

제주도 화산 지층 하부에 분포하는 U층의 광물 및 퇴적학적 특성

정종욱¹ · 윤석훈^{2,*} · 고기원³ · 조영진² · 홍정균² · 김진주⁴

¹경상대학교 공동실험실습관

²제주대학교 지구해양학과

³제주특별자치도개발공사 지역가치연구팀

⁴경상대학교 지질학과

요 약

제주도 화산암층 하부에 분포하는 U층의 광물 및 퇴적학적 특성을 제시하기 위하여 4개의 시추공으로부터 수집된 퇴적물 시료에 대해 입도 분석과 SEM, XRD를 이용한 광물조성을 분석하였다. 이와 함께 U층 상위의 서귀포층 퇴적물과의 비교를 위해서 시추공과 서귀포층 표식지 일부 노두로부터 채취된 시료에 대해서도 동일 분석을 실시하였다. 입도분석 결과, U층 시료들은 니의 함량이 70% 이상인 니(mud) 혹은 사질 니(sandy mud)로 분류되며, 분급이 불량하고 층리와 같은 1차 퇴적구조가 관찰되지 않는 특징을 보인다. 이와는 대조적으로 시추공의 서귀포층 구간에서 채취된 시료들은 자갈 및 모래 함량이 80% 내외인 니질 모래(muddy sand) 혹은 역니질 모래(gravelly muddy sand)로 분류되며, 일부 시료에서는 화산기원 입자와 깨각편이 육안으로 관찰된다. U층의 퇴적학적 특성은 오늘날 제주도 주변 외해역과 유사한 해파기저면보다 깊은 원안(offshore) 대륙붕 환경에서 주로 퇴적되었음을 지시하는 것으로 해석된다. SEM과 XRD를 이용한 광물조성 분석결과, U층에서는 직접적인 화산기원 입자가 전혀 나타나지 않으며, 소량(5% 내외)의 스멕타이트가 포함되어 있다. 이에 비해 서귀포층 시추 시료에서는 현무암질 화산유리 입자와 함께 U층에서보다 3배 정도 높은 스멕타이트 함량비(15% 내외)를 보인다. 이와 같은 분석결과는 제주도 화산활동 이전에 형성된 U층과 초기 수성화산활동기의 지층인 서귀포층의 특성 차이를 잘 반영하는 것으로 해석된다. 하지만 또다른 비교 시료인 서귀포층 노두 시료에서는 화산활동을 지시하는 화산유리나 스멕타이트가 거의 나타나지 않는다. 따라서 화산유리의 존재유무와 스멕타이트의 함량만으로 U층과 서귀포층을 구분할 때는 신중을 기할 필요가 있다.

주요어: 제주도, U층, 서귀포층, 입도조직, 점토광물, 정량X선회절분석

Jong-Ok Jeong, Seok-Hoon Yoon, Gi-Won Koh, Young-Jin Joe, Jeong-Gyun Hong and Jin-Ju Kim, 2016, Mineralogical and sedimentological characteristics of the U Formation underlying the volcanic strata in Jeju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 4, p. 389-403

ABSTRACT: This study presents mineralogical and sedimentological characteristics of the U Formation, one of the sedimentary rock units underlying the volcanic strata in the Jeju Island. Sediment core samples from 4 boreholes were analyzed in terms of sediment texture and mineral composition by Microtrac, SEM (scanning electron microscope) and XRD (X-ray diffractometer). For the comparative study, additional samples from the overlying Seogwipo Formation (borehole and outcrop section) were also analyzed in same methods. Samples from the U Formation are sedimentologically classified as muds or sandy muds (>70% of mud) which are characterized by poor sorting and absence of primary sedimentary structures, whereas borehole samples of the Seogwipo Formation are coarser muddy sands or gravelly muddy sands (>80% of gravels and sands) with significant amounts of volcanic rock fragments and fossil shells. The overall sedimentological characteristics of the U Formation suggest the deposition in an offshore continental shelf environment most probably below fair-weather wave base, which is quite similar to present offshore setting around the Jeju Island. According to SEM and XRD analyses, the borehole samples of the U Formation is characterized by absence of volcanogenic materials and very low content (~5%) of smectite, in contrast to those of the Seogwipo Formation showing much abundance of volcanic glasses and smectite (~15%). These mineralogical characteristics very well correspond to the stratigraphic relationship between pre-volcanic

* Corresponding author: +82-64-754-3436, E-mail: shyoon@jejunu.ac.kr

U Formation and early-stage volcanic strata of the Seogwipo Formation. The samples from outcrop of the Seogwipo Formation are, however, unexpectedly much similar in mineralogical composition to those of the U Formation rather than borehole samples of the Seogwipo Formation. We suggest that presence (or absence) of volcanic materials and smectite content must be used very carefully when distinguishing the U and Seogwipo formations each other.

Key words: Jeju Island, U Formation, Seogwipo Formation, grain-size texture, clay mineral, quantitative X-ray diffraction analysis

(Jong-Ok Jeong, Center for Research Facilities, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea; Seok-Hoon Yoon, Young-Jin Joe and Jeong-Gyun Hong, Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea; Gi-Won Koh, Local Values Research Team, Jeju Special Self-Governing Province Development Corporation, Jeju 63345, Republic of Korea; Jin-Ju Kim, Department of Geological Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea)

1. 서 언

제주도 지하를 구성하고 있는 암석의 층서는 하부로부터 상부로 가면서 백악기말-제3기초로 추정되는 화강암 및 화산암 기반 위에 플라이오-플라이스토세의 미고결 해성층인 U층, 제주도 화산활동의 전반기에 일어났던 수성분출과 관련된 서귀포층, 그리고 후반기의 본격적인 육상분출 시기에 형성된 다양한 용암류층 및 홀로세의 수성화산체 등으로 이루어져 있다(Ahn *et al.*, 1995; Sohn and Park, 2004). 최근 Koh *et al.* (2013)은 지하수 시추공 및 지표면에서 취득된 764개의 화산암 시료에 대한 Ar/Ar 절대연령측정 결과에 근거하여 제주도 화산활동사를 서귀포층 퇴적동시대(188~50만 년 전)와 이후시대(50만 년 전 이후)로 구분하여 새롭게 제시하였다. 특히, 연

대측정 결과 제주도 순상화산체의 기반을 이루고 있는 것으로 알려진 제주도 동서부 해안 저지대의 용암대지는 대부분 10만 년 전 이후에 형성된 비교적 젊은 화산암으로 이루어져 있음이 확인되었다. 아울러 한라산체의 형성이 제주도 도처에 분포하는 복성복합화산과 소형 단성화산체로부터 분출한 용암류 및 화산쇄설물이 오랜 기간 층상으로 누적된 결과임이 밝혀지게 되었다.

한편, 국지적인 지표조건이나 지하분출조건에 영향을 받는 화산암층과 달리 제주도 화산암층 하부에 분포하는 서귀포층과 U층은 백만 년 이상의 기간 동안 천해환경에서 형성된 퇴적층으로서 플라이스토세 제주도 화산활동 초기와 그 이전 시기의 우리나라 남해와 동중국해 해양환경과 고지리를 가늠해볼 수 있는 연구대상으로서 학술적 가치가 높다. 그러

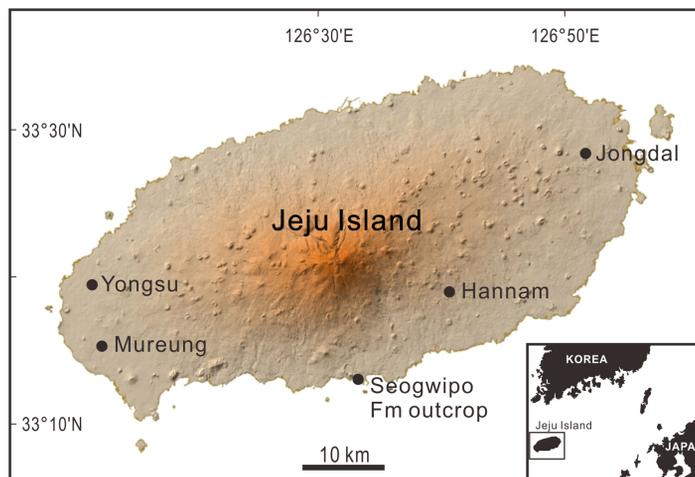


Fig. 1. Locations of sampling sites (wells and outcrop).

나 이들 퇴적층들은 일부 서귀포층 노두를 제외하고는 대부분 해수면 하 평균 110 m 이상 되는 깊은 지하에 분포하며 수리지질학적으로도 관심도가 낮기 때문에 상부의 화산암층에 비해 상대적으로 그 실체가 잘 알려져 있지 않다. 특히 U층의 경우에는 대체로 해수면 하 100 m 이상 굴착해야 확인이 가능하기 때문에 심부시추가 이루어진 1990년대초에 들어와서야 Koh (1991)와 Yoon *et al.* (1995)에 의해 'Unconsolidated Formation' 혹은 'Uncemented Sediment Formation'으로 명명되었다. 그 이후 U층의 광물조성과 미고생

물에 대한 분석(Koh, 1997; Yoon *et al.*, 2004)이 이루어졌으나, 후속연구는 지난 10여 년 동안 거의 전무한 실정이다.

이 연구에서는 제주도 동부, 남부 및 서부 지역의 4개 시추공(그림 1, 2)으로부터 U층으로 판별된 퇴적물 시료를 입수하여 조직 특성과 광물구성을 분석함으로써 제주도 화산활동 이전의 고해양환경을 이해하는 데 필요한 기초자료로 제공하고자 한다. 아울러 서귀포층 퇴적물과의 특성 비교를 위해 일부 시추공(그림 2)과 서귀포층 표식지 노두로부터 채취

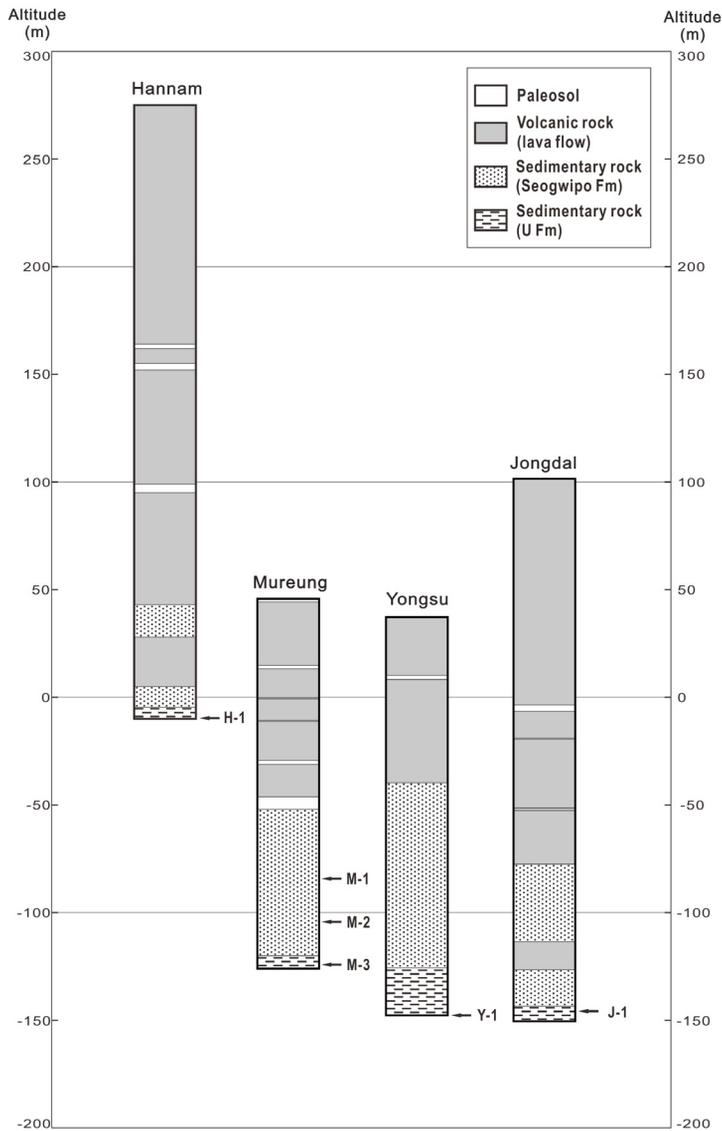


Fig. 2. Lithology of wells and sampling locations. For well locations, see Figure 1.

된 유사 조직의 시료(그림 3)에 대해서도 동일한 분석을 실시하였다.

2. 제주도 지질 개요

제주도는 플라이스토세 초기부터 약 180만 년 동안 이어진 화산활동을 통해 해발 1,950 m의 한라산 순상화산체를 비롯하여 370여개의 크고 작은 단성 화산체(분석구, 응회구/응회환, 용암돔, 마르 등)와 130여개의 용암동굴, 동부와 서부 해안저지대의 넓은 용암대지 등으로 이루어진 화산섬이다(Woo *et al.*, 2013). 제주도 지표의 지질은 주로 용암류 화산암과 화성쇄설암(응회암)으로 구성되어 있다. 화산암은 대부분 20~30만 년 전 이후에 일어난 용암분출로 형성되었는데, 현무암, 조면현무암, 현무암질조면안산암, 조면안산암 및 조면암 등으로 분류되며, 알칼리 화산암계열의 지화학적 특성을 보인다. 이들 화산암은 대체로 소형 단성화산체들로부터 유출된 용암에 의해 형성된 것인데, 대부분은 스트롬볼리형(strombolian) 분출로 형성된 분석구(scoria cone)로서 제주도 육상이나 인근 연안 해저에 산재하여 나타난다. 또한 용암류층 사이에는 화산활동 휴지기에 형성된 고토양층이 협재하여 나타나기도 한다. 다만, 산방산 등 일부 조면암질 용암돔 화산체들은 서귀포층 퇴적과 동시기인 90~50만 년 전에 형성된 것으로 연대가 제시되어 있다(Koh *et al.*, 2013). 지표의 수성화산분출에 의해 형성된 유리질 화산쇄설암은 퇴적암의 층리와 같은 잘 발달된 퇴적구조를 보이면서 해안지역을 따라 응회구/응회환(단산, 송악산, 수월봉, 용머리, 일출봉)의 형태로 나타나는데(Woo *et al.*, 2013), 용머리와 단산 응회구를 제외하고는 대부분 수만 년 내지 수천 년의 젊은 형성연대를 갖는 것으로 알려져 있다(Cheong *et al.*, 2007; Sohn *et al.*, 2012).

제주도 남부해안 일부와 지하에 분포하는 서귀포층은 제주도 화산분출 초기단계(188~50만 년 전)에 집적된 퇴적층으로서, 천해환경에서 일어난 수성분출로 생성된 화성쇄설물과 화산활동 휴지기에 쌓인 해양퇴적물로 구성되어 있다(Sohn and Park, 2004; Koh *et al.*, 2013). 성인에 따라 일차 퇴적상과 이차 또는 재동(secondary or reworked) 퇴적상으로 구분되며, 퇴적환경에 따라 육성 퇴적상과 해성 퇴적상으로 구분된다(Yoon and Chough, 2006; Sohn *et al.*, 2008).

일차 퇴적상은 주로 화쇄류와 낙하에 의해 화산쇄설물이 육성환경에서 응회환 응회구를 형성한 퇴적상이며, 이차 퇴적상은 육지 또는 수중에 쌓인 화산물질이 육성 또는 해성환경에서 재퇴적되어 만들어진 퇴적상이다(Sohn and Park, 2004; Sohn and Yoon, 2010). 해저에서 재퇴적된 암상은 종종 패각이 다량 함유되어 있으며, 사층리와 연흔 등의 퇴적구조가

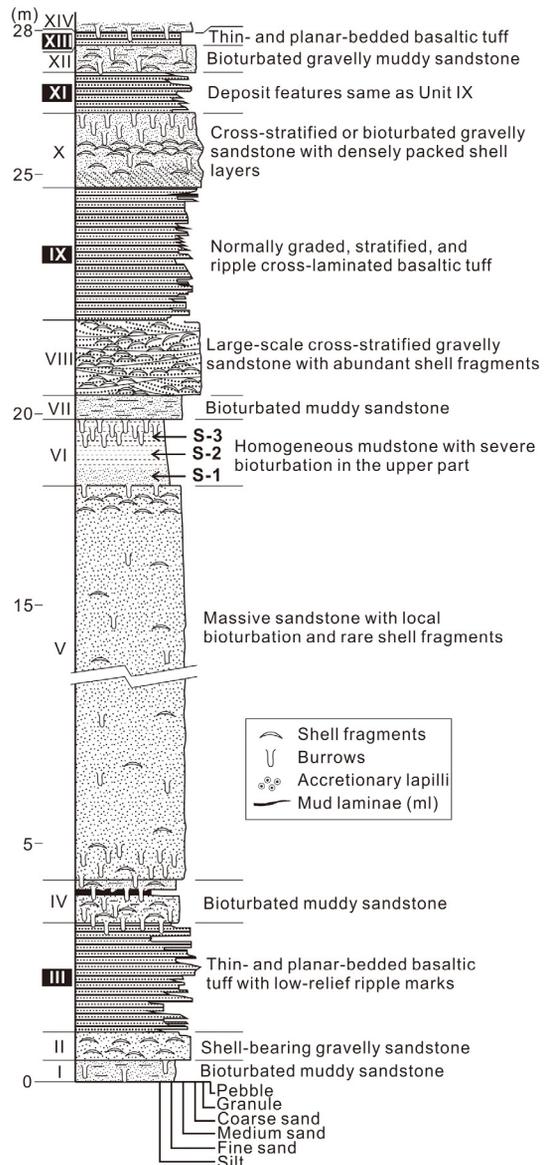


Fig. 3. Summarized log of the Seogwipo Formation in the outcrop site. Arrows indicate the sampling locations. After Sohn and Yoon (2010).

Table 1. Information on sampling sites including 4 wells and an outcrop. For site locations, see Figure 1.

Well and outcrop	Well-top altitude (m)*	Well-bottom depth (m)**	Sampling depth (m)	Sample No.	Formation
Hannam well	275	285	283	H-1	U
Mureung well	46	195	130	M-1	Seogwipo
			150	M-2	Seogwipo
			170	M-3	U
Yongsu well	37	185	185	Y-1	U
Jongdal well	100	252	247	J-1	U
Seogwipo Fm. outcrop	10			S-1	Seogwipo
				S-2	Seogwipo
				S-3	Seogwipo

* Above sea level
 ** Below ground surface

잘 나타난다. 한편, 수성화산퇴적층 사이에서는 석영질 모래층, 엽층리 이암, 패각층 등이 협재되어 나타나는데, 이들 암상에서는 화산기원 입자가 거의 없거나 소량으로 포함되어 있기 때문에 화산활동 휴지기에 쌓인 것으로 추정된다(Sohn and Park, 2004).

서귀포층 하부에 놓인 미고결의 U층은 제주도 화산활동 이전에 주로 대륙붕 천해환경에서 쌓인 해성층으로 해석되고 있다. 현재까지 보고되어 있는 U층의 주요 특징은 대부분 니와 세립질 모래로 이루어져 있으며, 주구성광물로 석영, 장석과 함께 소량의 운모와 고령토가 포함되어 나타나는 것으로 알려져 있다(Koh, 1997). 이와 함께 U층에서는 플라이오세-플라이스토세 초기를 지시하는 석회질 초미화석이 보고되기도 하였다(Yoon *et al.*, 2004).

U층의 하부에는 제주도의 기반암이라 할 수 있는 중생대 및 신생대 초기에 형성된 화산쇄설암류와 화강암이 나타난다. 제주도 기저 화산쇄설암은 정확한 연대가 밝혀지지는 않았지만 암상으로 볼 때 백악기 유천층군에 대비되는 것으로 추정되고 있으며(Koh, 1997), 제3기 초기에 이를 관입한 것으로 보이는 화강암은 암석학 및 지구화학적 특성에 근거하여 현재 경남 남해안 지역에 분포하는 미문상화강암과 유사한 시기 및 환경에서 형성된 것으로 추정된다(Ahn *et al.*, 1995).

3. 연구자료 및 분석방법

이 연구를 위해 제주도 4개 지역(한남, 무릉, 용수,

종달) 육상 시추공에서 U층 시료 4점을 획득하였으며(그림 1, 2), 비교를 위해 무릉 시추공에서 서귀포층 시료 2점(그림 2)과 서귀포층 표식지로 알려진 서귀포시 서흥동의 해안단에 일부 노두에서도 분석시료 3점을 채취하였다(그림 3, 표 1). 채취된 시료는 모두 50°C 이하에서 건조시킨 후 입도분석, X-선 회절(X-ray diffraction, XRD)분석 및 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM) 관찰을 위한 전처리를 수행하였다.

퇴적물 시료에 대한 입도분석을 위하여 시추공 시료는 약 0.5 g을 취하여 과산화수소 처리와 세 차례의 증류수 희석을 통하여 유기물과 염분을 제거하여 분석이 이루어졌다. 반고화의 서귀포층 시료는 보다 많은 양을 취하여 소니케이터(sonicator)로 충분히 시료를 풀어준 뒤에 유기물을 제거하고 4Φ 표준망체로 사질과 니질 퇴적물을 구분하였다. 구분된 사질 퇴적물은 건식체질로 니질 퇴적물은 시료를 희석하여 한국지질자원연구원의 Microtrac 3500D 분석기로 입도분석이 수행되었다.

SEM 관찰을 위해 박편 및 연마편을 제작하였으며, 경상대학교 공동실험실습관에 보유중인 Jeol사의 JSM-7610F 모델의 전계방출형 주사전자현미경(FE-SEM)과 X-선 에너지 분광기(EDS)을 이용하여 조직관찰과 광물동정을 실시하였다. 분석조건은 가속전압 15 kV, 가속전류 5 nA, 초점거리 15 mm에서 영상관찰 및 EDS분석을 하였으며, 고배율(×10,000 이상) 영상촬영 시에는 가속전압 10 kV, 가속전류 1

Table 2. Sediment texture and color.

Formation	Sample No.	Gravel (%)	Sand (%)	Mud (%)	Mean (Φ)	Sorting (Φ)	Sed. type *	Sediment Color**
U	H-1	0.0	3.2	96.8	5.55	1.40 (poor)	Mud	Dark gray (N5) to greenish black (5G2/1)
	M-3	0.0	24.9	75.1	5.55	2.08 (very poor)	Sandy mud	Dark yellowish brown (10YR4/2)
	Y-1	0.0	28.3	71.7	5.50	2.17 (very poor)	Sandy mud	Pale yellowish brown (10YR6/2)
	J-1	0.0	31.8	68.2	5.15	2.14 (very poor)	Sandy mud	Medium dark gray (N4)
Seogwipo	M-1	6.5	80.4	13.1	0.76	1.91 (poor)	Gravelly muddy sand	Moderate yellowish brown (10YR6/6)
	M-2	0.0	79.4	20.6	3.06	1.14 (poor)	Muddy sand	Light olive gray (5Y5/2)
	S-1	0.0	4.0	96.0	6.72	1.64 (poor)	Mud	Light olive brown (5Y5/6)
	S-2	0.0	19.9	80.1	5.85	2.08 (very poor)	Sandy mud	Moderate yellowish brown (10YR5/4)
	S-3	0.0	64.6	35.4	3.96	2.23 (very poor)	Muddy sand	Light olive brown (5Y5/6)

*Folk (1954), ** Rock Color Chart by GSA

nA, 초점거리 4.5 mm 조건에서 관찰하였다.

X-선 회절 분석은 채취된 시료를 60°C에서 완전히 건조시킨 후 볼밀(ball mill)을 사용하여 분말시료를 제작한 후, 경상대학교 공동실험실습관에서 보유하고 있는 Bruker사의 D8 Advance A25 모델을 이용하여 실시하였다. 획득된 X-선 회절 자료는 EVA V3.1 (정성분석), TOPAS (정량분석) 프로그램을 이용하여 광물 조성 및 함량에 대한 정량분석을 하였다. 분석조건은 니켈 필터를 이용한 구리 파장의 X-선을 이용하여 40 kV, 40 mA, 4~90° 2-theta 구간에서 0.02°/57.3 s로 분석하였다.

이와는 별도로 시료 내에 존재하는 점토광물의 종류를 알아보기 위해 2 g의 건조시료와 200 ml의 증류수를 혼합하여 5분간 초음파 세척한 후 1시간 동안 마그네틱으로 교반(stirring)시켰다. 교반된 시료를 약 3시간 30분 동안 침전시킨 후, 상부 1 cm 구간의 혼탁액을 채취하였다. 이 혼탁액을 슬라이드 글라스 위에 올려놓고 상온에서 24시간 동안 건조시켜 정방위 시료를 제작하였다. 점토광물의 감정은 공기중 건조시료와 60°C에서 24시간 동안 에틸렌글리콜(Ethylene Glycol)로 포화시킨 시료에 대해 각각 X-선 회절분석을 실시하고 그 결과를 비교하여

결정하였다. 점토광물 정방위 시료인 경우는 40 kV, 40 mA, 3~15° 2-theta구간에서 0.005°/93 s의 조건으로 분석을 실시하였다.

4. 연구 결과

4.1 퇴적물 조직 특성

4.1.1 U층 시추공 시료

일반적으로 시추공 암상조사에서 U층은 주로 패각편과 응회암편이 나타나지 않으며, 미고화 내지 반고화 상태를 보이고, 세립질 니의 함량이 우세하게 나타나는 특성을 기준으로 구분된다. 이러한 기준에 따라 U층으로 판별된 구간에서 채취된 시료는 H-1 (한남), M-3 (무릉), Y-1 (용수), J-1 (종달) 등 4개의 시료이다(그림 2). 이들 시료에서는 육안으로 층리와 같은 1차적인 퇴적구조는 관찰되지 않으며, 패각편과 같은 조립의 생물기원입자도 육안으로는 구분되지 않는다. 다만, 모든 시료가 묽은 염산(10%)과 반응하여 석회질 입자가 함유되어 있음을 지시한다. 색상은 H-1이 암갈색(dark gray, N5) 내지 녹색(black, 5G2/1), M-3가 암황갈색(dark yellowish brown, 10YR4/2), Y-1이 담황갈색(pale

yellowish brown, 10YR6/2), J-1은 보통의 암회색 (medium dark gray, N4)으로 나타난다(표 2).

입도분석 결과(표 2), H-1 시료는 모래 3.2%, 실트와 점토를 합한 니 96.8%로 구성되어 있으며 Folk (1954)의 기준에 따르면 니(mud)로 분류된다. 평균입도는 5.55 Φ 이며, 분급도는 1.4 Φ 로서 불량한 분급을 보인다. 나머지 M-3, Y-1, J-1 시료는 서로 유사한 조직특성을 보이는데, 자갈은 나타나지 않고 사질 입자의 함량이 24.9~31.8%, 니가 68.2~75.1%로 포함되어 있으며, Folk (1954)의 분류기준에 따르면 사질 니(sandy mud)에 해당된다. 이들 시료의 평균입도는 5.15~5.55 Φ 이며, 분급도는 2.08~2.17 Φ 로 매우 불량한 분급으로 분류된다.

4.1.2 서귀포층 시추공 시료

시추공 시료 중에서 서귀포층으로 판별된 것은 무릉 시추공의 심도 130 m와 150 m에서 채취된 M-1과 M-2 시료로서 모든 시료가 묽은 염산과 활발하게 반응한다. 특히 M-1시료는 수 cm 크기의 패각편이 산재하여 나타나며, 자갈 내지 모래 크기의 검은색 응회암질 암편이 포함되어 있는 것이 육안으로 확인된다. 시료의 색상은 M-1이 보통의 황갈색(moderate yellowish brown, 10YR6/6), M-2가 담녹갈색(light olive gray, 5Y5/6)을 띤다(표 2).

입도분석 결과(표 2), M-1 시료는 자갈 6.5%, 모래 80.4%, 니 13.1%로 구성되어 있으며 Folk (1954)에

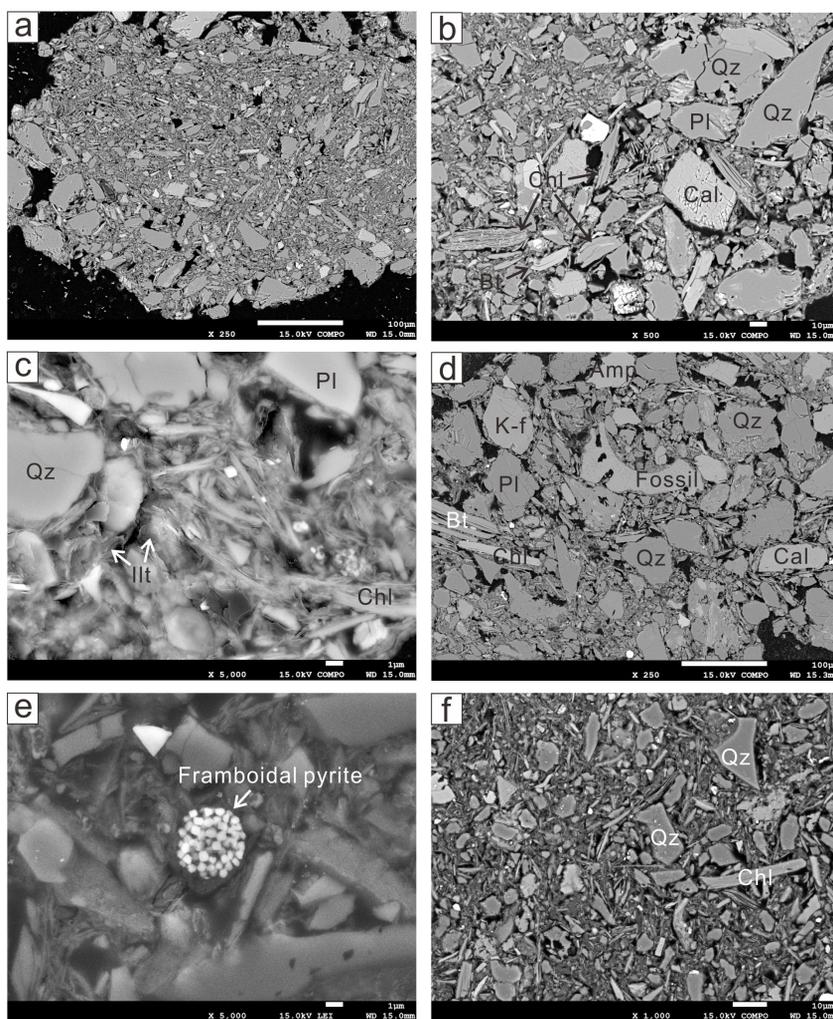


Fig. 4. SEM photography of samples from the U Formation. A, B and C are from H-1, D and E are from M-3, F is from J-1. Pl: plagioclase, K-f: K-feldspar, Qz: quartz, Amp: amphibole, Bt: biotite, Cal: calcite, Chl: chlorite, Ill: illite.

따르면 역니질 모래(gravelly muddy sand)로 분류된다. 평균입도는 0.57 Φ 이며, 분급도는 1.99로서 불량한 분급을 보인다. 한편, M-2 시료는 자갈은 거의 없이 모래 79.4%, 니 20.6%로 구성되어 있으며 니질 모래(muddy sand)으로 분류된다. 평균입도는 3.06 Φ 이며, 분급도는 1.14 Φ 로서 불량한 분급에 해당한다.

4.1.3 서귀포층 노두 시료

서귀포층 노두는 서귀포시 서흥동 해안단애를 따라 약 30 m 두께로 분포하는데, 주로 역질사암, 사암, 사질이암, 이암 등으로 이루어져 있으며 다양한 종류의 해양 체구화석(body fossil) 및 흔적화석(trace fossil) 과 함께 평행(엽)층리, 점이층리, 연흔 및 언덕사층리

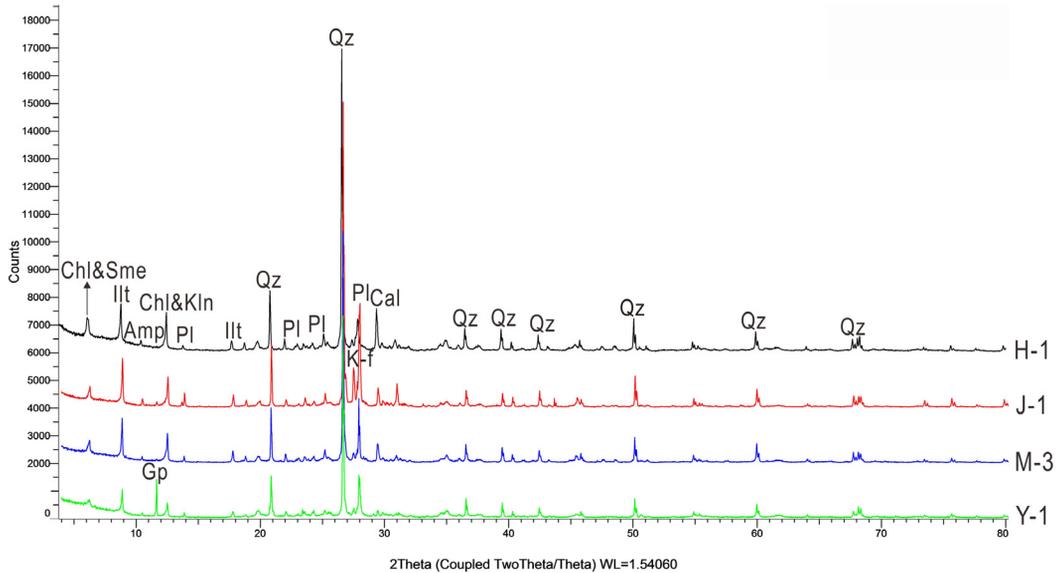


Fig. 5. X-ray diffraction pattern of samples from the U Formation. Qz: quartz, Pl: plagioclase, K-f: K-feldspar, Amp: amphibole, Bt: biotite, Sme: smectite, Chl: chlorite, Kln: kaolinite, Ill: illite, Cal: calcite, Gp: gypsum.

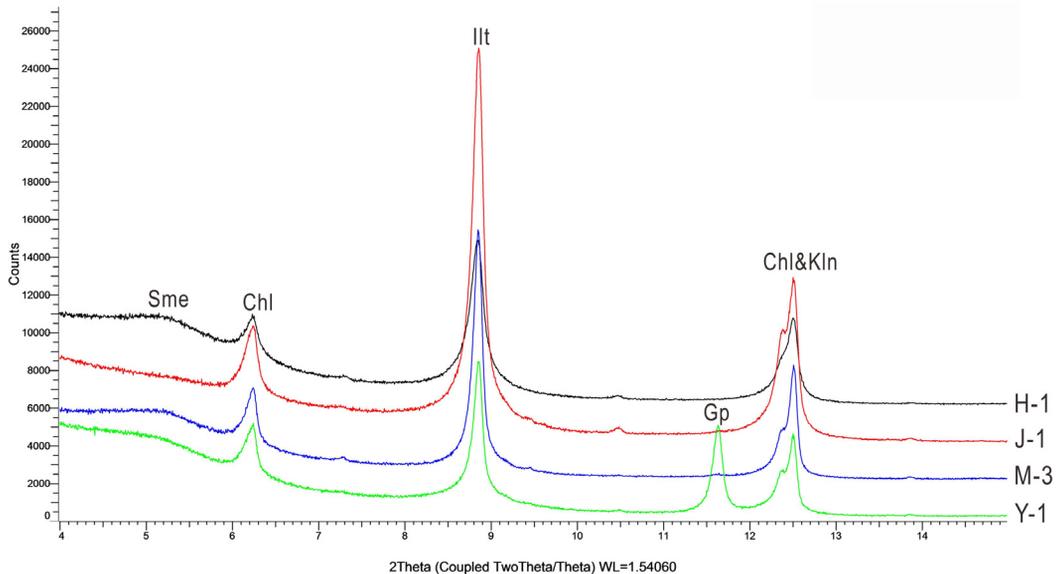


Fig. 6. X-ray diffraction pattern of ethylene-glycolated samples from the U Formation. Sme: smectite, Chl: chlorite, Kln: kaolinite, Ill: illite, Gp: gypsum.

Table 3. Mineral composition (wt%) of bulk sediment samples from U and Seogwipo formations.

	U Formation (well samples)					Seogwipo Formation (well samples)			Seogwipo Formation (outcrop samples)				Recent South Sea*
	H-1	M-3	Y-1	J-1	Mean	M-1	M-2	Mean	S-1	S-2	S-3	Mean	Mean
Quartz	29.8	32.2	28.5	39.5	32.5	1.9	38.2	20.1	32.4	29.9	29.2	30.5	37.4
Plagioclase	15.3	12.7	13.1	16.6	14.4	21.1	13.7	17.4	16.9	13.9	16.4	15.7	11.7
K-feldspar	15.8	18.2	21.2	13.6	17.2	8.8	11.4	11.4	12.0	12.6	14.1	12.9	5.5
Amphibole	3.3	1.8	0.7	1.8	1.9	-	5.0	2.5	2.3	2.7	0.9	2.0	3.1
Biotite	3.6	4.7	6.7	2.9	4.5	3.9	4.0	4.0	1.5	3.6	5.4	3.5	-
Smectite	0.3	9.1	8.5	1.9	5.0	12.7	17.5	15.1	0.6	1.2	0.5	0.8	-
Chlorite	11.3	7.9	5.1	8.0	8.1	17.5	3.6	10.6	10.3	12.9	15.0	12.7	4.7
Kaolinite	11.4	6.6	10.6	9.0	9.4	3.3	2.9	3.1	11.9	14.4	12.6	13.0	1.8
Illite	0.9	1.0	1.8	1.5	1.3	3.3	1.0	2.2	6.6	1.9	1.4	3.3	19.2
Calcite	8.2	5.8	1.8	3.1	4.7	18.4	1.3	9.9	5.5	7.1	4.6	5.7	14.1
Analcime	-	-	-	-	-	9.1	-	4.6	-	-	-	-	-
Gypsum	-	-	2.2	1.8	1.0	-	1.4	0.7	-	-	-	-	-
Dolomite	-	-	-	0.4	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-

*Moon *et al.* (2009)

등의 퇴적구조가 나타난다(Yoon and Chough, 2006). 층서적으로는 암상, 퇴적구조, 침식경계면, 생물교란 및 화석포함여부 등을 기준으로 하여 10개의 화석포함 층단위와 4개의 화석비포함 층단위로 구분되며(Sohn and Yoon, 2010), 분석시료는 층단위 VI에서 채취되었다(그림 3). 층단위 VI는 두께 1.3~1.5 m로 황갈색(10YR5/4)이나 녹갈색(5Y5/6) 계열의 니질 내지 사질 퇴적물로 구성되어 있다. 전반적으로 층단위 최상부의 생물서식구조를 제외하고는 균질한 퇴적구조를 보이며, 상하부 층경계면은 침식면은 아니지만 비교적 뚜렷하고 평탄하게 나타난다.

입도분석 결과(표 2), 서귀포층 노두 시료는 하부에서 상부로 가면서 세립화의 경향을 보인다. 최하부의 S-3는 모래 64.6%, 니 35.4%로 구성된 니질 모래(muddy sand, Folk, 1954)로 분류되며, 상부의 S-2에서는 모래 함량이 19.9%로 감소하고 대신 니 함량이 80.1%로 증가하여 사질 니로 분류된다. 최상부 S-1 시료는 니의 함량이 96.0%로 더 증가하여 니로 분류되며, 모래는 4.0%로 상대적으로 매우 적은 함량을 보인다. 이와 함께 평균입도도 하부에서 상부로 가면서, 3.96 Φ , 5.85 Φ , 6.72 Φ 로 점차 세립화의 경향을 반영한다. 분급도는 하부에서 상부로 가면서 2.23 Φ , 2.08 Φ , 1.64 Φ 의 순으로 매우 불량한 분급에서 불량 분급으로 변화된다.

4.2 광물학적 특성

4.2.1 U층 시추공 시료

U층의 SEM-EDS 관찰결과, 모든 시료에서 각형 내지 아각형의 석영과 장석입자들이 관찰되며, 그 사이를 수 um 내외의 일라이트, 녹니석, 철산화광물들이 채우고 있다. 또한 기질에 나타나는 녹니석과 흑운모 결정들은 배열성을 보이기도 하며, 분급이 불량한 편이다(그림 4). 한남코어(H-1)와 무릉코어(M-3)에서는 자형의 방해석 결정들이 다수 관찰되며(그림 4b, d), 무릉코어(M-3)에서는 특이하게 화석들과 프람 보이드형 황철석(framboidal pyrite)이 종종 관찰된다(그림 4d, e).

XRD 분석결과(그림 5, 6), U층에서 채취된 시료들은 석영을 29.8~39.5% (평균 32.5%)로 가장 많이 포함하고 있으며, 두 번째 많은 광물은 K-장석으로서 함량비는 13.6~21.2% (평균 17.2%)이다. 그 다음으로 사장석 12.7~16.6% (평균 14.4%), 고령토 6.6~11.4% (평균 9.4%), 녹니석 5.1~11.3% (평균 8.1%), 스멕타이트 0.3~9.1% (평균 5.0%), 방해석 1.8~8.2% (평균 4.7%), 흑운모 2.9~6.7% (평균 4.5%), 각섬석 0.7~3.3% (1.9%), 일라이트 0.9~1.8% (평균 1.3%), 석고 0~2.2% (평균 1.0%), 백운석 0~0.4% (평균 0.1%)의 순으로 구성된다(표 3). 석영, 사장석, K-장석, 각섬석, 흑운모를 합한

양은 평균 70.5%이며, 점토광물의 평균 함량은 23.7%이다. U층 시료에서는 광물조합과 함량이 시료별로 큰 차이 없이 대체로 일정하게 나타나며 각섬석을 모두 포함하고 있는 것이 특징이다(표 3). 다만, 석고는 J-1과 Y-1에서 나타나며, J-1에는 소량의 백운석이 포함되어 있다(표 3).

4.2.2 서귀포층 시추공 시료

서귀포층 시추공 시료의 SEM 관찰결과, M-1 시료에서는 조립사 크기로 아각형 또는 타원형의 현무암질 화산유리 입자가 대부분을 차지하고 있으며 간

혹 화석들이 관찰되고(그림 7a, 7b), 이보다 더 깊은 심도의 M-2 시료에서는 세립사 크기로 원마도가 양호한 석영과 장석 입자들 사이에 현무암질 화산유리 입자가 혼재되어 나타난다(그림 7c, 7d).

무릉 시추공에서 취득된 2개의 서귀포층 시료(M-1, 2)는 XRD 분석결과(그림 8, 9) 다소 상이한 광물조성을 보인다. 육안으로 관찰되는 역질의 패각편과 응회암편을 다량 포함하고 있는 M-1 시료는 사장석이 21.1%로 가장 많고, 그 다음으로 방해석이 18.4%, 녹니석과 스�멕타이트가 각각 17.5%와 12.7%로 들어있으며, 특이하게 불석광물군인 아날심이

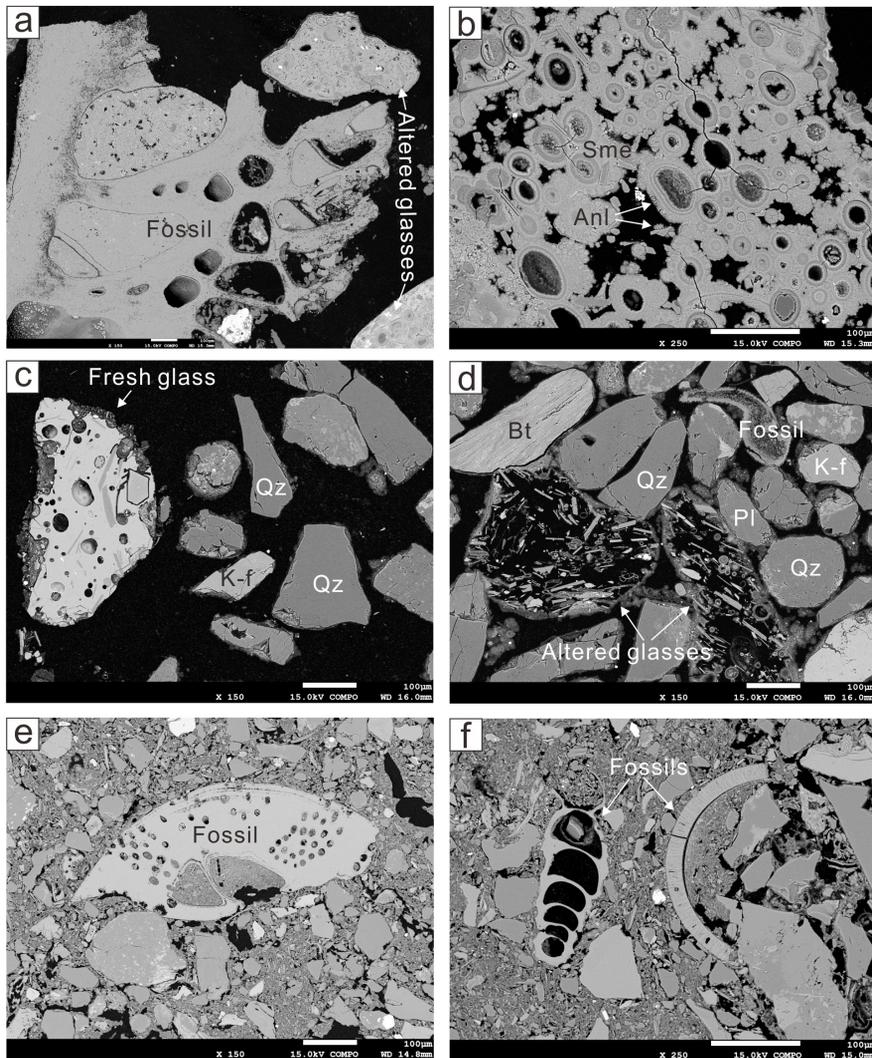


Fig. 7. SEM photography of samples from the Seogwipo Formation. A and B are from M-1, C and D are from M-2, E and F are from S-1. Pl: plagioclase, K-f: K-feldspar, Qz: quartz, Bt: biotite, Sme: smectite, Anl: analcime.

9.1%, 그리고 K-장석 8.8%, 흑운모는 3.9%, 고령토와 일라이트는 동일하게 3.3%의 함량비를 보인다(표 3). 그러나 여타 시료에서와는 달리 석영은 1.9%로 매우 적게 포함되어 있으며, 각섬석은 거의 나타나지 않는다. 석영, 사장석, K-장석, 흑운모를 더한 총량은 26.9%이며, 점토광물의 함량은 36.8%이다(표 3).

한편, 사질 모래로 구분되는 M-2 시료에서는 석영이 38.2%로 가장 높고, 스펙타이트 17.5%, 사장석 13.7%, K-장석 11.4%, 각섬석 5.0%, 흑운모 4.0%, 녹니석 3.6%, 고령토 2.9%, 석고 1.4%, 방해석 1.3%, 일라이트 1.0% 순으로 나타난다(표 3). 석영, 사장석, K-장석, 각섬석, 흑운모를 더한 총량은 72.3%이

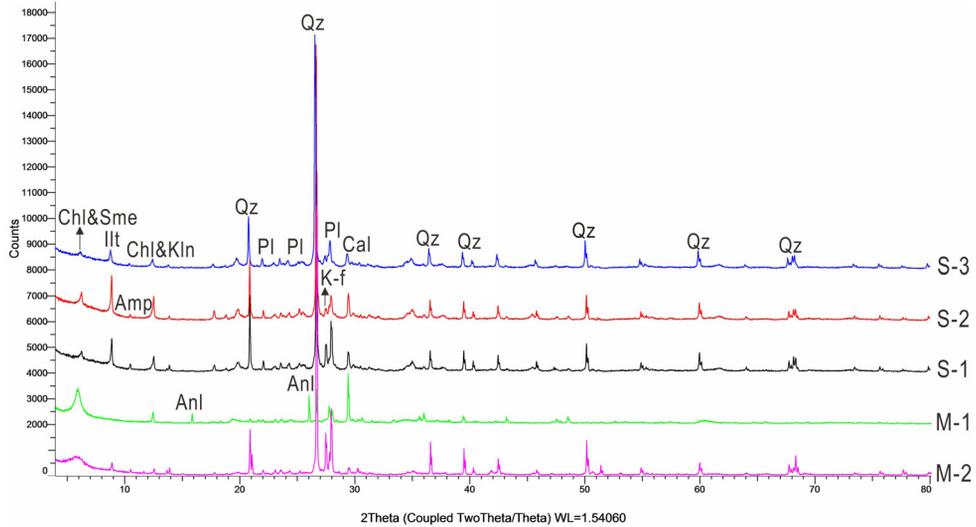


Fig. 8. X-ray diffraction pattern of samples from the Seogwipo Formation. Qz: quartz, Pl: plagioclase, K-f: K-feldspar, Amp: amphibole, Sme: smectite, Chl: chlorite, Kln: kaolinite, Ill: illite, Cal: calcite, Anl: analcime.

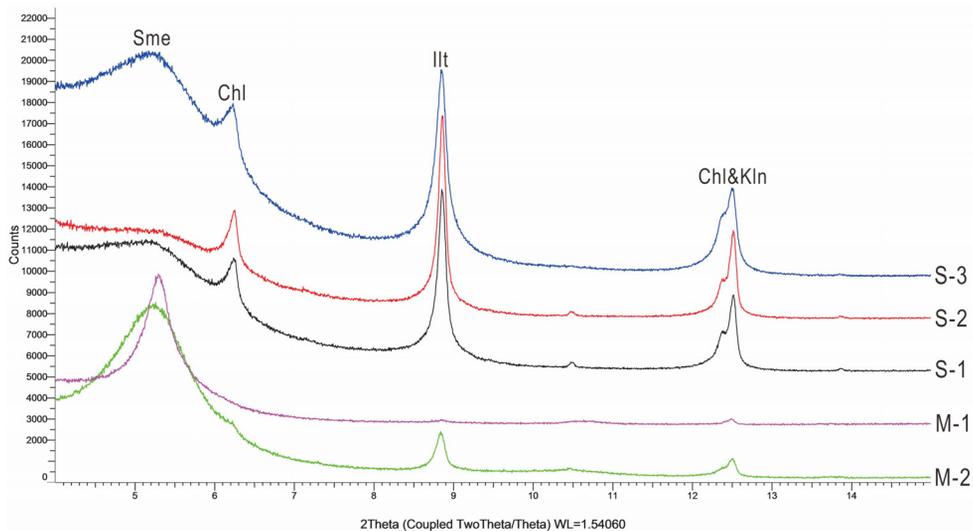


Fig. 9. X-ray diffraction pattern of ethylene-glycolated samples from the Seogwipo Formation. Sme: smectite, Chl: chlorite, Kln: kaolinite, Ill: illite.

고 점토광물의 함량은 25.0%로서, U층 시료의 평균치와 매우 근사하다(표 3).

4.2.3 서귀포층 노두 시료

서귀포층 노두 시료에 대한 SEM 관찰에서는 3개의 시료(S-1,2,3) 모두 U층과 유사하게 각형 내지 아각형의 석영과 장석입자들을 포함하고 있으며, 그 사이를 수 um 내외의 일라이트, 녹니석, 철산화광물들이 채우고 있다(그림 7e, 7f). 또한 기질에 나타나는 녹니석과 흑운모 결정들은 배열성을 보이기도 한다. 특히하게 다양한 화석의 파편들이 다량 포함되어 있으며, 서귀포층 시추공 시료에서와는 달리 현무암질 화산유리는 전혀 관찰되지 않는다(그림 7e, 7f).

XRD 분석결과(그림 8, 9), 서귀포층 노두 시료에는 석영이 29.2~32.4% (평균 30.5%)로 가장 많이 포함되어 있으며, 두 번째 많은 광물은 사장석으로서 함량비는 13.9~16.9% (평균 15.7%)이다. 그 다음으로 고령토 11.9~14.4% (평균 13.0%), K-장석 12.0~14.1% (평균 12.9%), 녹니석 10.3~15.0% (평균 12.7%), 방해석 4.6~7.1% (평균 5.7%), 흑운모 1.5~5.4% (평균 3.5%), 일라이트 1.4~6.6% (평균 3.3%)이며, 서귀포층 시추공 시료에서와는 대조적으로 �멕타이트가 가장 작은 0.5~1.2% (0.8%)의 함량비를 보인다(표 3). 한편, 석영, 사장석, K-장석, 각석, 흑운모 총함량의 평균값은 64.6%이며 점토광물의 평균함량은 29.3%로 나타난다.

5. 토 의

5.1 U층과 서귀포층의 광물조성 비교

U층은 제주도 기저를 이루고 있는 백악기말-제3기초의 화강암질 및 화산암질 기반암 상부에 위치한 미고화 내지 반고화의 해성퇴적층에 대해 명명된 층서단위로서, 70~250 m 두께로 제주도 전 지역의 지하에 분포하는 것으로 알려져 있다(Koh, 1997). 서귀포층에서와는 달리 U층에서는 화산기원 물질이나 입자가 거의 보고되지 않고 있는데, 이는 제주도 화산활동이 본격적으로 일어나기 전에 U층이 형성되었음을 지시하는 중요한 증거로 받아들여지고 있다(Koh, 1997). 한편, 서귀포층은 U층과 제주화산체를 구성하는 화산암류 지층 사이에 위치하고 있는데, 천해환경에서 집적된 해성퇴적층과 화산기원 유

리질입자로 구성된 응회암질 퇴적층이 교호하여 나타나는 특징을 보인다(Sohn and Park, 2004; Yoon and Chough, 2006). 따라서 서귀포층은 화산기원 입자가 나타나는 최하부 층서단위로서 제주도를 형성한 화산활동의 시작점으로 간주되고 있다.

이 연구에서 수행된 SEM과 XRD 광물조성 분석 결과는 이러한 기존의 연구결과를 비교적 잘 반영하는 것으로 보인다. 즉, 서귀포층 시추공 시료인 M-1과 M-2에서는 조립사 내지 세립사 크기의 아각형 또는 타원형의 현무암질 화산유리 입자가 원마도가 양호한 석영과 장석 입자들과 혼재하여 나타나는 것이 관찰된다(그림 7). 화산유리질 입자는 지표면에서 쉽게 풍화되어 변질되거나 소멸되는 특성을 점을 감안한다면, 서귀포층 시추공 시료 내에 원마도가 불량한 화산물질이 포함되어 있다는 것은 퇴적과 거의 동시기에 주변에 활발한 화산활동이 있었음을 반영하는 것으로 해석된다. 반면에 H-1, M-3, Y-1, J-1 등 U층 시료에서는 석영, 장석 입자들과 소량의 생물파편은 서귀포층 시료와 거의 동일하게 나타나지만, 화산기원 입자는 전혀 발견되지 않는다(그림 4).

화산기원 물질의 풍화와 관련하여, 점토광물 중의 �멕타이트는 일반적으로 현무암질 유리물질이 속성 변질작용(diagenetic alteration)을 거쳐 생성되는 대표적인 풍화광물 중 하나로 알려져 있다(Chamley, 1989). 서귀포층 시추공 시료(M-1과 M-2)에서의 �멕타이트 함량은 전체 광물 중에 평균 15.1%이며, 점토광물군(스멕타이트, 녹니석, 고령토, 일라이트) 내에서는 평균 49%로서 녹니석과 함께 주구성 점토광물로 나타난다(표 3). 한편, U층 시료(H-1, M-3, Y-1, J-1)에서는 전체 광물 대비 함량이 평균 5.0%, 점토광물군 내에서는 평균 21%로서, 서귀포층 시추공 시료와 비교할 때 상대적으로 적은 양의 �멕타이트가 포함되어 있다(표 3). 다만 기존 연구에서는, U층에서 �멕타이트가 거의 나타나지 않는 것으로 보고하였으나(Koh, 1997), 이는 XRD 장비의 성능과 점토광물 조성에 대한 정량적 계산법 차이에 기인한 것으로 판단된다.

5.2 서귀포층 노두 시료에서의 화산기원 물질의 부재

서귀포층 노두에는 응회암질 입자로 구성된 재동 화산쇄설층과 육안 판별이 가능한 화산암편을 포함하는 해성퇴적층이 협재하기 때문에(그림 3), 이곳의

지층이 제주도 형성초기 화산활동에 의한 직간접적인 영향을 받았다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다(Yoon and Chough, 2006; Sohn and Yoon, 2010). 하지만, 서귀포층 노두 층단위 VI로부터 채취된 시료들(S-1,2,3)에서는 화산활동을 지시하는 증거가 명확하게 나타나지는 않는다. 즉, 서귀포층 노두 시료들의 XRD 분석 결과 스�멕타이트 함량은 3개 시료 평균 0.8%(최대 1.2%)로서 서귀포층 시추공 시료(평균 15.1%)는 물론, U층 시료(평균 5.0%)보다도 매우 적은 함량비를 보인다(표 3). 또한 SEM 분석에서도 화산기원 물질은 거의 발견되지 않는다(그림 7e, 7f). 이는 서귀포층 층단위 VI가 퇴적될 당시의 환경조건과 관계가 있는 것으로 보인다.

서귀포층 층단위 VI는 하부에서 상부로 가면서 니질 모래에서 니로 세립화의 경향을 보이며, 층리와 같은 퇴적구조 없이 전반적으로 균질한 특성을 보인다(그림 3). 층단위 VI의 바로 하부에는 약 15 m 두께의 미고화 사질 퇴적층(층단위 V)이 놓여 있는데, 퇴적물의 50% 이상이 분급이 양호한 세립질 석영 입자로 구성되어 있으며, 화산기원의 입자는 거의 관찰되지 않는다(Yoon and Chough, 2006). 화산활동이 있었음을 직접적으로 지시하는 응회암은 층단위 III에 나타나는데, 서귀포층 노두 시료가 채취된 층준보다 약 16 m 하위에 위치한다(그림 3). 석회질 초미화석과 구조화석 분석에 의한 두 층준의 연대차이는 약 77만년으로 제시되어 있다(Yoon *et al.*, 2004). 따라서 서귀포층 노두 층단위 VI는 대부분 오랜 화산휴지기가 지속되는 동안에 집적된 퇴적물로 구성되어 있는 것으로 추정되며, 이로 인해 이 연구의 서귀포층 노두 시료들에서는 화산기원 광물이나 물질이 발견되지 않는 것으로 해석된다.

한편, Lee (1990)는 층단위 VI로부터 채취된 개형충(Ostracoda)의 고생물학적 분석을 통하여, 이 층단위가 온난한 해수의 영향을 받는 수심 50~100 m 정도의 개방형 대륙붕 환경에서 퇴적된 것으로 해석한 바 있다. 이와 같은 퇴적환경은 상하위 층단위들의 형성환경에 비해 상대적으로 깊은 수심을 지시하는 것으로서(Lee, 1990), 층단위 VI가 퇴적되는 시기는 해수면이 상대적으로 높았던 고해수면기에 해당 하는 것으로 추정된다. 따라서 당시에 초기 제주 수성 화산체들은 대부분 해수면 아래에 잠긴 상태에서 오랜 기간 화산휴지기가 이어지면서 해성퇴적물로

피복되었고 이로 인해 화산기원 물질의 공급이나 재동이 매우 제한되어 있어서, 층단위 VI에는 화산 유리물질이 거의 없고 스�멕타이트도 낮은 함량으로 나타난다고 설명할 수 있을 것이다.

기존 연구에 따르면, 서귀포층 시추공 코어들과 대부분의 서귀포층 노두 층단위에서는 화산활동에 대한 광물암석학적 지시자들(화산암편, 유리물질, 스�멕타이트 등)이 적지 않은 함량비로 나타난다(Koh, 1997; Yoon and Chough, 2006). 따라서 제주도 지질층서에 있어서 서귀포층은 제주도 형성초기의 화산활동기를 가장 잘 반영하는 대표적 층서단위라고 할 수 있다. 하지만 층단위 VI와 같은 서귀포층의 일부 구간은 화산기원 물질의 공급이 제한되었던 화산휴지기나 해수면 상승기, 또는 이 두 시기가 겹친 기간에 형성되었기 때문에 U층과 유사하게 비화산기원의 퇴적물이 우세하게 나타나는 특징을 보일 수도 있다. 따라서 화산유리의 존재유무와 스�멕타이트의 함량을 U층과 서귀포층의 상호 구분에 일률적으로 적용하는 것에는 신중을 기해야 하며, 반드시 하부 지층과의 층서적 관계나 퇴적환경에 대한 분석이 함께 고려되어야 할 것이다.

5.3 U층의 퇴적환경

U층 시료에 대한 입도분석 결과, 모든 시료에서 니의 함량이 68.2~96.8% (평균 78.0%)로 가장 우세하며, 자갈은 거의 나타나지 않고 모래 3.2~31.8% (평균 22.1%)로 구성된다. 입도조성에 따라 대부분의 시료는 사질 니로 분류되며, 불량 내지 매우 불량한 분급도를 갖는다. 이러한 U층의 조직적 특성은 서귀포층에 비해서 그 변화폭이 작은 것으로서, 서귀포층 시료는 니에서 역니질 모래까지 다양한 입도의 특성을 보인다. 아울러 U층 시료에서는 육안으로 층리나 박층리 등의 1차 퇴적구조는 관찰되지 않으며, 패각편과 같은 조립질의 생물기원입자도 육안으로 구분되지 않는다. 하지만, 모든 시료에 1.8~8.2%의 방해석이 포함되어 있으며(표 3), SEM 분석에서는 생물편이 관찰되기도 한다(그림 4d). 실제 Yoon *et al.* (2004)은 제주도 동부지역 시추공의 U층으로부터 8종의 석회질 초미화석과 28종의 구조류 화석을 보고하기도 하였다.

U층의 이와 같은 퇴적학적 특성은 해저면까지 닿는 해류나 파도의 영향이 미약하고 비교적 세립질의 퇴적물이 우세하게 분포하는 광범위한 규모의 퇴적

환경을 지시하는 것으로 해석된다. 현재 제주도가 위치하고 있는 남해 및 동중국해 해역은 플라이오세 후기에 들어오면서 해성환경이 조성되어 해수면 변동에 따라 수심이 달라지는 대륙붕 환경이 우세했던 것으로 알려져 있다(Yoo *et al.*, 2002; Koh *et al.*, 2016). 따라서 U층에 대한 퇴적학적 해석을 기초로 한다면, 이 연구에서 분석된 U층 구간은 평상시의 해파기저면(fair-weather wave base)보다 더 깊은 해저에 해당하는 원안(offshore)에서 집적된 것으로 추정된다. 원안은 해수유동이 활발해지는 폭풍시기를 제외하고는 평상시에는 표층 해류나 해파로 인한 해수유동의 영향이 거의 없는 지역으로서, 자갈이나 모래 등 조립질 퇴적물의 유입이 제한적으로 이루어지는 대신 주로 뜬짐의 형태로 세립질 퇴적물이 우세하게 공급되어 집적된다(Potter *et al.*, 2005). 특히 U층에서 니질 퇴적물이 우세하게 나타나는 것은 한반도와 중국대륙 등 주변 육상의 하천으로부터 활발하게 퇴적물이 공급되어 저에너지 해저에 집적되었고, 상대적으로 폭풍이나 조류에 의한 재등의 영향이 적었기 때문으로 추정된다.

한편, 황해와 남해에서의 점토광물 연구에 따르면 점토광물의 조성은 퇴적물 기원지와 퇴적환경과 밀접한 관계를 갖는다(Choi and Kim, 1998; Moon *et al.*, 2009, 2010; Cho *et al.*, 2012). XRD 분석방법을 고려하였을 때 이 연구에서 분석결과와 비교할 수 있는 것은 황해 남동부와 남해역을 대상으로 한 Moon *et al.* (2009)의 연구로서(표 3), 전체적인 광물 조성은 U층 분석결과와 유사하지만, 현생 퇴적물의 점토광물 조성은 일라이트 함량이 가장 높고, 녹니석, 고령토 순으로 적어지며, 스�멕타이트는 거의 나타나지 않는다. 반면에 U층 시료에서는 고령토의 함량이 특이하게 가장 높게 나타나며, 녹니석, 스�멕타이트, 일라이트 순으로 낮아진다. 즉 일라이트와 고령토의 함량 비중이 점토광물군 내에서 서로 반대이고 U층에는 스�멕타이트가 나타난다는 점이 U층과 현생 퇴적물의 차이점이다. 아울러 조암광물은 현생 퇴적물에서 사장석이 K-장석 보다 높은 함량을 보이는데 반해(Moon *et al.*, 2009), U층에서는 그 반대의 특성이 나타난다. 현생 황해시료에 비해 U층 시료의 양이 많지 않아 확신할 수는 없지만, U층이 퇴적되던 당시의 제주해역은 수심이 다소 깊은 대륙붕으로서 현생환경과 유사하지만, 퇴적물의 공급원과 관련해서는 오늘날(Cho *et al.*,

2012)과 다소 차이가 있었을 것으로 추정된다.

6. 결론

제주도 동부, 남부, 서부 지역 4개소의 시추공으로부터 수집된 퇴적물 시료의 입도분석 결과, U층은 니의 함량이 70% 이상인 니 혹은 사질 니로 구성되어 있으며, 불량한 분급을 보인다. 아울러 층리 등 1차 퇴적구조가 관찰되지 않으며, 패각편과 같은 조립질의 생물기원입자도 육안으로 구분되지 않는다. 이와는 대조적으로 시추공의 서귀포층 구간에서 채취된 시료들은 자갈 및 모래의 함량이 80% 정도인 니질 모래 혹은 역니질 모래로 분류되며, 일부 시료에서는 화산기원 입자와 패각편이 육안으로 구분된다.

SEM과 XRD를 이용한 광물조성 분석결과, U층에서는 직접적인 화산기원 입자가 전혀 나타나지 않으며, 적은 양(5% 내외)의 스�멕타이트가 포함되어 있다. 이에 비해 서귀포층 시추 시료에서는 현무암질 화산유리 입자와 함께 U층에서보다 3배 정도(15% 내외) 많은 스�멕타이트가 포함되어 있다. 이와 같은 분석결과는 제주도 화산활동 이전에 형성된 U층과 제주도 형성초기 수성화산 활동기에 형성된 지층으로 알려져 있는 서귀포층의 특성 차이를 잘 반영하는 것으로 해석된다.

하지만 비교를 위해 분석된 서귀포층 노두의 세립질 모래 및 니 시료에서는 서귀포층 시추 시료에서와는 달리 화산활동을 지시하는 광물학적 증거가 거의 나타나지 않는다. 따라서 화산유리의 존재유무와 스�멕타이트의 함량만으로 U층과 서귀포층을 구분할 때는 신중을 기할 필요가 있다.

U층의 퇴적학적 특성은 오늘날 제주도 주변 외해역과 유사한 해파기저면 하부의 원안 대륙붕 환경에서 주로 퇴적되었음을 지시하는 것으로 해석된다. 그러나 현생 제주도 주변 퇴적물과 비교할 때, U층 퇴적물의 점토광물 조성은 고령토와 스�멕타이트의 함량이 상대적으로 높은 특징을 보이고 있어서, 퇴적물의 공급원은 오늘날과 다소 차이가 있었을 것으로 추정된다.

사 사

이 논문은 2015년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었습니다. 입도분석에 도움을 주신 한국

지질자원연구원 관계자와 논문 심사과정에서 유익한 조언을 주신 전용문 박사님께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Ahn, K.S., Lee, H.K. and Lim, H.C., 1995, A petrological and geochemical study of granites in the Cheju Island. *Economic and Environmental Geology*, 28, 513-518 (in Korean with English abstract).
- Chamley, H., 1989, *Clay Sedimentology*. Springer Verlag, Berlin, 623 p.
- 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.
- Cho, H.G., Kim, S.O. and Yi, H.I., 2012, Clay mineral distribution and characteristics in the Southeastern Yellow Sea Mud deposits. *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 25, 163-173 (in Korean with English abstract).
- Choi, J.Y. and Kim, S.Y., 1998, Distribution of clay minerals in the Korean Seas. *Journal of Korean Earth Science Society*, 19, 524-532 (in Korean with English abstract).
- Folk, R.L., 1954, The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rocks. *Journal of Geology*, 62, 345-351.
- Koh, C.S., Yoon, S.H., Lee, D.K. and Yoo, H.S., 2016, Tectonic evolution and depositional environments of Jeju and Socotra basins in the southernmost continental shelf of the South Sea, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 355-371 (in Korean with English abstract).
- Koh, K.W., 1991, Underground state of the Seoguipo Formation, Jeju Island. *Research Report of Oceanographic Institute of Jeju National University*, 15, 81-92 (in Korean).
- Koh, K.W., 1997, Characteristics of the Groundwater and Hydrogeologic Implications of the Seoguipo Formation in Cheju Island. PhD Thesis, Pusan National University, Pusan, 326 p (in Korean with English abstract).
- Koh, K.W., 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).
- Lee, E.H., 1990, Pleistocene Ostracoda from the Marine Sedimentary Strata of the Cheju Island, Korea. PhD Thesis, Korea University, Seoul, 400 p.
- Moon, D.H., Cho, H.G. and Yi, H.I., 2010, A comparative study on absolute and relative clay mineral composition of the surface sediments around the Jeju Island. *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 23, 15-23 (in Korean with English abstract).
- Moon, D.H., Yi, H.I., Shin, K.H., Do, J.Y. and Cho, H.G., 2009, Mineral distribution of the southeastern Yellow Sea and South Sea of Korea using Quantitative XRD analysis. *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 22, 49-61 (in Korean with English abstract).
- Potter, P.E., Maynard, J.B. and Deperis, P.J., 2005, *Mud and Mudstones, Introduction and Overview*. Springer, Berlin, 305 p.
- Sohn, Y.K., Cronin, S.J., Brenna, M., Smith, I.E.M., Nemeth, K., White, J.D.L., Murtagh, R.M., Jeon, Y.M. and Kwon, C.W., 2012, Ilchulbong tuff cone, Jeju Island, Korea, revisited: a compound monogenetic volcano involving multiple magma pulses, shifting vents, and discrete eruptive phases. *Geological Society of America Bulletin*, 124, 259-274.
- 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, K.H. and Yoon, S.H., 2008, Primary versus secondary and subaerial versus submarine hydro-volcanic deposits in the subsurface of Jeju Island, Korea. *Sedimentology*, 55, 899-924.
- Sohn, Y.K. and Yoon, S.H., 2010, Shallow-marine records of pyroclastic surges and fallouts over water in Jeju Island, Korea, and their stratigraphic implications. *Geology*, 38, 763-766.
- Woo, K.S., Sohn, S.K., Yoon, S.H., Ahn, U.S. and Spate, A., 2013, *Jeju Island Geopark - A Volcanic Wonder of Korea*. Springer Verlag, Berlin, 88 p.
- Yoo, D.G., Lee, C.W., Kim, S.P., Jin, J.H., Kim, J.K. and Han, H.C., 2002, Late Quaternary transgressive and highstand systems tracts in the northern East China Sea mid-shelf. *Marine Geology*, 187, 313-328.
- Yoon, S.H. and Chough, S.K., 2006, Sedimentary facies and depositional environment of Seoguipo Formation, Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 1-17 (in Korean with English abstract).
- Yoon, S., Koh, G.W. and Kim, I.T., 1995, Formation history of Jeju Island. *Journal of Jeju Provincial Government*, 98, 148-164 (in Korean).
- Yoon, S., Yi, S., Bak, Y.S., Jung, C.Y. and Lee, E.H., 2004, Calcareous nannofossils and diatoms from the groundwater monitoring wells in the eastern part of Jeju Island. *Journal of Paleontological Society of Korea*, 20, 99-119 (in Korean with English abstract).

Received : July 11, 2016

Revised : August 9, 2016

Accepted : August 14, 2016