

우도 수성화산활동에 수반된 갈대화석 산출과 고환경 복원

강순석 · 류춘길

제주특별자치도
제주연구원 제주학연구센터

발 간 사

제주도는 화산섬으로 화산활동의 영향으로 화석산출이 불가능하다는 게 보통의 이론이라고 합니다. 그러나 해안에서는 수성화산활동에 수반되어 산출되는 다양한 화석들이 고환경 연구에 중요한 자료가 되고 있습니다. 사계리 사람발자국화석은 송악산 분출과 연관이 있고, 신양리층 화석은 성산일출봉 분출과 연관이 있다고 합니다. 더불어 우도 갈대화석은 쇠머리오름 분출과 관련된 화석산지라고 합니다. 그럼에도 이에 대한 후속연구가 이루어지지 못하여 안타까운 실정이었습니다.

이번 연구는 고생물학적 연구를 비롯하여 화산지질학적 연구, 고환경 해석 등의 연구방법을 통해 수성화산인 우도 쇠머리오름과 우도 전역에 대한 조사·연구활동을 진행하였습니다. 우도의 갈대화석산지에 대한 퇴적학 및 고생물학적 연구를 통해 갈대화석층의 퇴적환경 및 형성과정을 복원하고, 산출되는 식물화석의 식물상을 복원하는 연구를 진행하였습니다. 따라서 이번 연구는 화석산지에 대한 후속연구로서 큰 의미를 부여하지 않을 수 없습니다.

제주도는 우리나라에서 유일하게 유네스코 세계자연유산과 세계지질공원으로 등재된 지역입니다. 이 두 개의 유네스코 프로그램에 등재된 학문 분야가 화산지질학입니다. 화산활동의 결과물들은 제주의 대표적인 자원으로, 유명 경승지이자, 중요 학술 지대이기도 합니다. 이번 연구는 유네스코 세계지질공원이며 유명 관광지인 우도의 중요한 지질유산인 갈대화석산지를 조사·연구하여 학술적 가치를 정리해 두고자 하는 목적 아래 수행되었습니다.

이러한 학술적 축적은 제주도의 대표 자원들을 지속적으로 지켜나가는 데 중요한 기반이 될 것이라고 여겨집니다. 현장과 실험실을 오가며 연구에 매진해주신 강순석, 류춘길 박사님께 심심한 감사의 말씀을 드립니다. 이번 연구를 토대로 향후에도 제주도의 화석산지에 대한 연구가 지속될 수 있기를 고대합니다.

2017년 11월

제 주 연 구 원
원 장 강 기 춘

연구요약

I. 서론

1. 연구 배경

○ 우도 갈대화석은 연구책임자 본인이 민속자연사박물관 근무 당시인 1999년 5월에 발견하여 2001년 한국고생물학회 정기총회 및 제17차 학술발표회에 보고한 것이다. 당시 언론에 보도되고 관련 학회에 보고한 후에도 제주도 문화재 담당부서에서는 아무런 조치를 취하지 않은 채 오늘에 이르고 있다. 제주도는 화산섬으로서 화산활동의 영향으로 인해 화석 산출이 희소하다는 보통의 이론에서 비롯된 것이 아닌 가 짐작해본다. 우도 갈대화석 외에 지금까지 제주도에서 발견, 보고된 화석산지는 서귀포층 패류화석, 신양리층의 패류화석과 유공충화석, 사계리 하모리층의 동물 및 사람발자국화석 등 3곳이다.

○ 제주도의 화석산지는 모두 해안지역으로서 해안에서의 수성화산활동에 수반된 산출 특성으로 인해 화산활동 및 고환경 연구에서 중요한 자료가 되고 있다. 사계리 사람발자국화석은 송악산, 신양리층 화석은 성산일출봉 분출과 연관되어 있다. 이에 덧붙여 우도 갈대화석은 그 산출 위치로부터 쇠머리오름 분출과 관련된 화석 산지일 가능성이 높다. 이렇게 중요한 화석이 아직까지 문화재로 지정도 되지 않은 채 방치되어 있고, 연구 활동도 진행되지 않았다. 이번 기회를 통해 유네스코 세계지질공원이며 유명 관광지인 우도의 중요한 지질유산인 갈대화석을 연구 조사하여 학술적 가치를 정리해 두고자 한다.

2. 연구 목적

○ 그동안 우도에서 갈대화석이 발견, 보고된 후에 후속 연구가 전혀 진행되지 않았다. 산출된 갈대를 비롯한 식물화석과 생물흔적화석에 대한 고생물학적 연구가 필요한 시점에 있다. 또한 화석은 우도 쇠머리오름 응화구의 분화활동 중에 형성되었을 가능성이 있다. 따라서 화석의 생태학적 정보를 알아낸다면 우도 전체가 화산활동에 의해 형성되는 전 과정을 해석해 낼 수 있을 것이다. 즉 우도 생성 당시의 고환경 복원이 가능한 것이다.

- 또한, 우도는 세계지질공원으로 지정되어 지질관광 활동이 요구되는 섬 지역으로서, 갈대화석 산지는 천연기념물로 지정 보호되고 있는 홍조단과 해빈(서빈백사)과 함께 지질관광으로 즉시 활용 가능한 지질유산이다. 아울러 지구역사에 있어서 화석이라고 하는 생물 진화에 대한 직접적인 증거로서 중요한 학술적 가치를 지니고 있다.

3. 연구 범위 및 방법

- 화석 산출지인 동천진동 해안에서 퇴적층과 화석에 대한 조사가 이루어진다. 쇠머리오름의 수성화산 연구는 우도 남쪽 해안의 쇠머리오름에서 행해진다.
- 갈대화석을 배태하고 있는 퇴적층에 대한 퇴적학적, OSL 연대측정, 산출 화석에 대한 고생물학적 기재와 분류 및 동정, 쇠머리오름에 대한 화산 지질학적 연구를 수행한다.

II. 우도의 지형 및 지질환경 개관

1. 우도의 지형환경

- 제주도 동쪽 해상에 위치한 우도는 제주도의 55개 부속 도서 중 가장 큰 섬으로서 8개 유인도서 중 하나이며, 우리나라의 705개 유인도서 중에서는 76번째로 큰 섬이기도 하다. 행정구역에 있어 섬 전역이 제주특별자치도 제주시 우도면에 해당되는 우도는 동경 126° 56′~126° 58′, 북위 33° 29′~33° 31′에 위치해 있으며, 성산포에서 북동쪽으로 약 3.8km 떨어져 있다. 섬의 남북 길이는 약 3.5km, 동서 길이는 약 2.5km로서 면적이 약 6.18km²에 달하고, 해안선의 길이는 약 17km에 이르며 섬의 동쪽 끝에 비양도라는 작은 무인도가 있다.
- 우도는 보다 넓은 남쪽지역이 남북으로 약간 신장된 타원형을 이루고, 북쪽지역은 훨씬 협소하며 북으로 돌출된 길쭉한 형상을 나타내고 있어 종 모양에 가까운 지형 형상을 보인다. 내만을 형성하는 하고수동 해안과 남동쪽 해안을 향해 크게 돌출의 쇠머리오름 해안을 제외하면 우도 해안은 전체적으로 단조로운 편이다. 그러나 규모는 크지 않으나 해안을 따라 곳곳에서 만입과 돌출된 해안지형이 발달한다. 우도의 북동쪽 해안에는 본섬과 연결된 비양도가 자리한다.

- 해안을 따라서 다양한 해안지형이 발달하고 있다. 용암류와 응회암으로 구성된 파식대지 및 파식절벽 등의 암석해안이 우세하나, 소규모의 모래 및 자갈 해변, 해안사구, 조간대 등도 발달하고 있다.
- 섬의 남동쪽 해안에 섬의 정점을 이루는 해발고도 132.5m의 수성화산체인 응회구로 알려진 쇠머리오름(우도봉)이 위치하며 북서 방향으로 열려 있는 말굽형을 띤다. 쇠머리오름을 제외하면 우도는 해발고도 약 40m를 넘지 않는 평탄대지를 형성하며 오름의 열려 있는 면으로부터 북서 방향으로 연장되다가 해발고도 약 10m 부근을 지나면서 거의 남북 방향으로 평탄지의 중심축이 바뀐다. 또한, 우도 중앙부를 형성하는 넓은 정부 평탄면으로부터 남에서 북동 방향에 이르는 거의 방사상으로 해안을 향해 완만하게 경사지고 있다. 이러한 우도의 지형적 특징은 오름을 제외한 우도 전역이 쇠머리오름으로부터 분출된 용암류에 의해 형성되었음을 지시한다.
- 한편, 우도의 북쪽 말단의 평탄대지는 섬의 중앙부에 비해 해발고도가 낮으며 그 경계지역이 비교적 급한 사면을 형성하고 있어 뚜렷한 지형 기복의 차이를 보여주고 있다. 또한, 전체적으로 북서방향으로 발달하는 우도의 전체적인 지형 형태와는 달리, 완만하지만 거의 남북 방향으로 연장되는 평탄정부를 형성하고 있어 지형의 연장성에서도 다소간의 차이를 나타내고 있다. 이러한 미세한 지형적 차이는 우도 북쪽 지역이 층서적으로 다른 시기의 용암류로 구성되었을 가능성을 시사하는 것으로 판단된다.

2. 우도의 지질환경

- 우도는 화산층서에 있어 하부로부터 응회구, 분석구, 그리고 용암순상지를 형성하는 소머리현무암으로 이루어져 있다. 분석구의 경우 스패터(spatter)라 불리는 용결된 분석(welded scoria)이 집적된 것으로 스패터구(spatter mound)로 지칭하는 것이 더 정확하나 편의상 분석구로 불리고 있다. 우도는 응회구의 분화구 내부에 분석구가 발달하고 용암류에 의해 피복되어 있어 수성화산활동에 의한 응회구 형성-육상에서의 스트롬볼리안 분출에 의한 분석구 형성-용암류 분출로 이어지는 일윤회 분출의 단성화산체(monogenetic volcano)로 해석된다.

- 쇠머리오름으로 불리는 우도 응회구는 우도 남쪽 해안에 위치하며 20~30°로 가파르게 경사진 응회암 및 화산력응회암으로 이루어져 있다. 응회구는 북서쪽으로 트여있는 말굽 형태를 지니며 응회암층들은 화구를 중심으로 방사상의 경사를 나타낸다. 응회암은 대부분 화산력(lapilli)으로 구성되며 화산암괴(volcanic block)와 화산회(ash)를 수반하며 층리구조의 발달이 양호하다. 또한, 응회암 내에는 현무암류로 구성되는 유질암괴와 이질암괴로서 백악기 용결응회암, 응회암 및 흑운모화강암 등을 포함한다.
- 우도 응회구를 구성하는 응회암은 렌즈상 래필리스톤(Facies A1), 렌즈상 조립질 응회암(Facies A2), 판상 래필리스톤(Facies B), 희미한 층리 발달 화산력 응회암(Facies C), 얇은 층리 응회암(Facies D) 등의 퇴적상으로 구분된다. 응회암층은 최하부의 응회구층(BTC: basal tuff cone), 하부 응회구층(LTC: lower tuff cone), 상부 응회구층(UTC: upper tuff cone) 등 크게 세 개의 퇴적단위로 이루어져 있다.
- 우도 응회구 서쪽의 툭칸이 해안과 동쪽의 검멀레 해안에서는 응회구층을 용암순상지를 형성하는 용암류가 정합적으로 피복하는 층서 관계가 확인된다. 이러한 층서 관계는 용암류가 응회구의 분출이 종료된 직후에 정치되었으며, 우도의 응회구와 분석구, 용암순상지가 시간의 단절 없이 연속적으로 분출이 일어나 형성되었음을 지시한다. 또한, 응회구층과 용암류는 거의 수평에 가까운 경사를 지닌 재동된 화산쇄설성 퇴적층에 의해 피복된다.
- 우도 응회구의 분화구의 중앙에서 약간 남쪽에 치우친 지점에 약 300m 직경의 소규모 분석구가 자리한다. 분석구는 실제 스파터구로 알려져 있으나 초지와 공동묘지가 조성되어 있고 토양이 피복하고 있어 구성 암상의 확인이 곤란하다.
- 소머리현무암은 다양한 두께의 판상의 괴상 용암류가 누적되어 있고, 새끼줄구조(ropy structure), 용암발가락(lava toe), 튜물러스(tumulus), 용암동굴(lava tube) 등의 화산구조를 발달시키고 있어 파호이호이 용암류의 유형을 가짐을 알 수 있다.

- 소머리현무암은 다양한 두께의 판상의 괴상 용암류가 누적되어 있고, 새끼줄구조(ropy structure), 용암발가락(lava toe), 튜물러스(tumulus), 용암동굴(lava tube) 등의 화산구조를 발달시키고 있어 파호이호이 용암류의 유형을 가짐을 알 수 있다. 소머리현무암은 침상장석현무암의 암상적 특징을 갖는다. 지화학적 특징에 의한 화산암 분류에 있어서 소머리현무암은 대부분이 서브알칼리암 계열에 해당되며 서브알칼리 계열의 현무암과 현무암질안산암 영역에 속한다. 또한, 고알루미나질 현무암(또는 칼크-알칼리 현무암)에 비해 Al_2O_3 함량이 낮은 쏘레이아이트질(tholeiitic) 현무암의 영역에 해당된다.
- 우도의 화산활동은 상대적으로 진화한 알칼리 마그마가 수성화산폭발을 일으키며 응회구를 만들며 시작되었다. 응회구를 만든 마그마는 분출이 진행됨에 따라 점차 원시적인 조성으로 변해갔으나 응회구 분출의 마지막 단계에서는 다시 진화한 조성으로 되돌아갔다. 아-알칼리(sub-alkali) 조성을 지닌 별개의 마그마가 응회구 분출 직후에 분출하여 용암순상지가 형성되었다. 각 화산층서단위 사이에 침식면이 없어 이러한 분출은 휴지기 없이 연속적으로 이루어진 것으로 보인다. 알칼리 마그마를 모델링한 결과, 마그마는 3~3.5 GPa의 압력 하에 석류석-감람암(garnet peridotite)의 용융에 의해 생성된 후, 1.5~2 GPa의 압력 하에서 단사회석-감람석-스피넬 분별결정을 겪었던 것으로 보인다. 반면, 아-알칼리 마그마는 화학조성이 다른 별개의 감람암에서 생성되어 비교적 천부의 지하에서 감람석 분별결정을 겪으며 만들어진 것으로 해석된다.
- 우도 응회구의 화학조성이 진화한 마그마에서 원시적인 마그마로 갔다가 다시 진화한 마그마 조성으로 돌아온 현상은 마그마 덩이가 하나의 암맥 시스템을 통해 분출하며 마그마 덩이의 각기 다른 부분이 순차적으로 분출하여 나타난 것으로 보인다. 아-알칼리 마그마는 알칼리 마그마가 먼저 분출하며 지표로 상승할 수 있는 길을 열어주었기 때문에 분출한 것으로 보인다. 이상의 결과는 제주도의 단성화산 분출 시 조성을 달리하는 마그마 덩이들이 상호작용을 하며 분출하였음을 지시한다.

- 소머리현무암에 대해 우도 북동쪽 해안에서 이루어진 K-Ar 연대측정 결과, $114 \pm 3 \text{ka}$ 의 연대를 지닌 것으로 나타났으며 우도 화산체의 화산활동 시기는 후기 플라이스토세에 해당한다고 보고되었다. 한편, 쇠머리오름 분화구 내부에서 얻어진 시추코어에 대한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정 결과를 보면, 해발 25.5m의 쏘레아이트질 안산암으로부터 $102 \pm 69 \text{ka}$ 의 연대가 얻어졌으며, 해발 7.5m의 알칼리 현무암에서는 $86 \pm 10 \text{ka}$ 의 연대가 얻어졌다. 이들 연대는 우도 지표에서 얻어진 K-Ar 연대와 대체로 유사한 결과로서 우도가 후기 플라이스토세의 화산활동으로 형성되었음을 확증해주고 있다.

III. 갈대화석 산지의 지질과 고환경

1. 갈대화석 산지의 지질

- 갈대화석 산지의 지질은 소머리현무암과 이를 부정합으로 피복하는 제4기 퇴적층으로 구성된다. 제4기 퇴적층은 크게 하부의 유기질 이질 퇴적층과 상부의 갈대화석층으로서 식물화석을 배태하고 있는 현무암질 응회질 퇴적층으로 구분된다.
- 제4기 퇴적층의 하부를 점하는 유기질 이질 퇴적층은 유기물 함량이 높고 퇴적구조의 발달이 불량한 괴상의 실트질 퇴적층으로 구성된다. 이러한 특징은 느린 유속 또는 정체수 환경의 부유 퇴적에 의해 형성되는 습지 퇴적층과 매우 유사하다. 이 퇴적층의 전체적인 C/N 비로부터 유기물은 전적으로 육상에서 공급되었음을 지시하고 있어 이 퇴적층은 육상 습지 환경에서 형성된 것으로 해석된다. 한편, 이 퇴적층의 중간부와 하부 구간의 C/S 비는 해수와 담수 및 기수환경의 경계부에 분포하고 있어 뚜렷한 퇴적환경적 위치를 지시하지 못하고 있다. 이는 이 퇴적층이 상부 응회질 퇴적층의 침식에 따라 해수면에 노출되어 지속적인 해수의 영향을 받았기 때문인 것으로 추정된다.
- 갈대화석층으로서 제4기 퇴적층의 상부를 점하는 응회질 퇴적층은 전체적으로 현무암질 응회암과 괴상을 비롯하여 층리구조가 양호하게 발달한 현무암질 응회질 사암으로 구성되며, 두 암상이 반복적으로 교호한다

- 이 퇴적층은 수차례에 걸친 화산쇄설물의 공급과 다양한 수력학적 조건에서의 반복적인 재동작용에 의해 형성되었음을 지시한다. 전체적으로 평행엽층리, 곡사엽층리, 연흔사엽층리 등이 발달하는 응회질 사암이 우세하며 이질 퇴적층이 협재되지 않고 있어 과도 작용이 우세한 비교적 고에너지의 연안 환경에서 형성되었던 것으로 해석된다. 응회질 퇴적층은 퇴적학적으로 4개의 퇴적단위(하부로부터 Unit I, II, III, IV)로 구분된다.
- Unit I 은 초기 응회암의 퇴적과 재동작용에 의한 응회질 사암의 형성으로 구성되는 3회의 퇴적과정이 인지된다. 하부는 응회암과 평행 및 곡사엽층리가 발달한 응회질 사암, 중간부는 응회암과 희미한 평행엽층리가 발달한 응회질 사암, 상부는 응회암과 평행엽층리가 발달한 응회질 사암으로 구성된다. 상부와 하부에서 퇴적구조의 발달이 보다 양호하게 나타나고 있어 중간부에 비해 보다 활발한 유수작용을 겪었음을 보여준다. 하부 구간의 응회암 상면은 파상의 기록을 유지하며 파상 또는 저각의 사엽층리 및 평행엽층리가 발달하고 있어 상부 구간에 비해 저에너지 환경에서 형성되었음을 지시한다.
- Unit II는 전체적으로 곡사엽층리, 연흔사엽층리, 평행엽층리가 발달하는 응회질 사암이 우세하게 발달하며 하부 구간에 매우 소규모의 응회암이 협재된다. 암상 구성으로부터 이 퇴적단위는 화산쇄설물의 재동작용이 활발하게 이루어졌던 구간이다. 퇴적구조는 하부로부터 곡사엽층리, 연흔사엽층리, 평행엽층리의 순으로 발달하며 중간부의 곡사엽층리 구간이 규모가 크고 상부의 평행엽층리의 규모가 가장 작다. 상부의 평행엽층리는 하부의 연흔사엽층리와 조화를 이루지 않고 뚜렷한 판상 경계를 형성하고 있다. 이와 같이 Unit II는 수직적으로 수력학적 조건의 변화가 일어나고 있음을 보여준다.
- Unit III은 두꺼운 피상의 응회질 사암으로 구성된다. 하부 구간에는 일부 희미한 평행엽층리가 발달한다. 피상의 특징으로부터 이 퇴적층은 고밀도 상태로 급격한 퇴적에 의해 형성되었음을 지시한다. 상부 구간의 응회질 사암에는 기공이 다수 관찰되고 있어 이 퇴적층은 급격한 화산쇄설물의 공급 후에 유수의 영향을 크게 받지 않았던 것으로 해석된다.

- 한편, 이 퇴적단위는 식물뿌리흔적이 관찰되며 주로 상부에 집중적으로 발달한다. 따라서 이 퇴적층 형성 후에 식생이 번성하였으며, 더 이상의 퇴적작용은 중단되고 육상 조건이 유지되었다는 것을 의미한다. Unit III의 형성과 함께 해안선이 전진하였을 것이다.
- Unit IV는 전체적으로 평행엽층리가 발달한 응회질 사암이 우세하며 하부와 상부에 소규모의 응회암이 협재된다. 응회암은 하부에 비해 상부에서의 규모가 약간 크게 발달한다. 전체적으로 이 퇴적단위는 화산쇄설물 공급 이후 활발한 유수 작용이 지속적으로 이루어졌던 것으로 판단된다. Unit III의 형성에 따라 이 지역이 육상화가 이루어지고 해안선이 전진하였다는 것을 고려하면, Unit 4는 현재의 갈대화석산지 보다 바다 쪽으로 치우친 지역에 형성되었을 것으로 추정된다.
- 갈대화석층의 하부를 접하는 유기질 이질 퇴적층의 최상부에서 얻어진 $8.0 \pm 0.3\text{ka BP}$ 와 $10.0 \pm 0.5\text{ka BP}$ 의 OSL 연대로부터, 유기질 퇴적층은 8,000~10,000년 전인 홀로세 초기에 형성되었으며, 적어도 10,000년 전 이후의 어느 시점에 갈대화석을 배태하고 있는 응회질 퇴적층의 발달이 시작되었음을 알 수 있다.

2. 갈대화석 산지의 고환경

- 홀로세 초에 해당되는 유기질 퇴적층의 형성 시기는 현재 보다 해수면이 상당히 낮았으며 갈대화석 산지는 해안에서 멀리 떨어진 육상 지역이었을 것이다. 그러므로 화산쇄설물의 공급과 유수에 의한 재동작용이 일어날 수 있었던 시기, 즉 갈대화석층의 형성 시기는 현재와 유사한 수준으로 해수면이 상승했던 홀로세 중기 이후에 해당될 것이다.
- 갈대화석층을 형성하는데 있어서 모재가 되었던 화산쇄설물은 이 시기에 분출한 수성화산활동에 의해 공급되었을 것이다. 따라서 갈대화석층은 홀로세 중기에 분출한 성산일출봉 응회구의 화산쇄설물이 공급, 재동되어 형성된 것으로 해석된다.

IV. 갈대화석의 산상과 식물상

1. 갈대화석의 산상

- 갈대화석 산지의 식물화석은 응회질 퇴적층의 최상부로 추정되는 층준에서 집중적으로 산출된다. 응회질 퇴적층의 최하부에서 산출되기도 하나 매우 드물며 야외에서 관찰하기는 매우 어렵다. 식물화석은 퇴적층 표면에 찍힌 자국으로 보존된 인상화석의 형태로 산출된다.

2. 갈대화석의 식물상

- 식물화석은 파편상으로서 온전한 개체를 찾아보기 힘들으나, 형태적 특징에 따라 크게 3가지 유형으로 분류할 수 있다. 유형 1은 형태적으로 편평한 세장형을 띠며 평행맥이 발달하고 있어 초본류의 잎으로 판단된다. 유형 2는 내부가 비어 있는 관상을 띠며 내면에 미세한 평행맥이 발달하고 있는 것이 관찰되고 있어, 이 유형은 초본류의 줄기로 해석된다. 유형 3은 다수의 미세한 줄기 다발이 'V'자 형태로 무수하게 갈라져 있는 형태를 이루고 있다. 이러한 특징은 갈대나 억새와 같은 초본류에 보이는 원추꽃차례와 매우 유사하다. 꽃의 흔적은 찾아볼 수 없으며 무수하게 갈라진 꽃대만이 잔존하고 있는 것으로 보인다. 세장형의 형태를 띠고 평행맥이 발달하고 있어 식물화석은 초본류로 판단된다. 갈대화석층은 해안선 부근의 연안 습지환경에서 형성되었으므로, 식물화석은 대표적인 염생습지식물인 갈대와 사초과에 속하는 초본류일 것으로 판단된다. 매우 희귀하지만, 원추꽃차례로 보이는 꽃 부분이 산출되고 있어 갈대가 우세한 것으로 판단된다.
- 갈대화석층에서는 식물화석과 함께 여러 층준에서 저서동물의 활동 흔적인 생흔화석이 다수 관찰되며 서관구조의 형태를 띤다. 드물게 식물화석을 배태하고 있는 상부 응회질 퇴적층에서도 관찰되지만, 대부분의 서관구조는 하부 응회질 퇴적층에 주로 발달한다. 산상과 형태적 특징으로부터 서관구조는 기어간 자국(crawling trace)과 거주 흔적(dwelling trace)으로 판단된다. Unit 3의 응회질 퇴적층에서는 식물뿌리흔적이 발달하며, 특히 상면의 일부 범위에 집중적으로 분포한다. 퇴적층 내부에는 수평 및 수직적으로 발달하는 미세한 실뿌리로 보이는 흔적이 관찰된다.

V. 결론

- 우도의 수성화산활동과 이에 수반된 갈대화석의 산출 및 고환경 복원에 대한 연구를 수행하였다. 우도는 플라이스토세 후기의 수성화산활동 및 현무암의 육상 분출에 의해 형성되었다. 우도 응회구를 이루고 있는 응회암과 그 위를 덮고 있는 용암류는 하부로부터 하부 응회구층(LTC), 상부 응회구층(UTC), 그리고 용암류(LS: lava shield) 등 총 세 개의 화학층서단위(chemostratigraphic unit)로 이루어져 있으며, 단성화산 분출 시 조성을 달리하는 마그마 덩이들이 상호작용을 하며 분출하였던 것으로 보고되었다.
- 식물화석은 소머리현무암을 부정합으로 피복하는 제4기 퇴적층에 배태되어 있으며, 제4기 퇴적층은 하부의 미고결 유기질 이질 퇴적층과 상부의 응회질 퇴적층으로 구성된다. 제4기 퇴적층의 상부를 점하는 응회질 퇴적층은 전체적으로 현무암질 응회암과 괴상을 비롯하여 층리구조가 양호하게 발달한 현무암질 응회질 사암으로 구성되며, 두 암상이 반복적으로 교호한다. 따라서 이 퇴적층은 수차례에 걸친 화산쇄설물의 공급과 다양한 수력학적 조건에서의 반복적인 재동작용에 의해 형성되었음을 지시한다. 전체적으로 평행엽층리, 곡사엽층리, 연흔사엽층리 등이 발달하는 응회질 사암이 우세하며 이질 퇴적층이 협재되지 않고 있어 파도 작용이 우세한 비교적 고에너지의 연안 환경에서 형성되었던 것으로 해석된다.
- 홀로세 초에 해당되는 유기질 퇴적층의 형성 시기는 현재 보다 해수면이 상당히 낮았으며 갈대화석 산지는 해안에서 멀리 떨어진 육상 지역이었을 것이다. 그러므로 화산쇄설물의 공급과 유수에 의한 재동작용이 일어날 수 있었던 시기, 즉 갈대화석층의 형성 시기는 현재와 유사한 수준으로 해수면이 상승했던 홀로세 중기 이후에 해당될 것이다. 또한, 갈대화석층을 형성하는데 있어서 최초 모재가 되었던 화산쇄설물은 이 시기에 분출한 수성화산활동에 의해 공급되었을 것이다. 따라서 갈대화석층은 홀로세 중기에 분출한 성산일출봉 응회구의 화산쇄설물이 공급, 재동되어 형성된 것으로 해석된다.

- 식물화석은 소머리현무암을 부정합으로 피복하는 제4기 응회질 퇴적암에 배태되어 있으며, 인상 형태의 식물화석의 파편으로 구성된다. 형태적으로 3가지 유형으로 구분된다. 전체적으로 세장형의 형태를 띠고 평행맥이 발달하고 있어 식물화석은 초본류로 판단된다. 갈대화석층은 해안선 부근의 연안 습지환경에서 형성되었으므로, 식물화석은 대표적인 염생습지식물인 갈대와 사초과에 속하는 초본류일 것으로 판단된다. 매우 희귀하지만, 원추꽃차례로 보이는 꽃 부분이 산출되고 있어 갈대가 우세한 것으로 판단된다.
- 갈대화석층에서는 식물화석과 함께 여러 층준에서 저서동물의 활동 흔적인 생흔화석이 다수 관찰되며 서관구조의 형태를 띤다. 드물게 식물화석을 배태하고 있는 상부 응회질 퇴적층에서도 관찰되지만, 대부분의 서관구조는 하부 응회질 퇴적층에 주로 발달한다. 산상과 형태적 특징으로부터 서관구조는 기어간 자국(crawling trace)과 거주 흔적(dwelling trace)으로 판단된다.

목 차

I. 연구개요	1
1. 연구배경 및 필요성	1
2. 연구목적	1
3. 연구범위	2
4. 연구기간	2
5. 연구방법 및 절차	2
6. 연구내용	5
7. 연구의 기대 효과	6
II. 연구지역 개관	7
1. 위치 및 지형환경	7
2. 지질환경	12
III. 갈대화석 산지의 지질과 고환경	23
1. 갈대화석 산지의 개관	23
2. 갈대화석 산지의 지질	25
3. 갈대화석 산지의 고환경 복원	35
IV. 갈대화석의 산상과 식물상	39
1. 갈대화석의 산출상태	39
2. 갈대화석의 식물상 분석	40
V. 결론	47

참고문헌	51
Abstract	54

<표 목차>

<표 I - 1> 연구절차	4
<표 III- 1> 유기질 이질 퇴적층의 총탄소, 총질소, 총황 및 총유기탄소 함량과 C/N 및 C/S 비	29
<표 III- 2> 갈대화석 산지 유기질 이질 퇴적층의 OSL 연대측정 결과 ·	35

<그림 목차>

<그림 II-1> 제주도의 음영기복도 및 우도의 위치도	7
<그림 II-2> 우도의 전경	8
<그림 II-3> 우도 주변의 육상 및 해저 지형도	10
<그림 II-4> 우도의 정밀 지형도	11
<그림 II-5> 우도의 지질도	13
<그림 II-6> 우도 응회구의 전경	14
<그림 II-7> 우도 응회구의 지질	15
<그림 II-8> 우도 응회구 분화구 내에 발달하는 분석구	18
<그림 II-9> 소머리현무암의 용암류 특징	19
<그림 II-10> 소머리현무암의 암상 및 현미경적 특징	20
<그림 II-11> 우도를 형성한 마그마 시스템 모델	22
<그림 III-1> 갈대화석 산지의 전경사진	24
<그림 III-2> 갈대화석층 및 갈대화석의 산출 전경사진	25
<그림 III-3> 갈대화석 산지 제4기 퇴적층의 퇴적주상도	27
<그림 III-4> 유기질 이질 퇴적층의 전경사진	28
<그림 III-5> 유기질 퇴적층의 깊이에 따른 총탄소, 총질소, 총황, 총유기탄소, C/N 비 및 C/S 비 분포도	30
<그림 III-6> 하부 응회질 퇴적층의 전경사진	31
<그림 III-7> 상부 응회질 퇴적층의 전경사진	32
<그림 III-8> 응회질 퇴적층의 세부 전경 및 퇴적단위 구성도	33
<그림 III-9> 최하부 유기질 이질 퇴적층에서의 OSL 연대측정을 위한 시료채취 전경 및 연대측정 결과	34
<그림 IV-1> 갈대화석 산지 식물화석의 산출상태	39
<그림 IV-2> 제주민속자연사박물관에서 보유하고 있는 갈대화석 산지의 식물화석 표본의 사진	41
<그림 IV-3> 갈대화석 산지에서 채집된 식물화석 표본의 사진	42
<그림 IV-4> 갈대화석에 산출되는 유형 1의 식물화석의 세부 사진	43
<그림 IV-5> 갈대화석층에서 산출되는 유형 2와 유형 3의 식물화석의 세부 사진	44
<그림 IV-6> 갈대화석층에서 산출되는 생흔화석의 전경사진	46

I. 연구개요

1. 연구배경 및 필요성

우도 갈대화석은 연구책임자 본인이 민속자연사박물관 근무 당시인 1999년 5월에 발견하여 2001년 한국고생물학회 정기총회 및 제17차 학술발표회에 보고한 것이다. 당시 언론에 보도되고 관련 학회에 보고한 후에도 제주도 문화재 담당부서에서는 아무런 조치를 취하지 않은 채 오늘에 이르고 있다. 제주도는 화산섬으로서 화산활동의 영향으로 인해 화석 산출이 희소하다는 보통의 이론에서 비롯된 것이 아닌 가 짐작해본다. 우도 갈대화석 외에 지금까지 제주도에서 발견, 보고된 화석산지는 서귀포층 패류화석, 신양리층의 패류화석과 유공충화석, 사계리 하모리층의 동물 및 사람발자국화석 등 3곳이다.

제주도의 화석산지는 모두 해안지역으로서 해안에서의 수성화산활동에 수반된 산출 특성으로 인해 화산활동 및 고환경 연구에서 중요한 자료가 되고 있다. 사계리 사람발자국화석은 송악산 분출, 신양리층 화석은 성산일출봉 분출과 연관되어 있다. 이에 덧붙여 우도 갈대화석은 그 산출 위치로부터 쇠머리오름 분출과 관련된 화석 산지일 가능성이 높다. 이렇게 중요한 화석이 아직까지 문화재로 지정도 되지 않은 채 방치되어 있고, 연구 활동도 진행되지 않았다. 아마 발견자 본인이 직접 연구해야 할 몫으로 남겨두고 있는지도 모른다. 이번 기회를 통해 유네스코 세계지질공원이며 유명 관광지인 우도의 중요한 지질유산인 갈대화석을 연구 조사하여 학술적 가치를 정리해 두고자 한다.

2. 연구목적

그동안 우도에서 갈대화석이 발견, 보고된 후에 후속 연구가 전혀 진행되지 않았다. 산출된 갈대를 비롯한 식물화석과 생물흔적화석에 대한 고생물학적 연구가 필요한 시점에 있다. 또한 화석은 우도 쇠머리오름 응화구의 분화 활동 중에 형성되었을 가능성이 있다. 따라서 화석의 생태학적 정보를 알아낸다면 우도 전체가 화산활동에 의해 형성되는 전 과정을 해석해 낼 수 있

을 것이다. 즉 우도 생성 당시의 고환경 복원이 가능한 것이다.

또한, 우도는 세계지질공원으로 지정되어 지질관광 활동이 요구되는 섬 지역으로서, 갈대화석 산지는 천연기념물로 지정 보호되고 있는 홍조단괴 해빈(서빈백사)과 함께 지질관광으로 즉시 활용 가능한 지질유산이다. 아울러 지구역사에 있어서 화석이라고 하는 생물 진화에 대한 직접적인 증거로서 중요한 학술적 가치를 지니고 있다.

3. 연구범위

기본적으로 우도 전역이 연구범위이다. 화석 산출지인 동천진동 해안에서 퇴적층과 화석에 대한 조사가 이루어진다. 쇠머리오름의 수성화산 연구는 우도 남쪽 해안의 쇠머리오름에서 행해진다. 산출 화석에 대한 고생물학적 기재와 분류 및 동정, 쇠머리오름에 대한 화산지질학적 연구를 수행한다.

4. 연구기간

2017년 04월 13일~2017년 10월 09일

5. 연구방법 및 절차

5.1 연구방법

5.1.1 퇴적학적 연구

갈대화석 포함 퇴적층의 입도, 퇴적구조, 구성 물질, 화석 포함 여부 등의 다양한 퇴적학적 특징을 조사, 종합하여 퇴적주상도 작성하고, 퇴적기구 및 퇴적환경을 해석하였다.

5.1.2 고생물학적 연구

식물화석의 고생물학적 연구는 먼저 화석의 산출상태를 파악하고, 육안 및 실체 현미경 관찰을 병행하여 식물화석의 동정 및 분류를 실시하였다. 일반

적으로 완형의 1/2 이상을 가진 표본을 1개체로 판단하였으며, 식물화석은 외형(전체, 가장자리의 형태 등)과 잎맥의 특징에 따라 동정, 분류하였다. 화석 연구에 있어서 갈대화석 발견 당시 연구책임자에 의해 채집되어 제주민속자연사박물관에 보관되어 있던 화석표본에 대해서도 고생물학적 연구를 실시하였다.

5.1.3 OSL 연대측정

루미네선스(luminescence)는 석영, 장석 등의 무기결정에 축적된 환경방사선 에너지가 열 또는 빛에 의해서 외부에 빛으로 방출되는 물리적 현상이다. 열에 의해 방출되는 루미네선스를 TL(thermoluminescence), 빛에 의해 방출되는 루미네선스를 OSL(optically stimulated luminescence)이라 한다. OSL 연대측정은 루미네선스와 환경방사선의 상관관계를 이용한 연대측정법으로서 석영 결정 내에 퇴적 당시 햇빛에 노출되면서 축적된 환경방사선 에너지가 빛에 의해 방출되는 광여기루미네선스(OSL) 현상을 이용한다. OSL 연대측정법은 제4기 퇴적층에 일반적인 방사성탄소연대측정법에 비해 연대의 상한이 훨씬 길고, 탄화물이 부재된 지층에도 적용이 가능하므로 특히 플라이스토세 지층서 보편적으로 활용되고 있다. OSL 연대측정은 한국기초과학지원연구원 환경과학연구부에 의뢰하여 수행되었다.

5.1.4 화산지질학적 연구

우도 쇄머리오름에 대한 수성화산활동을 파악하기 위하여 기존 연구 결과를 참조하고 야외 지질조사를 통하여 용암류 및 응회암의 분포 특성과 화산 지질학적 특징을 파악함으로써 전체적인 화산활동사를 복원하였다.

5.1.5 고환경 해석

산출 화석에 대한 고생태학적 정보와 쇄머리오름 수성화산활동의 특성을 결합시켜, 플라이스토세 후기의 우도 쇄머리오름 화산활동 및 고해양환경을 복원하였다.

5.2 연구절차

연구절차는 다음 <표 I-1>과 같다. 먼저 연구계획의 수립과 지형도를 비롯한 기존 연구 성과의 자료 조사를 수행하였다. 식물화석을 배태하고 있는 퇴적층에 대한 퇴적학적 조사를 실시하고, 화석의 산출상태를 파악하였

다. 화석에 대한 자세한 관찰 및 동정을 위해 대표적인 형태의 화석표본을 채취, 수습하였다. 아울러 화석 포함층의 형성 시기를 파악하기 위하여 OSL 연대측정용 시료를 채취하였다. 이번 연구 과정에서 수습된 화석을 비롯하여 제주민속자연사에서 보관 중인 화석표본에 대해 실내 분석을 실시하였다.

쇠머리오름 응회구를 비롯하여 우도 전역에 분포하는 용암류에 대한 화산 지질학적 조사를 수행하였다. 기존 연구 성과를 바탕으로 쇠머리오름 응회암과 용암류의 분포 및 층서 관계를 재확인하고, 각 화산층서 단위의 화산퇴적학 및 화산지질학적 특징을 조사하였다.

<표 I-1> 연구절차.

주요내용		소요기간	2017년						
			4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월
1	연구계획 수립, 자료 조사								
2	화석 및 퇴적층 조사, 화석 분류 동정								
3	우도 수성화산활동 조사, 쇠머리오름 응회구								
4	고환경 해석 연구								
5	전문가 자문회의, 세미나 (화석, 수성화산, 지질공원)								
6	보고서 작성, 제출								

이상의 조사 성과를 종합하여 쇠머리오름 응회구 및 용암류에 화산활동사와 화석을 배태하고 있는 퇴적암의 퇴적환경 및 고환경 복원을 수행하였다.

연구 초기와 완성 단계에 화석, 수성화산활동 및 갈대화석 산지의 지질유산으로서의 활용 가치 등에 대해 전문가 회의를 개최하였다.

6. 연구내용

화석과 화석 산출지에 대한 고생물학적, 퇴적학적 연구를 수행하고, 수성화산 쇠머리오름과 우도 전역에 대한 화산지질학적 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

화석이 발견된 퇴적층은 쇠머리오름 응회구 중심부에서 서쪽으로 약 1km 떨어진 곳인 동천진동 해안의 해안선 부근에 소규모로 노출되어 있으며, 현무암질 화산쇄설물이 재동되어 층리구조가 잘 발달되어 있는 응회질 퇴적층이다. 층서적으로는 쇠머리오름 응회구의 상부에 위치할 것으로 추정된다. 응회질 퇴적층의 최상부로 추정되는 층준에서 갈대 화석을 비롯한 식물화석이 다량 산출된다. 화석은 주로 갈대의 잎, 줄기, 꽃으로 추정되며 퇴적층의 층리면을 따라 다량 산출된다. 화석들은 층리면에 인상으로 찍혀있는 형태이다. 또한 같은 층준에서 참나무과로 추정되는 넓은 잎을 갖는 식물화석도 산출되었다. 더욱이 식물화석 산출층의 하부 층준에서는 생물흔적화석(trace fossils)이 잘 관찰되며, 이 생물흔적 화석은 조간대 환경에 서식하는 연체동물이나 갑각류의 수평 서관(棲管)으로 추정된다.

우도 형성 당시의 고환경 복원에 사용된 자연사적 증거 자료는 다음과 같다. 우선 쇠머리오름 현무암에 대해 기존 연구자들에 의해 얻어진 절대연대로서 K-Ar 및 Ar/Ar 연대측정 자료가 활용된다. 또한 상대연대 자료로는 쇠머리오름 응회구의 화산층서와 갈대화석을 들 수 있다. 두 번째 자료는 우도에서 산출된 갈대 화석과 생물흔적 화석의 생태학적 정보들이다.

신생대 제4기 플라이스토세 후기가 시작되는 8만 6천 년 전에 우도는 바다 속에서 화산활동을 시작하였다. 당시 해수면은 현재보다 약 20~30미터는 낮았을 것으로 추정된다. 당시 우도는 현재 성산포 내해지역과 연결되어 있었고, 그 곳에는 갈대가 자라고 있던 환경이었을 것이다. 또한 동시에 산출된 생물흔적 화석은 갑각류의 서관으로서 현재 우리나라 서해안과 같은 조간대의 갯벌 환경 하에서 서식하는 종이다. 따라서 우도는 화석형성 당시 화산재의 갯벌이 넓게 펼쳐진 조간대였다는 것을 알 수 있다.

한편, 갈대화석이 산출되는 응회질 퇴적암은 현재의 해안선으로서 고조면과 저조면 사이의 파식대지 상에 발달하고 있으며, 쇠머리오름 응회구 화산

활동 당시의 해수면과 큰 차이가 있다. 따라서 응회질 퇴적암은 쇠머리오름 응회구의 재동에 의해서가 아니라 보다 젊은 시기의 다른 수성화산체의 화산활동과 관련되었을 가능성도 제기된다.

7. 연구의 기대 효과

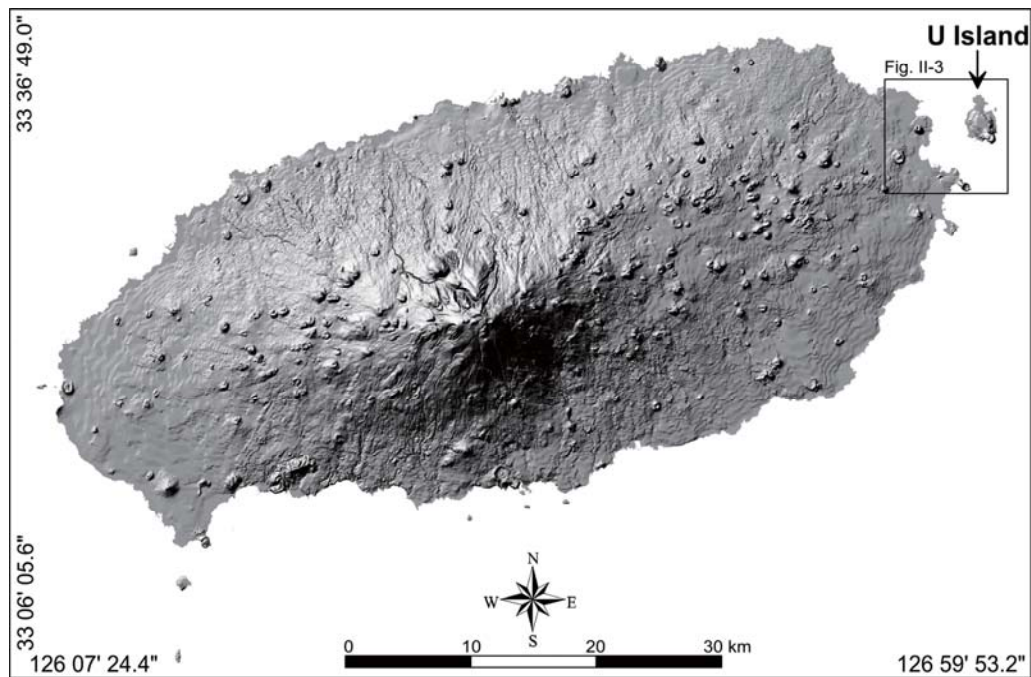
제주도는 우리나라에서 유일하게 유네스코 세계자연유산과 세계지질공원으로 등재된 지역이다. 우리나라에서 세계에 내놓을 수 있는 유일한 자연유산은 제주도뿐이다. 이 두 개의 유네스코 프로그램에 등재된 학문적 분야가 화산지질학이다. 화산활동의 결과물들이 제주의 대표적인 자원이며, 이곳들은 대부분이 경관지로서 유명 관광지이기도 하다. 한라산을 비롯하여 만장굴, 성산일출봉, 서귀포층, 주상절리 등이다.

섬 속의 섬으로 최근 인기 관광지로서 수많은 여행객들로 연중 붐비는 곳이 우도이다. 우도는 2012년에 세계지질공원의 지질명소(geosites)로 등재되었다. 세계지질공원은 중요한 지질유산을 보호하는 유네스코 프로그램으로 2004년에 시작되었다. 비교적 최근에 만들어진 이 프로그램은 기존의 유산 보호 프로그램과 다른 점이 하나 있다. 그것은 지질공원에서 지질관광(geotourism)을 허용하는 것이다. 지역 주민들에 의해 유산의 적극적 보전 방안의 대안으로 제시된 것이다. 그러나 실제로 연간 삼백만명 이상이 방문하는 우도에서 지질관광은 시행되지 않고 있다. 지질공원에서 화산에 의해 생성된 우도의 지질유산을 현지 해설사들의 안내로 해설을 들으며 자연환경의 신비를 배우고 느끼는 선진국형의 관광 행태의 하나이다. 우도의 지질유산에 대한 해설 프로그램을 개발하기 위해서는 우선 지질학적 가치에 대한 연구가 선행되어야 한다. 지질학 중에서도 지구 46억년의 진화를 가장 잘 보여주는 화석(고생물학적 자료)이 우도에서 산출되어 학계에 보고되었음에도 불구하고, 아직까지 상세한 연구는 이루어지지 않고 있다. 본 연구 결과는 우도를 선진국형의 지질관광지로 개발하는데 중요한 자료로 활용될 것이다.

II. 연구지역 개관

1. 위치 및 지형환경

제주도 동쪽 해상에 위치한 우도는 제주도의 55개 부속 도서 중 가장 큰 섬으로서 8개 유인도서 중 하나이며(그림 II-1), 우리나라의 705개 유인도서 중에서는 76번째로 큰 섬이기도 하다. 행정구역에 있어 섬 전역이 제주특별자치도 제주시 우도면에 해당되는 우도는 동경 126° 56'~126° 58', 북위 33° 29'~33° 31'에 위치해 있으며, 성산포에서 북동쪽으로 약 3.8km 떨어져 있다. 섬의 남북 길이는 약 3.5km, 동서 길이는 약 2.5km로서 면적이 약 6.18km²에 달하고, 해안선의 길이는 약 17km에 이르며 섬의 동쪽 끝에 비양도라는 작은 무인도가 있다.



<그림 II-1> 제주도의 음영기복도 및 우도의 위치도.

성산포항에서 우도를 조망하면 남쪽 끝에 해안을 따라 급경사의 해안절벽을 형성하는 쇠머리오름이 자리한다(그림 II-2). 쇠머리오름은 화산지질학적으로 응회구에 해당되는 단성화산체로서, 외륜부에 의해 둘러싸인 오목한

분화구가 섬의 내륙에 위치한다. 쇠머리오름은 섬의 내륙을 향해 점차 완만해져 평탄지로 연결된다. 오름의 북쪽으로는 용암대지를 형성하는 저지대의 평탄지가 넓게 펼쳐져 있다.



<그림 II-2> 우도의 전경. A: 성산포항에서 바라본 우도, B: 우도의 최고봉인 쇠머리오름과 전면의 평탄지를 형성하는 용암대지, C: 하늘에서 바라본 우도의 전경.

우도와 주변 지역에 대해 해저를 포함한 전체적인 지형 특성을 살펴보기 위하여 우도 주변의 육상 및 해저 지형도를 작성하여 그림 II-3에 나타내었다.

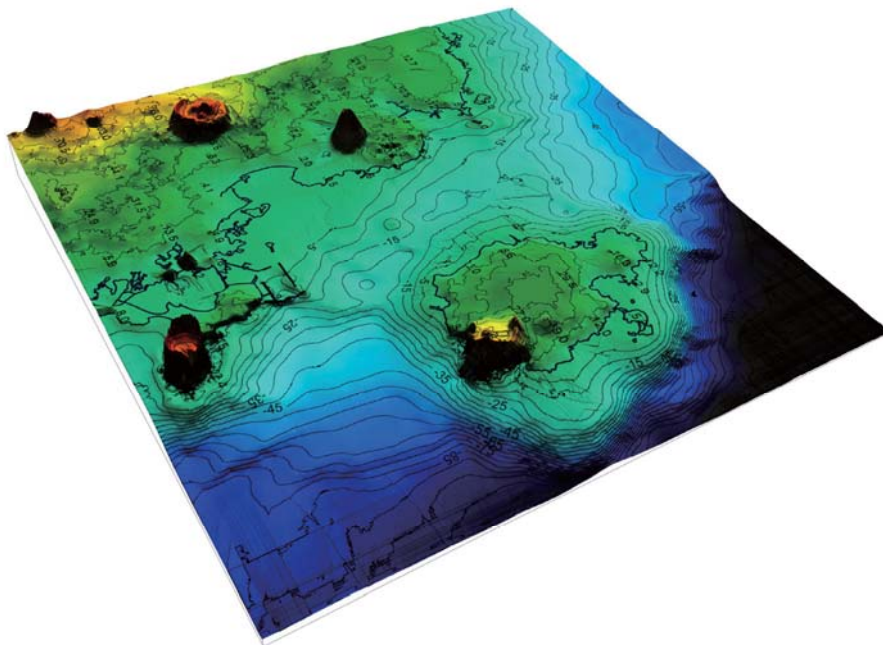
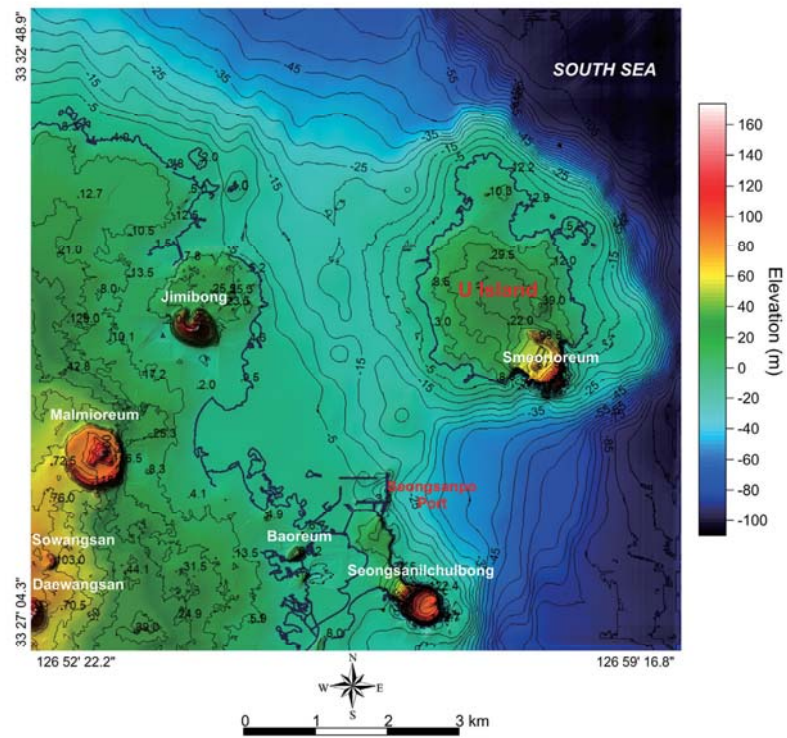
우도와 인접한 제주도 북동부의 해안지대는 전체적으로 대왕산, 소왕산, 말

미오름, 지미봉, 식산봉 및 성산일출봉 등의 오름이 분포하며, 이들 오름 주변의 고지대를 제외하면 해발고도 약 50m 미만의 평탄지 또는 완사면부를 형성한다. 해안선은 제주도의 다른 지역과는 달리 굴곡이 심하여 우리나라 남서 해안의 특징인 리아형(Ria-type) 해안과 유사하다. 특히, 지미봉에서 성산일출봉 부근에 이르는 해안은 내륙으로 크게 만입되어 내만을 이루고 있다. 이 내만역은 전체적으로 -5m 미만의 비교적 낮은 수심을 유지하며 거의 평탄한 해저 기복을 보이고 있다.

우도의 서쪽 해역은 육지와 사이에 최대 수심이 약 20m에 이르는 협소한 수로(우도수로)를 형성하며 비교적 완만한 해저지형을 형성하나 기타 주변 해역은 급경사를 보이고 있어 크게 대조를 이룬다. 전체적으로 육상부는 해안을 지나 우도를 향해 완만한 지형 경사를 유지하다가 우도 인근에 이르러서는 비교적 급경사로 크게 변하고 있어 우도가 육상부를 올라타고 있는 형상을 띤다. 이러한 해저지형 특성은 우도가 육지 보다 늦은 단계의 화산활동으로 형성되었음을 시사한다.

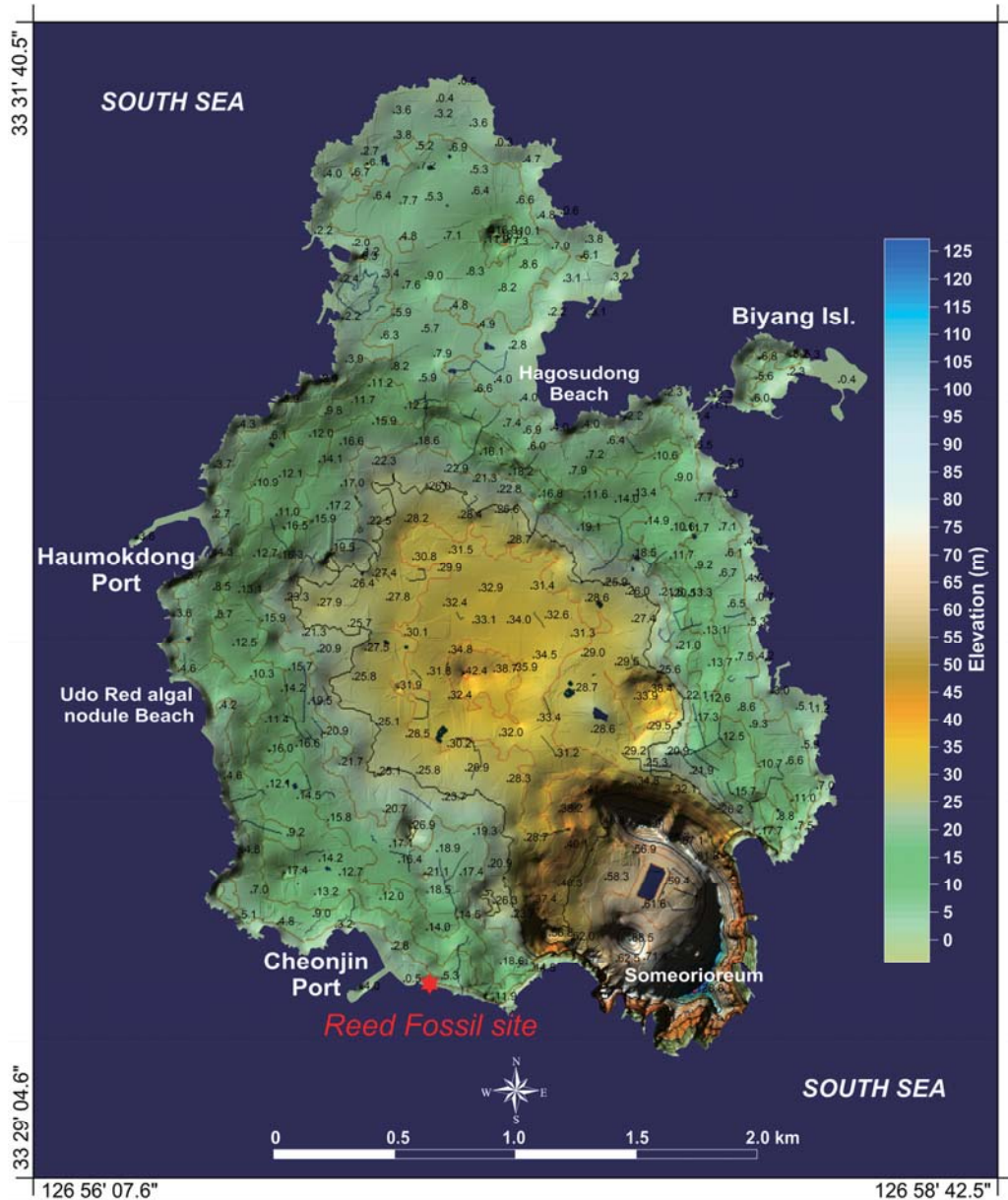
동쪽 해역은 섬으로부터 약 1km 범위에서는 약 15m 수심 내에서 완경사를 유지하다가 최대 약 110m의 수심에 도달하면서 매우 급한 해저사면을 이루고 있어 계단상의 해저지형을 형성한다. 해저부의 완경사 지대는 과거 홀로세 해수면 상승기에 형성된 고파식대지이며 이하의 급사면은 고해식에 의해 형성된다. 쇠머리오름이 위치한 남동쪽 해역은 대체로 급사면이 해저로 연장되고 있어 쇠머리오름의 해저 연장부의 존재를 지시한다. 우도 주변의 해저지형으로부터 우도 화산체는 해저 연장부의 범위가 뚜렷이 확인되며 쇠머리오름으로부터 남북 방향을 장축으로 하여 거의 방사상으로 확장, 형성되었음을 보여준다.

우도의 보다 자세한 지형 특성을 파악하기 위하여 정밀지형도를 작성하여 그림 II-4에 나타내었다. 우도는 보다 넓은 남쪽지역이 남북으로 약간 신장된 타원형을 이루고, 북쪽지역은 훨씬 협소하며 북으로 돌출된 길쭉한 형상을 나타내고 있어 종 모양에 가까운 지형 형상을 보인다. 내만을 형성하는 하고수동 해안과 남동쪽 해안을 향해 크게 돌출의 쇠머리오름 해안을 제외하면 우도 해안은 전체적으로 단조로운 편이다. 그러나 규모는 크지 않으나 해안을 따라 곳곳에서 만입과 돌출된 해안지형이 발달한다. 우도의 북동쪽 해안에는 본 섬과 도로로 연결된 비양도가 자리한다. 해안을 따라서 다양한 해안지형이 발달하고 있다. 용암류와 응회암으로 구성된 파식대지 및 파식절벽 등의 암석해안이 우세하나, 소규모의 모래 및 자갈 해변, 해안 사구, 조간대 등도 발달한다(제주특별자치도 세계유산관리단, 2014).



<그림 II-3> 우도 주변의 육상 및 해저 지형도.

II. 연구지역 개관



<그림 II-4> 우도의 정밀 지형도.

섬의 남동쪽 해안에 섬의 정점을 이루는 해발고도 132.5m의 수성화산체인 응회구로 알려진 쇠머리오름(우도봉)이 위치하며 북서 방향으로 열려 있는 말굽형을 띤다. 쇠머리오름을 제외하면 우도는 해발고도 약 40m를 넘지 않는 평탄대지를 형성하며 오름의 열려 있는 면으로부터 북서 방향으로 연장되다가 해발고도 약 10m 부근을 지나면서 거의 남북 방향으로 평탄지의 중

심축이 바뀐다. 또한, 우도 중앙부를 형성하는 넓은 정부 평탄면으로부터 남에서 북동 방향에 이르는 거의 방사상으로 해안을 향해 완만하게 경사지고 있다. 이러한 우도의 지형적 특징은 오름을 제외한 우도 전역이 쇠머리오름으로부터 분출된 용암류에 의해 형성되었음을 지시한다.

한편, 우도의 북쪽 말단의 평탄대지는 섬의 중앙부에 비해 해발고도가 낮으며 그 경계지역이 비교적 급한 사면을 형성하고 있어 뚜렷한 지형 기복의 차이를 보여주고 있다. 또한, 전체적으로 북서방향으로 발달하는 우도의 전체적인 지형 형태와는 달리, 완만하지만 거의 남북 방향으로 연장되는 평탄 정부를 형성하고 있어 지형의 연장성에서도 다소간의 차이를 나타내고 있다. 이러한 미세한 지형적 차이는 우도 북쪽 지역이 층서적으로 다른 시기의 용암류로 구성되었을 가능성을 시사하는 것으로 판단된다.

2. 지질환경

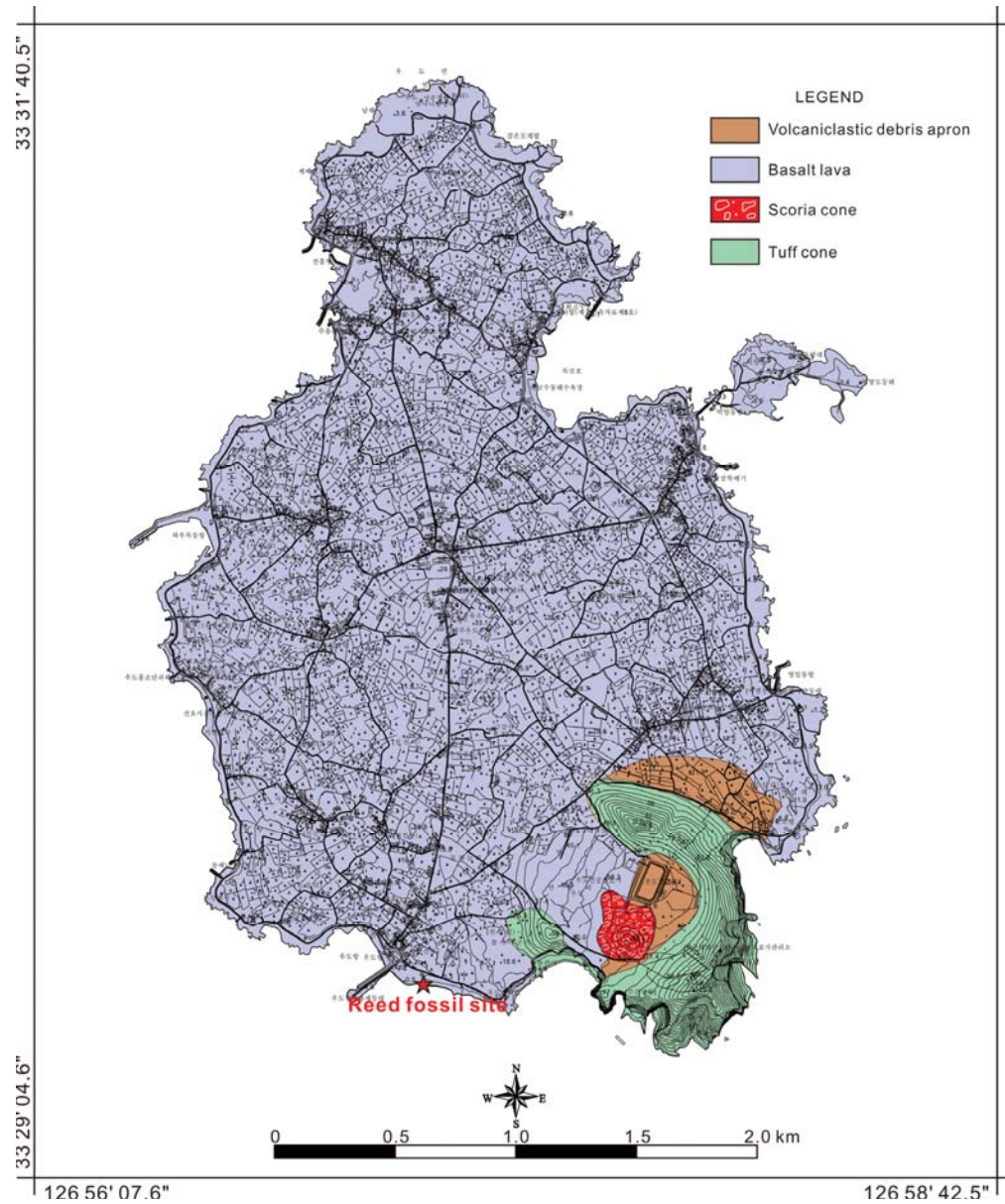
우도의 지질은 1:50,000 성산도폭(원종관 외, 1993)에서 표선리현무암을 기반으로 쇠머리오름 응회구, 분석구, 소머리현무암으로 구성된다고 보고된 후, 응회구의 분출기구와 분출과정(황상구, 1992, 1993), 퇴적기구(Sohn and Chough, 1993), 그리고 소머리현무암에 대한 암석학적 연구(고정선 외, 2005)가 진행되어 비교적 상세한 지질이 알려져 있다. 최근에는 우도 화산체를 형성한 마그마 작용에 대한 지화학적 연구도 수행되었다(Brenna et al., 2010). 최신의 연구 성과를 종합하면, 우도는 하부로부터 수정화산체인 우도 응회구(Udo tuff cone), 분석구(scoria cone), 그리고 용암순상지(lava shield)를 형성한 소머리현무암으로 구성된다(그림 II-5).

2.1 지질 구성 및 화산층서

우도는 화산층서에 있어 전술한 바와 같이, 하부로부터 응회구, 분석구, 그리고 용암순상지를 형성하는 소머리현무암으로 이루어져 있다. 분석구의 경우 스패터(spatter)라 불리는 용결된 분석(welded scoria)이 집적된 것으로 스패터구(spatter mound)로 지칭하는 것이 더 정확하나 편의상 분석구로 불리고 있다. 우도는 응회구의 분화구 내부에 분석구가 발달하고 용암류에 의해 피복되어 있어 수정화산활동에 의한 응회구 형성-육상에서의 스트롬볼리

II. 연구지역 개관

안 분출에 의한 분석구 형성-용암류 분출로 이어지는 일윤희 분출의 단성화 산체(monogenetic volcano)로 해석된다.

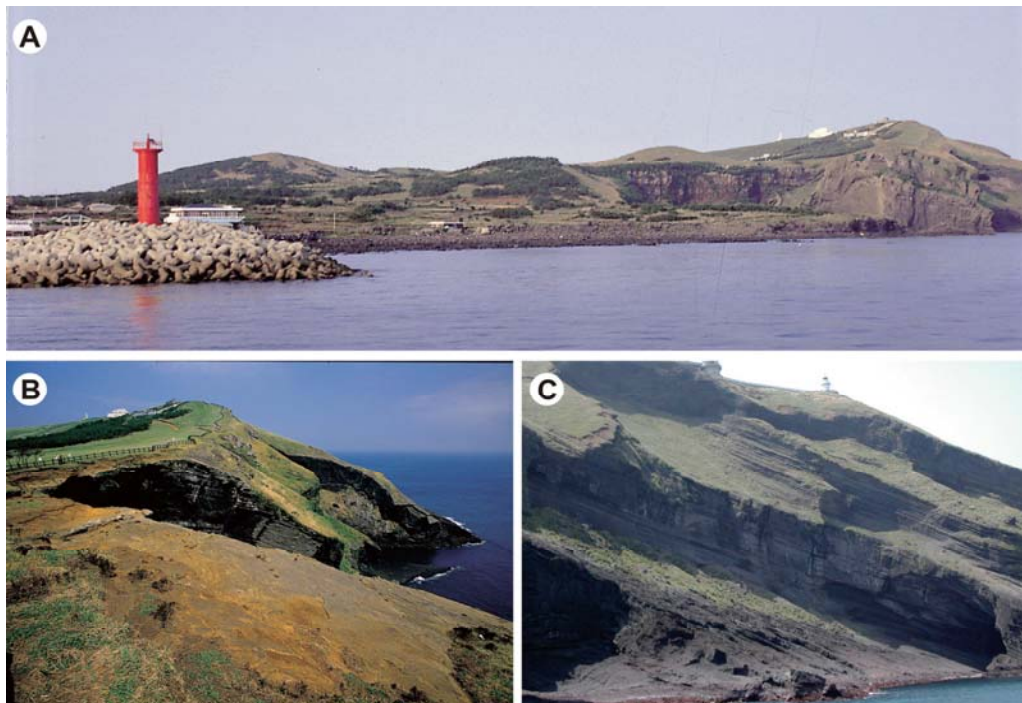


<그림 II-5> 우도의 지질도. 황상구(1993)와 Sohn and Chough(1993)의 지질도를 중합, 편집하였음.

2.1.1 우도 응회구

쇠머리오름으로 불리는 우도 응회구는 우도 남쪽 해안에 위치하며 20~30°

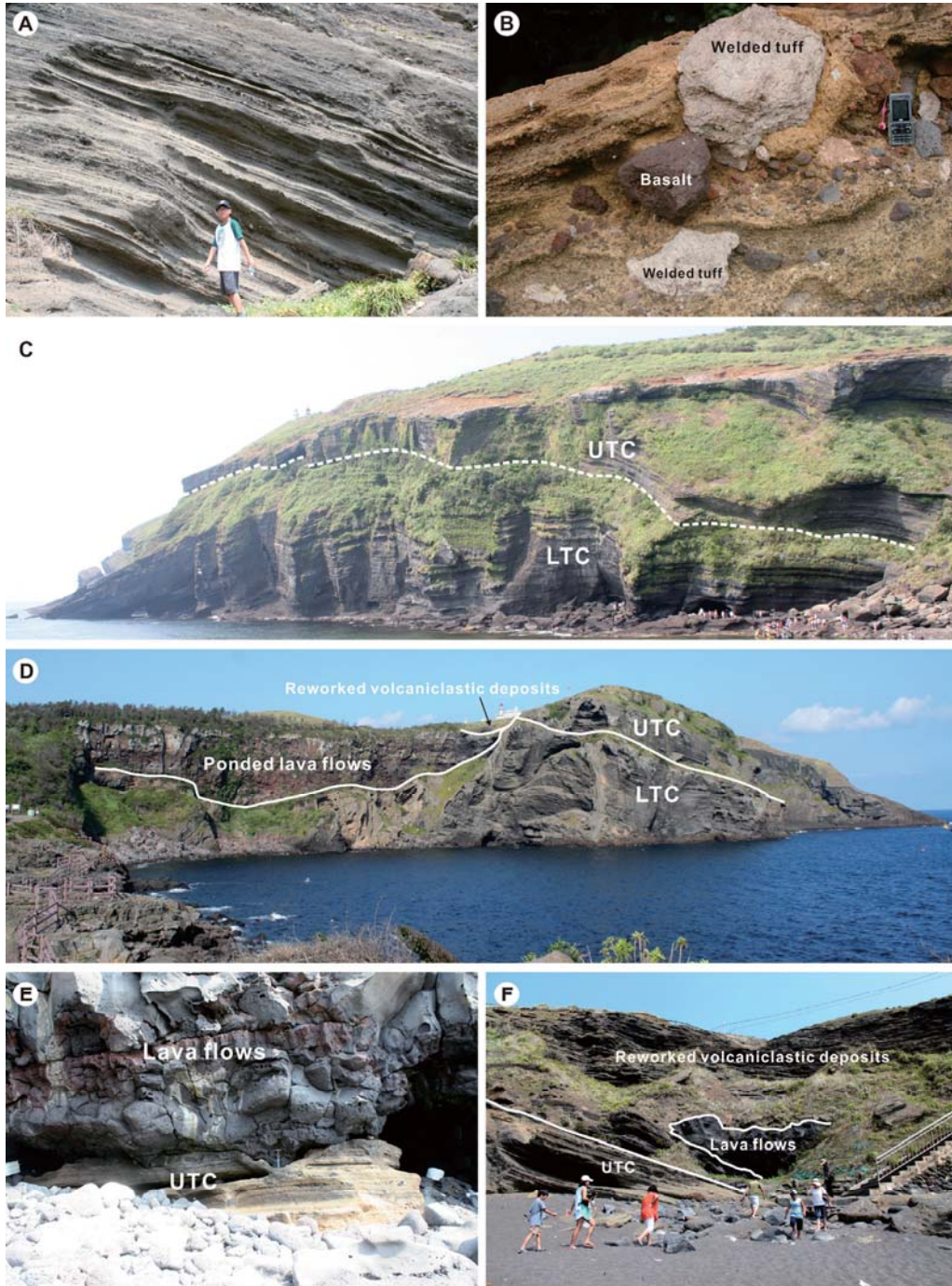
로 가파르게 경사진 응회암 및 화산력응회암으로 이루어져 있다(그림 II-6). 응회구는 북서쪽으로 트여있는 말굽 형태를 지니며 응회암층들은 화구를 중심으로 방사상의 경사를 나타낸다(황상구, 1992; Sohn and Chough, 1993). 응회암은 대부분 화산력(lapilli)으로 구성되며 화산암괴(volcanic block)와 화산회(ash)를 수반하며 층리구조의 발달이 양호하다(그림 II-7A). 또한, 응회암 내에는 현무암류로 구성되는 유질암괴와 이질암괴로서 백악기 용결응회암, 응회암 및 흑운모화강암 등을 포함한다(Kim et al., 1986).



<그림 II-6> 우도 응회구의 전경. A: 우도 남서쪽 해상에서 바라본 우도 응회구, B: 우도 응회구의 남쪽 외륜부, C: 우도 응회구 남쪽 해상에서 관찰되는 응회구 사면부를 형성하는 응회암.

유질암괴인 현무암류는 유리질로서 다공질인 것과 미정질이면서 비반상 내지 다소 반상조직을 보이며 우도 화산체 바로 아래에 존재하는 현무암질 용암류로부터 유래되었을 것이다(황상구, 1992; 그림 II-7B). 한편, 이질암편들은 제주도의 기반을 이루고 있던 백악기 기반암이 비교적 깊은 심도(300m 이상)에서 일어난 수성화산폭발에 의해 뜯겨 올라온 것으로 해석되고 있다(Sohn, 1996; 그림 II-7B).

II. 연구지역 개관



<그림 II-7> 우도 응회구의 지질. A: 우도 응회구를 구성하는 현무암질 응회암의 전경, B: 응회암 내 유질과 이질 암편, C & D: 우도 응회구의 응회암 구성 단위, D & E: 응회암을 피복하는 용암류, F: 응회암과 용암류를 피복하는 재동된 화산쇄설성 퇴적층. 지질조사용 해머길이 32cm.

우도 응회구에 대한 퇴적학적 연구결과(Sohn and Chough, 1993)에 따르면, 응회암은 렌즈상 래필리스톤(Facies A1), 렌즈상 조립질 응회암(Facies A2), 판상 래필리스톤(Facies B), 희미한 층리 발달 화산력 응회암(Facies C), 얇은 층리 응회암(Facies D) 등의 퇴적상으로 구분된다.

퇴적상 A, B는 연장 또는 렌즈상의 기질이 소실된 입자-지지된 래필리스톤으로 구성되며 역점리와 사면 하부로 가면서 조립화된다. 이러한 특징들은 중력으로 유도된 응력과 입자 충돌에 의해 유지되는 입자류(grain flow)에 의해 형성된 퇴적상임을 지시한다. 입자류는 고도로 분산된 도약 이동(saltation) 형태의 암설사태(avalanching)를 일으킨 화산쇄설성 입자들의 낙하로 발생되었다. 이때의 힘은 입자 간 충돌이 아니라 Nemec(1990)의 암설 낙하(debris fall)와 유사한 입자 자체로부터 발생한 것으로 해석된다. 암설 낙하가 안식각 미만의 응회구 사면 하부로 이동할 때 비탄성적 충돌과 이로 부터 증가된 입자 집중에 의한 에너지 손실에 기인하여 수축하게 된다. 결국, 입자들의 운반은 충돌에 의한 일반적인 입자류와 유사한 형태로 바뀌게 되었다. 퇴적상 C는 희미한 층리가 발달하고 국부적으로 역점리를 보이는 분급이 불량한 화산력 응회암으로 구성되어 있어 고농도 입자류에 의해 급격히 퇴적되었음을 지시한다. 퇴적상 D는 얇은 층리가 발달하고 층상으로 피복하는 형태의 응회암으로 구성되며 바람에 실려 운반된 화산회의 공중 낙하에 의해 형성된 것으로 해석된다.

우도 응회구를 구성하는 응회암층은 최하부의 응회구층(BTC: basal tuff cone), 하부 응회구층(LTC: lower tuff cone), 상부 응회구층(UTC: upper tuff cone) 등 크게 세 개의 퇴적단위로 이루어져 있음이 밝혀졌다(Brenna *et. al.*, 2010; 그림 II-7C). BTC는 접근이 어려운 해식절벽 노두에서만 관찰되며, 우도 응회구 전체 부피의 약 15%를 차지하는 것으로 추정된다. LTC는 해안을 따라 넓게 분포하고 있으나 접근 가능한 지역은 매우 제한되어 있으며, BTC를 정합적으로 덮고 있으며 간혹 침식적인 경계를 지니기도 한다. LTC와 BTC 사이의 절단면(truncation surface)은 응회구가 성장함에 따라 화도가 넓어지거나 또는 응회구 지층의 차별하중에 의해 응회구 지층이 붕괴되어 만들어진 면으로 해석된다(Sohn and Park, 2005). 이 절단면이 측방향으로 가며 정합적인 면으로 변화하는데 이는 기저 응회구층과 하부 응회구층 사이에 긴 시간 간격이 없었음을 지시한다.

LTC와 UTC는 전반적으로 정합적으로 쌓여있어 그 경계를 노두에서 확인하기가 어렵다. 하지만 한 지역에서는 LTC의 윗부분에 뒤틀리고 파쇄된 응회암층으로 이루어진 혼돈상의 지층(chaotic deposits)이 나타나고 그 위를

층리가 잘 발달한 UTC가 덮고 있어 LTC가 쌓인 후 잠시 화산분출의 휴지가 있었고 이때 응회구의 사면붕괴 작용이 일어났음을 보여준다. 다른 지역에서는 LTC와 UTC 사이의 경계를 확인하기는 어려우나, LTC가 판상층리를 보이는 화산력응회암으로 주로 이루어져있는 반면, UTC는 얇은 층리를 보여주는 응회암층으로 주로 이루어져 있어 양자 간의 구별이 가능하다.

우도 응회구 서쪽의 톨칸이 해안과 동쪽의 검멀레 해안에서는 응회구층을 용암순상지를 형성하는 용암류가 정합적으로 피복하는 층서 관계가 확인된다(그림 II-7D & E). 이러한 층서 관계는 용암류가 응회구의 분출이 종료된 직후에 정치되었으며, 우도의 응회구와 분석구, 용암순상지가 시간의 단절 없이 연속적으로 분출이 일어나 형성되었음을 지시한다. 또한, 응회구층과 용암류는 거의 수평에 가까운 경사를 지닌 재동된 화산쇄설성 퇴적층에 의해 피복된다(그림 II-7F). 재동된 화산쇄설성 퇴적층은 Sohn and Chough(1993)의 괴상 화산력 응회암(Facies E), 혼돈상 화산력 응회암(Facies F), 사층리가 발달한 응회질 사암(Facies G) 등으로서 응회구의 분출이 끝난 후 쇄설류(debris flow), 사태 및 슬럼프(slide/slump), 하천류(stream flow) 등의 재퇴적작용에 의해 형성된 것으로 해석되었다. 이러한 화산쇄설물의 재동작용은 수정화산분출이 종료된 직후 응회구층의 고결이 일어나기 전에 일어나는 것으로 알려져 있다(Ferrucci et al., 2005; Németh and Cronin, 2007).

한편, 우도 응회구에서는 바다에서 일어난 재동작용에 의해 쌓인 지층이 발견되지 않는데, 이는 수면 위에 드러난 우도 응회구가 전적으로 대기 하 환경에서 쌓였음을 지시한다. 그러나 물속에 잠긴 부분의 경우 해저에서 쌓였을 가능성을 배제할 수는 없다.

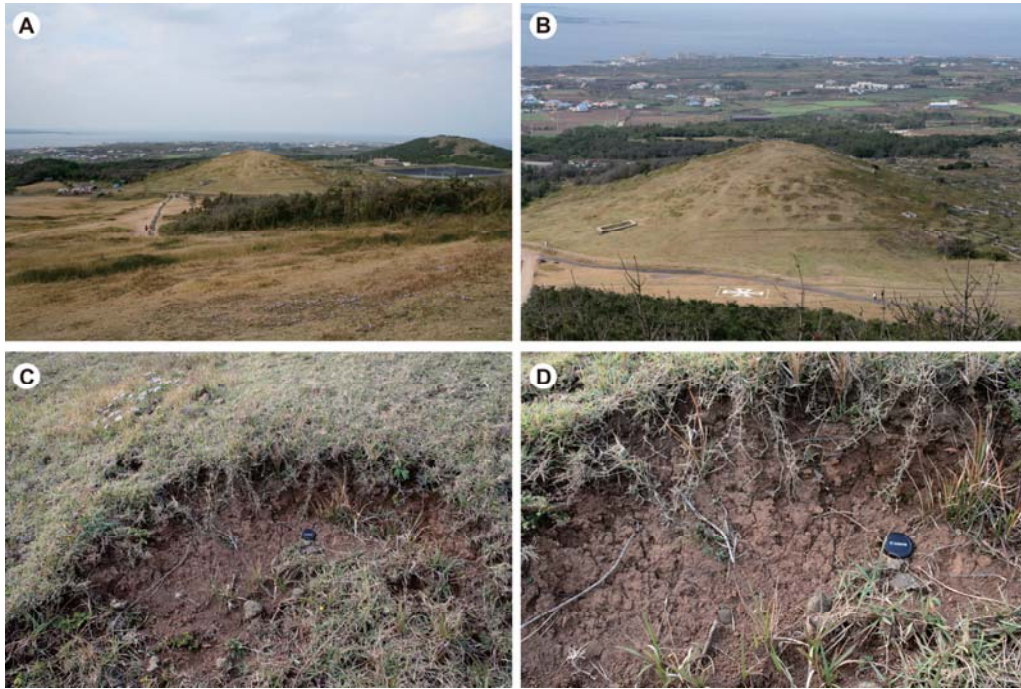
2.1.2 분석구

우도 응회구의 분화구의 중앙에서 약간 남쪽에 치우친 지점에 약 300m 직경의 소규모 분석구가 자리한다(그림 II-8A & B). 분석구는 실제 스페터구로 알려져 있으나 초지와 공동묘지가 조성되어 있고 토양이 피복하고 있어 구성 암상의 확인이 곤란하다(그림 II-8C & D).

2.1.3 소머리현무암

소머리현무암은 우도 응회구 분화구에서 분출되어 섬의 전역을 피복하며 톨칸이 해안 부근의 암석해안에서 암상적 특징을 보여주는 노두가 잘 발달한다. 소머리현무암은 다양한 두께의 판상의 괴상 용암류가 누적되어 있고,

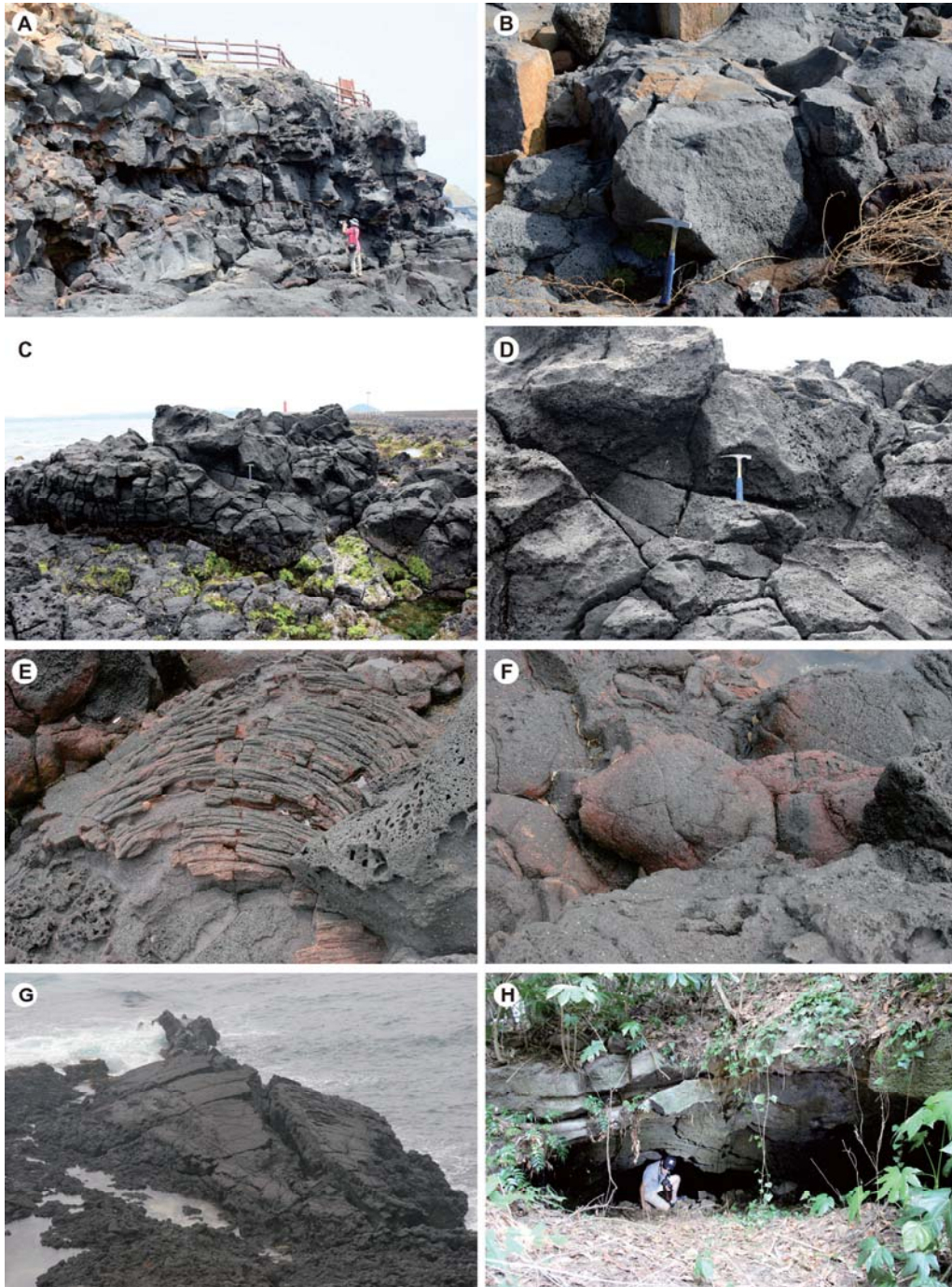
새끼줄구조(ropy structure), 용암발가락(lava toe), 튜물러스(tumulus), 용암동굴(lava tube) 등의 화산구조를 발달시키고 있어 파호이호이 용암류의 유형을 가짐을 알 수 있다(그림 II-9).



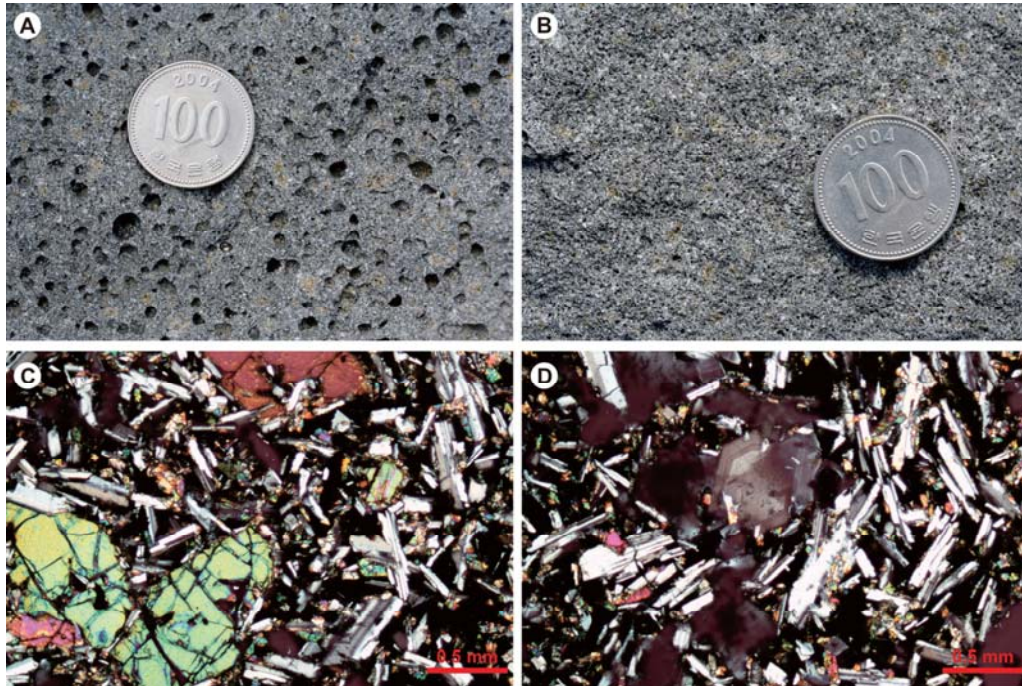
<그림 II-8> 우도 응회구 분화구 내에 발달하는 분석구. A & B: 분석구의 전경, C & D: 분석구 표면에 발달된 토양층. 카메라 렌즈덜개 직경 6cm.

침상장석감람석현무암의 암상적 특징을 가지는 소머리 현무암은 med. dark gray(N4)의 색조를 띠며 다량의 침상의 사장석을 포함하는 기질에 감람석 반정으로 구성된다. 감람석은 최대 5mm 크기에 이르나 대체로 약 1mm 크기가 우세하며 5~7%의 함량을 보인다. 기공은 원형 또는 타원형을 이루며 수 cm 크기에 이르나 대체로 약 5mm 크기가 우세하고, 다공질 부분에서는 20~30%의 함량을 갖는다(그림 II-10A & B). 현미경 하에서 소머리현무암은 약한 반상조직으로서 주로 감람석, 사장석, 사방회석이 반정으로 나타나며 드물게 반정과 미반정으로 단사회석이 산출된다. 석기는 감람석과 회석 등의 유색광물이 목편상의 사장석 결정 사이의 공간을 채우고 있는 입간상 조직(intergranular texture)을 띤다. 부분적으로 소량의 유리질이 석기를 이루는 미정질의 사장석, 회석, 감람석 결정 사이를 채우고 있는 인터서틀 조직(intersertal texture)을 나타내기도 한다(그림 II-10C & D).

II. 연구지역 개관



<그림 II-9> 소머리현무암의 용암류 특징. A & B: 시트상으로 누적된 소머리현무암, C & D: 괴상 암체의 특징을 보이는 소머리현무암, E: 새끼줄구조, F: 용암발가락, G: 튜물러스, H: 용암동굴(포켓동산굴). 지질조사용 해머 길이 32cm.



<그림 II-10> 소머리현무암의 암상 및 현미경적 특징. A: 다공질 암상, B: 괴상 암상, C & D: 입간상 및 인터서틀 조직을 보이는 현미경 사진. 동전 직경 2.3cm.

소머리현무암은 TAS 성분도($(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ 의 IUGS 분류도: Le Bas *et al.*, 1986)에서 알칼리 성분 함량을 기준으로 암석계열을 구분해 보면 (Irvine and Baragar, 1971; Macdonald and Katsura, 1964), 대부분이 서브알칼리암 계열에 도식되고 있어 서브알칼리 계열의 현무암과 현무암질안산암 영역에 해당된다(고정선 외, 2005). 또한, 서브알칼리암 계열의 현무암을 Al_2O_3 에 대한 알칼리 지수(alkali index)로 구분하는 성분도(Middlemost, 1975)에서 소머리현무암은 고알루미나질 현무암(또는 칼크-알칼리 현무암)에 비해 Al_2O_3 함량이 낮은 쏘레이아이트질(tholeiitic) 현무암의 영역에 도식된다(고정선 외, 2005).

2.2 우도 화산체를 형성한 마그마 작용

우도 응회구를 이루고 있는 응회암과 그 위를 덮고 있는 용암류에 대해 이루어진 화학분석 결과를 보면 우도의 암석은 하부로부터 하부 응회구층(LTC), 상부 응회구층(UTC), 그리고 용암류(LS: lava shield) 등 총 세 개

의 화학층서단위(chemostratigraphic unit)로 이루어져 있다(Brenna *et al.*, 2010). 이들 층서단위에 대한 주원소와 미량원소의 조성의 지화학적 특성으로부터 우도를 형성시킨 현무암질 마그마는 <그림 II-11>과 같이 매우 복잡한 지화학적 변화를 경험한 것이 드러났다(Brenna *et al.*, 2010). Brenna *et al.*(2010)에 의해 밝혀진 우도를 형성한 마그마 작용을 정리하면 다음과 같다.

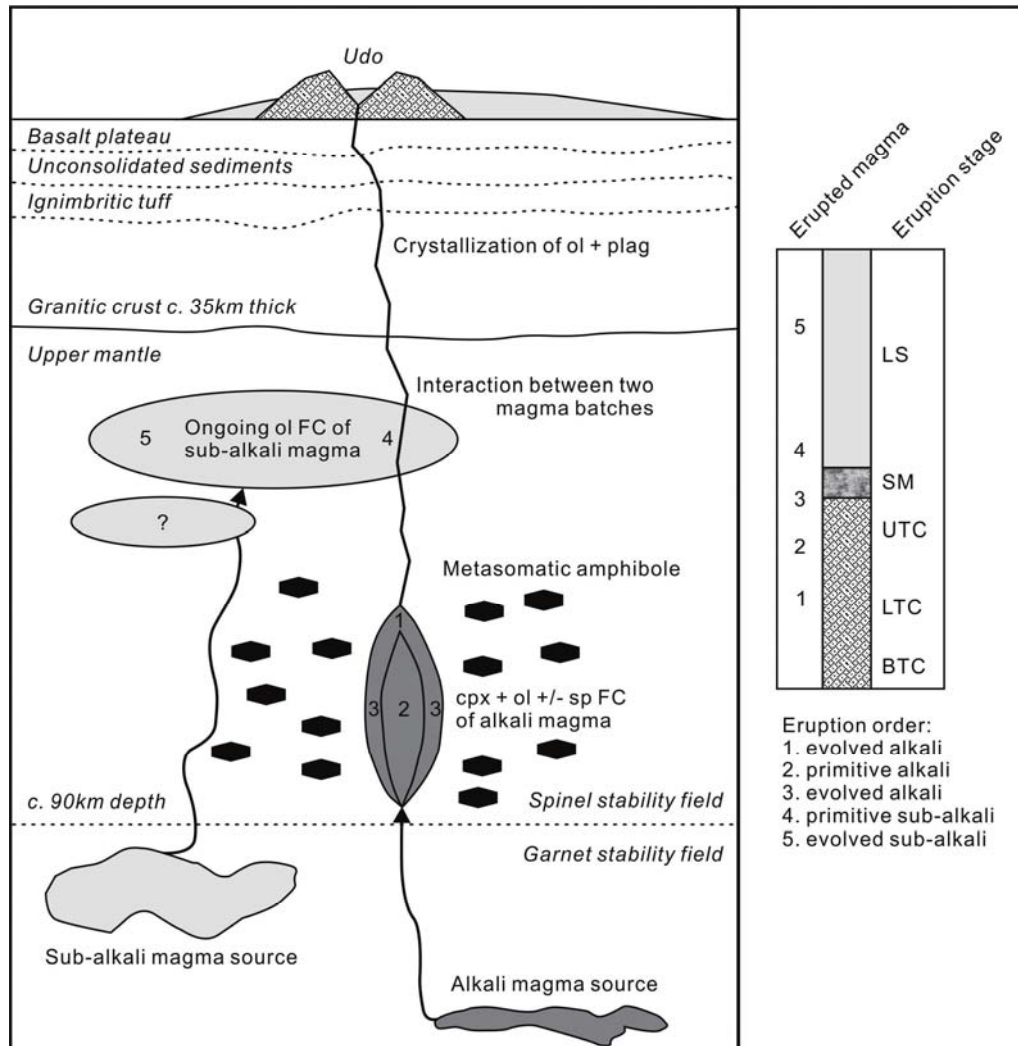
우도의 화산활동은 상대적으로 진화한 알칼리 마그마가 수성화산폭발을 일으키며 응회구를 만들며 시작되었다. 응회구를 만든 마그마는 분출이 진행됨에 따라 점차 원시적인 조성으로 변해갔으나 응회구 분출의 마지막 단계에서는 다시 진화한 조성으로 되돌아갔다. 아-알칼리(sub-alkali) 조성을 지닌 별개의 마그마가 응회구 분출 직후에 분출하여 용암순상지가 형성되었다. 각 화산층서단위 사이에 침식면이 없어 이러한 분출은 휴지기 없이 연속적으로 이루어진 것으로 보인다. 알칼리 마그마를 모델링한 결과, 마그마는 3~3.5 GPa의 압력 하에 석류석-감람암(garnet peridotite)의 용융에 의해 생성된 후, 1.5~2 GPa의 압력 하에서 단사회석-감람석-스피넬 분별결정을 겪었던 것으로 보인다. 반면, 아-알칼리 마그마는 화학조성이 다른 별개의 감람암에서 생성되어 비교적 천부의 지하에서 감람석 분별결정을 겪으며 만들어진 것으로 해석된다.

우도 응회구의 화학조성이 진화한 마그마에서 원시적인 마그마로 갔다가 다시 진화한 마그마 조성으로 돌아온 현상은 마그마 덩이가 하나의 암맥 시스템을 통해 분출하며 마그마 덩이의 각기 다른 부분이 순차적으로 분출하여 나타난 것으로 보인다. 아-알칼리 마그마는 알칼리 마그마가 먼저 분출하며 지표로 상승할 수 있는 길을 열어주었기 때문에 분출한 것으로 보인다. 이상의 결과는 제주도의 단성화산 분출 시 조성을 달리하는 마그마 덩이들이 상호작용을 하며 분출하였음을 지시한다.

2.3 우도 화산체의 형성 시기

소머리현무암에 대해 우도 북동쪽 해안에서 이루어진 K-Ar 연대측정 결과, 114 ± 3 ka의 연대를 지닌 것으로 나타났으며 우도 화산체의 화산활동 시기는 후기 플라이스토세에 해당한다고 보고되었다(고정선 외, 2005). 한편, 쇠머리오름 분화구 내부에서 얻어진 시추코어에 대한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정 결과를 보면, 해발 25.5m의 쏘레아이트질 안산암으로부터 102 ± 69 ka의 연대가 얻어졌으며, 해발 7.5m의 알칼리 현무암에서는 86 ± 10 ka의 연대가 얻어

졌다(고기원 외, 2008). 이들 연대는 우도 지표에서 얻어진 K-Ar 연대와 대체로 유사한 결과로서 우도가 후기 플라이스토세의 화산활동으로 형성되었음을 확증해주고 있다.



<그림 II-11> 우도를 형성한 마그마 시스템 모델(Brenna *et al.*, 2010).
 ol: 감람석, plag: 사장석, cpx: 단사회석, FC: 분별결정작용, BTC: 현무암질 응회구, LTC: 하부응회구, UTC: 상부응회구, SM: 스패터구, LS: 용암순상지.

Ⅲ. 갈대화석 산지의 지질과 고환경

1. 갈대화석 산지의 개관

1.1 위치 및 지형환경

갈대화석 산지는 우도 남쪽의 우도항 방파제로부터 동쪽의 툇칸이 해안 쪽으로 약 200m 떨어진 해안에 위치하고 있다(그림 II-4 참조). 지리좌표에 있어 갈대화석 산지는 E126° 57' 11.15", N33° 29' 30.87"에 해당된다. 이 해안은 서북서-동남동 방향의 거의 직선상으로 발달하며, 현무암의 거력으로 구성된 자갈 해변과 곳곳에 현무암반의 파식대지를 형성하고 있다(그림 III-1A & B).

갈대화석 산지는 거의 해안선상에 입지하고 있어 만조 기에는 침수되며, 간조 기에만 관찰과 접근이 가능하다(그림 III-1C & D). 최대 간조 시에는 화석산지 전면 해상의 암초지대까지 노출된다. 갈대화석 산지 해안은 화석을 배태하고 있으며 파식대지를 이루는 응회질 퇴적암체가 협소하게 발달하며 그 주변으로는 현무암의 거력으로 구성된 자갈 해변이 넓게 발달한다. 갈대화석 산지의 전면 해상에는 현무암으로 구성된 소규모 암초가 해안선과 평행하게 발달하고 있어 바다에 대한 지형적 장벽을 형성하고 있다(그림 III-1C & D). 이와 같이 다른 미소한 해안지형적 특성이 갈대화석을 배태하는 퇴적층의 형성에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

1.2 갈대화석층의 산출 상태

갈대화석이 산출되는 지층, 즉 갈대화석층은 응회질 퇴적층으로서 해안선 부근에 매우 협소하게 발달하고 있다(그림 III-2A). 노출된 범위는 길이 약 20m, 폭 약 5m 정도로서 약 100m²에 불과하다. 노두 주변의 현무암 거력 사이에 갈대화석층의 암체로부터 분리된 다양한 크기의 암괴가 산재하고 있다(그림 III-2B-D). 현재 갈대화석을 포함하는 식물화석은 응회질 퇴적층의 본체 내에서는 관찰되지 않으며 그 주변에 거력으로 산재하고 있는 응회질 퇴적암 각력에서만 확인되고 있다(그림 III-2D). 이러한 양상은 갈대화석을 포함하는 지층이 층서적으로 본 암체의 상부에 위치하고 있었음을 암시한다.



<그림 III-1> 갈대화석 산지의 전경사진. A: 드론으로 촬영한 갈대화석 산지와 주변 해안, B: 톨칸이 해안 부근의 ‘한반도 여’ 조망 지점에서 바라본 갈대화석 산지 해안, C: 간조기에 부분적으로 노출된 갈대화석 산지 해안, D: 최대 간조기에 완전히 드러난 갈대화석 산지 해안.



<그림 III-2> 갈대화석층 및 갈대화석의 산출 전경사진. A: 갈대화석층(응회질 퇴적층) 노두의 전경, B & C: 갈대화석층 본체에서 해안침식으로 인해 떨어져 나와 현무암 거력 사이에 산재된 갈대화석층의 각력, D: 갈대화석층 각력에서 관찰되는 식물화석. A의 URF-1은 퇴적주상도 작성 지점. 지질조사용 해머 길이 32cm.

2. 갈대화석 산지의 지질

2.1 지질 개요

갈대화석 산지의 지질은 소머리현무암과 이를 부정합으로 피복하는 제4기 퇴적층으로 구성된다. 갈대화석 산지에서의 소머리현무암은 부분적으로 암반으로 산출되기도 하나 대부분의 지역에서 거력의 해변 자갈로서 분포한다.

제4기 퇴적층은 크게 하부의 유기질 이질 퇴적층과 상부의 갈대화석층으로서 식물화석을 배태하고 있는 현무암질 응회질 퇴적층으로 구분된다. 하부의 유기질 이질 퇴적층은 완전한 미고결 상태를 유지하고 있으나, 상부의 응회질 퇴적층은 부분적으로 교결작용이 진행되어 어느 정도 견고한 상태를 유지하고 있어 양자 간의 산상 차이가 뚜렷하다.

2.2 제4기 퇴적층의 지질

갈대화석 산지의 제4기 퇴적층에 대해 암상, 퇴적구조, 구성물질, 화석산출 유무 등의 여러 퇴적학적 특징을 자세히 관찰하고 이 결과를 퇴적주상도로 작성하여 그림 III-3에 나타내었다. 퇴적주상도는 갈대화석 산지 북쪽의 해안쪽 모서리 지점에서 작성하였다(그림 III-2A).

전술한 바와 같이 제4기 퇴적층은 크게 하부의 유기질 이질 퇴적층과 상부의 응회질 퇴적층으로 구분된다. 응회질 퇴적층은 다시 상부와 하부 응회질 퇴적층으로 세분된다. 특히, 갈대화석을 배태하고 있는 상부 응회질 퇴적층은 노두에는 발달하지 않고 산재된 각력에서만 확인할 수 있다. 노두를 이루고 있는 응회질 퇴적층에서는 갈대화석이 산출되지 않고 있어 갈대화석을 포함하며 각력으로 산출되는 응회질 퇴적층이 층서적으로 상위를 점하고 있었을 것으로 판단된다. 이에 따라 퇴적주상도 작성에 있어서 갈대화석 산지에서 가장 큰 규모로 산출되는 그림 III-2C의 응회질 퇴적층의 거력을 대상으로 하였다.

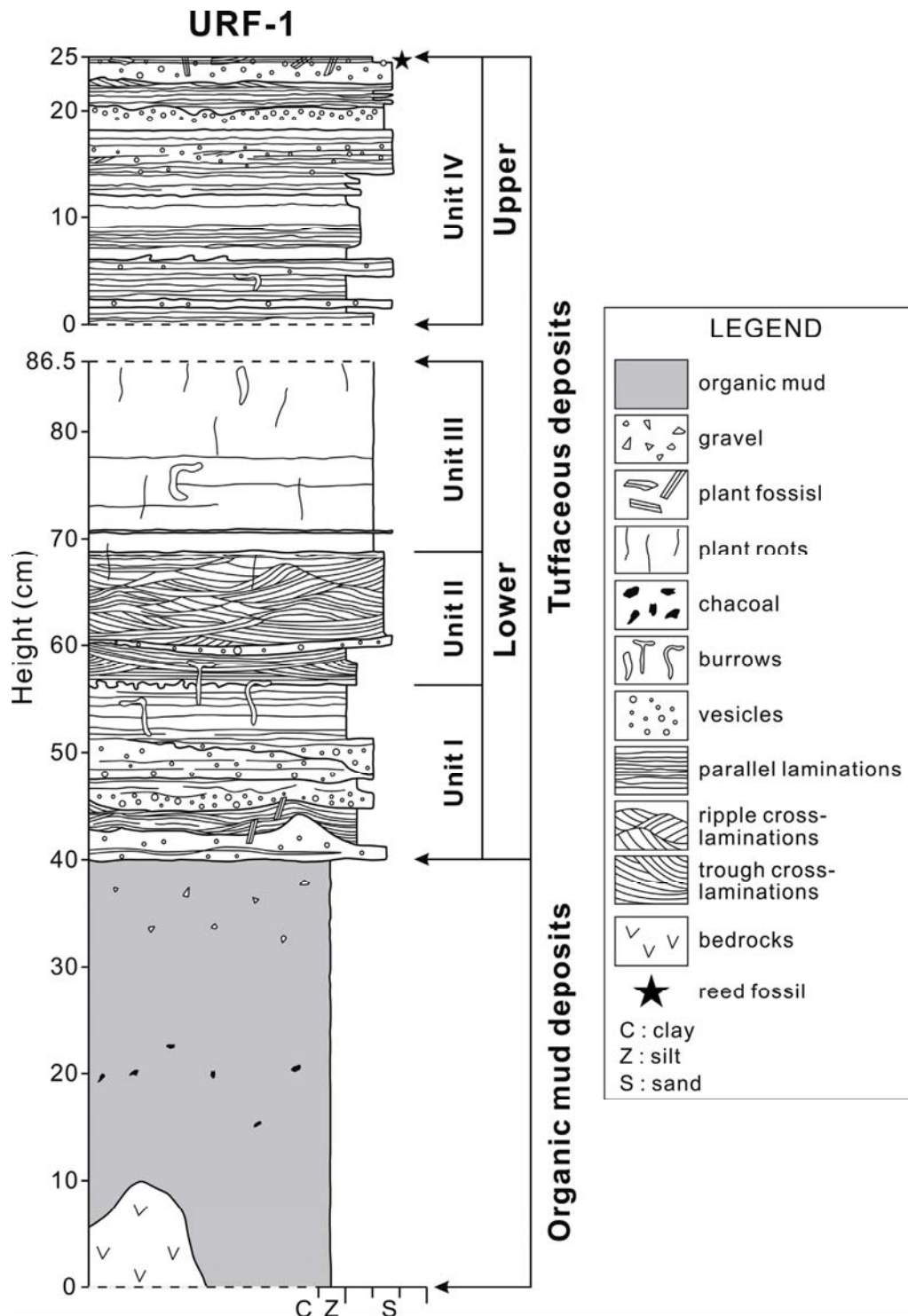
2.2.1 유기질 이질 퇴적층

제4기 퇴적층의 하부를 접하는 유기질 이질 퇴적층은 소머리현무암과의 하부 경계를 뚜렷이 관찰할 수 없으며 최소 약 40cm 두께에 이르는 것으로 확인되었다(그림 III-3과 III-4A-C).

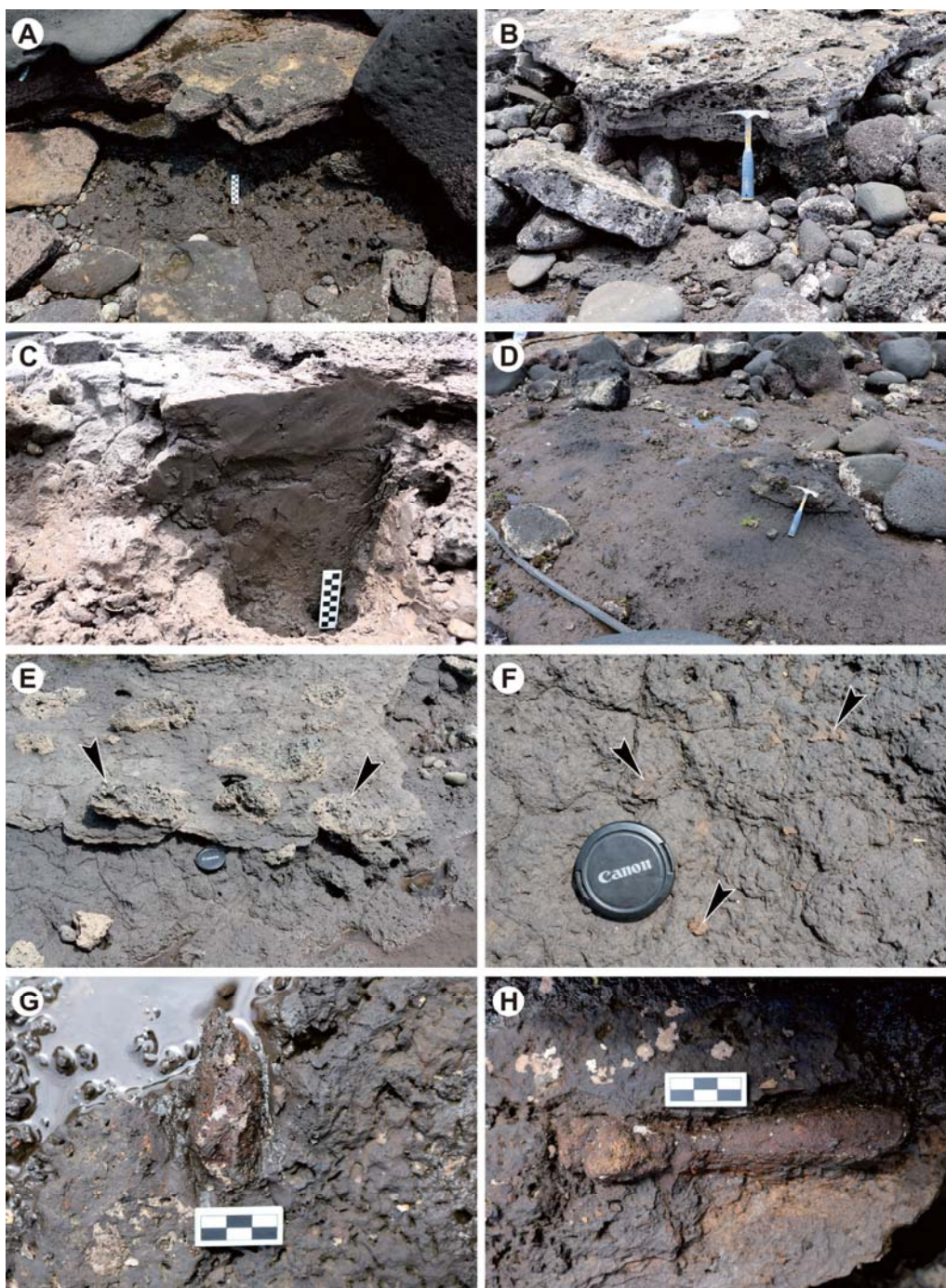
이 퇴적층은 균질한 실트질 퇴적물로 구성되며 암회색의 색조로서 나타나듯이 전체적으로 유기물 함량이 높다(그림 III-4C). 퇴적구조의 발달이 불량하여 괴상의 특징을 보인다. 미약하지만 퇴적층 상부에서 유기물 함량이 높아 보다 어두운 색조를 띤다. 퇴적층 중간부에는 수 mm 크기의 탄화식물편이 소량 관찰되며 최상부 구간에는 수 mm 크기의 풍화암편을 소량 포함한다. 퇴적층 내에는 현무암 각력이 산재하고 있는데 이를 피복하는 응회질 퇴적층이 제거되어 평면상에 노출된 곳에서 쉽게 확인할 수 있다(그림 III-4D & E).

한편, 유기질 이질 퇴적층의 최상면에는 다양한 크기의 노듈(nodule)이 관찰된다(그림 III-4F-H). 형태에 있어서 노듈은 1~2cm 크기를 가지며 불규칙하거나 괴상을 띠기도 하지만 일부는 최대 10cm 크기에 이르는 관상을 이루기도 한다(그림 III-4G & H). 노듈의 내부는 이질 퇴적물로 구성되며 외연부는 갈색의 산화물이 피복하고 있다. 이와 같이 산화물로 피복된 노듈의 산출은 이 퇴적층 형성된 후에 상당 기간 대기에 노출되었음을 지시한다.

III. 갈대화석 산지의 지질과 고환경



<그림 III-3> 갈대화석 산지 제4기 퇴적층의 퇴적주상도. 퇴적주상도 작성 지점은 그림 III-2A 참조.



<그림 III-4> 유기질 이질 퇴적층의 전경사진. A & B: 응회질 퇴적층의 하부에 발달함, C: 퇴적층의 단면 전경, D & E: 퇴적층의 평면 노출 전경 (화살표는 현무암 각력), F-H: 최상부에 층준에 발달하는 노둑(F의 화살표는 노둑). 지질조사용 해머길이 32cm, 카메라 렌즈덮개 직경 6cm.

III. 갈대화석 산지의 지질과 고환경

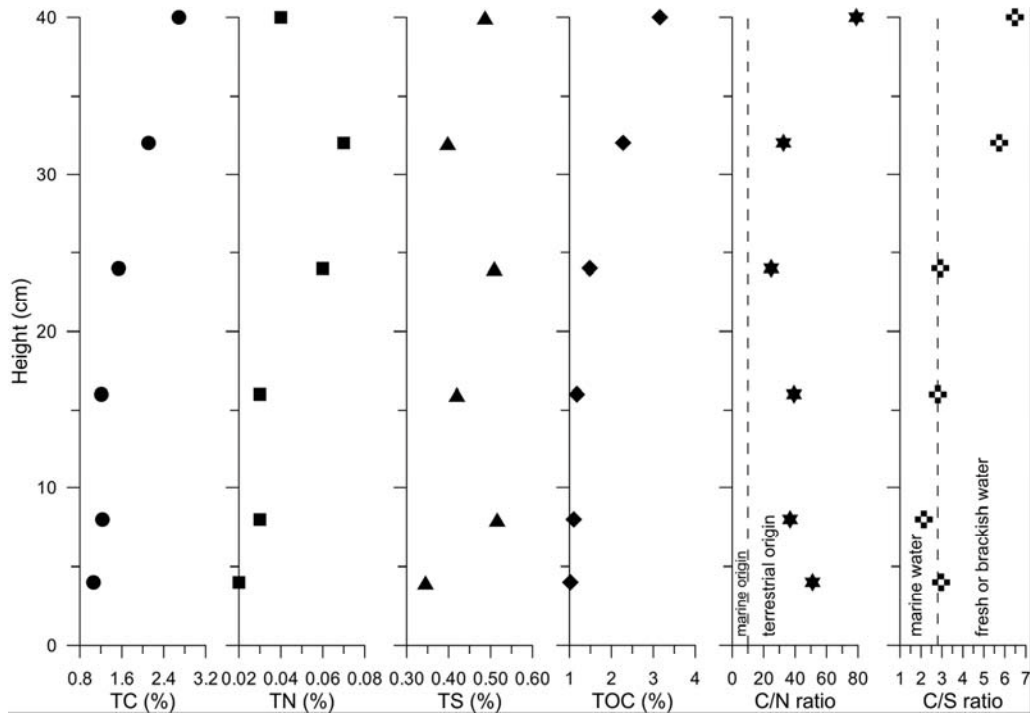
유기질 이질 퇴적층의 형성 환경, 즉 퇴적물의 기원과 퇴적환경을 규명하기 위하여 유기지화적 분석을 수행하였다. 퇴적층에 대해 수행된 유기지화학적 분석의 내용은 총탄소(TC), 총질소(TN), 총황(TS), 총유기탄소(TOC) 함량 등이며 측정값으로부터 C/N 비(총질소 함량에 대한 총유기탄소 함량의 비)와 C/S 비(총황 함량에 대한 총유기탄소의 비)를 산정하였다. 퇴적층 전체를 포괄할 수 있도록 약 4~8cm 간격으로 총 6지점을 선정하여 분석을 실시하였다. 퇴적물의 총탄소, 총질소, 총황 함량은 한국기초과학지원연구소에, 그리고 총유기탄소 함량은 경성대학교 공동실험실습관에 의뢰하여 수행되었다. 유기질 이질 퇴적층의 유기지화학적 분석 결과는 표 III-1에 제시하였고, 깊이에 따른 변화 특성을 파악하기 위하여 그래프로 작성하여 그림 III-5에 나타내었다.

<표 III-1> 유기질 이질 퇴적층의 총탄소, 총질소, 총황 및 총유기탄소 함량과 C/N 및 C/S 비

시료 번호	심도(cm)	TC(%)	TN(%)	TS(%)	TOC(%)	C/N 비	C/S 비
1	40	2.69	0.04	0.49	3.16	78.90	6.48
2	32	2.11	0.07	0.40	2.28	32.57	5.73
3	24	1.54	0.06	0.51	1.49	24.77	2.92
4	16	1.21	0.03	0.42	1.18	39.27	2.81
5	8	1.23	0.03	0.52	1.10	36.77	2.14
6	4	1.06	0.02	0.35	1.02	51.10	2.96

총탄소 함량은 전체적으로 1.06~2.69%의 범위를 보이며 상부로 가면서 점차 증가한다. 심도 24cm를 지나면서는 보다 큰 폭으로 증가한다. 총질소는 0.02~0.07%의 함량 범위를 가지며 총탄소와 거의 유사한 분포 경향을 나타내나 최상부 시료에서는 감소하고 있어 차이를 보인다. 총황은 전체적으로 0.35~0.51%의 협소한 범위를 유지하며 심도에 따라 뚜렷한 분포 경향이 나타나지 않고 증감이 반복되고 있어 다소 산재된 양상을 보인다. 총유기탄소 함량은 1.02~3.16%의 범위를 보이며 상부로 가면서 미약한 증가를 보이다가 심도 24cm를 지나면서는 증가폭이 비교적 크게 나타난다. C/N 비는 24.77~78.90의 범위로서 상부로 가면서 점차 감소하다가 24cm 이상의 최상부 구간에서 다시 증가하고 있다. C/S 비는 2.14~6.48의 범위를 보이며 상부로 가면서 대체로 일정하게 유지되다가 최상부 구간에서 증가하는 양상

을 나타낸다.



<그림 III-5> 유기질 퇴적층의 깊이에 따른 총탄소, 총질소, 총황, 총유기탄소, C/N 비 및 C/S 비 분포도.

주요 유기원소의 함량 및 원소 비의 분포 특성에 따라 유기질 이질 퇴적층은 대체로 깊이 25~30cm 사이를 경계로 상부 및 하부 구간으로 세분된다. 상부 구간에서의 유기물 함량이 높게 나타나고 있어 전술한 색조의 변화 양상과 대체로 일치한다.

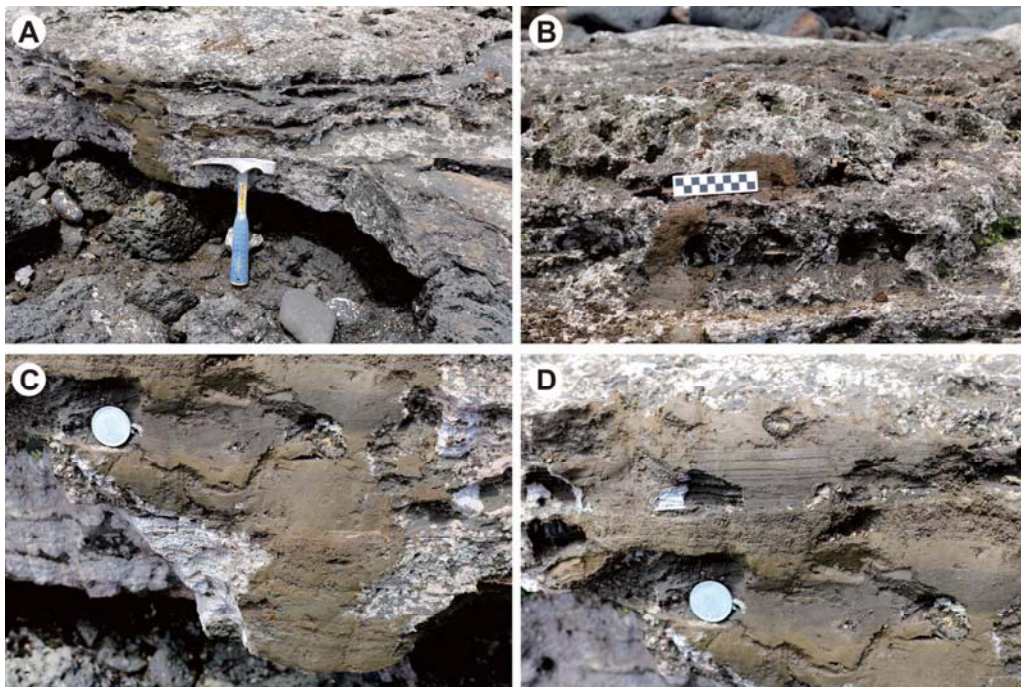
C/N 비는 해양 퇴적물에 쌓인 유기물의 해양 또는 육성 기원이 우세한지를 판단하는 기준이 된다. C/N 비가 10 이상이면 육상기원이고, 그 이하이면 해양 기원 유기물의 유입이 우세하는 것을 지시한다. 또한 해양 환경에서 퇴적된 퇴적물 내의 평균 C/S 비는 2.8 ± 0.8 이하의 값을 나타내고, 담수나 기수 환경에서는 이보다 높은 값을 나타낸다(Berner, 1982; Berner and Raiswell, 1984). 유기질 이질 퇴적층의 C/N 비는 모든 시료에서 10을 초과하고 있어 퇴적층의 유기물은 육상 기원임을 지시한다. C/S 비는 최상부 구간에서는 2.8을 크게 초과하고 있어 담수 또는 기수환경을 지시하나 이하 구간에서는 2.8 내외의 값을 나타내고 있어 해수와 담수 또는 기수환경의

경계 영역에 분포하고 있다.

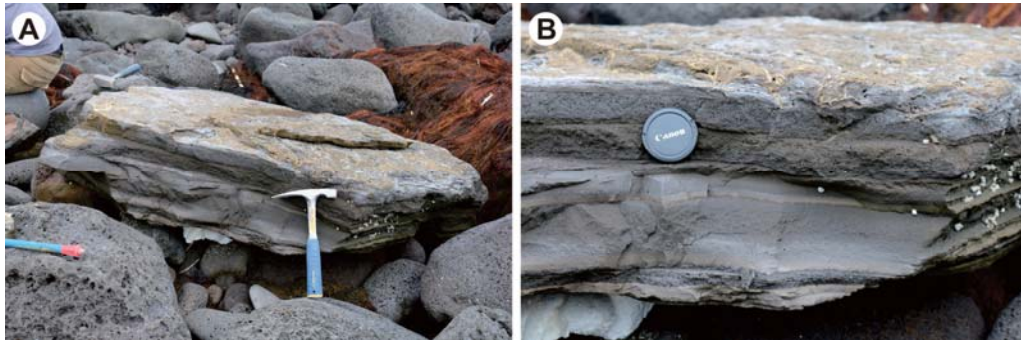
2.2.2 응회질 퇴적층

갈대화석을 배태하고 있는 응회질 퇴적층은 현재 잔존 규모가 약 71.5cm 두께로서 1m에도 이르지 못하는 소규모로 산출된다. 상부 응회질 퇴적층은 약 25cm이며, 하부 응회질 퇴적층은 약 46.5cm로서 보다 두껍게 발달한다. 전체적으로 응회질 퇴적층은 담회색, 녹회색 또는 담갈색 등의 색조를 띠는 극세립질~중립질의 현무암질 응회질 사암으로 구성되며 박층의 현무암질 응회암이 여러 층준에서 협재된다(그림 Ⅲ-6과 Ⅲ-7). 응회질 사암으로 구성된 구간에서는 평행엽층리, 사암층리 등의 층리구조의 발달이 잘 관찰된다(그림 Ⅲ-6C & D, 그림 Ⅲ-7B). 응회질 퇴적층은 거의 수평층이나 바다를 향해 미세하게 경사진다.

제4기 퇴적층의 상부를 점하는 응회질 퇴적층은 암상, 퇴적구조, 구성물질, 화석의 산출 여부 등의 다양한 퇴적학적 특징에 따라 전체적으로 4개의 퇴적단위(하부로부터 Unit I~Unit IV)로 세분된다(그림 Ⅲ-3과 Ⅲ-7). Unit I~Ⅲ은 하부 응회질 퇴적층에, 그리고 Unit IV는 상부 응회질 퇴적층에 해당된다.



<그림 Ⅲ-6> 하부 응회질 퇴적층의 전경사진.

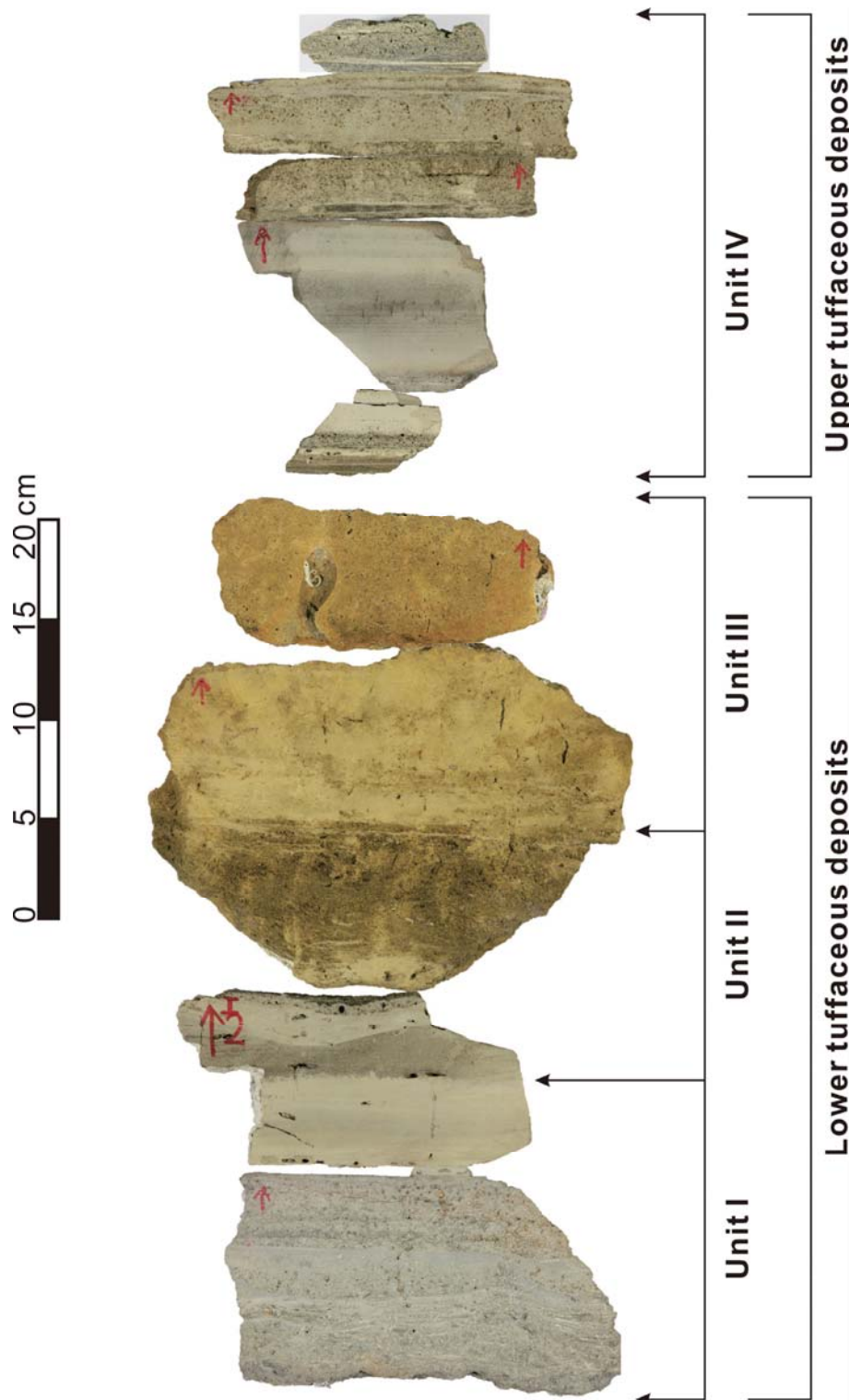


<그림 III-7> 상부 응회질 퇴적층의 전경사진.

Unit I 은 약 16cm 두께로서, 하부의 응회암과 상부의 평행엽층리가 발달하는 응회질 사암의 반복적인 세트르 구성된다. 상부로 가면서 각 세트의 하부를 점하는 응회암의 두께는 점차 감소한다. 응회암에는 미세한 구형 또는 타원형의 기공이 발달한다. 최하부 응회질 사암의 평행엽층리는 매우 조밀하며 응회암의 상면 기복과 조화를 이루어 부분적으로 파상을 이루거나 저각의 사층리를 발달시키기도 한다. 중간부의 응회질 사암에 발달하는 평행엽층리는 다소 희미하며 전체적으로 응회암에 가까운 암상을 띠고 있어 상하부 구간과 차이를 보인다. 퇴적단위 상부와 중간부 사이에는 대체로 하도상을 이루는 불규칙한 침식면이 발달하기도 한다. 침식면을 따라서는 산화물이 침전되어 있다. 퇴적단위의 최상부의 응회질 사암에서는 수직과 수평적으로 발달하는 서관구조(burrow)가 발달하며, 최하부의 응회질 사암에서는 매우 드물게 식물화석을 포함하기도 한다.

Unit II는 약 12cm 두께로서 하부로부터 곡사엽층리, 연흔사암층리, 평행엽층리가 발달하는 응회질 사암으로 구성되며, 중간부의 연흔사암층리의 발달 구간이 보다 두껍다. 하부의 곡사엽층리 발달 구간 내에는 1~2cm 두께의 박층의 응회암이 협재된다. 응회암 내에는 미세한 구형의 기공이 발달한다. 퇴적단위의 최상부에는 미세한 식물뿌리흔적이 관찰된다.

Unit III은 약 17.5cm 두께에 이르며, 전체적으로 퇴적구조의 발달이 불량하여 괴상이거나 부분적으로 희미한 평행엽층리가 발달하는 응회질 사암으로 구성된다. 하부의 Unit II와는 거의 평탄한 경계를 이루나 부분적으로 불규칙한 침식경계를 이루기도 한다. 전체적으로 균질한 입도를 유지하며 퇴적단위 곳곳에 미세한 식물뿌리흔적과 서관구조가 발달한다. 상부 구간의 응회질 사암 내에는 대부분 구형을 이루나 부분적으로 불규칙한 형태의 기공이 소량 발달하기도 한다.



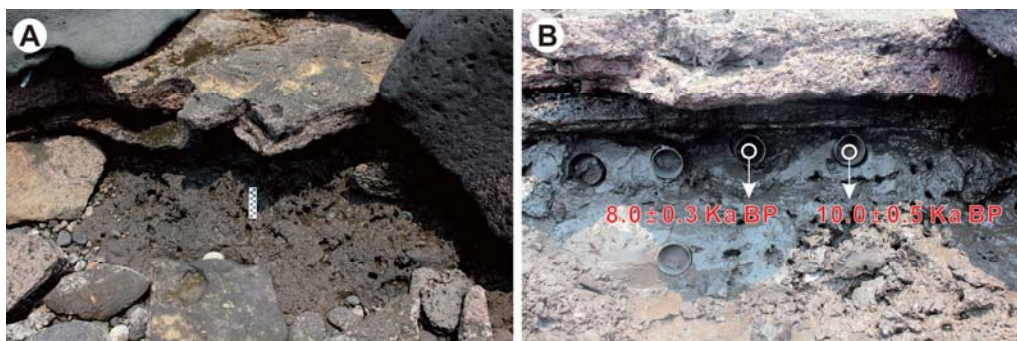
<그림 III-8> 응회질 퇴적층의 세부 전경 및 퇴적단위 구성도.

Unit IV는 약 25cm 두께로서, 전체적으로 평행엽층리의 발달이 우세한 응회질 사암으로 구성되며 최상부 구간에는 박층의 응회암이 협재된다. 최상부의 응회암 및 응회질 사암 내에 식물화석을 다량 포함하며 최하부의 응회질 사암 내에는 서관구조가 관찰된다. 평행엽층리가 발달한 응회질 사암의 최상부에는 부분적으로 연흔사암층리가 발달하기도 한다. 부분적으로 층 경계는 뚜렷하고 평탄하나 부분적으로 파상의 침식흔적이 관찰되기도 한다.

2.3 연대측정

2.3.1 연대측정 개요

갈대화석을 배태하고 있는 응회질 퇴적층의 형성 시기를 규명하기 위하여 최하부 유기질 이질 퇴적층을 대상으로 OSL(광여기루미네선스) 연대측정을 실시하였다. 연대측정을 위해 유기질 이질 퇴적층의 최상부 구간에서 2점의 시료를 채취하였다(그림 III-9).



<그림 III-9> 최하부 유기질 이질 퇴적층에서의 OSL 연대측정을 위한 시료채취 전경 및 연대측정 결과.

루미네선스(luminescence)는 석영, 장석 등의 무기결정에 축적된 환경방사선 에너지가 열 또는 빛에 의해서 외부에 빛으로 방출되는 물리적 현상이다. 열에 의해 방출되는 루미네선스를 TL(thermoluminescence), 빛에 의해 방출되는 루미네선스를 OSL(optically stimulated luminescence)이라 한다. OSL 연대측정은 루미네선스와 환경방사선의 상관관계를 이용한 연대측정법으로서 석영 결정 내에 퇴적 당시 햇빛에 노출되면서 축적된 환경방사선 에너지가 빛에 의해 방출되는 광여기루미네선스(OSL) 현상을 이용한다. OSL 연대측정법은 제4기 퇴적층에 일반적인 방사성탄소연대측정법에 비해 연대

의 상한이 훨씬 길고, 탄화물이 부재된 지층에도 적용이 가능하므로 특히 구석기유적에서 보편적으로 널리 활용되고 있다. OSL 연대측정은 한국기초과학지원연구원 환경과학연구부에서 의뢰하여 수행되었다.

2.3.2 연대측정 결과

갈대화석을 배태하고 있는 응회질 퇴적층의 하부를 점하는 최하부 유기질 이질 퇴적층에 대한 OSL 연대측정 결과를 표 III-2에 정리하였으며, 그림 III-8에도 함께 도시하였다. 유기질 이질 퇴적층의 최상부 2개 지점에서 $8.0 \pm 0.3\text{ka BP}$ 와 $10.0 \pm 0.5\text{ka BP}$ 의 OSL 연대를 얻었다. 동일한 층준임을 고려하면 두 시료의 오차는 작지 않으나 이 퇴적층의 개략적인 형성 시기를 추정하는 데는 크게 무리가 없는 것으로 판단된다.

결론적으로 갈대화석을 배태하고 있는 유기질 퇴적층은 8,000~10,000년 전인 홀로세 초기에 형성되었으며, 적어도 10,000년 전 이후에 갈대화석을 배태하고 있는 응회질 퇴적층의 발달이 시작되었음을 알 수 있다.

<표 III-2> 갈대화석 산지 유기질 이질 퇴적층의 OSL 연대측정 결과.

Sample Code	Dose Rate (Gy/ka)	Water content* (%)	Equivalent Dose (Gy)	Aliquots used** (n/N)	OSL age (ka, 1σ SE)
우도갈대 1	2.80 ± 0.08 (2.80 ± 0.08)	35.5 (35.6)	22.5 ± 0.7	16/16	8.0 ± 0.3 (8.0 ± 0.3)
우도갈대 2	2.68 ± 0.07 (2.68 ± 0.07)	33.1 (33.1)	26.9 ± 1.0	16/16	10.0 ± 0.5 (10.0 ± 0.5)

* 괄호 안의 숫자는 물로 포화된 조건에서의 측정값임.

** n/N은 'OSL 측정시스템에 적용된 aliquots의 전체 개수'에 대한 '자료 분석에 이용된 aliquots의 수'의 비를 지시함.

3. 갈대화석 산지의 고환경 복원

3.1 갈대화석층의 퇴적환경

3.1.1 유기질 이질 퇴적층

갈대화석 산지의 제4기 퇴적층의 하부를 점하는 유기질 이질 퇴적층은 유

기물 함량이 높고 퇴적구조의 발달이 불량한 괴상의 실트질 퇴적층으로 구성된다. 이러한 특징은 느린 유속 또는 정체수 환경의 부유 퇴적에 의해 형성되는 습지 퇴적층과 매우 유사하다. 이 퇴적층의 전체적인 C/N 비로부터 유기물은 전적으로 육상에서 공급되었음을 지시하고 있어 이 퇴적층은 육상 습지 환경에서 형성된 것으로 해석된다.

한편, 이 퇴적층의 중간부와 하부 구간의 C/S 비는 해수와 담수 및 기수환경의 경계부에 분포하고 있어 뚜렷한 퇴적환경적 위치를 지시하지 못하고 있다. 이는 현재 이 퇴적층이 상부 응회질 퇴적층의 침식에 따라 지표면에 노출되어 지속적인 해수의 영향을 받았기 때문인 것으로 추정된다.

3.1.2 응회질 퇴적층

제4기 퇴적층의 상부를 점하는 응회질 퇴적층은 전체적으로 현무암질 응회암과 괴상을 비롯하여 층리구조가 양호하게 발달한 현무암질 응회질 사암으로 구성되며, 두 암상이 반복적으로 교호한다. 따라서 이 퇴적층은 수차례에 걸친 화산쇄설물의 공급과 다양한 수력학적 조건에서의 반복적인 재동작용에 의해 형성되었음을 지시한다. 전체적으로 평행엽층리, 곡사엽층리, 연흔사엽층리 등이 발달하는 응회질 사암이 우세하며 이질 퇴적층이 협재되지 않고 있어 파도 작용이 우세한 비교적 고에너지의 연안 환경에서 형성되었던 것으로 해석된다. 퇴적단위 순으로 퇴적과정을 설명하면 다음과 같다.

Unit I 은 초기 응회암의 퇴적과 재동작용에 의한 응회질 사암의 형성으로 구성되는 3회의 퇴적과정이 인지된다. 하부는 응회암과 평행 및 파상엽층리가 발달한 응회질 사암, 중간부는 응회암과 희미한 평행엽층리가 발달한 응회질 사암, 상부는 응회암과 평행엽층리가 발달한 응회질 사암으로 구성된다. 상부와 하부에서 퇴적구조의 발달이 보다 양호하게 나타나고 있어 중간부에 비해 보다 활발한 유수작용을 겪었음을 보여준다. 하부 구간의 응회암 상면은 괴상의 기복을 갖는 층면을 형성하며 이러한 기복을 유지하며 파상 또는 저각의 사엽층리 및 평행엽층리가 발달하고 있어 상부 구간에 비해 저에너지 환경에서 형성되었음을 지시한다.

Unit II 는 전체적으로 곡사엽층리, 연흔사엽층리, 평행엽층리가 발달하는 응회질 사암이 우세하게 발달하며 하부 구간에 매우 소규모의 응회암이 협재된다. 암상 구성으로부터 이 퇴적단위는 화산쇄설물의 재동작용이 지속적으로 활발하게 이루어졌던 구간이다. 퇴적구조는 하부로부터 곡사엽층리, 연흔사엽층리, 평행엽층리의 순으로 발달하며 중간부의 곡사엽층리 구간이 규모가 크며 상부의 평행엽층리의 규모가 가장 작다. 상부의 평행엽층리는 하

부의 연흔사엽층리와 조화를 이루지 않고 뚜렷한 판상 경계를 형성하고 있다. 이와 같이 Unit II는 수직적으로 수력학적 조건의 변화가 일어나고 있음을 보여준다.

Unit III은 비교적 두꺼운 괴상의 응회질 사암으로 구성된다. 하부 구간에는 일부 희미한 평행엽층리가 발달하기도 한다. 괴상의 특징으로부터 이 퇴적층은 고밀도 상태로 급격한 퇴적작용에 의해 형성되었음을 지시한다. 상부 구간의 응회질 사암에는 응회암에 발달하는 기공이 다수 관찰되고 있어 이 퇴적층은 급격한 화산쇄설물의 공급 후에 다른 구간과는 달리 유수의 영향을 크게 받지 않았던 것으로 해석된다. 한편, 이 퇴적단위는 식물뿌리흔적이 관찰되며 주로 상부에 집중적으로 발달한다. 식물뿌리흔적은 이 퇴적층 형성 후에 식생이 번성하였음을 지시하는 것으로서, 더 이상의 퇴적작용은 중단되고 육상 조건이 유지되었다는 것을 의미한다. Unit III의 형성과 함께 해안선을 전진하였을 것이다.

Unit IV는 전체적으로 평행엽층리가 발달한 응회질 사암이 우세하며 하부와 상부에 소규모의 응회암이 협재된다. 응회암은 하부에 비해 상부에서의 규모가 약간 크게 발달한다. 전체적으로 이 퇴적단위는 화산쇄설물 공급 이후 활발한 유수 작용이 지속적으로 이루어졌던 것으로 판단된다. Unit III의 형성에 따라 이 지역이 육상화가 이루어지고 해안선이 전진하였다는 것을 고려하면, Unit 4는 현재의 갈대화석 산지 보다 바다 쪽으로 치우친 지역에 형성되었을 것으로 추정된다.

3.2 갈대화석층의 형성 시기와 화산쇄설물의 공급지

갈대화석층의 하부를 점하는 유기질 이질 퇴적층의 최상부에서 얻어진 $8.0 \pm 0.3 \text{ka BP}$ 와 $10.0 \pm 0.5 \text{ka BP}$ 의 OSL 연대로부터, 유기질 퇴적층은 8,000~10,000년 전인 홀로세 초기에 형성되었으며, 적어도 10,000년 전 이후의 어느 시점에 갈대화석을 배태하고 있는 응회질 퇴적층의 발달이 시작되었음을 알 수 있다.

홀로세 초에 해당되는 유기질 퇴적층의 형성 시기는 현재 보다 해수면이 상당히 낮았으며 갈대화석 산지는 해안에서 멀리 떨어진 육상 지역이었을 것이다. 그러므로 화산쇄설물의 공급과 유수에 의한 재동작용이 일어날 수 있었던 시기, 즉 갈대화석층의 형성 시기는 현재와 유사한 수준으로 해수면이 상승했던 홀로세 중기 이후에 해당될 것이다. 또한, 갈대화석층을 형성하는데 있어서 최초 모재가 되었던 화산쇄설물은 이 시기에 분출한 수성화산

활동에 의해 공급되었을 것이다.

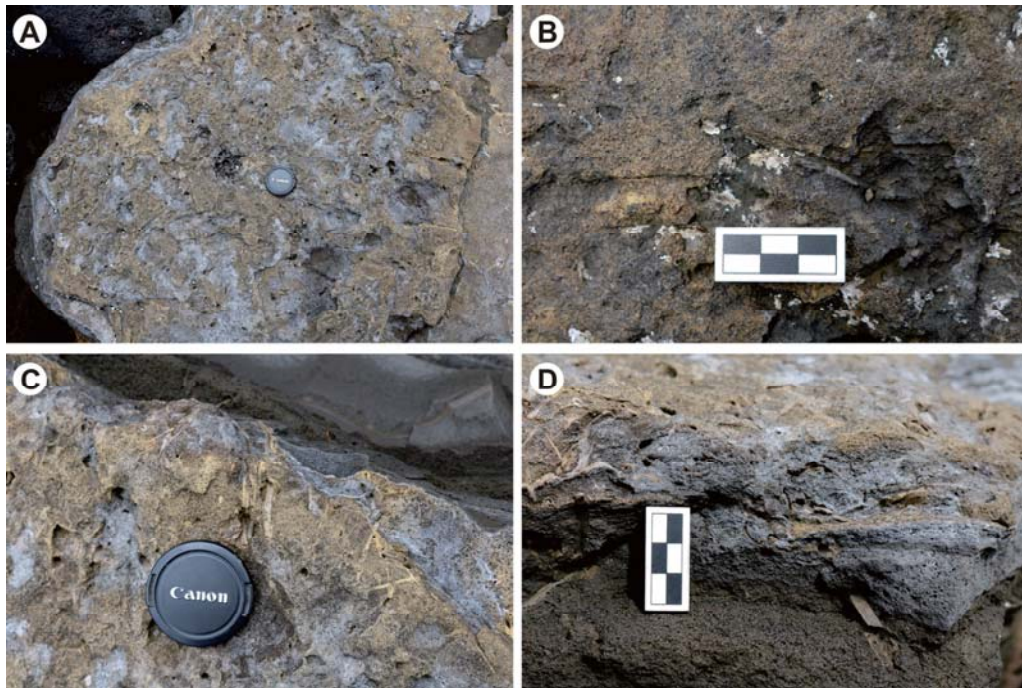
전술한 조건을 고려하면 홀로세 중기 무렵에 분출한 성산일출봉 응회구 (Sohn and Chough, 1999)의 화산활동이 갈대화석층의 형성과 직접적인 관련이 있을 것으로 판단된다. 성산일출봉 응회구의 남쪽에 인접한 광치기해변을 따라서는 화산쇄설물이 재동되어 형성된 것으로 알려진 신양리층이 발달한다. 신양리층에서 산출되는 패각에서 $4,780 \pm 60$ yr BP (Sameshima et al., 1988), 4,400~1,570 yr BP (Kim et al., 1999)의 ^{14}C 연대가 보고되었다. 따라서 갈대화석층은 홀로세 중기에 분출한 성산일출봉 응회구의 화산쇄설물이 공급, 재동되어 형성된 것으로 해석할 수 있다.

IV. 갈대화석의 식물상

1. 갈대화석의 산출상태

갈대화석으로 통칭되는 갈대화석 산지의 식물화석은 응회질 퇴적층의 최상부로 추정되는 층준에서 집중적으로 산출된다. 응회질 퇴적층의 최하부에서 산출되기도 하나 매우 드물며 야외에서의 관찰하기는 매우 어렵다. 식물화석은 퇴적층 표면에 찍힌 자국으로 보존된 인상화석(imprint fossil)의 형태로 산출된다(그림 IV-1).

전체적으로 식물화석은 파편상이며 층리면에서 뚜렷한 방향성 없이 불규칙하게 산재하고 있으나(그림 IV-1A) 부분적으로 집중되어 방향성을 보이기도 한다(그림 IV-1B & C). 일부 식물화석은 퇴적층 내부에서 산출되기도 한다(그림 IV-1D).



<그림 IV-1> 갈대화석 산지 식물화석의 산출상태. A-C: 응회질 퇴적층의 층리면을 따라 인상으로 산출되는 식물화석, D: 일부 식물화석은 퇴적층 내에 불규칙하게 포함되어 있기도 함.

2. 갈대화석의 식물상 분석

2.1 식물상 분석 개요

갈대화석층에서 산출되는 식물화석의 식물상을 파악하기 위하여 제주자연사박물관의 협조를 얻어 박물관에서 보유하고 있는 12점의 식물화석 표본과 이 연구 과정에서 화석산지에서 일부 수습된 4점의 화석 표본 등 총 16점의 화석 표본을 대상으로 식물상 분석을 수행하였다. 제주민속자연사박물관 보유 식물화석 표본과 수습된 식물화석 표본의 사진을 각각 그림 IV-2와 그림 IV-3에 제시하였다.

2.2 식물화석의 형태적 특징과 식물상 분석

갈대화석층에서 산출되는 거의 모든 식물화석은 파편상으로서 온전한 개체를 찾아보기 힘들다. 식물화석은 형태적 특징에 따라 크게 3가지 유형으로 분류할 수 있다. 식물화석은 거의 대부분 유형 1에 속하며 유형 2와 3은 드물다. 특히 유형 3의 산출은 매우 희귀하다.

유형 1은 산출되는 식물화석의 거의 대부분을 차지한다. 화석의 크기는 1cm 미만의 폭과 수 cm 길이를 가지며 형태적으로 편평한 세장형을 띤다(그림 IV-4). 화석의 길이 방향을 따라 미세한 평행맥이 발달하며(그림 IV-4A, E & F), 드물게 일부 화석의 중앙부에는 보다 뚜렷한 주맥이 관찰되기도 한다(그림 IV-4A). 일부는 끝이나 연변부가 약간 말려 있는 양상을 보이고 있어 매우 얇은 두께를 가지고 있음을 지시한다(그림 IV-4H). 따라서 유형 1은 평행맥을 특징으로 하는 초본류의 잎으로 판단된다.

유형 2는 화석층 내부로 관통된 산상을 나타내는 식물화석으로서, 크기에 있어서는 유형 1과 큰 차이가 없다. 산상에서 보듯이 이 유형의 식물화석은 형태적으로 내부가 비어 있는 관상을 띠며 내면에 식물조직이 잔존하고 있다(그림 IV-5A & B). 식물조직은 다소 희미하나 미세한 평행맥이 발달하고 있는 것이 관찰된다. 미세한 평행맥이 발달한 관상의 형태적 특징으로부터 유형 2는 초본류의 줄기로 해석된다.

유형 3은 다수의 미세한 줄기 다발이 'V'자 형태로 무수하게 갈라져 있는 형태를 이루고 있다(그림 IV-5C & D). 이러한 특징은 갈대나 억새와 같은 초본류에 보이는 원주꽃차례와 매우 유사하다. 꽃의 흔적은 찾아볼 수 없으며 무수하게 갈라진 꽃대만이 잔존하고 있는 것으로 보인다.

IV. 갈대화석의 식물상



<그림 IV-2> 제주민속자연사박물관에서 보유하고 있는 갈대화석 산지의 식물화석 표본의 사진. A: JMUD-01, B: JMUD-02, C: JMUD-03, D: JMUD-04, E: JMUD-05, F: JMUD-06, G: JMUD-07, H: JMUD-08. 축척 5cm.

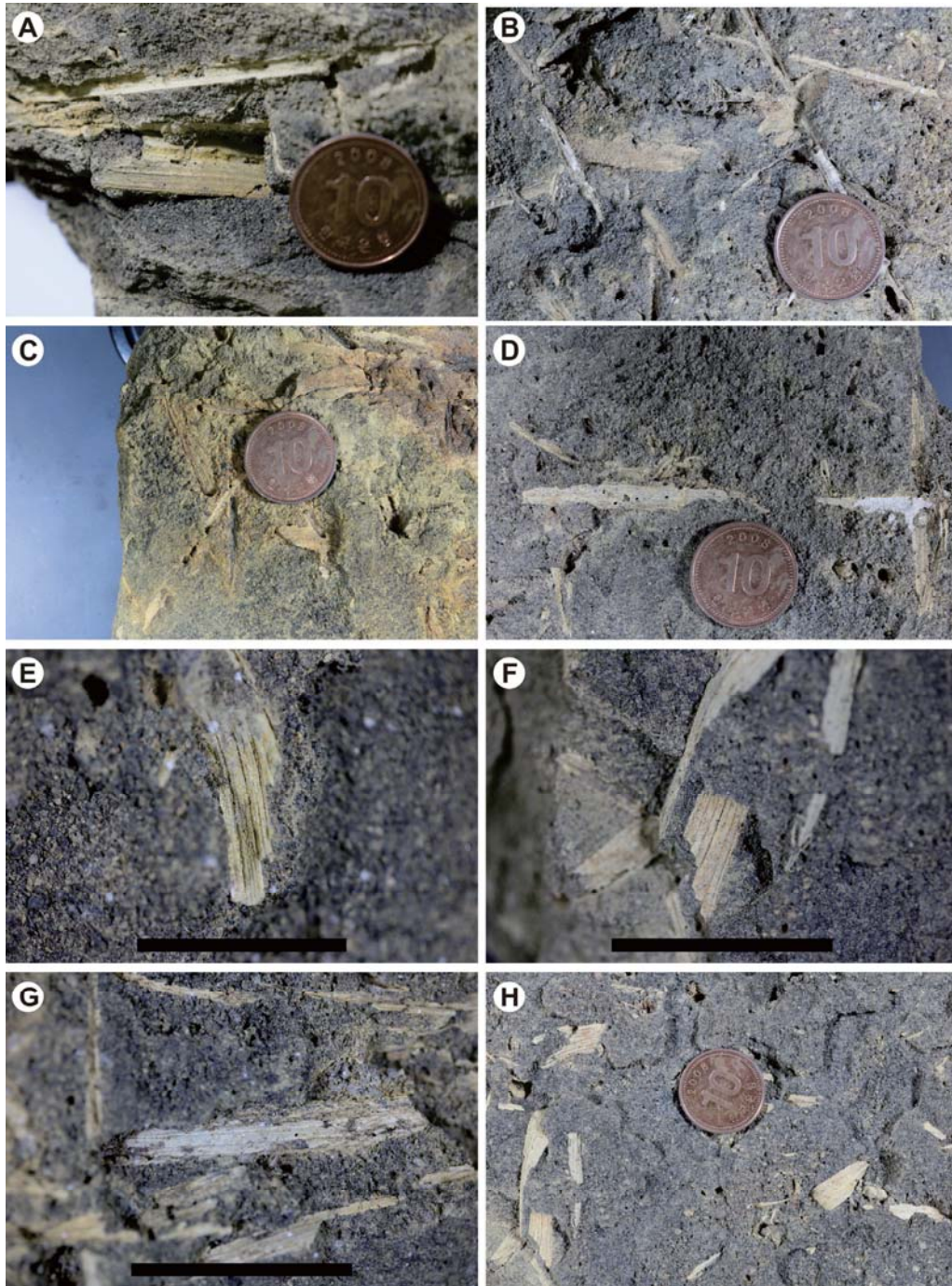


<그림 IV-2> (계속). I: JMUD-09, J: JMUD-10, K: JMUD-11, L: JMUD-12. 축척 5cm.

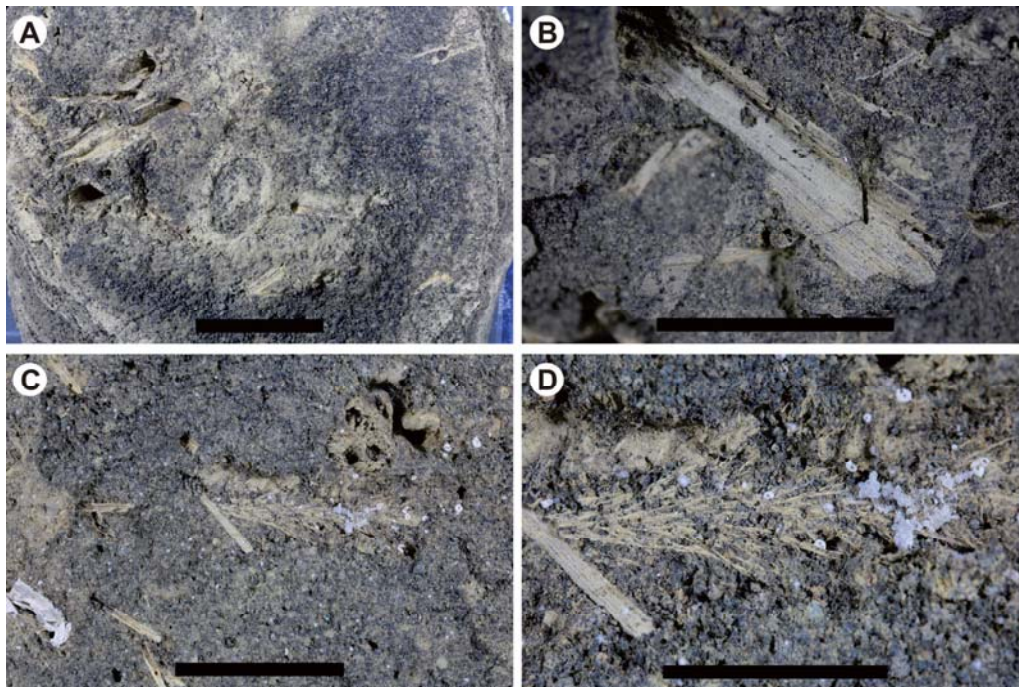


<그림 IV-3> 갈대화석 산지에서 채집된 식물화석 표본의 사진. A: 17UD-1, B: 17UD-2, C: 17UD-3, D: 17UD-4. 축척 5cm.

IV. 갈대화석의 식물상



<그림 IV-4> 갈대화석에 산출되는 유형 1의 식물화석의 세부 사진. A, 동전 직경 1.8cm, 축척 2cm.



<그림 IV-5> 갈대화석층에서 산출되는 유형 2와 유형 3의 식물화석의 세부 사진. A & B: 유형 2, C & D: 유형 3(D는 F의 확대사진). 동전 직경 1.8cm, A와 B의 축척 2cm, C와 D의 축척 1cm.

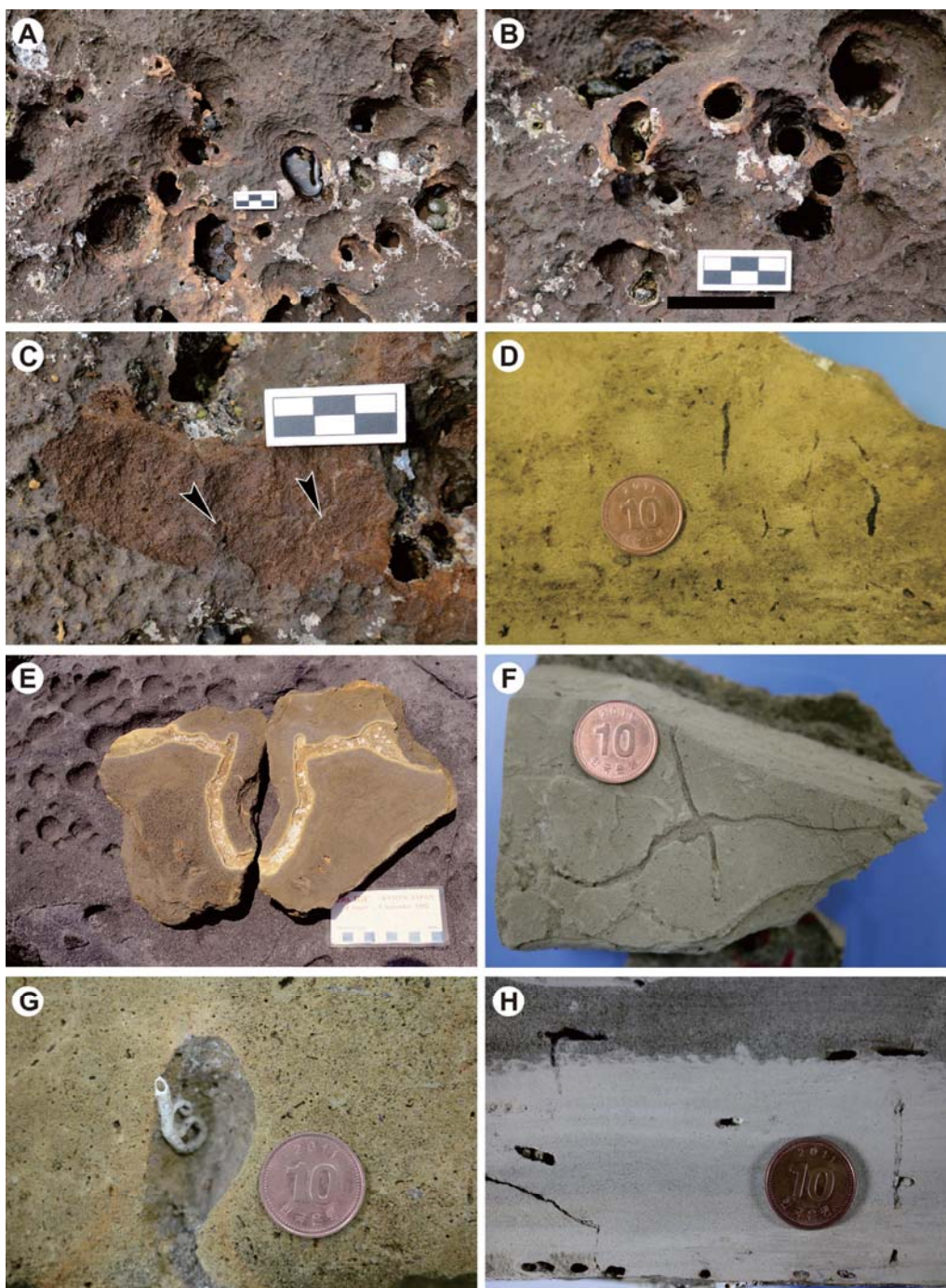
형태적 특징으로부터 초본류의 식물종을 판별하는 것은 용이하지 않다. 더구나 갈대화석층에서 산출되는 초본류 화석의 대부분은 소편상으로서 온전한 형태를 관찰하기가 어렵다. 그러나 세장형의 형태를 띠고 평행맥이 발달하고 있어 식물화석은 초본류로 판단된다. 갈대화석층은 해안선 부근의 연안 습지환경에서 형성되었음을 고려하면, 식물화석은 대표적인 염생습지식물인 갈대와 사초과에 속하는 초본류일 것으로 판단된다. 매우 희귀하지만, 원주 꽃차례로 보이는 꽃 부분이 산출되고 있어 갈대가 우세한 것으로 판단된다.

2.2 생흔화석

갈대화석층에서는 식물화석과 함께 여러 층준에서 저서동물의 활동 흔적인 생흔화석(trace fossil)이 다수 관찰되며 서관구조(burrow)의 형태를 띤다(그림 IV-3). 드물게 식물화석을 배태하고 있는 상부 응회질 퇴적층에서도 관찰되지만, 대부분의 서관구조는 하부 응회질 퇴적층에 주로 발달한다. 특히, 최하부의 Unit I의 상부와 Unit III에 집중되는 경향을 보인다. 형태적

으로 서관구조는 수 mm에서 최대 2cm에 이르는 일정한 직경을 유지하는 관상을 띠며 층리면을 따라 불규칙하게 연장되며 서로 교차하기도 한다(그림 IV-6A & B). 퇴적층 단면에서는 층리에 수평 또는 수직으로 발달하며 간혹 사교하는 양상을 보이기도 한다(그림 IV-6C & D). 관찰되는 서관구조의 연장은 단면에 따라 수 mm에 그치거나 수 cm에 이르기도 한다. 거의 대부분의 서관구조의 내부는 비어 있다. 그림 IV-6A & B는 표면을 따라 불규칙하게 연장되는 기어간 자국(crawling trace)과 유사하며, 그림 IV-6C는 층내에서 연장이 끝나며 말단부에서 직경이 커지는 특징을 보이고 있어 거주 흔적(dwelling trace)으로 판단된다.

한편, Unit 3의 응회질 퇴적층에서는 식물뿌리흔적이 발달하며, 특히 상면의 일부 범위에 집중적으로 분포한다. 상면에서 관찰되는 식물뿌리흔적은 내부가 빈 원형의 관상을 띠며, 1~5cm 직경을 갖는다(그림 IV-6E & F). 연변부는 수 mm 두께의 산화된 띠가 발달하고 있어 주변 퇴적층과 뚜렷이 구분된다. 퇴적층 내부에는 수평적으로 발달하는 미세한 실뿌리로 보이는 흔적이 관찰되며(그림 IV-6G), 퇴적층 단면에서도 수직의 실뿌리 흔적이 확인된다(그림 IV-6H).



<그림 IV-6> 갈대화석층에서 산출되는 생흔화석의 전경사진. A-D: 식물 뿌리흔적, F-H: 서관구조.

V. 결론

우도의 갈대화석 산지에 대한 퇴적학 및 고생물학적 연구를 통해 갈대화석층의 퇴적환경 및 형성 과정을 복원하고, 산출되는 식물화석의 식물상을 복원하였다.

갈대화석 산지의 지질은 소머리현무암과 이를 부정합으로 피복하는 제4기 퇴적층으로 구성된다. 제4기 퇴적층은 크게 하부의 유기질 이질 퇴적층과 상부의 갈대화석층으로서 식물화석을 배태하고 있는 현무암질 응회질 퇴적층으로 구분된다.

제4기 퇴적층의 하부를 점하는 유기질 이질 퇴적층은 유기물 함량이 높고 퇴적구조의 발달이 불량한 괴상의 실트질 퇴적층으로 구성된다. 이러한 특징은 느린 유속 또는 정체수 환경의 부유 퇴적에 의해 형성되는 습지 퇴적층과 매우 유사하다. 이 퇴적층의 전체적인 C/N 비로부터 유기물은 전적으로 육상에서 공급되었음을 지시하고 있어 이 퇴적층은 육상 습지 환경에서 형성된 것으로 해석된다. 한편, 이 퇴적층의 중간부와 하부 구간의 C/S 비는 해수와 담수 및 기수환경의 경계부에 분포하고 있어 뚜렷한 퇴적환경적 위치를 지시하지 못하고 있다. 이는 현재 이 퇴적층이 상부 응회질 퇴적층의 침식에 따라 지표면에 노출되어 지속적인 해수의 영향을 받았기 때문인 것으로 추정된다.

갈대화석층으로서 제4기 퇴적층의 상부를 점하는 응회질 퇴적층은 전체적으로 현무암질 응회암과 괴상을 비롯하여 층리구조가 양호하게 발달한 현무암질 응회질 사암으로 구성되며, 두 암상이 반복적으로 교호한다. 따라서 이 퇴적층은 수차례에 걸친 화산쇄설물의 공급과 다양한 수력학적 조건에서의 반복적인 재동작용에 의해 형성되었음을 지시한다. 전체적으로 평행엽층리, 곡사엽층리, 연흔사엽층리 등이 발달하는 응회질 사암이 우세하며 이질 퇴적층이 협재되지 않고 있어 과도 작용이 우세한 비교적 고에너지의 연안 환경에서 형성되었던 것으로 해석된다. 응회질 퇴적층은 퇴적학적으로 4개의 퇴적단위(하부로부터 Unit I, II, III, IV)로 구분되며 자세한 퇴적과정을 설명하면 다음과 같다.

Unit I은 초기 응회암의 퇴적과 재동작용에 의한 응회질 사암의 형성으로 구성되는 3회의 퇴적과정이 인지된다. 하부는 응회암과 평행 및 파사엽층리가 발달한 응회질 사암, 중간부는 응회암과 희미한 평행엽층리가 발달한 응회질 사암, 상부는 응회암과 평행엽층리가 발달한 응회질 사암으로 구성된

다. 상부와 하부에서 퇴적구조의 발달이 보다 양호하게 나타나고 있어 중간부에 비해 보다 활발한 유수작용을 겪었음을 보여준다. 하부 구간의 응회암 상면은 파상의 기복을 갖는 층면을 형성하며 이러한 기복을 유지하며 파상 또는 저각의 사면층리 및 평행엽층리가 발달하고 있어 상부 구간에 비해 저에너지 환경에서 형성되었음을 지시한다.

Unit II는 전체적으로 곡사면층리, 연흔사면층리, 평행엽층리가 발달하는 응회질 사암이 우세하게 발달하며 하부 구간에 매우 소규모의 응회암이 협재된다. 암상 구성으로부터 이 퇴적단위는 화산쇄설물의 재동작용이 지속적으로 활발하게 이루어졌던 구간이다. 퇴적구조는 하부로부터 곡사면층리, 연흔사면층리, 평행엽층리의 순으로 발달하며 중간부의 곡사면층리 구간이 규모가 크며 상부의 평행엽층리의 규모가 가장 작다. 상부의 평행엽층리는 하부의 연흔사면층리와 조화를 이루지 않고 뚜렷한 판상 경계를 형성하고 있다. 이와 같이 Unit II는 수직적으로 수력학적 조건의 변화가 일어나고 있음을 보여준다.

Unit III은 비교적 두꺼운 파상의 응회질 사암으로 구성된다. 하부 구간에는 일부 희미한 평행엽층리가 발달하기도 한다. 파상의 특징으로부터 이 퇴적층은 고밀도 상태로 급격한 퇴적작용에 의해 형성되었음을 지시한다. 상부 구간의 응회질 사암에는 응회암에 발달하는 기공이 다수 관찰되고 있어 이 퇴적층은 급격한 화산쇄설물의 공급 후에 다른 구간과는 달리 유수의 영향을 크게 받지 않았던 것으로 해석된다. 한편, 이 퇴적단위는 식물뿌리흔적이 관찰되며 주로 상부에 집중적으로 발달한다. 식물뿌리흔적은 이 퇴적층 형성 후에 식생이 번성하였음을 지시하는 것으로서, 더 이상의 퇴적작용은 중단되고 육상 조건이 유지되었다는 것을 의미한다. Unit III의 형성과 함께 해안선을 전진하였을 것이다.

Unit IV는 전체적으로 평행엽층리가 발달한 응회질 사암이 우세하며 하부와 상부에 소규모의 응회암이 협재된다. 응회암은 하부에 비해 상부에서의 규모가 약간 크게 발달한다. 전체적으로 이 퇴적단위는 화산쇄설물 공급 이후 활발한 유수 작용이 지속적으로 이루어졌던 것으로 판단된다. Unit III의 형성에 따라 이 지역이 육상화가 이루어지고 해안선이 전진하였다는 것을 고려하면, Unit 4는 현재의 갈대화석 산지 보다 바다 쪽으로 치우친 지역에 형성되었을 것으로 추정된다.

갈대화석층의 하부를 점하는 유기질 이질 퇴적층의 최상부에서 얻어진 $8.0 \pm 0.3\text{ka BP}$ 와 $10.0 \pm 0.5\text{ka BP}$ 의 OSL 연대로부터, 유기질 퇴적층은 8,000~10,000년 전인 홀로세 초기에 형성되었으며, 적어도 10,000년 전

이후의 어느 시점에 갈대화석을 배태하고 있는 응회질 퇴적층의 발달이 시작되었음을 알 수 있다.

홀로세 초에 해당되는 유기질 퇴적층의 형성 시기는 현재 보다 해수면이 상당히 낮았으며 갈대화석 산지는 해안에서 멀리 떨어진 육상 지역이었을 것이다. 그러므로 화산쇄설물의 공급과 유수에 의한 재동작용이 일어날 수 있었던 시기, 즉 갈대화석층의 형성 시기는 현재와 유사한 수준으로 해수면이 상승했던 홀로세 중기 이후에 해당될 것이다. 또한, 갈대화석층을 형성하는데 있어서 최초 모재가 되었던 화산쇄설물은 이 시기에 분출한 수성화산 활동에 의해 공급되었을 것이다. 따라서 갈대화석층은 홀로세 중기에 분출한 성산일출봉 응회구의 화산쇄설물이 공급, 재동되어 형성된 것으로 해석된다.

갈대화석으로 통칭되는 갈대화석 산지의 식물화석은 응회질 퇴적층의 최상부로 추정되는 층준에서 집중적으로 산출된다. 응회질 퇴적층의 최하부에서 산출되기도 하나 매우 드물며 야외에서 관찰하기는 매우 어렵다. 식물화석은 퇴적층 표면에 찍힌 자국으로 보존된 인상화석의 형태로 산출된다. 식물화석은 파편상으로서 온전한 개체를 찾아보기 힘들기는 하나, 형태적 특징에 따라 크게 3가지 유형으로 분류할 수 있다.

유형 1은 형태적으로 편평한 세장형을 띠며 평행맥이 발달하고 있어 초본류의 잎으로 판단된다. 유형 2는 내부가 비어 있는 관상을 띠며 내면에 미세한 평행맥이 발달하고 있는 것이 관찰되고 있어, 이 유형은 초본류의 줄기로 해석된다. 유형 3은 다수의 미세한 줄기 다발이 'V'자 형태로 무수하게 갈라져 있는 형태를 이루고 있다. 이러한 특징은 갈대나 억새와 같은 초본류에 보이는 원추꽃차례와 매우 유사하다. 꽃의 흔적은 찾아볼 수 없으며 무수하게 갈라진 꽃대만이 잔존하고 있는 것으로 보인다.

세장형의 형태를 띠고 평행맥이 발달하고 있어 식물화석은 초본류로 판단된다. 갈대화석층은 해안선 부근의 연안 습지환경에서 형성되었음을 고려하면, 식물화석은 대표적인 염생습지식물인 갈대와 사초과에 속하는 초본류일 것으로 판단된다. 매우 희귀하지만, 원추꽃차례로 보이는 꽃 부분이 산출되고 있어 갈대가 우세한 것으로 판단된다.

갈대화석층에서는 식물화석과 함께 여러 층준에서 저서동물의 활동 흔적인 생흔화석이 다수 관찰되며 서관구조의 형태를 띤다. 드물게 식물화석을 배태하고 있는 상부 응회질 퇴적층에서도 관찰되지만, 대부분의 서관구조는 하부 응회질 퇴적층에 주로 발달한다. 산상과 형태적 특징으로부터 서관구조는 기어간 자국(crawling trace)과 거주 흔적(dwelling trace)으로 판단된다. Unit 3의 응회질 퇴적층에서는 식물뿌리흔적이 발달하며, 특히 상면의 일부

범위에 집중적으로 분포한다. 퇴적층 내부에는 수평 및 수직적으로 발달하는 미세한 실뿌리로 보이는 흔적이 관찰된다.

<참고문헌>

- 강순석, 2001, '우도 쇄머리오름 응회구로부터 후기 플라이스토세 갈대화석 산출', 한국고생물학회 정기총회 및 제17차 학술발표회, 27p.
- 고정선, 윤성효, 현경봉, 이문원, 길영우, 2005, '제주도 우도 단성화산의 현 무암에 대한 암석학적 연구', 암석학회지, 14, 45-60.
- 원종관·이문원·이동영·박계원, 1993, 『성산도폭설명서』, 제주도청.
- 제주특별자치도 세계자연유산관리단, 2014, 『제주도 지질공원 대표명소 추가 지정을 위한 우도·비양도·선홍곶자왓(동백동산) 학술조사 및 활용방안 보고서』, 269p.
- 황상구, 1992, '우도 응회구의 분출기구와 분출과정', 암석학회지, 1, 91-103.
- 황상구, 1993, '우도 분화구에서의 일운회 화산과정', 광산지질, 26, 55-65.
- Berner, R.A. 1982, Burial of organic carbon and pyrite sulfur in the modern ocean: its geochemical and environmental significance. American Journal of Science, 282
- Berner, R.A. and Raiswell, R., 1984, C/S method for distinguishing freshwater from marine sedimentary rocks. Geology, 12, 365-368.
- Brenna, M., Shane, J., Cronin, 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. Contribution of Mineralogy and Petrology, 160, 931-950.
- Ferrucci, M., Pertusati, S., Sulpizio, R., Zanchetta, G., Pareschi, M.T. and Santacroce, R., 2005, Volcaniclastic debris flows at La Fossa Volcano (Vulcano Island, southern Italy): Insights for erosion behavior of loose pyroclastic material on steep slopes. Journal of Volcanology and Geotherm Research, 145, 173-191.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Science, 8, 523-548.
- Kim, D.H., Hwang, J.H., Hwang, S.K., Howells, M.F. and Reedman, A.J., 1986, Tuff rings and cones on Jeju Island, Korea. Journal of Geological Society of Korea, 22, 1-9.

- Kim, K.H. et al., 1999, Paleoclimatic and chronostratigraphic interpretations from strontium, carbon and oxygen isotopic ratios in molluscan fossils of Quaternary Seoguipo and Shinyangri Formation, Cheju Island, Korea. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 154, 219–235.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, a. and Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali–silica diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745–750.
- Mcdonald, G.A. and Katsura, T., 1964, Chemical composition of Hawaiian lavas. *Journal of Petrology*, 5, 82–133.
- Németh, K. and Cronin, S.J., 2007, Syn- and post-eruptive erosion, gully formation, and morphological evolution of a tephra ring in tropical climate erupted in 1913 in West Ambrym, Vanuatu. *Geomorphology*, 86, 115–130.
- Sameshima, T., Ogawa, T., Kashima, N., 1988, 5th Int. Symp. Vulcanospeleology, Cheju Island (Korea), Excursion Guide Book, 30–36.
- Sohn, Y.K. and Chough, S.K., 1992, The Ilchulbong tuff tuff cone, Cheju Island, South Korea: depositional processes and evolution of an emergent, Surtseyan-type tuff cone. *Sedimentology*, 39, 837–855.
- Sohn, Y.K. and Chough, S.K., 1993, The Udo tuff cone, Cheju Island, South Korea: transformation of pyroclastic fall into debris fall and grain flow on a steep volcanic cone slope. *Sedimentology*, 40, 769–786.
- Sohn, Y.K. and Park, K.H., 2005, Composite tuff ring/cone complexes in Jeju Island, Korea: transformation of pyroclastic fall into debris fall and grain flow on a steep volcanic cone slope. *Sedimentology*, 40, 769–786.

요약

우도 수성화산활동에 수반된 갈대화석 산출과 고환경 복원

강순석¹, 류춘길²

¹제주지질연구소, ²한국지질환경연구소

우도의 갈대화석 산지에 대한 퇴적학 및 고생물학적 연구를 통해 갈대화석층의 퇴적환경 및 형성 과정을 복원하고, 산출되는 식물화석의 식물상을 복원하였다. 갈대화석 산지의 지질은 소머리현무암과 이를 부정합으로 피복하는 하부의 유기질 이질 퇴적층과 상부의 현무암질 응회질 퇴적층으로 이루어진다. 유기질 이질 퇴적층은 유기물 함량이 높고 괴상의 실트질 퇴적층으로서 육상의 습지 환경에서 형성되었다. 응회질 퇴적층은 현무암질 응회암과 괴상을 비롯하여 층리구조가 발달한 현무암질 응회질 사암으로 구성되며, 두 암상이 교호한다. 따라서 이 퇴적층은 수차례에 걸친 화산쇄설물의 공급과 재동작용에 의해 형성되었음을 지시한다. 평행엽층리, 곡사엽층리, 연흔사엽층리 등이 발달하는 응회질 사암이 우세하며 이질 퇴적층이 협재되지 않아 파도가 우세한 비교적 고에너지의 연안 환경에서 형성된 것으로 해석된다. 유기질 이질 퇴적층의 최상부의 OSL 연대는 8,000~10,000년 전의 홀로세 초를 지시하며, 적어도 10,000년 전 이후의 어느 시점에 응회질 퇴적층이 형성되었음을 지시한다. 갈대화석층의 퇴적환경은 현재와 유사한 홀로세 중기 무렵의 연안환경을 지시하므로 이 시기에 분출한 성산일출봉 응회구가 공급원인 것으로 해석된다. 식물화석은 응회질 퇴적층의 최상부에서 집중적으로 산출된다. 식물화석은 파편상으로서 온전한 개체를 찾아보기 어려우나, 형태적으로 초본류의 잎과 줄기, 그리고 매우 드물게 원추꽃차례 등으로 동정된다. 갈대화석층이 해안선 부근의 연안환경에서 형성되었음을 고려하면, 식물화석은 대표적인 염생습지식물인 갈대와 사초과에 속하는 초본류일 것으로 판단된다. 매우 희귀하지만, 원추꽃차례로 보이는 꽃 부분이 산출되고 있어 갈대가 우세했을 것으로 판단된다. 여러 층준에서 저서동물의 활동 흔적인 서관 구조로서 기어간 자국과 거주 흔적이 확인된다. 일부 층준에는 식물뿌리흔적이 발달하며, 수평 및 수직적으로 발달하는 미세한 실뿌리도 발달한다.

주요어: 우도 갈대화석 산지, 현무암질 응회질 퇴적층, 성산일출봉 응회구, 갈대화석, 생흔화석

Abstract

Reed-fossils and Paleoenvironmental Reconstruction Accompanied by Udo Hydrovolcanic Activity

Soon Seok Kang¹, Choon Kil Ryu²

¹Jeju Geological Institute, ²Korea Institute of Geological Environments

Depositional environments, processes and the origin of sediments of the reed fossil bearing Quaternary deposits at U Island were analysed by sedimentological, paleontological, and OSL dating. Quaternary deposits unconformably overlying Someori basalt consist of lower organic muddy sediments and upper basaltic tuffaceous sediments. Organic muddy sediments composed of massive silt were deposited in terrestrial wet land. The OSL age of organic muddy sediments is 8~10 ka BP. Basaltic tuffaceous sediments interlayered by basaltic tuff were divided into four units, Unit I, Unit II, Unit III and Unit IV, ascending order. These sediments were deposited in a high-energy nearshore environments during and after the eruption of Seongsan Ilchulbong tuff cone. Abundant plant fossil is occurred at the uppermost part of the basaltic tuffaceous sediments. The plant fossils are divided into three types. Type 1 and 2 are leafs and stem of herb, respectively. Type 3 is very rare, and it is a flower of panicle. On the basis of depositional environments of the basaltic tuffaceous sediments, the plant fossils might be a sort of reed and Cyperaceae. And also trace fossils of burrows, crawling and dwelling trace, and plant roots are occurred on the surface and internal parts of the basaltic tuffaceous sediments.

Key words: U Island, reed fossil-bearing Quaternary deposits, depositional environments, Seongsan Ilchulbong tuff cone, trace fossils

연구진

연구책임	강 순 석	제주지질연구소
공동연구	류 춘 길	한국지질환경연구소

제주학연구 40

우도 수성화산활동에 수반된 갈대화석 산출과 고환경 복원

발행인 || 강 기 춘

발행일 || 2017년 11월

발행처 || 제주연구원 제주학연구센터

63196 제주시 동광로 51, 3층

전화: (064) 726-0973 팩스: (064) 747-6140

홈페이지: www.jst.re.kr

인쇄처 || 세종문화사

ISBN : 978-89-6010-560-7 93460

- ☐ 이 보고서의 내용은 연구진의 견해로서, 제주특별자치도의 정책적
입장과는 다를 수 있습니다. 또한 이 보고서는 출처를 밝히는 한
자유로이 인용할 수 있으나 무단전재나 복제는 금합니다.

