journal of Ecology* 6, 114–127.
- Lim, J., Matsumoto, E. and Kitagawa, H., 2005, Eolian quartz flux variations in Cheju Island, Korea, during the last 6500 yr and a possible Sun–moon linkage. *Quaternary Research*, 64, 12–20.
- Lowe, D. J., 2011, Tephrochronology and its application: A review. *Quaternary Geochronology*, 6, 107–153.
- Manville, V., Németh, K. and Kano, K., 2009, Source to sink: A review of three decades of progress in the understanding of volcanoclastic processes, deposits, and hazards. *Sedimentary Geology*, 220, 136–161.
- Marques, R., Prudencio, M.I., Waerenborgh, J.C., Rocha, F., Dias, M.I., Ruiz, F., Ferreira da Silva, E., Abad, M. and Munro, A.M., 2014, Origin of reddening in a paleosol buried by lava flows in Fogo island(Cape Verde). *J. Afr. Earth Sci.* 96, 60–70.
- Meyers, P.A., 1997. Organic geochemical proxies of palaeoceanographic, palaeolimnologic, and palaeoclimatic processes. *Organic Geochemistry* 27, 213–250.
- Németh, K., 2010, Mechanisms driving polymagmatic activity at a monogenetic volcano, Udo, Jeju Island, South Korea. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160, 931–950.
- O`Leary, M.H., 1981. Carbon isotope fractionation in plants. *Phytochemistry* 20, 553–567.
- O`Leary, M.H., 1988. Carbon isotopes in photosynthesis. *BioScience* 38, 328–335.
- Oh, J., Yi, S., Yoon, S., Koh, G.W., Yun, H. and Lee, J.-D., 2000, Subsurface stratigraphy of Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 36, 181–194 (in Korean with English abstract).
- Oh, J., Yi, S.Y., Koh, G.W., Yun, H., and Lee, J.-D., 2000, Subsurface stratigraphy of Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 36, 181–194 (in Korean with English abstract).

- Park, J.B. and Kwon, S.T., 1996, Tholeiitic volcanism in Cheju Island, Korea. 5, 66–83 Journal of Petrological Society of Korea, 5, 66–83 (in Korean with English abstract).
- Park, J.B., Park, K.H. and Cheong, C.S., 1996, Sr–Nd–Pb Isotopic compositions of lavas from Cheju Island, Korea. Journal of Petrological Society of Korea, 5, 66–83 (in Korean with English abstract).
- Park, J.B., Park, K.H., Cho, D.L. and Koh, G.W., 1999, Petrochemical classification of the Quaternary volcanic rocks in Cheju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 35, 253–264 (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Cho, D.L. and Kim, J.C., 2000, Geologic report of the Mosulpo–Hanrim Sheet (1:50,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 56 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Cho, D.L. and Kim, J.C., 2000a, Geologic report of the Mosulpo–Hanrim Sheet (1:50,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 56 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Cho, D.L., Kim, Y.B., Kim, J.-C., Cho, B.-W., Jang, Y.N., Lee, B.-J., Lee, S.-R., Son, B.K., Cheon, H.Y., Lee, H.Y. and Kim, Y.U., 2000, Geologic report of the Segwipo–Hahyori Sheet (1:50,000). Jeju Provincial Government, 163 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Cho, D.L., Kim, Y.B., Kim, J.-C., Cho, B.-W., Jang, Y.N., Lee, B.-J., Lee, S.-R., Son, B.K., Cheon, H.Y., Lee, H.Y. and Kim, Y.U., 2000b, Geologic report of the Segwipo–Hahyori Sheet (1:50,000). Jeju Provincial Government, 163 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Koh, D.C., Kim, Y.C., Moon, S.H., Seong, K.S., Shin, J.H., Yum, B.U., Jeon, C.M., Chae, K.T., Hwang, S.H., Kim, G.Y., Kim, Y.J., Kim, T.H., Park, I.H., Park, K.K., Ahn, J.S., Lee, B.J., Cho, S.Y. and Ha, K.C., 2008, Integrated analysis of groundwater occurrence in Jeju. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, GP2007–009–04–2008(2), 365 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Lee, B.J., Cho, D.L., Kim, J.C., Lee, S.R., Choi, H.I., Hwang, J.H., Song, G.Y., Choi, B.Y., Cho, B.U. and Kim, Y.B., 1998, Geologic report of

- the Jeju–Aewol Sheet (1:50,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 290 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Lee, B.J., Cho, D.L., Kim, J.C., Lee, S.R., Choi, H.I., Hwang, J.H., Song, G.Y., Choi, B.Y., Cho, B.U. and Kim, Y.B., 1998, Geologic report of the Jeju–Aewol Sheet (1:50,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 290 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Lee, B.J., Kim, J.C., Cho, D.L., Lee, S.R., Park, D.W., Lee, S.R., Choi, Y.S., Yeum, D.Y., Kim, J.Y., Seo, J.Y. and Shin, H.M., 2000c, Geologic report of the Jeju (including Baekado–Jinnampo) Sheet (1:250,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 59 p (in Korean with English abstract).
- Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N.I., Barnola, J.–M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, M., Delaygue, G, Delmotte, M., Kotlyakov, V.M., Legrand, M., Lipenkov, V.Y., Lorius, C., PÉpin, L., Ritz, C., Saltzman, E. and Stievenard, M., 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399, 429–436.
- Riedel, C., Ernst, G.G.J. and Riley, M., 2003, Controls on the growth and geometry of pyroclastic constructs. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 127, 121–152.
- Risebrobakken, B., Dokken, T.M. and Jansen, E., 2005. Extent and variability of the meridional Atlantic circulation in the eastern Nordic seas during marine isotope stage 5 and its influence on the inception of the last glacial. In: Drange, H., et al. (eds.), *The Nordic Seas: An Integrated Perspective*. Geophysical Monographs Vol. 158, American Geophysical Union, Washington, DC, USA.
- Rodriguez–Gonzalez, A., Fernandez–Turiel, J.L., Perez–Torrado, F.J., Hansen, A., Aulinas, M., Carracedo, J. C., Gimeno, D., Guillou, H., Paris, R. and Paterne, M., 2009, The Holocene volcanic history of Gran Canaria island: Implications for volcanic hazards. *Journal of Quaternary Science*, 24, 697–709.
- Sameshima, T., Ogawa, T. and Kashima, N. (1988) 5th International

- Symposium on Vulcanospeleology Excursion Guide Book, Tokyo, Japan, 80p.
- Settle, M., 1979, The structure and emplacement of cinder cone fields. American Journal of Science, 279, 1089–1107.
- Sohn, Y. K. and Park, K.H., 2004, Early-stage volcanism and sedimentation of Jeju Island revealed by the Sagye borehole, SW Jeju Island. Korea. Geosciences Journal, 8, 73–84.
- Sohn, Y.K., Park, J.B., Khim, B.K., Park, K.H. and Koh, G.W., 2002, Stratigraphy, petrochemistry and Quaternary depositional record of the Songaksan tuff ring, Jeju Island, Korea. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 119, 1–20.
- Sohn, Y.K., Park, J.B., Khim, B.K., Park, K.H. and Koh, G.W., 2002, Stratigraphy, petrochemistry and Quaternary depositional record of the Songaksan tuff ring, Jeju Island. Korea. J. Volcanol. Geoth. Res., 19, 1–20.
- Sohn, Y.K., Park, K.H. and Yoon, S.H., 2008, Primary versus secondary and subaerial versus submarine hydrovolcanic deposits in the subsurface of Jeju Island, Korea. Sedimentology, 55, 899–924.
- Son, I.S., Lee, M.W. and Youn, J.S., 1998, The subsurface stratigraphy of Cheju volcanic island, Korea. Journal of the Korean Earth Science Society, 19, 581–589 (in Korean with English abstract).
- Song, S.T., 2000, Distributions and Lithology of the Aa Rubble Flows in Cheju Island, Korea. PhD dissertation, department of geology, graduate School, Pusan National University, 118p.
- Song, S.T., 2003, Lavas in Gotjawal Terrain, Jeju Island, Korea No. 4. Byeongak Gotjawal Lava. The journal of basic sciences Cheju national university, 16, 57–63 (in Korean with English abstract).
- Suchodoletz, H.v., Blanchard, H., Hilgers, A., Radtke, U., Fuchs, M., Dietze M. and Zöller, L., 2012, TL and ESR dating of middle pleistocene lava flows on Lanzarote island, Canary islands (Spain). Quaternary Geochronology, 9, 54–64.
- Tieszen, L.L., 1991, Natural variations in the carbon isotope values of

- plants: Implications for archaeology, ecology, and paleoecology: *Journal of Archaeological Science* 18, 227–248.
- Valentine, G.A. and Gregg, T.K.P., 2008, Continental basaltic volcanoes—processes and problems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177, 857–873.
- Waelbroeck, C., Labeyrie, L., Michel, E., Duplessy, J.C., McManus, J.F., Lambeck, K., Balbon, E. and Labracherie, M., 2002. Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records. *Quaternary Science Reviews* 21, 295–305.
- Wang, Y.J., Cheng, H., Edwards, R.L., An, Z.S., Wu, J.Y., Chen, C.-C., Dorale, J.A., 2001. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science* 294, 2345–2348.
- Won, C.K., 1976, Study of petrochemistry of volcanic rocks in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 12, 207–226 (in Korean with English abstract).
- Won, C.K., Lee, M.W., Lee, D.Y. and Sohn, Y.K., 1993, Explanatory text of the geological map of Sungsan Sheet (1:50,000), Ministry of Construction, Jeju Provincial Government and Korea Water Resources Corporation, 104 p (in Korean, title translated).
- Won, C.-K., Lee, M.-W., Yun, S.-H. and Ko, B.-K., 1998, Geochemical Characteristics of the volcanic rocks in Pyoseon Area, Southeast Cheju, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 34, 172–191 (in Korean with English abstract).
- Won, J.K., Matsuda, J., Nagao, K., Kim, K.H. and Lee, M.W., 1986, Paleomagnetism and radiometric age of trachytes in Jeju island, Korea. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 19, 25–33.
- Yokoyama, Y., Lambeck, K., De Deckker, P., Johnston, P. and Fifield, L.K., 2000. Timing of the Last Glacial Maximum from observed sea-level minima. *Nature* 406, 713–716.
- Yoon, S., Hyun, W.H. and Jung, C.Y., 2005, Geology of Hallasan (Mt. Halla), Jeju Island, *Journal of the Geological Society of Korea*. 41, 481–497 (in Korean with English abstract).

- Yoon, S.-H., Lee, B.-G. and Shon, Y.K., 2006, Geomorphic and geological characteristics and eruption process of the Hanon volcano, Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 19–30 (in Korean with English abstract).
- Yu, H., Liu, Z., Berné, S., Jia, G., Xiong, Y., Dickens, G.R., Wei, X., Liu, J.P., Chen, F., 2009. Variations in temperature and salinity of the surface water above the middle Okinawa Trough during the past 37 kyr. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 281, 154–164.
- Yun, S.H., 2004, The volcanic sequences of Jeju volcano: General. The second international symposium of Jeju volcanological institute (Abstracts), Jeju, 17–29.
- Yun, S.K., Han, D.S. and Lee, D.Y., 1987, Quaternary geology in the southern part of Jeju Island. Korea Institute Energy & Resources Rpt KR-86-2-(B)-2, 64 p (in Korean).
- Yun, S.K., Han, D.S., and Lee, D.Y., 1987, Quaternary geology in the southern part of Jeju Island. Korea Institute Energy & Resources Rpt KR-86-2-(B)-2, 64 p (in Korean).

제 6 장

부 록

1. OSL 연대분석결과 표

Lab. No	Water Content (%) ^a	Depth (m)	Alpha dose (Gy/ka) ^b	Beta dose (Gy/ka)		Gamma dose (Gy/ka)	Cosmic dose (Gy/ka)	
				coarse grain	fine grain			
SC-OSL01	15.7 ± 5	3.5	0.40 ± 0.20	1.55 ± 0.09	1.76 ± 0.12	1.08 ± 0.07	0.13 ± 0.01	
SC-OSL02	9.8 ± 5	3.7	0.35 ± 0.18	1.16 ± 0.07	1.32 ± 0.10	0.89 ± 0.06	0.13 ± 0.01	
^a The water content is expressed as the weight of water divided by the weight of dry sediments.								
^b Alpha dose rate was calculated using an a-value of 0.04±0.02 (Ree-Jones, 1995).								
Lab. No	Dose rate (Gy/ka)		D _e (Gy)		No. of discs		Age (ka)	
	β+γ+cosmic	α+β+γ+cosmic	coarse quartz	fine quartz	coarse quartz	fine quartz	coarse quartz	fine quartz
SC-OSL01	2.76 ± 0.11	3.37	9.5 ± 0.3	10.1 ± 0.1	12/15	8/8	3.4 ± 0.2	3.0 ± 0.2
SC-OSL02	2.17 ± 0.09	2.69	10.6 ± 0.2	11.7 ± 0.2	15/15	8/8	4.9 ± 0.2	4.4 ± 0.4

Lab. No	Water Content (%)		Depth (cm)	Alpha (Gy/ka)		Beta (Gy/ka)		Gamma (Gy/ka)		Cosmic (Gy/ka)		Dose rate (Gy/ka)		D _e (Gy)		age (ka)	
교래 1-1	22.4	± 5	150	0.235	±0.119	0.599	±0.061	0.540	±0.035	0.165	±0.008	1.539	±0.138	63.31	± 7.56	41.1	± 6.15
교래 1-2	17.8	± 5	200	0.275	±0.139	1.050	±0.082	0.706	±0.045	0.155	±0.008	2.187	±0.167	69.26	± 4.00	31.7	± 3.04
교래 1-3	17.0	± 5	150	0.310	±0.157	1.618	±0.110	0.948	±0.057	0.165	±0.008	3.041	±0.200	89.40	± 3.24	29.4	± 2.21
교래 1-4	12.5	± 5	200	0.288	±0.145	1.552	±0.111	0.898	±0.056	0.155	±0.008	2.893	±0.191	94.78	± 2.45	32.8	± 2.32
Lab. No	Water Content (%)		Depth (cm)	Alpha (Gy/ka)		Beta (Gy/ka)		Gamma (Gy/ka)		Cosmic (Gy/ka)		Dose rate (Gy/ka)		D _e (Gy)		age (ka)	
교래 2-1	16.4	± 5	100	0.377	±0.190	1.621	±0.111	1.004	±0.060	0.176	±0.009	3.178	±0.228	42.06	± 0.50	13.2	± 0.96
교래 2-2	14.4	± 5	150	0.354	±0.178	1.522	±0.108	0.948	±0.058	0.165	±0.008	2.989	±0.216	45.89	± 0.32	15.4	± 1.12
교래 2-3	15.3	± 5	200	0.368	±0.186	1.692	±0.116	1.015	±0.062	0.155	±0.008	3.230	±0.227	46.24	± 2.44	14.3	± 1.26
Lab. No	Water Content (%)		Depth (cm)	Alpha (Gy/ka)		Beta (Gy/ka)		Gamma (Gy/ka)		Cosmic (Gy/ka)		Dose rate (Gy/ka)		D _e (Gy)		age (ka)	
SWB-01	3.2	± 5	100			1.278	±0.086	0.750	±0.051	0.176	±0.009	2.205	±0.100	38.12	± 1.75	17.3	± 1.12
SWB-02	3.5	± 5	100			0.866	±0.058	0.567	±0.041	0.176	±0.009	1.610	±0.072	32.38	± 3.11	20.1	± 2.13
SWB-03	16.1	± 5	100			0.755	±0.045	0.501	±0.034	0.176	±0.009	1.432	±0.057	45.78	± 3.71	32.0	± 2.89
SWB-04	15.4	± 5	100			1.210	±0.078	0.677	±0.045	0.176	±0.009	2.064	±0.090	38.65	± 4.51	18.7	± 2.33
SWB-05	7.1	± 5	100			1.232	±0.080	0.697	±0.047	0.176	±0.009	2.105	±0.093	45.40	± 2.97	21.6	± 1.70
SWB-06	6.3	± 5	100			1.238	±0.081	0.674	±0.046	0.176	±0.009	2.088	±0.093	52.15	± 2.83	25.0	± 1.75
SWB-07	18.0	± 5	100			1.197	±0.071	0.687	±0.043	0.176	±0.008	2.061	±0.083	51.14	± 5.36	24.8	± 2.79
SWB-08	7.6	± 5	100			1.333	±0.086	0.751	±0.050	0.176	±0.009	2.260	±0.100	31.43	± 1.27	13.9	± 0.83
SWB-09	9.7	± 5	100			1.453	±0.092	0.797	±0.051	0.176	±0.009	2.426	±0.106	104.54	± 12.18	43.1	± 5.36
GS-1	13.1	± 5	100	0.343	±0.173	1.527	±0.109	0.930	±0.058	0.176	±0.009	2.977	±0.213	55.81	± 0.71	18.8	± 1.36
GS-2	13.0	± 5	100	0.412	±0.208	1.910	±0.130	1.137	±0.069	0.176	±0.009	3.634	±0.255	72.42	± 0.95	19.9	± 1.42
GS-3	12.0	± 5	100	0.396	±0.200	1.836	±0.127	1.089	±0.067	0.176	±0.009	3.497	±0.246	92.39	± 1.19	26.4	± 1.89
Lab. No	Water Content (%)		Depth (cm)	Alpha (Gy/ka)		Beta (Gy/ka)		Gamma (Gy/ka)		Cosmic (Gy/ka)		Dose rate (Gy/ka)		D _e (Gy)		age (ka)	
달산봉 tuff 최하부	7.2	± 5	100			1.452	±0.094	0.845	±0.055	0.176	±0.009	2.473	±0.109	58.90	± 3.93	23.8	± 1.91
QK 1-2	15.4	± 5	150	0.229	±0.115	0.840	±0.074	0.576	±0.038	0.165	±0.008	1.810	±0.142	47.23	± 0.65	26.1	± 2.08
QK 1-1	12.4	± 5	200	0.311	±0.157	1.356	±0.101	0.843	±0.053	0.155	±0.008	2.665	±0.194	68.08	± 0.81	25.5	± 1.88

2. 방사성탄소연대 분석결과표

Sample ID	Material (method)	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	^{14}C ageyrBP	Calibrated age (2 σ range) Cal yr BP	Lab Code
Jeju_KY11	Humic(토양)	-14.4	28,190 $\pm$ 150	32,405 $\pm$ 635	ITg130,349
Jeju_KY12	AAA(식물편)	-18.5	8,200 $\pm$ 70	7,290 $\pm$ 130	ITg130,360
Jeju_KY13	Humic(토양)	-19.3	20,010 $\pm$ 130	23,910 $\pm$ 430	ITg130,350
Jeju_KY15	Humic(토양)	-24.8	29,080 $\pm$ 180	33,850 $\pm$ 650	ITg130,353
Jeju_KY16	Humic(토양)	-25	12,450 $\pm$ 60	14,582 $\pm$ 430	ITg130,389
Jeju_KY17	Humic(토양)	-18.9	22,210 $\pm$ 110	26,865 $\pm$ 695	ITg130,362
Jeju_KY18	Humic(토양)	-21.9	24,990 $\pm$ 160	29,870 $\pm$ 390	ITg130,367
Jeju_KY12_OSL_co	Humic(토양)	-22.4	27,710 $\pm$ 170	31,500 $\pm$ 350	ITg130,911
Jeju_KY13_OSL_CORE	Humic(토양)	-28.9	19,480 $\pm$ 130	23,450 $\pm$ 390	ITg130,914
Jeju_KY14(OS2)	Humic(토양)	-24.5	21,730 $\pm$ 150	26,125 $\pm$ 605	ITg130,352
Jeju_KY14_OSL_co	Humic(토양)	-27.5	18,050 $\pm$ 150	21,890 $\pm$ 420	ITg130,919
Jeju_KY21	Humic(토양)	-25.9	3,340 $\pm$ 40	3,580 $\pm$ 110	ITg130,363
Jeju_KY22	Humic(토양)	-22.2	6,830 $\pm$ 40	7,665 $\pm$ 85	ITg130,364
Jeju_KY24	Humic(토양)	-18.4	21,350 $\pm$ 100	25,505 $\pm$ 425	ITg130,365
Jeju_KY25	Humic(토양)	-16.2	22,500 $\pm$ 100	27,240 $\pm$ 530	ITg130,366
Jeju_KY23_OSL_co	Humic(토양)	-24.1	22,220 $\pm$ 110	26,475 $\pm$ 375	ITg130,918
Jeju_QbHs1	Humic(토양)	-21.1		modern	ITg130,385
Jeju_QbHs2	Humic(토양)	-24.9	15,360 $\pm$ 80	18,538 $\pm$ 301	ITg130,386
Jeju_QK1	Humic(토양)	-26.4	15,020 $\pm$ 60	18,279 $\pm$ 267	ITg130,388
Jeju_QK2	Humic(토양)	-23.8	14,820 $\pm$ 60	18,107 $\pm$ 400	ITg130,404
Jeju_QK11_OSL_co	Humic(토양)	-27.9	14,240 $\pm$ 70	17,335 $\pm$ 235	ITg130,917
Jeju_QK11_OSL_co	Humic(토양)	-24.8	17,590 $\pm$ 80	21,260 $\pm$ 290	ITg130,920
Jeju_QK12_OSL_co	Humic(토양)	-22	16,700 $\pm$ 70	20,160 $\pm$ 230	ITg130,909
Jeju_Qkmt1	AAA(식물편)	-19.3	10,300 $\pm$ 50	12,111 $\pm$ 277	ITg130,407
Jeju_Qkmt2	Humic(토양)	-20.8	8,240 $\pm$ 40	9,217 $\pm$ 183	ITg130,405
Jeju_Qkmt3	Humic(토양)	-25.6	20,940 $\pm$ 100	24,950 $\pm$ 429	ITg130,413
Jeju_Qkmt4	Humic(토양)	-20	970 $\pm$ 30	864 $\pm$ 69	ITg130,406
Jeju_Qkmt2_OSL	Humic(토양)	-21.5	9,220 $\pm$ 60	10,400 $\pm$ 160	ITg130,912
Jeju_Qkmt3_OSL	Humic(토양)	-20.5	9,270 $\pm$ 50	10,425 $\pm$ 155	ITg130,916
Jeju_QKS1	Humic(토양)	-28.1	21,770 $\pm$ 100	26,237 $\pm$ 453	ITg130,384
Jeju_QSK1	Humic(토양)	-14.5	9,400 $\pm$ 40	10,623 $\pm$ 103	ITg130,382
Jeju_QSK2	Humic(토양)	-19.9	19,630 $\pm$ 90	23,438 $\pm$ 407	ITg130,383
Jeju_Qssi1	Humic(토양)	7.5	7,920 $\pm$ 130	8,761 $\pm$ 330	ITg130,409
Jeju_QyUC01	Humic(토양)	-28.3	22,790 $\pm$ 110	27,110 $\pm$ 330	ITg130,929
Jeju_QyUC02	Humic(토양)	-26.3	8,390 $\pm$ 50	9,405 $\pm$ 115	ITg130,930

Sample ID	Material (method)	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	^{14}C ageyrBP	Calibrated age (2 σ range) Cal yr BP	Lab Code
Jeju_QyUC05	Humic(토양)	-28.4	20,040 $\pm$ 120	24,110 $\pm$ 320	ITg130,931
Jeju_QyUC06	Humic(토양)	-27	1,370 $\pm$ 30	1,305 $\pm$ 45	ITg130,932
Jeju_SECHLO_OSL_CORE	Humic(토양)	-23.8	6,510 $\pm$ 40	7,410 $\pm$ 90	ITg130,913
Jeju_SECHUP_OSL_core	Humic(토양)	-29.1	2,400 $\pm$ 50	2,525 $\pm$ 185	ITg130,910
Jeju3_KY101(C04)	Humic(토양)	-20.1	22,220 $\pm$ 130	26,880 $\pm$ 710	ITg130,548
Jeju3_KY102(C07)	Humic(토양)	-24.7	29,350 $\pm$ 140	34,025 $\pm$ 555	ITg130,549
Jeju3_KY103(C10)	Humic(토양)	-20	28,390 $\pm$ 130	32,650 $\pm$ 590	ITg130,550
Jeju3_KY104(C14)	Humic(토양)	-17.3	27,340 $\pm$ 160	31,510 $\pm$ 310	ITg130,558
Jeju3_KY105(C18)	Humic(토양)	-15.9	26,590 $\pm$ 140	31,130 $\pm$ 180	ITg130,559
Jeju3_KY106(C25)	Humic(토양)	10.6		측정불가	ITg130,560
Jeju3_KY107(C31)	Humic(토양)	9.1		측정불가	ITg130,561
Jeju3_KY21	Humic(토양)	-19.8	16,660 $\pm$ 70	19,840 $\pm$ 310	ITg130,562
Jeju3_KY22	Humic(토양)	-24.2	12,300 $\pm$ 60	14,425 $\pm$ 465	ITg130,563
Jeju3_KY23	Humic(토양)	-24.5	7,780 $\pm$ 40	8,545 $\pm$ 95	ITg130,564
Jeju3_KY211	Humic(토양)	-21.4	18,840 $\pm$ 80	22,705 $\pm$ 525	ITg130,573
Jeju3_KY214	Humic(토양)	-18.7	20,940 $\pm$ 90	24,935 $\pm$ 415	ITg130,576
Jeju3_KY204(C01)	Humic(토양)	-24.2	2,240 $\pm$ 30	2,245 $\pm$ 95	ITg130,565
Jeju3_KY205(C05)	Humic(토양)	-24.2	13,740 $\pm$ 70	16,870 $\pm$ 190	ITg130,566
Jeju3_KY206(C10)	Humic(토양)	-22.9	12,830 $\pm$ 80	15,470 $\pm$ 570	ITg130,568
Jeju3_KY207(C20)	Humic(토양)	54.2		측정불가	ITg130,569
Jeju3_KY208(C28)	Humic(토양)	28.6		측정불가	ITg130,570
Jeju3_KY209(C36)	Humic(토양)	-26.8	14,890 $\pm$ 70	18,190 $\pm$ 340	ITg130,571
Jeju3_KY210(C49)	Humic(토양)	-21.6	17,420 $\pm$ 70	20,785 $\pm$ 415	ITg130,572
Jeju3_KY212(C75)	Humic(토양)	-20.4	21,270 $\pm$ 100	25,430 $\pm$ 410	ITg130,574
Jeju3_KY213(U_OSL)	Humic(토양)	5,349		측정불가	ITg130,575
Jeju3_KY215(L_OSL)	Humic(토양)	-24	20,780 $\pm$ 100	24,755 $\pm$ 315	ITg130,557
Jeju3_QK101(C01-01cm)	Humic(토양)	-21.7	14,030 $\pm$ 70	17,140 $\pm$ 300	ITg130,590
Jeju3_QK102(OSL02_C05-10Cm)	Humic(토양)	-21.7	14,380 $\pm$ 80	17,500 $\pm$ 360	ITg130,591
Jeju3_QK103(C14-32cm)	Humic(토양)	-23.8	15,400 $\pm$ 80	18,675 $\pm$ 165	ITg130,592
Jeju3_QK104(OSL_C27-60cm)	Humic(토양)	-21.8	17,470 $\pm$ 90	20,830 $\pm$ 430	ITg130,593
Jeju3_QK105(C44-85cm)	Humic(토양)	-21.5	18,520 $\pm$ 90	22,000 $\pm$ 410	ITg130,594
Jeju3_QK12_OSL_CORE	Humic(토양)	-24.3	14,210 $\pm$ 70	17,305 $\pm$ 235	ITg130,915
Jeju3_QKmt1	Humic(토양)	-25.1	9,200 $\pm$ 50	10,375 $\pm$ 135	ITg130,577
Jeju3_Qkmt1	Humic(토양)	-20.1	3,690 $\pm$ 30	4,036 $\pm$ 109	ITg130,682
Jeju3_QKmt2	Humic(토양)	-18.7	10,080 $\pm$ 50	11,665 $\pm$ 305	ITg130,578
Jeju3_QKmt3	Humic(토양)	-16.5	10,680 $\pm$ 50	12,625 $\pm$ 85	ITg130,579
Jeju3_Qkmt3	Humic(토양)	-23.4	3,710 $\pm$ 40	4,074 $\pm$ 147	ITg130,683

Sample ID	Material (method)	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	^{14}C ageyrBP	Calibrated age (2 σ range) Cal yr BP	Lab Code
Jeju3_QKmt4	Humic(토양)	-17.6	12,390 $\pm$ 50	14,515 $\pm$ 425	ITg130,580
Jeju3_QKmt5	Humic(토양)	-18.4	12,950 $\pm$ 60	15,635 $\pm$ 565	ITg130,581
Jeju3_QKmt06(C06)	Humic(토양)	-20.8	20,920 $\pm$ 90	24,890 $\pm$ 390	ITg130,582
Jeju3_QKmt07(C10)	Humic(토양)	-25.5	20,670 $\pm$ 120	24,680 $\pm$ 340	ITg130,586
Jeju3_QKmt08(C18)	Humic(토양)	-24.3	21,520 $\pm$ 110	25,675 $\pm$ 475	ITg130,587
Jeju3_QKmt09(C26)	Humic(토양)	-21	22,010 $\pm$ 110	26,445 $\pm$ 425	ITg130,588
Jeju3_QKmt10(C37)	Humic(토양)	-23.6	22,210 $\pm$ 120	26,870 $\pm$ 700	ITg130,589
Jeju3_QkmtE13	Humic(토양)	-16.5	6,560 $\pm$ 40	7,493 $\pm$ 71	ITg130,684
Jeju3_QkmtE14	Humic(토양)	-21.6	8,010 $\pm$ 50	8,837 $\pm$ 180	ITg130,685
Jeju3_QkmtE21	Humic(토양)	-20	6,150 $\pm$ 40	7,053 $\pm$ 112	ITg130,686
Jeju3_QkmtE22	Humic(토양)	-19.9	8,740 $\pm$ 50	9,730 $\pm$ 174	ITg130,687
Jeju3_QkmtE31	Humic(토양)	-21.8	5,080 $\pm$ 40	5,826 $\pm$ 89	ITg130,688
Jeju3_QkmtE34	Humic(토양)	-20.4	1,680 $\pm$ 30	1,608 $\pm$ 83	ITg130,689
Jeju3_QkmtE34w	AAA(식물편)	-26.9		modern	ITg130,691
Jeju3_QkmtE35	Humic(토양)	-22.5	2,220 $\pm$ 30	2,242 $\pm$ 89	ITg130,690
Jeju4-SWmt01-0.03	Humic(토양)	-25.6	13,520 $\pm$ 70	16,650 $\pm$ 258	ITg130,645
Jeju4-SWmt01-0.03w1	AAA(식물편)	-30	12,940 $\pm$ 70	15,632 $\pm$ 574	ITg130,641
Jeju4-SWmt01-0.03w2	AAA(식물편)	-27	13,130 $\pm$ 60	15,875 $\pm$ 623	ITg130,642
Jeju4-SWmt01-0.03w3	AAA(식물편)	-31.6	13,200 $\pm$ 60	16,022 $\pm$ 625	ITg130,643
Jeju4-SWmt01-0.03w4	AAA(식물편)	-29.7	13,230 $\pm$ 70	16,074 $\pm$ 628	ITg130,656
Jeju4-SWmt01-0.03w5	AAA(식물편)	-26.7	13,220 $\pm$ 60	16,064 $\pm$ 617	ITg130,657
Jeju4-SWmt02-0.22	Humic(토양)	-24.5	15,090 $\pm$ 70	18,305 $\pm$ 279	ITg130,646
Jeju4-SWmt03-0.43	Humic(토양)	-20.8	16,430 $\pm$ 80	19,641 $\pm$ 231	ITg130,647
Jeju4-SWmt04-0.66	Humic(토양)	-23.9	17,220 $\pm$ 90	20,593 $\pm$ 444	ITg130,648
Jeju4-SWmt05-0.88	Humic(토양)	-24.2	19,990 $\pm$ 100	23,884 $\pm$ 396	ITg130,649
Jeju4-SWmt06-1.08	Humic(토양)	-27.6	21,740 $\pm$ 130	26,172 $\pm$ 548	ITg130,650
Jeju4-SWmt07-1.20	Humic(토양)	-24.6	19,950 $\pm$ 140	23,851 $\pm$ 437	ITg130,651
Jeju4-SWmt08-1.40	Humic(토양)	-21.9	20,140 $\pm$ 180	24,014 $\pm$ 475	ITg130,652
Jeju4-SWmt09-1.60	Humic(토양)	-14.1		측정부적합	ITg130,653
Jeju4-SWmtOSLSellSoil	Humic(토양)	15.7		측정부적합	ITg130,743
Jeju-BHCS1C03	Humic(토양)	-30.1	210 $\pm$ 50	215 $\pm$ 215	ITg130,984
Jeju-BHCS1C06	Humic(토양)	-29.7	40 $\pm$ 50	140 $\pm$ 130	ITg130,985
Jeju-BHCS2C09	Humic(토양)	-22.9	550 $\pm$ 40	580 $\pm$ 70	ITg130,986
Jeju-KY2A1	Humic(토양)	-27	11,730 $\pm$ 60	13,585 $\pm$ 175	ISA130,028
Jeju-KY2A2	Humic(토양)	-24.6	8,810 $\pm$ 50	9,915 $\pm$ 245	ISA130,029
Jeju-QyS1C01	Humic(토양)	-26.6	6,050 $\pm$ 60	6,950 $\pm$ 210	ITg130,975
Jeju-QyS1C02	Humic(토양)	-25.1	16,360 $\pm$ 110	19,765 $\pm$ 285	ITg130,976

Sample ID	Material (method)	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	^{14}C ageyrBP	Calibrated age (2 σ range) Cal yr BP	Lab Code
Jeju-QyS1C04	Humic(토양)				ITg130,977
Jeju-QyS1C05	Humic(토양)				ITg130,978
Jeju-QyS1C07	Humic(토양)	-28.3	20,660 $\pm$ 140	24,875 $\pm$ 425	ITg130,979
Jeju-QyS1C08	Humic(토양)				ITg130,980
Jeju-QyS2C01	Humic(토양)	-30.2	11,500 $\pm$ 80	13,320 $\pm$ 170	ITg130,981
Jeju-QyS2C02	Humic(토양)	-29.5	11,540 $\pm$ 80	13,385 $\pm$ 165	ITg130,982
Jeju-QyS2C03	Humic(토양)	-28.3	8,130 $\pm$ 70	9,080 $\pm$ 220	ITg130,983
Jeju-SCPC01	Humic(토양)	-28.5	590 $\pm$ 40	595 $\pm$ 65	ITg130,987
Jeju-SCPC02	Humic(토양)	-25.3	370 $\pm$ 30	410 $\pm$ 100	ITg130,989
Jeju교례리토양층1	Humic(토양)	-18.5	3,600 $\pm$ 30	3,909 $\pm$ 72	ITg120,579
Jeju교례리토양층4	Humic(토양)	-19.9	20,181 $\pm$ 70	24,119 $\pm$ 277	ITg120,580
SC-W01	Charcoal	-24.8	4,280 $\pm$ 40	4,840 $\pm$ 130	ITg120,294
SC-W02	Charcoal	-26.7	4,340 $\pm$ 30	4,910 $\pm$ 70	ITg130,334
SC-W03	Charcoal	-29.7	4,270 $\pm$ 40	4,810 $\pm$ 160	IWD130,180
SC-W04	Charcoal	-29.2	4,370 $\pm$ 40	4,950 $\pm$ 100	ITg130,361
SC-W05	Charcoal	-26.6	4,320 $\pm$ 30	4,903 $\pm$ 60	ITg130,393
SC-W06	Charcoal	-25.1	4,310 $\pm$ 40	4,901 $\pm$ 70	ITg130,424
SC-W07	Charcoal	-24.7	4,310 $\pm$ 40	4,901 $\pm$ 70	ITg130,471
SC-W08	Charcoal	-31.7	4,390 $\pm$ 30	4,960 $\pm$ 100	ITg130,536
SC-W09	Charcoal	-25.9	4,350 $\pm$ 30	4,940 $\pm$ 90	ITg130,499
SC-W10	Charcoal	-28.7	4,310 $\pm$ 40	4,900 $\pm$ 80	ITg130,567
SC-W11	Charcoal	-23.8	4,400 $\pm$ 40	5,070 $\pm$ 220	ITg130,601
SC-W12	Charcoal	-24.7	4,280 $\pm$ 40	4,840 $\pm$ 130	ITg130,644
SC-W13	Charcoal	-26.1	4,420 $\pm$ 30	5,070 $\pm$ 200	ITg130,700
SC-W14	Charcoal	-28.0	4,390 $\pm$ 40	5,030 $\pm$ 200	ITg130,728
SC-W15	Charcoal	-24.2	4,390 $\pm$ 30	4,960 $\pm$ 100	ITg130,828
SC-W16	Charcoal	-27.6	4,290 $\pm$ 40	4,850 $\pm$ 130	ITg130,792
SC-W17	Charcoal	-30.9	4,340 $\pm$ 40	4,940 $\pm$ 100	ITg130,868
SC-W18	Charcoal	-28.0	4,500 $\pm$ 40	5,150 $\pm$ 170	ITg130,921
SC-W19	Charcoal	-25.7	4,380 $\pm$ 40	5,040 $\pm$ 190	ITg130,988
SC-W20	Charcoal	-29.4	4,390 $\pm$ 40	5,060 $\pm$ 210	ITg131,021
SC-W21	Charcoal	-27.2	4,400 $\pm$ 40	5,070 $\pm$ 220	ITg131,067
SC-W22	Charcoal	-26.8	4,360 $\pm$ 40	4,950 $\pm$ 100	ITg131,098
SC-B01	bulk	-18.2	2,230 $\pm$ 30	2,250 $\pm$ 100	ITg130,347
SC-B02	bulk	-29.1	2,400 $\pm$ 50	2,530 $\pm$ 190	ITg130,910
SC-B03	bulk	-13.1	4,370 $\pm$ 40	4,950 $\pm$ 100	ITg130,354
SC-B04	bulk	-16.8	5,270 $\pm$ 30	6,060 $\pm$ 120	ITg120,578

Sample ID	Material (method)	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	^{14}C age yr BP	Calibrated age (2σ range) Cal yr BP	Lab Code
SC-B05	bulk	-26.5	5,310 $\pm$ 40	6,080 $\pm$ 140	ITg130,351
SC-B06	bulk	-15.3	6,320 $\pm$ 40	7,290 $\pm$ 130	ITg130,348

주 의

1. 이 보고서는 한국지질자원연구원에서 시행한 자체연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국지질자원연구원의 자체연구사업 보고서임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.