

제주도 탐라층의 구성광물

현원학 · 황진연* · 이진현 · 손병서 · 오지호 · 양경희 · 김광희
부산대학교 지질환경과학과

Mineral Composition of the Tamna Formation, Jeju Island

Weonhak Hyun, Jinyeon Hwang*, Jinhyun Lee, Byeongseo Son, Jiho Oh,
Kyounghee Yang, and Kwanghee Kim

Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Korea

요약: 제주도의 전 지역에 걸쳐 넓게 분포하고 있는 하성 퇴적층인 탐라층은 역암, 사암, 이암 등으로 구성되어 있다. 대부분의 탐라층 이암 내에 다양한 크기의 석영이 다량 함유하는 것이 확인되었다. XRD 분석의 결과, 탐라층에는 석영, 사장석, 칼륨장석, 운모, 자철석, 적철석, 감람석, 휘석, 김사이트, 방해석, 아날심, 그리고 점토광물로서 일라이트, 카올린나이트, 베미클라이트, 스메타이트, 녹나석, 10 Å-할로이사이트 등의 다양한 광물들이 산출되었다. 석영이 많은 곳일수록 카올린나이트, 베미클라이트, 녹나석의 함량이 많아지는 경향이 나타났다. 이상의 결과들로 보아 탐라층의 근원암은 제주도의 화산암에서 기원된 것만이 아니며, 석영을 다량 함유한 기반암이 포함된 것으로 사료된다. 따라서 탐라층은 이전에 존재했던 기반암과 함께 제주도 화산암류의 물질들이 침가되어 퇴적된 후, 속성작용, 열수작용, 풍화작용 등의 변질작용을 받아 형성된 것으로 생각된다.

핵심어: 제주도, 탐라층, 석영, 이암, 광물, 근원암

Abstract: The fluvial Tamna Formation, consisting of conglomerate, sandstone and mudstone layers, is widely distributed in Jeju Island. Various sizes of quartz crystals were identified from most of the Tamna Formation, including the mudstone layer. XRD analysis also shows that the mudstone layer is composed of various minerals, quartz, plagioclase, K-feldspar, mica, magnetite, hematite, olivine, amphibole, gibbsite, calcite, analcime and clay minerals such as illite, kaolinite, vermiculite, smectite, chlorite, 10 Å-halloysite. There is a tendency showing that the more amount of kaolinite, vermiculite, and chlorite is present where the more amount of quartz crystals is present. It is likely that the main source materials contributing to the Tamna Formation were from the parental rocks containing abundant quartz grains, suggesting that the Tamna Formation could not be related to Jeju volcanic rocks, but possibly to pre-existing basement rocks. Thus, we propose that the Tamna Formation was formed from the materials derived from both pre-existing basement rocks and Jeju volcanic rocks, which were subsequently affected by diagenesis, hydrothermal alteration and weathering process.

Keywords: Jeju Island, Tamna Formation, quartz, mudstone, mineral, provenance

서언

제주도는 예전부터 흔히 화산도라고 알려져 왔으며, 그 지질에 관한 연구는 일본인 지질학자 Haraguchi

*Corresponding author
Tel: +82-51-510-2254
E-mail: hwangjy@pusan.ac.kr

(1931)에 의하여 최초로 실시되었다. Haraguchi (1931)는 제주도의 화산활동은 아래와 같이 3단계로 구분하였다. (1) 제주도의 최초 화산활동은 제3기 후기에 조면암질 마그마의 분출로 시작하여, 많은 둘상의 화산체가 형성되었다. 그 후의 휴식기에 서귀포층이 천해에서 퇴적되었다. (2) 플라이스토세 초에 화산활동이 점차로 증가하여 조면-안산암질 용암들이 분출하였고,

그 후에 화산활동은 크게 쇠퇴하였다. (3) 그 이후에 다시 화산활동이 격렬해져서 제주도 전역에 분포하는 많은 분석구들을 형성하였으며, 이 화산활동으로 다양한 현무암질 마그마가 분출되었다.

1965년과 1966년에 건설부에 제출한 (주)한국지하자원조사소의 제주도 지하수탐사를 위한 지질조사보고서를 종합한 농업진흥공사(ADC, 1971)의 제주도 지하수보고서에서는 제주도의 화산암은 최하위 표선리현무암의 용암들을 제외한 모든 용암들은 한라산 정상의 백록담을 형성한 분화구로부터 분출하였으며, 많은 곳에 산재하여 있는 분석구들은 제주도 화산활동의 최후기에 형성되었다고 설명하였다. 그 후, Won *et al.* (1993, 1995), Park *et al.* (1998, 2000a, 2000b)에 의하여 작성된 1:50,000축척의 제주도 지질도들에서는 용암들이 백록담 분화구에서뿐만 아니라 많은 분석구에서도 분출하였다고 하였다.

Brenna *et al.* (2012)은 제주도는 약 1.8 Ma에서 홀로세 사이의 현무암질 화산활동에 의한 화산지대의 일부라고 하였으며, 그리고 Koh *et al.* (2013)은 제주도의 화산활동은 서귀포층을 기준으로 크게 퇴적동 시기(약 1.88~0.5 Ma)와 퇴적이후의 화산활동기(0.5 Ma~홀로세)로 구분된다고 하였다. 즉 약 0.5 Ma를 전후로 그 이전의 수성화산활동과 함께 일어난 산발적인 육상 화산활동시기와, 그 후 전면적인 육상화산활동시기로 구분할 수 있다고 하였다.

제주도 전역에 걸쳐 널리 분포하고 있는 탐라층에서 Hyun *et al.* (2005)은 규암과 맥석영과 유사한 거의 석영으로 구성된 10~20 mm에 달하는 소력들의 산출을 보고하였다. 제주도는 주로 현무암질과 조면암질 화산활동으로 이루어진 섬이기 때문에, 이러한 석영을 포함하는 역들은 현지성으로는 산출할 수가 없으므로 외지로부터 운반되어 온 것으로 해석할 수 밖에 없다고 하였다. 이를 근거로 하여 Yoon *et al.* (2014)는 탐라층이 퇴적될 당시에는 전라남도 해남~강진지역에서 제주도에 이르는 사이에 넓은 육지가 존재하였으며 이 육지를 훌렸던 하천에 의하여 전라남도 해남~강진지역 옥천대와 같은 규암층과 맥석영으로부터 운반되었을 것이라고 추정하였다.

이러한 해석을 뒷받침하기 위하여 제주도 전역에 널리 분포하는 탐라층을 대상으로 전체적인 구성광물을 조사하고자 하였다. 그 중에서도 모든 탐라층에서 산출되는 이암이나 세립질인 이질암 부분을 대상으로 연구하였다. 이러한 세립질인 이질암 부분은 멀리서

운반되어 온 미립물질들도 포함하고 있기 때문에 폭넓은 균원지를 추정하는데 유용한 자료가 될 수 있다. 이전의 육안 관찰만으로 수행하였던 탐라층의 연구와는 달리 미립물질의 광물성분을 분석할 수 있는 X-선회절분석과 전자현미경 등의 방법을 사용하여, 이질암 부분에 대한 구성광물을 상세히 분석하였다. 이와 함께 제주도 전역의 탐라층에 대하여 퇴적상과 산출상을 조사하고, 구성광물의 성분, 특성, 조합, 분포 등을 검토하여, 그 구성광물들의 기원을 밝히고자 하였다. 이를 토대로 탐라층의 특성을 파악하고 균원암을 규명하는데 유용한 기초자료를 제공하고자 한다.

연구방법

제주도 탐라층의 분포지역에 대하여 자세한 야외관찰을 행하고, 탐라층과 그 주변 암석에 대한 시료를 채취하여 분석하였다. 탐라층의 이질부분의 암석을 대상으로 많은 시료를 채취하였으며, 광물성분의 비교를 위하여 이와 관련된 주변의 화산암류와 화산쇄설성 퇴적물 등도 일부 채취하고 분석하였다. 채취한 시료는 제주도의 동부, 중부, 서부지역으로 구분하여 검토하였다. Table 1에 나타낸 바와 같이, 세 지역으로 구분하여 시료번호(E, C, W)를 나타냈으며, 채취장소의 지명도 표시하였다.

이질암의 시료는 건조시킨 후, 분쇄하여 우선 전암으로 모두 X-선회절분석을 실시하여 구성광물을 분석하였다. X-선회절분석은 Rigaku사제 Geigerflex 2301의 X-선통일회절장치를 사용하였으며, CuK α 선과 Ni-filter에 의한 X-선을 사용하였다. 측정조건은 전압 30 kV, 15 mA, scan speed 2° 20/min, 시정수 1 sec, slit 1° (diverging slit) ~ 0.3 mm (receiving slit) ~ 1° (scatter slit)로 측정하였다. 점토광물을 포함한 시료에 대해서는 분말시료를 증류수에 분산시켜 원심분리를 이용한 수증침강법에 의해 2 μm 이하의 점토분으로 분리하여 정방위 시편을 제작하였다. 점토광물에 대한 정확한 감정을 실시하기 위하여 정방위 시편에 에틸렌글리콜처리와 가열처리 등을 행하여 X-선회절분석을 실시하였다.

또한 일부 점토광물의 식별과 형태관찰을 위하여 주사전자현미경(SEM/EDS)의 분석도 실시하였다. 측정은 Hitachi 사 model S4800을 사용하였으며, 15.0 kV의 전압조건에서 관찰하였다.

Table 1. Mineral compositions of mudstone in the Tamna Formation

Sample No.	Locality	Mineral					Clay Mineral				Others
		Qz	Fd	Py	Ma	He	Il	Sm	Ka	Ve	
E01	Dongbok-ri	++	+				++	+			
E02	Tosan-ri	++++					++		+++		
E03	Kyore-ri	+++	+	+			+				
E04	Hwabuk-dong		+++		+		++				
E05	Handong-ri	+			+	+					
E06	Songdang-ri		+	++	++						Fo
E07	Decheon-dong	+	++++	+	+				+		
E08	Gimnyeong-ri	++++	+		+		++	++	+	+	
E09	Pyeongde-ri	+++	+		+	+	++	++			
E10	Seongup-ri	++	++		+					+	
C01	Eosichen-river	+	+++				++		+	+	
C02	Depyoeng-ri	+	+								
C03	Seohong-dong1	+					++++				
C04	Bekrokdam		++				+	++			Am
C05	Sajebidongsan	+	++				+++				
C06	Daepo-dong	++	+				+	+	+		
C07	Dosun-ri	++							++	++	
C08	1100goji	+	+			+					
C09	Tamragegok-valley	+++	+						+	++	
C10	Eorimok2	++	+				+	+	+		
C11	Bulgeun-oreum		++			+					Al, Ca
C12	Hangpaduri	++++	+			+	+	++		++	
C13	Hawon	++	+				+	++		+	
C14	Dongsugyo1	++	+						+		Gi
C15	Yonggingak1-sand		+								
C16	Yonggingak2-mud		++++								
C17	Ora-dong		+								
C18	Gemimok	+	+		+				++	++	
C19	Seondol1	+	+			+	+++		+	+	Gi, Ha
C20	Witseoreum	+	++		+						Gi
C21	Hanchen-river1	+	+		+		+				Gi
C22	Hanchen-river2		++								
C23	Nohyeong-dong	+++++	+				++	++		++	
C25	Dopyoung	++		+	+		++		+		
C26	Hakrim-dong	++	++	+							
C28	Muljangol-oreum	++	+++				+		+		
C29	Dongsugyo2	+		+	+	+					
C30	Dosundawon	++						+	++	+	Gi
C31	Keumsanmokjang	+	+		+						Gi
C32	Yongjingak3		+								
C33	Seohong-dong2	+	+	+	+						Ha
C34	Hancheon-river3	+++	+				++				
C35	Hancheon-river4	++	+				++		+	+	

Table 1. Continued

Sample No.	Locality	Mineral					Clay Mineral				Others
		Qz	Fd	Py	Ma	He	Il	Sm	Ka	Ve	
C36	Seondol2	++	+		+						
C37	Dare-oreum		+++		+	+					
W01	Hanwon	++	+				+	+	++	+	
W02	Kosan-ri	+++	++				++		++	+++	
W03	Sinpyoung-ri	+++	+				+	+++	++		
W04	Myoungwol-ri	+++	+				+		++		++
W05	Sangde-ri	+++							+		+
W06	Hwasun-ri	+		+		+		++++	+		Ca, Ze, Cr, Si, Fo
W07	Hamo-ri	++++	+				++		++	++	
W08	Deoksu-ri	+++	+				++		++		++
W09	Sansimbong-oreum	+++	+				++	+	+		+

Keys: Qz: quartz, Fd: feldspar, Il: illite, Sm: smectite, Ka: kaolinite, Ha: halloysite, Ve: vermiculite, Ch: chlorite, Pl: Plagioclase, Mi: Mica, Am: Amphibole, He: Hematite, Al: Alunite, Ca: Calcite, Ma: Magnetite, Gi: Gibbsite, Ze: zeolite, Cr: Cristobalite, Si: Siderite, Fo: Forsterite, Py: pyroxene

탐라층의 특성

탐라층(Tamna Formation)은 제주도의 동부지역과 서부지역에서는 표선리현무암군을 부정합으로 피복하고 있으며 중부지역에서는 서귀포층을 부정합으로 피복하고 있다(Yoon *et al.*, 2002). 라하르(lahar) 기원의 하성 쇄설성 퇴적층으로 역암, 함력 사암, 사암, 함력 이암, 사질 이암, 이암 등으로 구성되어 있으며, 역들은 현무암질과 조면암질이다. 이 암층은 해안에서부터 한라산 정상부에 이르기까지 제주도 전역에 걸쳐 넓게 분포하고 있으며, 해안지역에서는 두께가 수 미터에서 수십 미터의 비교적 얕지만, 한라산체에 접근할수록 두꺼워져 200 m 이상에 이른다. Won *et al.* (1993)의 토양층, Yoon *et al.* (1995)의 탐라역암과 금덕층, Park *et al.* (1998)의 일도동퇴적층, 거로교퇴적층, 서김녕리퇴적층, 교래교퇴적층, 탐라교퇴적층과 하성자갈층, Park *et al.* (2000a)의 굴전동역암, 범호천역암과 만세동역암, Park *et al.* (2000b)의 고산층, Yoon *et al.* (2001)의 성읍 표성쇄설퇴적물(Seongeup epiclastic sediments)이 이 탐라층에 포함된다.

화산지대에서는 고농도수류와 암설류 등에 의하여 방대한 양의 쇄설성 퇴적물이 하천에 의하여 운반 퇴적되는데, 이러한 퇴적물을 라하르라고 널리 불리어 져 왔다. Smith and Lowe (1991)는 라하르의 운반

과 퇴적작용을 (1) 저농도수류, (2) 고농도수류, (3) 암설류, (4) 암설사태로 구분하였다. 제주도의 라하르 퇴적물에는 이 4 종류의 퇴적물이 모두 분포하고 있는데, 이들 중 암설사태 퇴적물을 제외한 퇴적물을 총괄하여 탐라층으로 명명하였다. 이에 기초하여 탐라층의 퇴적상을 검토한다.

탐라층에서는 아직 화석이 발견 되지 않아 그 지질 시대를 정확히 알 수가 없으나, 탐라층의 하위의 용암과 상위의 용암의 연령을 사용하여 추정할 수 있다. 탐라층 하위에 있는 표선리현무암군의 방사성 동위원소(K-Ar) 연령이 0.63 ± 0.13 Ma(제주도 남동부 해안지역의 시료, Yun *et al.*, 1987), 0.60 ± 0.13 Ma(제주도 서부 해안지역의 시료, Yun *et al.*, 1987)이고, 탐라층 상위에 있는 백록담현무암용암의 방사성 동위원소(K-Ar) 연령이 0.47 ± 0.07 Ma (Tamanyu, 1990)이므로, 탐라층의 연령은 약 50~60만년 전후이고 지질시대는 플라이스토세 중기이다(Yoon *et al.*, 2014).

제주도에 분포하는 탐라층은 해안지대에서 한라산 정상부 까지 넓게 분포하고 있으며 지표지질에서 가장 넓은 면적을 차지하고 있다. 탐라층은 한라산체를 제외하고 대부분 농경지로 이용되고 있으며 구성암석의 종류에 따라 이용형태가 지역별로 다양하게 나타나고 있다. 제주도 지질주상도자료집(2012, 제주특별자치도 수자원본부)에 따르면 표선리현무암군은 제주도의 동부지역과 서부지역에 분포하고 있으며 한라산

체를 포함하는 중부지역에는 분포하고 있지 않은 것으로 나타났다. 이러한 사실은 제주도의 탐라층 분포에서 서로 다르게 나타난다. 동부지역과 서부지역의 탐라층은 두께가 수십 미터에 이르지만 표선리현무암군이 분포하지 않는 중부지역의 한라산체에서는 수백 미터의 두께를 갖고 있다(Yoon *et al.*, 2014).

탐라층 이질암의 구성광물 분석

제주도 탐라층의 이암, 사질이암, 역질이암 등의 이질암에 포함되는 광물성분에 대해 X-선분말회절법으로 분석하였다. 그 분석결과를 Table 1에 나타냈다. 야외 노두의 관찰 결과, 탐라층의 이질암에는 육안으로 쉽게 구분될 정도의 비교적 큰 석영입자들이 여러 곳에서 발견된다. 이 석영입자들은 원마도는 양호한 것에서부터 악각력의 형태를 띠는 것이 포함되며, 주로 입경이 1~3 cm에 해당되는 것들이 주로 눈에 띈다. 이들 중에 비교적 큰 석영입자들에 대해 박편을 제작하여 편광현미경으로 관찰한 결과, 석영의 입자들이 거의 등립질인 모자이크 형태의 조직을 나타냈다(Fig. 1). 석영입자들만으로 된 이러한 입상변정질 조직으로 보아 규암과 유사한 것으로 판단된다. 탐라층 이질암에서는 이러한 큰 석영결정 이외에 육안으로 식별될 만한 광물들은 거의 없으므로 X-선회절분석으로 광물성분을 분석하였다.

X-선회절분석의 결과, 탐라층의 이질암에는 석영, 사장석, 칼륨장석, 휘석, 적철석, 자철석, 운모, 감람석, 각섬석, 김사이트(gibbsite), 방해석, 아날сим(analcime),

점토광물, 비정질물질 등의 다양한 광물들이 산출되었다. Table 1에서 비정질이 많은 시료에서는 광물의 종류와 함량이 매우 적게 나타난다. 그리고 수중침강법에 의해 2 μm 이하의 점토분으로 분리하여 점토광물을 자세히 분석한 결과, 일라이트(ilite), 카올린나이트(kaolinite), 스메타이트(smectite), 베미큘라이트(vermiculite), 녹나석, 10 Å-할로이사이트(halloysite) 등의 점토광물들이 산출되었다. 이러한 주요 구성광물에 대해 광물종류별로 산출지역, 광물조합, 특성 등에 대해 설명한다.

석영

일부 시료를 제외하고는 대부분의 시료에서 석영이 두루 산출되었다. 시료에 따라 함량의 차이가 다양하게 나타났으나, 다른 광물에 비하여 비교적 많이 포함되고 있다. 구성광물의 정량분석은 어려우며 특히 비정질물질이 포함되는 경우는 더욱 부정확하기 때문에 분석결과를 제시하지 않았으나, X-선회절분석 결과로부터 SIROQUANT 3.0v를 이용하여 정량분석한 결과, 70% 이상의 시료에 약 20~65%의 석영 함량을 나타냈다. 이들 석영의 산출지점을 Fig. 2에 도시하여 나타냈다. 육안으로 판별될 정도로 큰 석영들은 중부지역의 3곳 정도에서 관찰되었다. 그리고 X-선회절분석의 결과, 대부분의 시료에서 다량의 석영이 산출되었으며 거의 모든 지역에서 나타난다. 그리고 고도별로는 해안지대에서 우세하게 중산간지대에서 보통으로 그리고 한라산체에서 소량 정도로 산출되는 특징을 나타냈다. 동부지역의 김녕리와 토산리, 중부지역의 노형동, 그리고 서부지역에서는 하모리, 신평리, 명월리, 고산리, 상대리 등의 많은 곳에서 우세하게 산출되었다. 석영이 포함되지 않는 시료들은 제주도의 중부지역에 주로 분포하며, 특히 중앙부인 한라산 지역에 나타난다. 이처럼 석영이 포함되지 않는 시료에는 대신에 사장석이 많이 함유되든지 아니면 비정질이 많은 경우가 주를 이룬다. 이러한 점으로 볼 때 현무암질이나 유리질의 화산성물질이 많이 포함되었기 때문으로 생각된다. 예를 들어 분석구와 응회구에서 재이동된 화산쇄설물로 이루어진 탐라층의 이질암에서는 석영이 산출되지 않았고, 반면에 장석과 비정질물질이 매우 우세하게 산출되었다. 제주도의 화산활동에 의해 분출된 현무암 및 조면암 등의 많은 화산암류들의 X-선회절분석 결과, 석영이 거의 포함되지 않으며 주로 장석을 다량 함유하고 있으며,

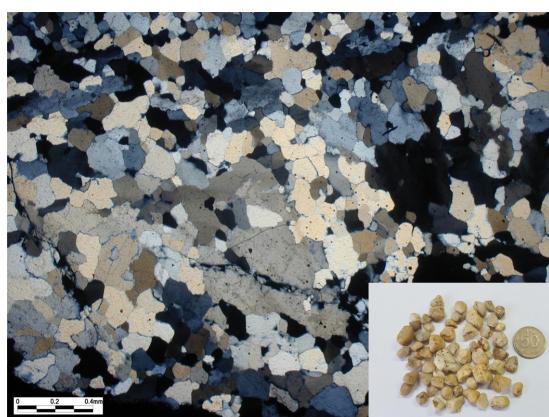


Fig. 1. Photomicrograph of a large quartz grain in the Tamna Formation.

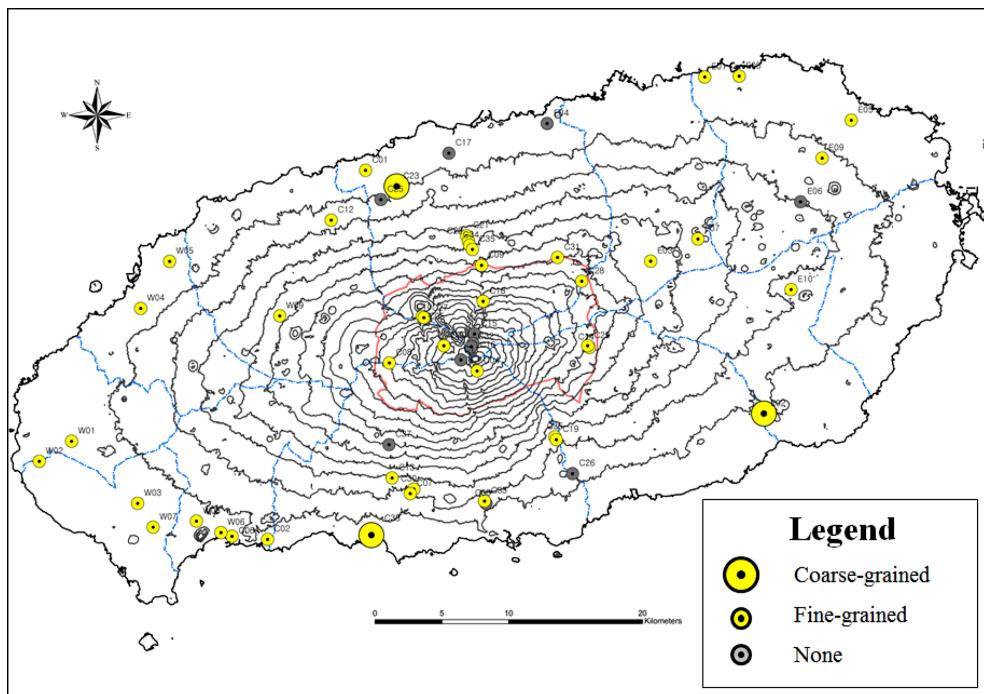


Fig. 2. Distribution map of the mineral assemblages in the Tamna Formation.

시료에 따라 감람석, 휘석, 각섬석 등이 소량 포함되어 나타났다.

장석

장석은 연구지역의 거의 대부분 지역에서 산출되었으며, 중부지역에서 우세하게 나타났으며 동부지역에서 보통으로 나타났고 서부지역에서 소량으로 나타났다. 고도별로는 해안지대에서 소량으로 나타났으며 중산간지대와 한라산체에서 우세하게 나타났고, 그리고 한라산체에서 소량 정도로 산출되는 특징을 나타냈다. 장석은 분석구가 밀집되어 있는 지역에서 우세하게 나타나는 경향을 보였으며 분석구가 분포하지 않은 서부지역에서는 소량으로 나타났다. 해안지대와 중산간지대에서는 사장석이 주를 이루었으며 조면암이 분포하고 있는 한라산에서는 칼륨장석이 산출되기도 하였다. 거의 모든 시료에서 장석으로 사장석과 칼륨장석이 혼합되어 나타났다. 대부분의 시료에서 사장석이 칼륨장석 보다 다소 많이 나타나는 경향을 보였다.

휘석, 감람석, 각섬석

휘석은 동부와 중부의 일부 시료에 포함되어 나타

났다. 감람석은 Mg-감람석인 포스테라이트(forsterite)에 해당되며, 동부의 송당리 시료와 서부의 화선리 시료의 두 곳에서 소량 포함되어 나타났다. 각섬석은 중부의 백록담 시료에서 소량 포함되며, 이 시료에는 석영은 포함되지 않았다. 고철질 화산암류에 많이 포함되는 휘석, 감람석, 각섬석 등이 적은 이유는 이들 광물들이 비교적 풍화작용에 약한 광물이기 때문에 침식과 풍화작용을 받아 퇴적된 이질암에서 많이 함유되기는 어려웠을 것으로 생각된다.

점토광물

점토광물로는 일라이트, 카올린나이트, 스메타이트, 베미큘라이트, 녹니석, 10 Å-할로이사이트 등이 산출되는 것이 확인되었다. 이를 점토광물이 산출하는 시료의 지점별로 보면 일라이트와 카올린나이트가 가장 흔하게 나타났다(Table 1). 반면에 드물게 10 Å-할로이사이트가 산출되었다. 각 점토광물에 대하여 X-선회절 특성과 산출상태 등을 아래에 설명한다.

일라이트: 일라이트는 10 Å의 회절선을 나타내며, 에칠렌글리콜 처리와 550°C의 1시간 가열처리에서도 거의 변화를 보이지 않는 것으로 식별하였다. 일라이

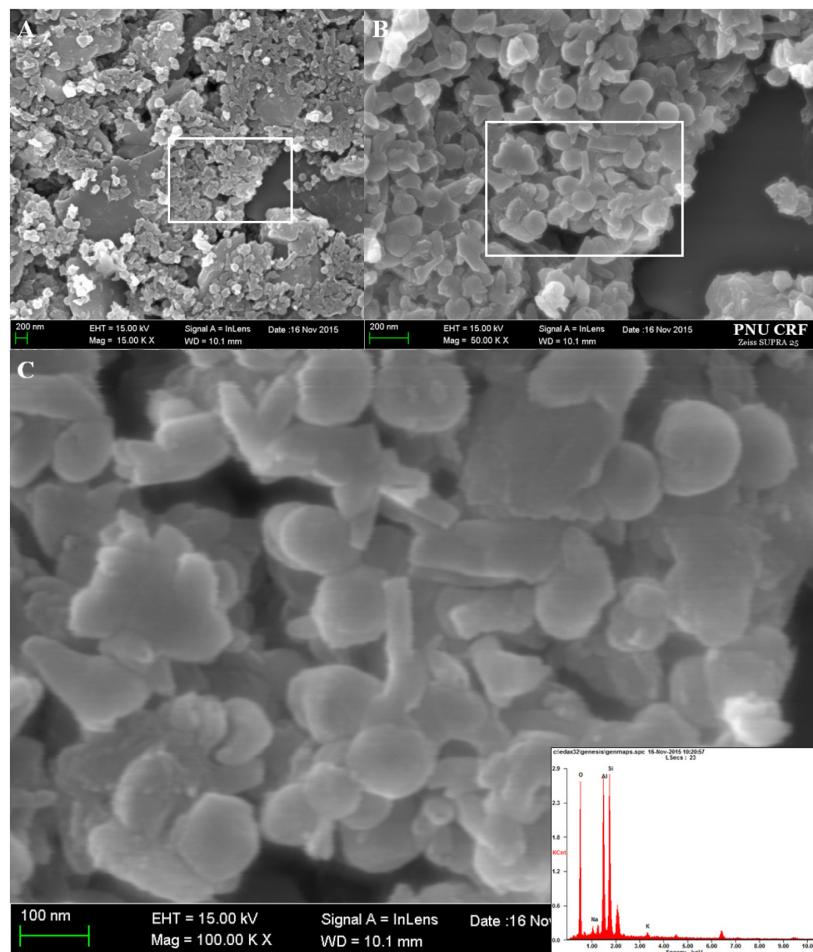


Fig. 3. SEM images showing the spherical shape of 10 Å-halloysite and EDS analysis. (A) x15,000, (B) x50,000, (C)x100,000.

트는 연구지역의 가장 많은 지점에서 산출되었으며, 중부지역의 서홍동과 용진각, 선돌 등에서 우세하게 나타났다. 일라이트는 중부지역의 한라산체에서 우세하게 나타났으며 동부와 서부지역은 보통 정도로 포함되었다. 일라이트는 퇴적작용, 열수변질, 풍화작용 등으로 형성되어 흔히 산출하는 점토광물이기 때문에 전지역에 고루 분포되었으며, 한라산체에 많이 분포하는 것은 열수변질의 영향인 것으로 생각된다.

카올린나이트: 카올린나이트는 7 Å의 회절선을 나타내며 에칠판글리콜 처리시 거의 변화를 보이지 않지만, 550°C로 가열하면 결정구조의 파괴로 7 Å의 회절선이 소멸하는 것으로 식별했다. 카올린나이트는 서부지역의 고산리, 신평리, 명월리, 하모리 지역의 여

러 곳에서 다양 포함되었으며, 동부지역의 토산리에서 다소 우세하게 나타났다. 그러나 중부지역의 어리목, 템라계곡, 한천 등에서는 소량으로 포함된다. 즉, 서부지역은 대체로 우세하며 중부지역의 한라산체는 소량으로 나타나는 특징을 보였다.

녹니석: 녹니석은 14 Å의 회절선을 나타내고, 에칠판글리콜 처리에 변화가 없으며, 550°C로 가열하해도 14Å 회절선이 남아있는 것으로 식별했다. 연구지역의 14개 지점에서 산출되었으며, 서부지역의 덕수리, 명월리 등과 중부지역의 노형동, 항파두리에서 보통 정도로 나타났으며 나머지 지역에서는 소량으로 나타났다. 녹니석은 석영이 우세하거나 보통인 지역에서 산출된다.

버미큘라이트: 버미큘라이트는 14 Å의 회절선을 나타내며, 550°C의 1시간 가열처리에서는 조금 수축하여 11 Å~12 Å의 회절선을 나타내는 것으로 식별했다. 버미큘라이트는 연구지역의 8개 지점에서 산출되었으며, 서부지역의 고산리와 하모리 등에서 우세하게 나타났으며, 중부지역의 탐라계곡 등에서 소량 나타났다. 버미큘라이트는 내륙의 풍화잔류토(Hwang *et al.*, 2000)에 주로 나타나는 것과 같이 암석의 풍화작용에 의해 주로 형성된다.

스메타이트: 스메타이트는 주로 15 Å의 저면간격을 갖고 있으며, 에칠렌글리콜 처리시 약 17 Å으로 이동하며, 550°C로 가열처리에서 10 Å으로 수축하였다. 스메타이트는 서부지역의 화순리에서 다소 우세하였고, 중부 및 동부지역에서도 일부 산출하였다. 스메타이트는 알칼리성이 높은 환경의 열수변질작용이나 풍화작용으로 생성될 수 있다.

10 Å-할로이사이트: 10 Å-할로이사이트는 무처리에 10 Å의 회절선을 나타내고, 에칠렌글리콜 처리시 11 Å으로 약간 이동하였고, 550°C로 가열처리에서 회절선이 소멸되었다. 할로이사이트는 카울린군 광물로서 결정구조 및 화학식은 카울린나이트와 유사하나 층간에 물 분자가 존재하는 것이 다르다. 이 시료를 전자현미경(SEM/EDX)으로 관찰한 결과, Fig. 5와 같이 미세한 구상의 형태를 나타내었다. 직경 약 70-150 nm에 해당되는 미세한 구상체로 주로 구성되어 있다. 이러한 구상의 할로이사이트는 Sudo and Shimoda (1978)에 의하면 주로 화산유리물질의 풍화작용에 형성되는 것으로 알려져 있다. 이곳에서도 같은 작용에 의한 것으로 생각된다.

기타 광물

이상에서 설명한 광물 이외에도 적철석과 자철석과 같은 산화철광물은 여러 시료에서 소량으로 포함되었다. 이들은 동부지역과 중부지역의 여러 시료에서 함유되어 나타났으나 서부지역 시료에서는 잘 나타나지 않는다. 그리고 텁사이트, 명반석, 방해석, 시드라이트, 아날실(alcime) 등의 광물들도 일부 시료에서 소량 포함되고 있다. 텁사이트는 풍화작용, 명반석은 열수작용, 방해석과 시드라이트는 속성작용이나 열수작용에 의해 형성될 수 있는 것으로 사료된다. 텁사이트와 명반석은 중부지역 일부에서만 나타났다.

서부지역 해안지대에 위치한 화순리(W06)에서 제올라이트(zeolite) 광물에 속하는 아날실이 산출되었다.

이 시료에는 장석이 거의 포함되지 않으며, 팽윤성 점토광물인 스메타이트가 다량 포함되고 있다. 또한 이 시료에는 소량의 휘석, 감람석, 방해석, 시드라이트, 크리스토발라이트 등의 여러 광물들이 포함된다.

광물조합과 분포특성

주 구성광물의 조합

이번 연구에서 도출된 X-선회절분석 결과를 통하여 시료별 구성광물의 광물조합을 검토하였다. 전암시료의 분석에 따른 주 구성광물 조합과, 시료를 점토입자로 분리 후 분석한 점토광물 조합으로 나누어 검토하였다. 아래와 같이, 이들의 각 광물조합의 종류를 구분하고, 그 분포상태와 산출특성 등에 대해 알아보았다.

연구지역의 모든 전암시료에서 산출되는 주 구성광물의 조합을 검토해 본 결과, Table 2와 같이 크게 5개의 조합으로 구분되었다. 이들의 대표적인 X-선회

Table 2. The types of mineral assemblages in the Tamna Formation.

Type	Mineral assemblages
A-Type	Quartz > Clay Mineral > Feldspar
B-Type	Amorphous > Quartz, Feldspar
C-Type	Feldspar > Quartz
D-Type	Feldspar > Amorphous
E-Type	Clay Mineral > others

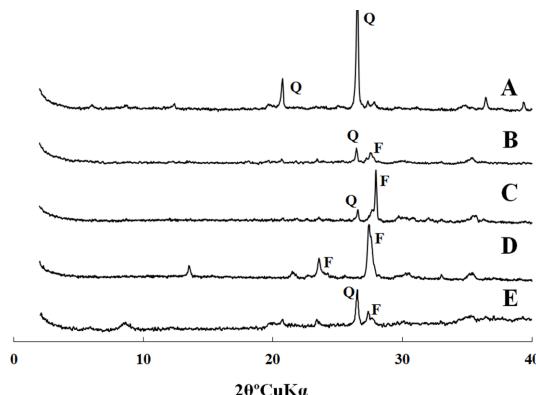


Fig. 4. XRD patterns of the representative mineral assemblages. (A) Quartz rich mineral assemblage, (B) Amorphous material rich mineral assemblage, (C) Mineral assemblages having a small quantity of quartz, (D) Feldspar rich mineral assemblage, (E) Other mineral assemblage.

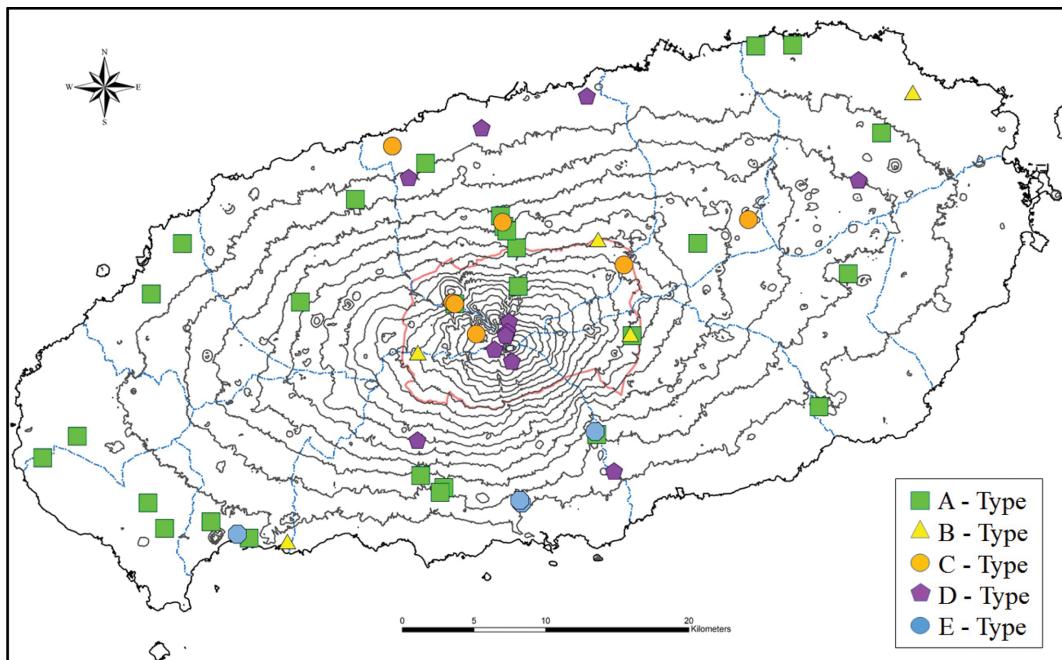


Fig. 5. Distribution map of the mineral assemblages in the Tamna Formation.

질폐단을 Fig. 4에 나타냈다. 이들의 각 광물조합에 대한 분포상태를 Fig. 5에 나타냈다. 이러한 광물조합별 구성광물과 산출특성 등에 대해 알아본다.

A조합은 석영이 다량으로 포함되며, 그 다음으로 점토광물이 많고 장석이 소량 포함되는 광물조합이다. B조합은 비정질물질이 우세하고 석영과 장석이 소량 포함되는 광물조합이다. C조합은 석영이 소량이며 석영에 비해 장석을 다량 함유하는 광물조합이다. D조합은 장석을 주로 구성하며 비정질물질도 포함되는 광물조합이다. E조합은 기타조합으로 점토광물이 아주 우세하거나 아날심 등의 특정광물이 포함되는 광물조합이다. 분석한 시료 중에서는 A조합이 가장 많이 나타났다. 이것으로 보아 탐라층의 이질암에는 석영을 다량 함유하는 광물조합이 주를 이루고 있는 것으로 보아도 좋을 것으로 생각된다. A조합은 중부, 동부, 서부의 모든 지역에서 거의 고루 분포하고 있으나, 서부의 시료에서는 거의 모두 A조합으로 나타난다. 즉 서부지역에서는 광물조합의 종류로 볼 때 다른 지역에 비해 A조합이 월등히 많이 분포한다. 석영이 적거나 없고, 반면에 비정질과 장석을 다량 함유하는 B, C, D의 조합들은 중부지역에 주로 분포하며, 일부는 동부지역에 나타나고 있다. 이러한 광물조

합은 전술한 바와 같이 현무암질 화산성 물질의 유입에 의한 것으로 생각된다. 이러한 조합이 중부와 동부에 많은 것도 전술한 지질층서와도 잘 일치하고 있는 것으로 생각된다. E조합은 점토광물인 10 \AA -할로이사이트가 포함되는 시료와 제올라이트인 아날심을 포함하는 광물조합으로 나타난다. E조합은 중부의 일부 지역에 분포한다. 이상과 같이 구분된 5개의 광물조합들은 지역과 지질조건에 따라 대체로 특징적인 분포를 나타내는 것으로 생각된다.

점토광물의 조합

연구지역의 시료에서 산출되는 점토광물의 조합을 검토해 본 결과, Table 3과 같이 크게 8개의 조합으로 구분되었다. 또한 이들의 각 광물조합에 대한 분포상태를 Fig. 6에 나타냈다. 이러한 광물조합별 구성광물과 산출특성 등에 대해 알아본다.

A조합은 일라이트를 주로 하는 조합이며, 주로 중부지역에 분포한다. B조합은 일라이트와 함께 카올린나이트를 소량 포함하는 조합이며, 이것도 중부지역에 분포한다. C조합은 일라이트와 함께 스메타이트를 소량 포함하는 조합이며, 이것은 동부의 1개 지점에서만 나타난다. D조합은 다량의 카올린나이트 함께

Table 3. The types of clay mineral assemblages in the Tamna Formation.

Type	Clay mineral assemblages
A-Type	Illite
B-Type	Illite > Kaolinite
C-Type	Illite > Smectite
D-Type	Kaolinite > Illite, Vermiculite
E-Type	Kaolinite > Illite, Chlorite
F-Type	Smectite > Illite, Kaolinite
G-Type	10 Å-Halloysite
H-Type	Amorphous material

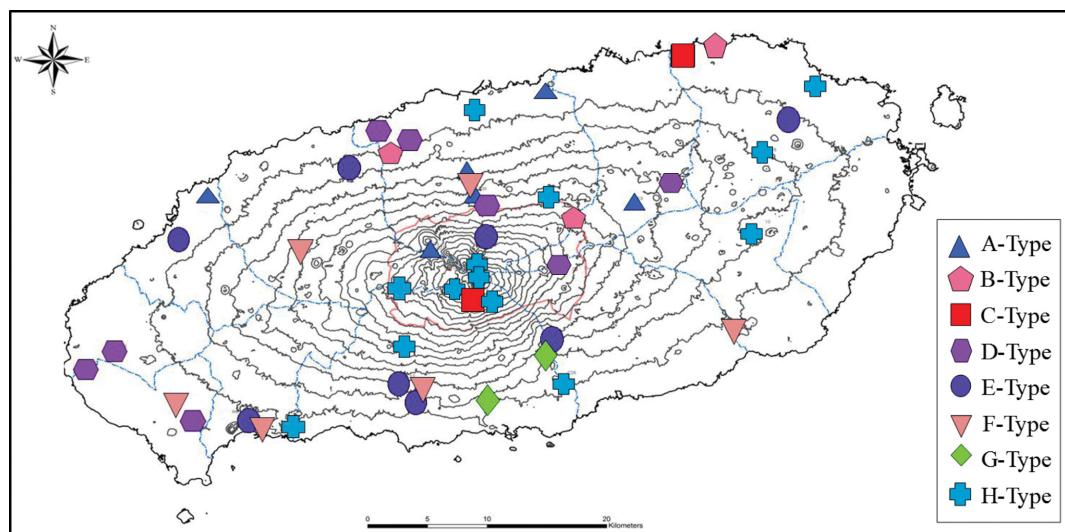
일라이트와 베미큘라이트를 소량 수반하는 조합이며, 대부분 서부지역에 분포하며 일부 중부지역에도 나타난다. E조합은 다량의 카올린나이트 함께 일라이트와 녹니석을 소량 수반하는 조합이며, 여러 지역에서 나타나지만 중부와 서부지역에서 다소 많이 분포한다. F조합은 스벡타이트 함께 일라이트와 카올린나이트를 소량 수반하는 조합이며, 여러 지역에서 나타나지만 중부와 서부지역에 대체로 많이 분포한다. G조합은 10 Å-할로이사이트를 포함하는 것으로 중남부 지역의 일부 지점에서만 나타난다. H조합은 X-선회절선이 거의 평탄하며 특징적인 점토광물의 회절선이 나타나지 않는 조합으로 주로 비정질물질인 것으로 생각된다. 이들 광물조합은 주로 중부와 동부지역에서 나타난다.

이상과 같은 결과로 볼 때, 전술한 전암시료의 광물조합과 유사하게 지역별로 분포특성을 나타내는 것

으로 보인다. 특히 카올린나이트와 베미큘라이트가 다량 포함되는 점토광물의 조합은 서부지역의 고산리 일대에서 특징적으로 많이 분포하고 있다.

주요 구성광물들의 함량과 상관관계

전술한 바와 같이 X-선회절의 정량분석에는 정화성에 대해 다소 문제가 많은 것으로 알려지고 있다. 따라서 석영과 점토광물의 함량에 대한 상호 관계를 검토하고자 그 광물들의 대표적 회절선의 강도를 측정하여 Fig. 7에 나타냈다. 회절선의 강도는 그 광물의 함량에 거의 비례하는 것으로 알려져 있기 때문이다. 그럼에도 석영의 가장 큰 회절선 강도와 점토광물에 해당되는 14 Å, 10 Å, 7 Å의 각 회절선 강도에 대한 상관도를 각각 나타내고, 대표적인 5개의 광물조합을 구분하여 표시하였다(Fig. 7). 그림에서 보면, 석영을 다량 함유하는 A 광물조합이 역시 석영의 회절선강도가 높은 곳에 표시되며, 시료의 수도 가장 많은 것으로 나타난다. 14 Å 회절선의 강도와 석영의 강도와의 관계를 보면, 석영의 강도가 작은 곳에서는 14 Å 회절선 강도가 작게 나타나고, 석영의 강도가 높은 곳에서는 14 Å 회절선 강도가 다소 크게 나타나는 경향을 가진다. 이것으로 보아 석영이 많은 곳에서는 14 Å 회절선에 관계하는 베미큘라이트와 녹니석의 함량도 높은 것으로 볼 수 있다. 반면에 석영이 적은 곳에서는 베미큘라이트와 녹니석의 함량도 적은 것으로 볼 수 있다. 10 Å 회절선의 강도와 석

**Fig. 6.** Distribution map of the clay mineral assemblages in the Tamna Formation.

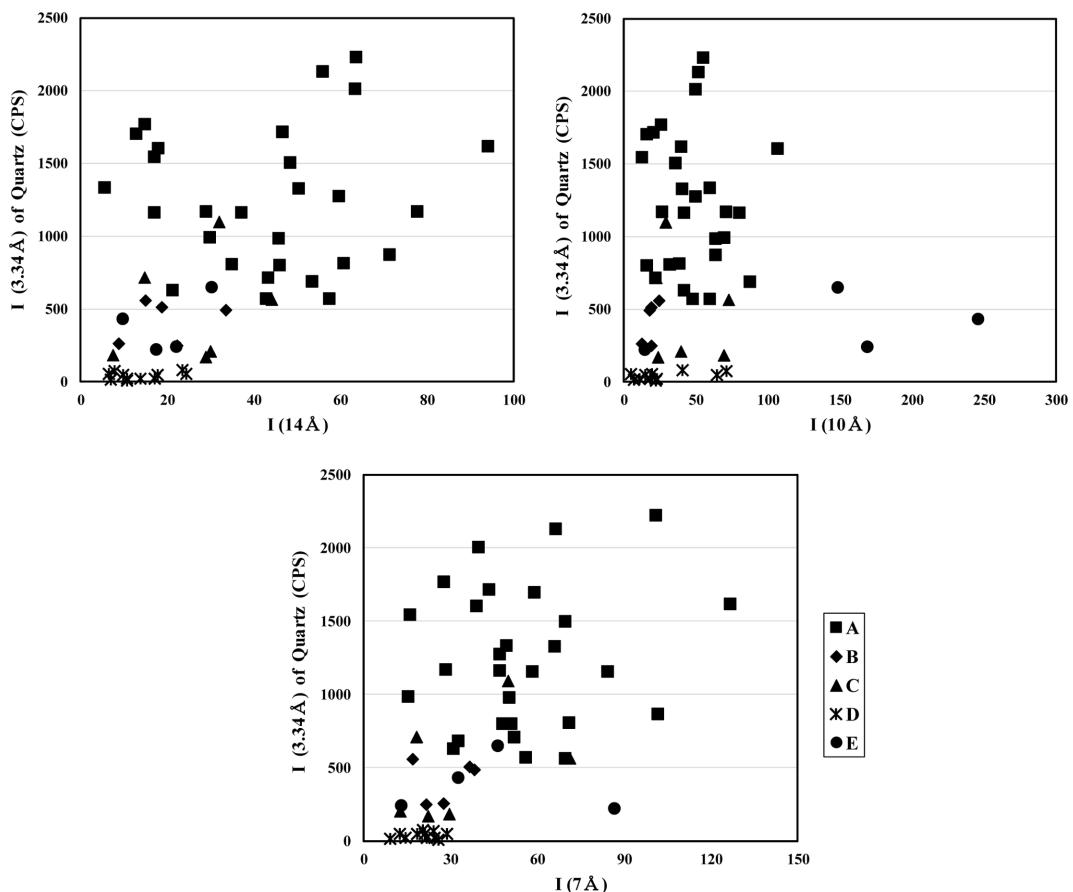


Fig. 7. Relationship between the XRD intensity of quartz and intensity of 14 Å, 10 Å and 7 Å of clay minerals. (A) quartz rich mineral assemblages, (B) amorphous material rich mineral assemblages, (C) mineral assemblages having a small quantity of quartz, (D) feldspar rich mineral assemblages, (E) other mineral assemblages.

영의 강도와의 관계를 보면, 점토광물이 특히 많은 E 광물조합을 제외하면, 석영의 강도에 상관없이 10 Å 회절선의 강도는 거의 일정한 것으로 나타났다. 이것으로 보면 10 Å 회절선에 해당되는 광물로는 일라이트가 주를 이루고 있으나, 일부 시료는 10 Å-할로이사이트에 해당되는 것으로 생각된다. 즉 10 Å 회절선 강도가 매우 큰 시료는 E 광물조합에 해당되며, 이것은 전술한 바와 같이 10 Å-할로이사이트에 해당된다. 이러한 할로이사이트 시료를 제외하면 일라이트의 함량은 석영의 함량과 거의 관계없이 거의 유사한 것으로 볼 수 있다. 즉 일라이트는 큰 차이 없이 두루 산출되는 것으로 보인다. 7 Å 회절선의 강도와 석영의 강도와의 관계를 보면, 석영의 강도가 작은 곳에서는 7 Å 회절선 강도가 작게 나타나고, 석영의 강도가 높은 곳에서는 7 Å 회절선 강도가 다소 크게 나

타나는 경향을 가진다. 이것으로 보아 석영이 많은 곳에서는 7 Å 회절선에 관계하는 카올린나이트의 함량도 높은 것으로 볼 수 있다. 반면에 석영이 적은 곳에서는 카올린나이트의 함량도 적은 것으로 볼 수 있다. 전체적으로 보면, 석영이 많은 곳일수록 카올린나이트, 베미큘라이트, 녹나석의 함량이 많아지는 경향이 나타났다. 이 그림에서 지역을 구분하여 검토해 보면, 전술한 바와 같이 서부지역에서 석영이 많고 베미큘라이트와 카올린나이트도 많이 포함되는 것으로 나타났다.

템라총 구성광물의 기원

템라총에서는 육안으로 잘 구분되는 비교적 큰 석영입자와 함께, 이질암의 X-선회절분석을 통하여 대

부분의 시료에서 다량의 석영이 함유되는 것으로 나타났다. 탐라층의 기원 퇴적물로서는 그 이전에 형성된 중생대 화강암과 옥천대 변성암과 같은 제주도 하부의 기반암(Ahn *et al.*, 1995; Kim *et al.*, 2002)과, 해성 화산퇴적물인 서귀포층, 표선리현무암 등의 화산암류 중에서 찾을 수 있다. 화산활동에 의해 분출된 현무암 및 조면암 등의 화산암류에서는 석영이 거의 포함되지 않기 때문에 화산암류가 아닌 그 이전의 다른 기반암을 생각할 수 있다. 현재 시추로서 확인되는 제주도의 기반암인 화강암과 변성암은 심부에 있기 때문에 탐라층의 직접적인 기원암체로 보기 어렵다. 따라서 이들 기반암과 같은 시대의 암석들이 탐라층이 퇴적될 당시에 제주도에 가까운 인접부에 배후지 산지로 존재했을 가능성이 큰 것으로 생각된다. 물론 지하 깊은 곳의 암석이 화산에 의해 암편으로 일부 분출 될 수 있으나, 전술한 바와 같이 조립의 석영과 많은 석영 함량이 광범위하게 산출되는 것을 설명하기는 어렵기 때문이다.

X-선회절분석의 결과, 탐라층 이질암에서는 석영, 사장석, 칼륨장석, 운모, 일라이트, 카올린광물, 베미큘라이트, 스멕타이트, 녹니석, 자철석, 적철석 등의 다양한 광물이 나타났다. 이들 구성광물의 조합으로는 5가지로 크게 구분되었으며 그 분포도 검토하였다. A 조합은 석영이 다량 포함하는 것으로 거의 모든 지역에서 분포하지만 서부지역에 다소 많이 나타났다. B 조합은 비정질물질이 많고 석영과 장석이 다소 포함되는 것이며, C조합은 석영이 소량인 반면에 장석이 많아지며, D조합은 석영이 없고 주로 장석으로 구성된다. 이렇게 장석과 비정질물질이 많은 시료일수록 화산성물질이 다량 포함되는 것으로 생각되며, 이러한 시료들은 화산활동이 활발했던 중부와 동부지역에서 다소 많이 분포한다.

점토광물의 광물조합을 검토한 결과, 여러 종류로 구분되었으며 그 분포도 지역적으로 다소 다르게 나타났다. 일라이트는 전역에 걸쳐 두루 산출되었으며, 석영의 함량이 많은 곳에서는 카올린광물, 베미큘라이트, 녹니석의 함량이 다소 높은 것으로 나타났다. 동부지역에 비해 서부지역에서 카올린광물과 베미큘라이트가 다소 높게 나타났다. 이와 같이 지역에 따라 다소 다른 분포특성을 나타냈다. 이것은 전술한 바와 같이 배후지 퇴적물의 성분 차이와 그 후 화산분출물의 유입 등에 기인하는 것으로 생각된다. 고기의 암석들이 많은 풍화작용을 받아서 장석, 운모, 각

섬석 등의 초기광물들이 거의 모두 풍화되어 카올린광물, 베미큘라이트, 일라이트 등의 점토광물로 변하였고, 풍화작용에 강한 석영이 남아서 현재의 광물조합을 만든 것으로 생각된다. 서부지역에서 석영과 함께 카올린광물과 베미큘라이트가 다소 높게 나타나는데, 이러한 구성광물은 한반도내륙에 나타나는 풍화잔류토인 소위 황토라고 하는 것(Hwang *et al.*, 2000)과 유사하다. 서부지역은 제주도에서 논경작지가 많은 편인데, 그 이유가 이러한 토양과 관련될 수도 있을 것으로 보인다.

또한 일부시료에서 아날심, 김사이트, 명반석, 10 Å-할로이사이트 등의 광물들도 발견되었다. 불석광물인 아날심은 알칼리가 풍부한 열수변질작용이나 매몰속성작용에 의해 주로 형성되는 것으로 알려져 있다(Sand and Mumpton, 1978). 탐라층의 매몰심도는 깊지 않기 때문에 이곳의 아날심은 화산의 열수에 의해 형성된 것으로 보인다. 명반석은 산성의 열수작용에 의한 것으로 볼 수 있다. 그리고 전술한 바와 같이 풍화작용에 의해 10 Å-할로이사이트, 카올린나이트, 베미큘라이트, 김사이트 등이 생성된 것으로 볼 수 있다. 이러한 다양한 광물들의 산출로 볼 때, 탐라층을 형성하는 고기 근원암의 퇴적물인 근원물질의 종류와 함량과, 그리고 퇴적과정에서 유입된 화산분출물의 성분과, 그 후 속성작용을 거치고 열수변질작용과 풍화작용을 받아 현재의 다양한 구성광물들이 형성된 것으로 사료된다.

결 언

제주도의 전 지역에 걸쳐 넓게 분포하고 있는 하성쇄설성 퇴적층인 탐라층의 이질암에 대한 구성광물을 분석하고 그 결과를 검토한 내용은 다음과 같이 간추려진다.

1) 탐라층에서는 직경 약 1-3 cm의 비교적 큰 석영입자들이 발견되었으며, 또한 탐라층 이질암의 부분에서도 다량의 세립질 석영이 포함되고 있음을 X-선회절분석에 의해 확인되었다. 또한 대부분의 시료에서 석영이 검출되는 것으로 보아 탐라층의 근원암은 석영을 다량 함유한 암석인 것으로 추정된다.

2) 탐라층 이질암에서는 석영과 함께, 사장석, 칼륨장석, 운모, 자철석, 적철석, 감람석, 휘석, 김사이트, 방해석, 아날심, 그리고 점토광물로서 일라이트, 카올린나이트, 베미큘라이트, 스멕타이트, 녹니석, 10 Å-할

로이사이트 등의 다양한 광물들이 포함되었다. 이들의 광물조합을 구분하고 이들의 분포상태도 제시하였다.

3) 제주도의 서부지역에서 석영의 함량이 많고, 카올린나이트와 베미큘라이트가 다소 높게 나타났다. 석영이 많은 곳일수록 카올린나이트, 베미큘라이트, 녹니석의 함량이 많아지는 경향이 나타났다. 석영이 거의 없고 대신에 장석과 비정질물질을 다량 함유하는 조합들은 중부지역에 일부 분포하며, 이는 화산성물질이 주로 유입된 것으로 생각된다.

4) 탐라층은 석영을 다량 함유하는 기반암과 함께 제주도 화산암류의 물질들이 첨가되어 탐라층이 퇴적되고 난 후, 현재까지의 속성작용, 열수작용, 풍화작용 등의 변질정도에 따라 다양한 구성광물들이 형성된 것으로 사료된다.

5) 이번에 제시된 탐라층의 구성광물에 대한 분석 결과는 탐라층의 특성 규명과 함께, 근원암을 파악하는데 기초자료로 활용될 것으로 기대한다.

사 사

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음을 밝힙니다. 연구과정에서 많은 자문을 해주신 부산대학교 명예교수 윤선 교수님께 감사 드립니다. 바쁘신 중에도 세심히 심사해 주신 두 심사위원님들께 감사 드립니다.

References

- Agriculture Development Corporation (ADC), 1971, Report of the Ground water Resources, Jeju Island. 381 p, 1 map (1:100,000), 4 plates (in Korean, title translated).
- 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).
- Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E.M., Sohn, Y.K. and Maas, R., 2012, Spatio-temporal evolution of a dispersed magmatic system and its implications for volcanic growth, Jeju Island Volcanic Field, Korea. Lithos, 148, 337-352.
- Haraguchi, K., 1931, Saishu Volcano. Bulletin of the Geological Survey of Chosen (Korea), 10, 1-34, 10 pls. (in Japanese); 1-12, 1 pl. (in English).
- Hyun, W.H., Hwang, J.Y. and Yoon, S., 2005, On the occurrence of the fragments of quartz vein in the Tamna Formation, Jeju Island and their source area. Annual Conference of the Geological Society of Korea, (Abstracts), Jinju, October 28-29, 68 p (in Korean, title translated).
- Hwang, J.Y., Jang, M.I., Kim, J.S., Cho, W.M., Ahn, B.S. and Kang, S.W., 2000, Mineralogy and chemical composition of the residual soils (Hwangto) from south Korea. Journal of the Mineralogical Society of Korea, 13, 147-163 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H., Tanaka, T., Suzuki, K., Nagao, K. and Park, E.J., 2002, Evidences of the presence of old continental basement in Cheju Volcanic Island, South Korea. Geochemical Journal, 36, 421-441.
- Koh, G.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).
- Park, K.H., Cho, D.L. and Kim, J.C., 2000a, Geologic Report of the Moseulpo-Hanlim sheet (1:50,000), Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 56 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, K.Y., Choi, P.Y., Cho, B.W. and Kim, Y.B., 1998, Geologic report of the Cheju-Aewol sheet (1:50,000). Cheju Provincial Government, 237 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Lee, B.J., Cho, D.L., Kim, J.C., Lee, S.R., Kim, Y.B., Lee, H.Y., Cho, B.W., Jang, Y.N., Son, B.K., Cheon, H.Y. and Kim, Y.U., 2000b, Geologic Report of the Seogwipo-Hahyori sheet (1:50,000). Jeju Provincial Government, 139 p (in Korean with English abstract).
- Sand, L.B. and Mumpton, F.A., 1978, Natural zeolites; occurrence, properties, uses. Pergamon press, 135-197.
- Smith, G.A. and Lowe, D.R., 1991, Lahars: Volcano-hydrologic events and deposition in the debris flow-hyperconcentrated flow continuum. In Fisher, R.V. and Smith, G.A. (eds.), Sedimentation in Volcanic Settings. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication 45, 59-70.
- Sudo, T. and Shimoda, S., 1978, Clays and clay minerals of Japan. Development of sedimentology, Vol. 26, Elsevier science publishing company, 189-219.
- Tamanyu, S., 1990, The K-Ar ages and their stratigraphic interpretation of the Cheju Volcanics, Korea. Bulletin of the Geological Survey of Japan, 41, 527-537 (in Japanese with English abstract).
- Won, J.K., Lee, M.W., Lee, D.Y. and Sohn, Y.K., 1993, Geologic report of the Seongsan sheet (1:50,000). Ministry of Construction, Jeju Provincial Government and Korea Water Resources Corporation, 104 p (in Korean).
- Won, J.K., Lee, M.W., Lee, D.Y. and Yun, S.H., 1995, Geologic report of the Pyoseon sheet (1:50,000). Ministry of Construction and Transportation and Korea Water Resources Corporation, 59 p (in Korean).

- Yoon, S., Jung, C.J., Hyun, W.H. and Song, S.T., 2014, Tectonic history of Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea. v. 50, no. 4, p. 457-474.
- Yoon, S., Jung, C.J., Song, S.T. and Yang, K.H., 2001, Volcanic debris-avalanche and epiclastic deposits in the Seongeup area, Jeju Island, Korea. Geosciences Journal, 5, 47-55.
- Yoon, S., Jung, C.J., Song, S.T. and Hyun, W.H., 2002, Mt. Halla, the main body of Jeju Island, Korea: an uplifted edifice. Proceedings of International Symposium on New Concepts in Global Tectonics (NCGT), La Junta, Colorado, 165-170.
- Yoon, S., Koh, G. and Kim, I.T., 1995, Development history of Cheju Island. Bulletin of Cheju-do Provincial Government, 98, 148-164 (in Korean, title translated).
- Yun, S.G., Han, D.S. and Lee, D.Y., 1987, Quaternary geology in the southern part of Jeju Island. Research Report KR-86-2-(B)-2, Korea Institute of Energy and Resources, 64 p (in Korean with English summary).

Received October 28, 2016

Review started November 26, 2016

Accepted December 21, 2016