

한반도 남동부 어일분지의 마이오세 화산암의 암석기재적 연구

이정현 · 윤성호 · 고정선*

부산대학교 지구과학교육과

Petrography of the Miocene Volcanic Rocks of the Eoil Basin, Southeastern Part of Korean Peninsula

Joung Hyun Lee, Sung Hyo Yun and Jeong Seon Koh*

Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

요약: 한반도 남동부에서 어일분지내의 마이오세 화산암류는 성분상 규장질(67.2~70.5wt.% SiO₂)과 염기성(49.3~55.2wt.% SiO₂)으로 구성되는 쌍모식 조성을 나타낸다. 이 분지에서의 쌍모식 화산작용은 분지 발달과 정과 밀접하게 연관되어 있으며, 화산암류는 분지내의 두터운 퇴적암층내에 협재되어 있으며, 특징적으로 반정 광물조합의 비평형을 나타낸다. 현무암질 용암에서는 용식된 석영 반정과 공존하는 감람석과 사방회석 반정이 산출되고, 데사이트-유문암질 용결회류용회암에서는 사방회석과 단사회석이 반정으로 출현한다. 구성 광물상의 불균형으로부터 어일분지에서 일어난 쌍모식 화산활동에서 서로 다른 성분의 마그마 혼합이 크게 작용하였음을 시사해준다.

주요어: 마이오세, 현무암, 규장질 회류용회암, 마그마 혼합, 반정 비평형

Abstract: The Miocene volcanic rocks in the Eoil Basin, which is one of the pull-apart basins in the southeastern Korean Peninsula, are bimodal in composition: felsic (67.2~70.5wt.% SiO₂) and mafic (49.3~55.2wt.% SiO₂). The bimodal volcanic activities in the basin appear to be closely associated with the basin development. The volcanic rocks are intercalated with thick piles of sedimentary sequence. They show evidence of magma mixing, which has produced mafic and felsic volcanic rocks. We are able to identify the petrographic characteristics (disequilibrium phenocryst assemblages) of the volcanic rocks that were mixed. In basaltic lava, phenocrysts of olivine and orthopyroxene coexist with corroded quartz phenocryst. Dacitic to rhyolitic welded ash-flow tuff contains phenocrysts of clinopyroxene and orthopyroxene. It suggests that phenocryst disequilibrium have been affected and mixed by magmas, which have different compositions.

Key words: Miocene, basalt, felsic ash-flow tuff, magma mixing, phenocryst disequilibrium.

서 론

신생대 에오세(54 Ma)에서 마이오세 말(4.6 Ma)까지 한반도에서는 제한된 여러 지역에서 간헐적인 화산활동이 있었다. 에오세에는 주로 규질의 화산암질암이 분출하였고, 그 이후에는 주로 소량의 규질 화산암을 수반한 염기성~중성 화산암의 분출활동이 있었다. 특히 이 시기는 유라시아판으로 섭입하던 태평양판의 섭입 형태가 자주 변하였으며, 환동해(環東海) 지역에서 화

산활동이 자주 일어났다. 이들 화산활동은 동해안을 따라 경상북도 영일군 일대의 포항, 장기와 어일, 울산광역시 하서, 정자 등지에서 있었으며, 마이오세 중기(약 25~15 Ma)에 가장 활발하였다. 이 시기는 동해의 열림이 있었으며, 소규모로 지각이 확장되고 침강되면서 화산활동과 함께 퇴적분지들이 형성되었다.

이들 마이오세의 분지들을 총칭하고 있는 암석들을 Tateiwa(1924)는 장기통과 연일통으로 구분하였다. 장기통은 전기 마이오세의 것으로 대부분 현무암과 데사

*Corresponding author: jskoh812@pusan.ac.kr

이트질 화산쇄설물 및 용암류로 구성되어 있고, 하성 및 호성 퇴적물을 포함하며, 포항분지를 제외한 그 남쪽의 분지들을 주로 충전하고 있다. 연일통은 장기통을 부정합적으로 피복하며 중기 마이오세의 것으로 화산물질을 전혀 함유하지 않은 해성 퇴적물로 구성되어 있으며, 양남분지(Yoon, 1986; 어일분지와 울산분지를 합쳐서 양남분지라 지칭함)의 일부를 제외하고는 대부분 포항분지를 충전하고 있다. 이는 포항분지가 확장되기 이전에 그 남쪽에서는 이미 지각이 활발히 신장되는 사건이 발생하였으며, 이와 함께 화산활동이 빈번하였음을 시사한다.

이들 제3기 분지에 대한 지질조사는 Tateiwa(1924)에 의해 연일, 구룡포, 조양 도폭의 조사가 이루어진 후, 한국동력자원연구소에서 최위찬 외(1988)에 의해 어일 도폭이 발견되었고, 김봉균(1970), 김봉균 외(1975), 김봉균과 윤선(1978), 장기홍(1985), Lee(1975, 1976)는 퇴적환경 규명을 위한 층서 및 고생물학적 연구를 수행하였으며, 김봉균(1964), 진명식 외(1988), 김인수와 강희철(1989), 이현구 외(1992), 김광호와 도성재(1994), 민경덕 외(1994), 손문과 김인수(1996)는 화산암에 대한 절대연령 측정과 고자기학적 연구를 통해 화산활동의 시기에 대한 자료를 제공하였다. 또한 박선애(1993), 이문원 외(1986, 1988), Kim *et al.*(1986), 박주희 외(1999), 윤성효 외(1994), Shimazu *et al.*(1990)은 중성-염기성 암석에 대한 암석화학적 연구 및 Rb-Sr 동위원소에 관한 연구를 통해 한반도를 포함한 일본 열도 주변의 지체구조 운동과 이 지역의 화성활동이 동해의 형성과 관계되어 있음을 언급하였다. 그러나 이러한 지각 사건에 연관된 화산활동의 특징에 대한 자료는 매우 미비한 실정이며, 화산암류에 관한 암석학적 특징에 대한 연구(Song *et al.*, 1997, 1998; 위수민과 이선구, 1999; 김영라 외, 2000)는 주로 중·염기성 화산암류에 대하여 단편적으로 진행되었다.

본 연구는 이들 제3기 분지 중 감포지역의 어일분지 내 화산암류를 대상으로 암석기제 및 구성광물의 화학 조성 특성을 밝히고 이에 근거한 화산활동사를 고찰하고자 한다.

지질 개요

어일분지는 경상북도 경주시 감포읍 양북면의 동부 일원에 위치하며, 길이 약 12 km, 최대 폭 약 5 km인 북동방향의 함몰지로서 북동방향이 우세한 수 개의 단층으로 구획된 여러 개의 지구(graben) 내지 반지구(half-graben)로 구성된다(손문 외, 2001). 어일분지는 북

북서방향의 우수향 주향이동단층운동과 이들 단층의 활동으로 이차적으로 형성된 북동방향의 정단층운동에 의해 확장되고 침강된 전형적인 당겨열림분지(pull-apart basin)로 조사된 바 있다(Son *et al.*, 2000). 연구대상인 북동소분지가 북부지괴와 남부지괴로 구분되는 기준역시 대규모의 북동방향이 우세한 정단층이다. 분지 충전물은 대체로 15°~30° 가량 북서방향으로 경사진 등사구조(同斜構造)를 보여주지만, 상부로 갈수록 지층의 경사각이 알아지는 경향을 보여준다(최위찬 외, 1988; Son *et al.*, 2000).

분지의 기반암류는 하위로부터 백악기 경상누층군의 퇴적암류, 팔레오세-에오세(진명식 외, 1988)의 규질 화산암류(왕산석영안산암질화산암류; 윤 선, 1988), 에오세의 화강암류(김근수 외, 1995)로 구성된다. 경상누층군의 퇴적암류는 하양층군의 상위 층준에 대비되는 것으로 보고되어 있으며(최위찬 외, 1988), 세일과 사암이 주를 이루고 있다. 이들은 대부분이 주변의 화성암류에 의한 접촉변성작용으로 인해 혼펠스화 되어 있다. 분지의 기반암류 중 가장 넓은 지역에 걸쳐 분포하는 규질 화산암류는 암편을 다량 포함하는 용결회류 응회암이 대부분이며, 부분적으로 소량의 반정을 포함하는 유리질 응회암이 분포한다. 이들 규질 화산암류는 야외에서 담회색 내지 담청색을 띠며 분지 충전물에 비해 치밀하게 고결되어 있어 분지 외곽에 지형적으로 높은 산악 지형을 형성하고 있다. 화강암류는 소규모 암주상으로 분포하는데, 규질 화산암류를 40 Ma 전후에 관입한 것으로 보고되고 있다(최위찬 외, 1988; 김근수 외, 1995).

어일분지의 분지 충전물을 퇴적환경과 암상에 근거하면 하위로부터 전기 마이오세의 감포층과 어일층으로 구분되며, 어일층은 감포층을 정합적으로 피복하고 있다(Fig. 1). 기반암을 부정합적으로 피복하고 있는 분지 충전물의 기저 지층인 감포층은 하천기원의 역지지(clast-supported) 역암과 역질사암으로 구성된다. 역은 대부분이 기반암인 백악기 퇴적암류와 고제3기 규질 화산암류로 구성되며, 암상의 측방변화가 없이 상부로 갈수록 세립화되는 경향을 나타낸다. 감포층의 하부에는 사장석과 흑운모 반정을 포함하는 데사이트질 응회암과 응회질 사암을 협재하며, 그 상부에는 측방 연속성이 양호하고 부가화산력(accretionary lapilli)을 가지며, 백색의 부석을 함유한 규질응회암(pumice-bearing felsic tuff)층이 약 8m의 두께로 산출된다. 이로부터 감포층의 퇴적 초기 혹은 이전에 이미 데사이트질 화산활동이 있었으며, 퇴적 말기에도 어일분지의 인근에서 규질 화산활동이 있었음을 시사한다.

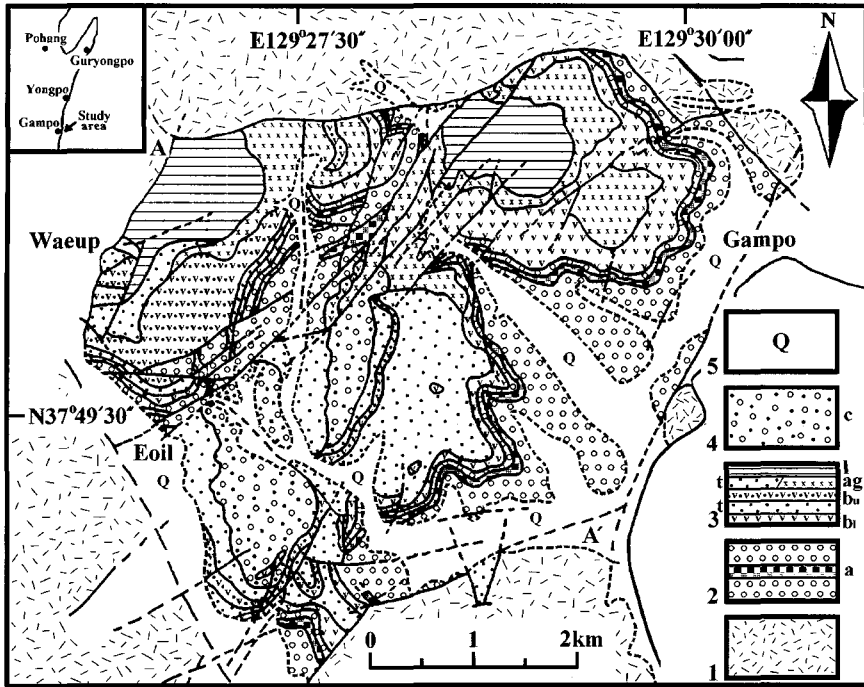


Fig. 1. Geological map of the Eoil area. 1; Pre-Miocene basement rocks, 2; Gampo Formation (a; felsic fallout tuff), 3; Eoil formation (b; lower basalt, t; tuffite, b_u; upper basalt, ag; agglomerate, l; lacustrine sedimentary rocks), 4; Songjeon Formation (c: conglomerate), 5; Alluvium.

어일층은 염기성 화산활동에 의한 용암류와 화성쇄설암류, 그리고 퇴적암으로 구성되는데, 암상과 지층의 층서적 위치에 따라 하부현무암, 응회질 역암과 사암, 상부현무암, 화산점괴암, 그리고 응회암을 협재하는 호성퇴적암으로 구성된다(손문 외, 2001). 현무암질 용암류는 윤 선(1988)에 의해 퇴적 후기의 관입암으로 보고된 바 있으나, 현무암질 분석층 및 사암층이 협재되어 있고 새끼구조(ropy texture), 화산탄과 화산탄낭(bomb sag)과 같은 분출의 증거들이 관찰되며(최위찬 외, 1988), 용암류들이 일정한 두께로 양호한 측방 연속성을 보이므로 이는 분출에 의한 것으로 보인다. 하부현무암 용암의 K-Ar 전암 연대는 20.4~19.3 Ma, 상부현무암 용암의 연대는 19.2~18.7 Ma로 알려져 있다(이현구 외, 1992; Song et al., 1998).

암석 기재

본 역에서 산출되는 화산암상은 염기성암인 현무암과, 규질암인 데사이트질~유문암질 용결 회류응회암(welded ash-flow tuff)과 부석을 함유하는 규질응회암으로 구분된다. 현무암은 다시 층서적으로 2매로 구분

이 되는데, 응회질 사암과 역암층을 경계로 하여 그 하부에 놓이는 것을 하부현무암, 그 상부에 놓이는 것을 상부현무암이라 명명한다. 야외에서 채취한 신선한 표본은 실내 작업을 통해 박편으로 제작하여 편광현미경 하에서 구성광물의 종류 및 조직 등을 관찰하였다. 현미경 하에서의 관찰 결과 대표적인 시료에 대해 2000 타점의 점샘법을 이용하여 모우드 분석을 실시하였으며, 모우드 분석 시 크기를 반정(0.1 mm 이상), 석기(0.1 mm 미만)로 구분하였다. 쉽게 부스러져서 박편으로 제작할 수 없었던 강하응회암을 제외하고, 각 암상별로 대표적인 시료(시료의 위치는 Fig. 2에 표시)에 대해 박편을 제작하여 모우드 분석을 실시하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다.

현무암은 노두에서 암회색 내지 암녹색 혹은 흑색을 띠며, 하부에는 기공을 거의 가지지 않는 치밀한 현무암이 나타나나, 상부로 갈수록 기공을 많이 가지는 현무암이 나타난다. 현무암의 풍화가 많이 진행된 곳에서는 풍화된 현무암이 양과구조를 보이며, 표면에는 사장석 래쓰(lath)들을 다량 함유하고 있다. 또한 현무암이 풍화되어 형성된 붉은 색의 토양과 현무암이 공존하여 나타나 풍화의 진행과정을 잘 보여준다. 데사이

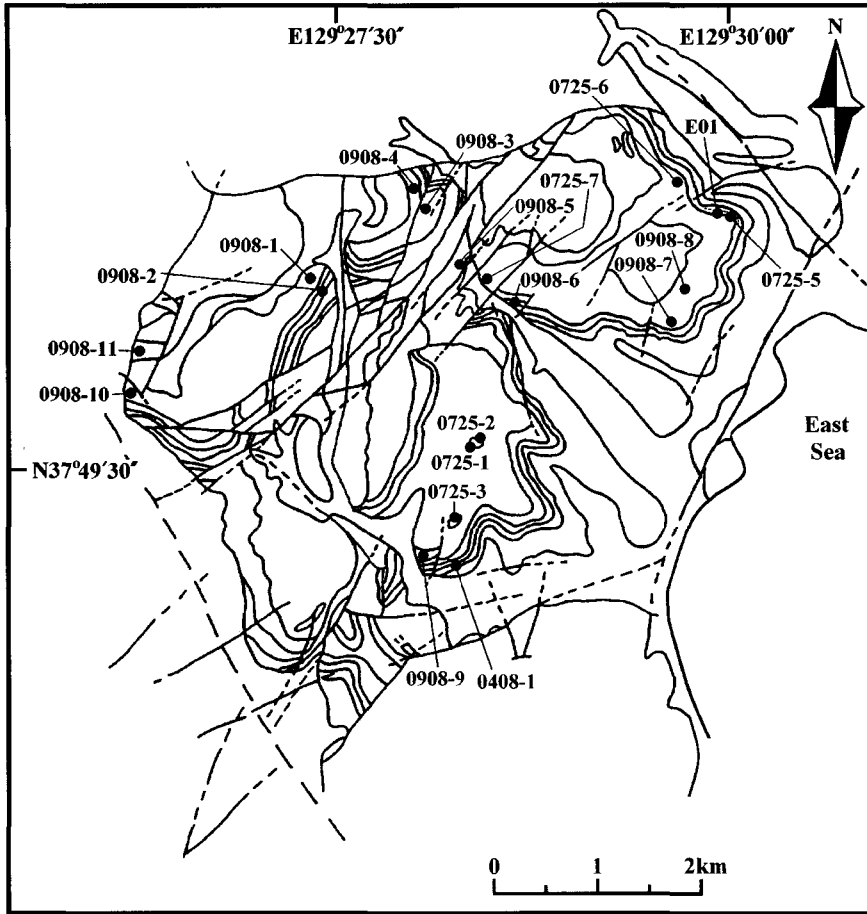


Fig. 2. Map showing sampling locations.

트질~유문암질 용결 회류용회암에는 표면에 용결 구조(welded structure)가 잘 발달되어 있으며 주로 암흑색을 띠고 있다. 부석을 함유한 규질용회암은 백색을 띠며, 부석을 많이 포함하고 있으며, 부분적으로 탄화물이나 혼펠스편을 포함하기도 한다.

야외산상

규질 용회암: 감포역암층 내에는 하부층준에 사장석과 흑운모의 결정편을 가지는 데사이트질 용회암과 용회질 사암이 단속적으로 협재되며, 상부층준에서는 측방 연속성이 양호하고 부가화산력을 가지며 백색의 부석을 함유하는 규질 용회암이 산출된다. 하부층준의 용회암은 용회질 사암과 수반하여 산출되고, 쉽게 부서지기 때문에 분석을 위한 시료를 채취하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 상부층준의 규질 용회암을 주

연구대상으로 하여 시료를 채취하였다.

전체적으로 밝은 백색을 띠고 있는 용회암은 측방 연속성이 양호하며, 약 8m의 균일한 두께로 산출된다. 누적 라필리를 함유하고 있으며, 특징적으로 부석편을 다량 함유하고 있다. 부석편의 크기는 0.1cm 정도 되는 작은 것에서부터 6.5cm 정도 크기까지 다양하게 나타난다. 부가화산력과 부석편 외에 혼펠스편과 탄화물이 일부 포함되어 나타나기도 한다.

데사이트질~유문암질 용결 회류용회암: 감포리 오곡지 입구에서 어일층 하부의 하부현무암 바로 밑에 암흑색을 띠는 데사이트질~유문암질 용결 회류용회암이 산출된다. 그러나 그 분포가 소규모로 단속적으로 나타나므로 본 연구의 지질도에는 기재되지 않는다. 이는 육안상 반상조직과 유리질 조직을 나타낸다. 반정

Table 1. Modal compositions of the volcanic rocks in the Eoil area.

Sample	Rock type	Phenocryst						Ore	Secondary	Rock fragment	Ground-mass	Texture
		pl	ol	cpx	opx	Q	amp					
0725-1	BL(U)	32.4	--	--	--	--	--	--	2.0	--	65.6	Ints
0725-2	BL(U)	28.5	0.4	1.4	--	--	--	--	1.2	--	68.5	Intg
0908-1	BL(U)	31.2	--	--	--	--	--	--	3.4	--	65.3	Intg
0908-10	BL(U)	30.6	--	2.0	0.2	--	--	--	5.6	--	61.5	Ints,Oph
0908-11	BL(U)	35.1	--	--	--	--	--	--	4.3	--	60.5	Ints
0725-6	BL(L)	25.4	0.5	0.2	0.4	--	--	--	1.9	--	71.4	Intg
0725-7*	BL(L)	32.1	--	0.6	0.2	0.2	--	--	8.4	--	58.2	Intg,Oph
0908-2	BL(L)	22.5	--	--	--	--	--	--	5.6	--	71.8	Ints
0908-3	BL(L)	25.2	0.3	0.4	0.2	--	--	--	3.3	--	70.5	Ints
0908-4	BL(L)	25.1	--	--	--	--	--	--	3.8	--	71.0	Ints
0908-5	BL(L)	29.5	--	--	--	--	--	--	4.6	--	65.7	Intg
0908-7	BL(L)	25.0	--	0.2	--	--	--	--	7.4	--	67.3	Intg
0908-8	BL(L)	33.3	--	tr	--	--	--	--	5.8	--	60.3	Ints
0908-9	BL(L)	35.3	--	--	--	--	--	--	5.3	--	59.3	Ints
0725-5	WT	7.2	--	0.6	--	tr	0.4	0.9	--	6.5	84.3	Por,welded
E01	WT	8.6	--	0.5	tr	tr	0.2	0.4	--	2.1	88.1	Por,welded

Modes based on about 2000 counts per samples. Phenocrysts; 0.1 mm >, groundmass; < 0.1 mm.

BL(U); upper basalt lava, BL(L); lower basalt lava, WT; dacitic-rhyolitic welded ash-flow tuff, pl; plagioclase, mpl; microplagioclase, ol; olivine, cpx; clinopyroxene, opx; orthopyroxene, Q; quartz, amp; amphibole, Ore; opaque mineral, Ints; intersertal, Intg; intergranular, Oph; ophitic, Por; porphyritic, tr; trace. 0725-7* contains small amount of corroded quartz phenocryst.

광물로는 사장석이 대부분이며, 외래 암편도 소량 관찰된다. 표면에는 용결 구조 즉, 압축 신장된 부석편과 피아메(fiamme)가 나란하게 배열되어 있는 용결엽리구조가 잘 관찰된다.

현무암류: 현무암류는 하부의 신생대 퇴적암류 즉 감포역암과 이암을 덮고 있다. 현무암질 용암류는 분지의 북동지괴의 중앙부와 남서지괴의 북동부에서는 수 십 m의 두께로 두텁게 나타나지만, 그 외의 지역에서는 수 m의 두께로 나타나며, 측방 연속성이 양호하게 나타난다. 현무암 내에는 현무암이 분출하기 전에 형성되었던 기존의 암석편이 포함되어 있기도 하는데, 암석편은 정동구조(miarolitic cavity)를 가지는 세립질 화강암(aplite), 알칼리 장석과 석영이 주된 광물인 중립질 화강암, 규질암편(왕산층의 것으로 판단됨) 외가 최대 70~50 cm, 최소 1 cm 정도의 다양한 크기로 나타난다. 또한 국부적으로 수중에서 분출한 현무암질 화성쇄설물로 구성되어 충리를 가지는 것이 산출되기도 한다. 호동리의 호동 제1교와 제3교 부근에서는 현무암의 표면에 주상절리가 잘 발달되어 있는 것이 관찰된다. 현무암이 풍화되어 나타나는 곳에서는 양과구조가 잘 나타나는데, 표면의 풍화 정도가 심하다. 현무

암이 풍화되어 형성된 토양과 풍화가 진행 중인 현무암이 함께 산출되기도 하며, 풍화되어 형성된 토양은 철을 많이 함유함으로써 붉은 색을 띠고 있다. 하부의 현무암은 곳에 따라 베계구조를 보이는 것도 관찰되어 수중 분출의 산물일 것으로 사료되며, 육안상으로 반상조각이 관찰되는데, 반정으로는 사장석과 휘석이 나타난다.

층회암(tuffites): 하부 용암류와 상부 용암류의 사이 층준에 퇴적된 층회암은 지괴에 따라서는 말할 것도 없고, 하나의 지괴 내에서도 측방으로 암상과 층의 두께가 확연한 차이를 보인다. 즉, 남부지괴에서는 최대 두께가 약 100 m 이상이며 주로 응회질 역암으로 구성된다. 또한 층의 두께는 지괴의 중심부에서 남서쪽으로 갈수록 얇아지며, 지괴의 북동부에 이르러서는 이 층은 사라지고 하부 용암류와 상부 용암류가 직접적으로 접촉하고 있다. 그러나 북부지괴에서는 이 층회암은 층의 두께가 남부지괴의 것에 비해 훨씬 얇아져서 최대 약 10 m 정도이며, 암상 또한 주로 응회질 사암으로 차이를 보인다. 또한 북동쪽으로 화산집괴암과 지교(interfingering) 관계를 보임으로써 남부지괴와는 다른 양상이다. 이러한 사실로부터 북동소분지의 남부지

괴와 북부지괴는 하부 현무암질 용암류가 분출된 이후 침강속도, 퇴적작용 그리고 화산활동을 서로 달리하는 독립적인 지괴운동을 겪었음을 알 수 있다(손문 외, 2001).

화산집괴암: 화산집괴암의 화산암괴는 대부분 각질이며 유리질 혹은 다공질의 현무암질 암석으로 구성되어 있어 용암류의 본질(essential) 혹은 유질(accessory)인 것으로 판단된다. 이 집괴암은 용암류가 비교적 두껍게 분포하는 북동소분지 북부지괴의 중앙부 그리고 남부지괴의 북동부에서 대체로 원형의 분포를 보이며 용암류에 의해 둘러싸여 있는 형상이다. 이러한 점들은 용암류의 유출 이후 북부지괴의 중앙부와 남부지괴의 북동부에 각각 직경 약 2 km의 분석구(cinder cone)가 형성되었을 가능성을 지시하며 또한 이곳에 주요한 화산분출구가 존재하였음을 암시하고 있다(손문 외, 2001).

호성퇴적암: 어일층의 최상부에 해당하는 호성 퇴적암은 응회암과 함께 역암과 사암이 호층을 이루고 있으며, 특징적으로 호성환경을 지시하는 구조암을 협재한다(Lee, 1976). 이 암석은 화산집괴암에 의해 둘러싸여져 있으며, 직경 약 1 km의 원형의 분포를 보이고 있어 화산분출과 관련된 후기 함몰지에서 형성된 호수 환경에서 퇴적되었을 것으로 판단된다.

현미경하관찰

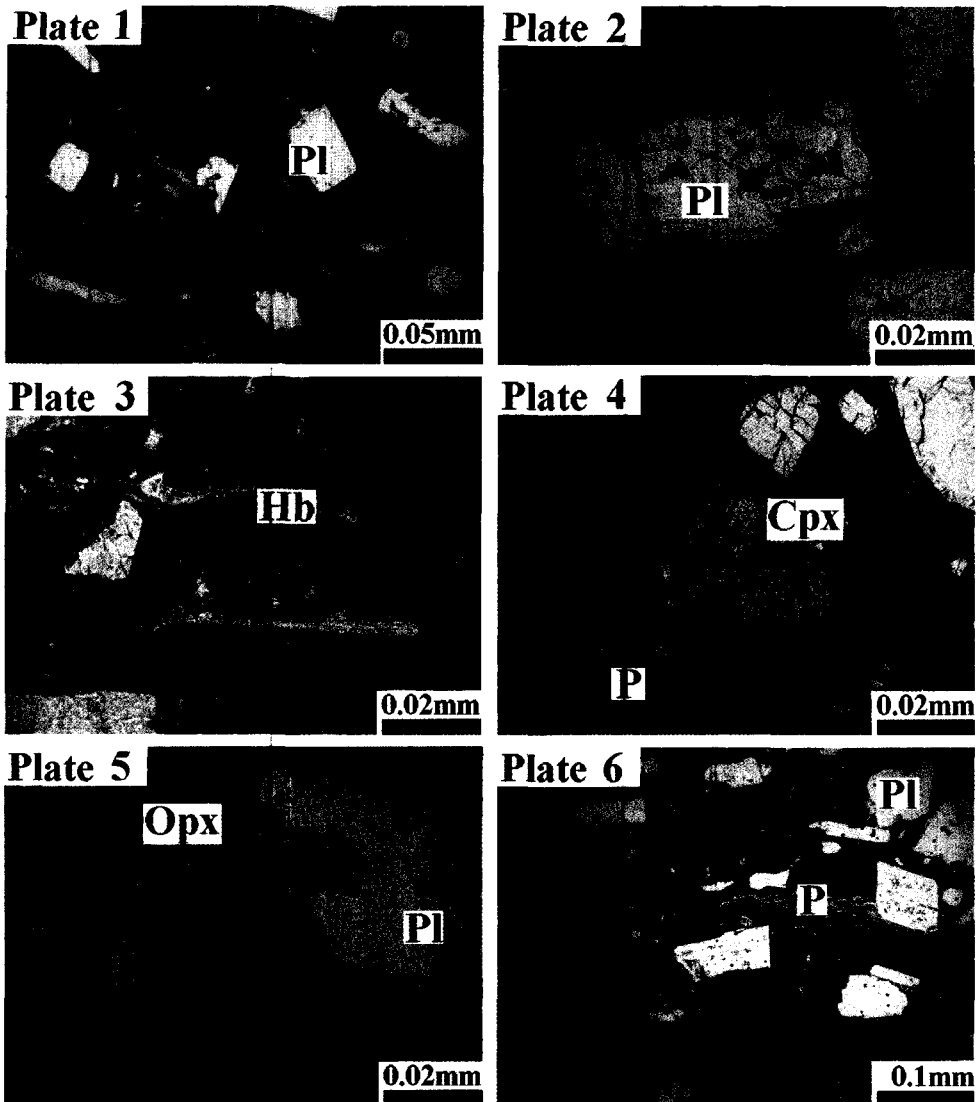
데사이트질~유문암질 용결 회류응회암: 규질의 용결 회류응회암은 사장석 반정이 7.2~8.6%, 단사휘석 반정이 0.5~0.6%, 각섬석 반정이 0.2~0.4%로 나타나며, 사방휘석 반정은 소량 존재한다. 외래암편이 2.1~6.5%로 상당 부분 포함되어 있고, 기질부가 84.3~88.1%로 거의 대부분을 차지한다. 기질부에는 부석편도 나타난다.

유리질의 기질부에 반정을 함유하고 있는 반상조직이 현저하게 나타난다(Plate 1). 반정으로 나타나는 사장석은 자형, 반자형, 타형으로 나타나며, 일부에서는 용식되어 골격구조(skeletal texture)를 보이기도 하며(Plate 2), 알바이트-칼스바드 쌍정, 누대구조가 나타난다. 용결응회암에서는 각섬석 반정이 나타나는데(Plate 3), 각섬석은 개방나뭇잎 하에서 노란색을 띤 갈색(yellowish brown)~녹색을 띤 갈색(greenish brown) 정도의 다색성을 나타내며, 그 크기는 0.2×0.2 mm~0.2×1 mm 정도이다. 모양은 깨끗한 자형이 우세하게 나타나며, 반자형의 것도 존재한다. 휘석 반정은 단사휘석(Plate 4)과 사방휘석(Plate 5)이 관찰되며, 자형, 반자형, 타형의 다양한 모양으로 나타나며, 쌍정으로 나타나는 것

도 있다(시료 E01). 기질부는 대부분이 유리질로 되어 있으며, 압축·신장되어 나타나는 부석편과 유리 샤아드도 우세하게 나타난다(Plate 6). 이러한 샤아드는 기질부에서 평행하게 나타나는 파라택시틱 조직(parataxitic texture)과 반정 혹은 압편을 둘러싸고 있는 유택시틱 조직(eutaxitic texture)을 나타낸다.

하부현무암: 하부현무암은 반정으로 사장석이 22.5~35.3%, 감람석이 0.3~0.5%, 단사휘석이 0.2~0.6%, 사방휘석이 0.2~0.4%로 나타나며, 변질 산물인 2차 광물이 1.9~8.4%로 나타난다. 특징적인 것은 부분적이기는 하지만, 사방휘석, 감람석 반정과 공존하여 용식된 석영 반정이 나타난다는 것이다(Plate 7). 이 석영 반정은 석영 반정을 가지고 있던 기반암(왕산층의 유문암질 결정응회암)의 동화과정에서의 결과라고 사료된다. 기질부는 58.2~71.8%로 전체의 반 이상을 차지하고 있다. 사장석 반정은 자형, 반자형, 타형의 다양한 모습으로 나타나며, 알바이트-칼스바드 쌍정, 누대구조를 나타내며(Plate 8), 가장자리가 용식된 체구조(sieve texture; Nelson and Montana, 1992)가 나타난다. 용식된 구조는 가장자리 뿐만 아니라 반정의 중심부에서도 나타나는 데(Plate 9), 용식된 부분을 감람석, 휘석, 불투명 광물이 채우고 있는 구조도 관찰된다. 감람석 반정은 반자형 내지 타형이 우세하게 나타나며, 일부에서는 녹색 내지 갈색을 띤 2차 광물로 변질되어 있다. 휘석 반정은 대부분 타형으로 나타나는 단사휘석이 특징적으로 소량 나타나는 사방휘석 반정보다 우세하게 나타나며, 간혹 사방휘석 반정을 작은 크기의 단사휘석과 감람석이 둘러싸고 있는 모습(Plate 10)도 관찰된다(시료 0725-6, 0908-3). 기질부는 상부현무암과 마찬가지로 인터그레놀라 조직과 인터서탈 조직이 주로 나타난다. 서브오피틱 조직(시료 0725-7, 0908-8)은 상부현무암에서보다 훨씬 더 잘 발달되어 나타난다.

상부현무암: 모우드 분석 결과, 상부현무암에는 반정으로 사장석이 28.5~35.1%, 단사휘석이 1.4~2.0%, 감람석이 0.4%, 사방휘석이 0.2% 정도로 나타나며, 감람석이 변질되어 형성된 2차적인 광물이 1.2~5.6% 정도로 나타난다. 기질부는 60.5~68.5%로 하부현무암에서와 마찬가지로 절반 이상이 기질부로 되어 있음을 알 수 있다. 대표적인 염기성 암석인 현무암에서 유색광물의 반정 비율이 낮은 것은 유색광물들이 반정 크기(0.1 mm 이상)로 나타나는 것이 아니라 작은 크기(0.01~0.02 mm)로 기질부에 분산되어 나타나기 때문이다. 반정으로는 사장석 반정이 우세하며, 사장석 반정은 자



[Abbr. P; pumice, Q; quartz, Pl; plagioclase, Hb; hornblende, Cpx; clinopyroxene, Opx; orthopyroxene, Ol; olivine]
 Plate 1. Photomicrograph of crystal-vitric welded ash-flow tuff, showing eutaxitic texture and porphyritic texture with phenocrysts of plagioclase in the groundmass of glass (opened polar).

Plate 2. Photomicrograph of crystal-vitric welded ash-flow tuff, showing skeletal textured plagioclase phenocryst (opened polar).

Plate 3. Photomicrograph of crystal-vitric welded ash-flow tuff, showing hornblende phenocryst (opened polar).

Plate 4. Photomicrograph of crystal-vitric welded ash-flow tuff, showing clinopyroxene phenocryst (opened polar).

Plate 5. Photomicrograph of crystal-vitric welded ash-flow tuff, showing orthopyroxene phenocryst (opened polar).

Plate 6. Photomicrograph of crystal-vitric welded ash-flow tuff, showing elongated pumice (opened polar).

형 내지 반자형, 타형으로 나타난다. 사장석의 가장자리가 용식되거나 혹은 가장자리와 중심부가 함께 용식되어 있는 채구조가 잘 발달하여 나타나며, 용식된 부분을 작은 감람석, 휘석, 불투명 광물들이 채우고 있는

모습이 관찰되고, 알바이트-칼스바드 쌍정과 누대구조를 나타낸다. 감람석 반정은 자형으로 깨끗하게 나타나는 부분도 있지만, 2차 광물로 변질되어 나타나기도 한다. 휘석 반정은 자형 내지 타형으로 나타나고, 단사

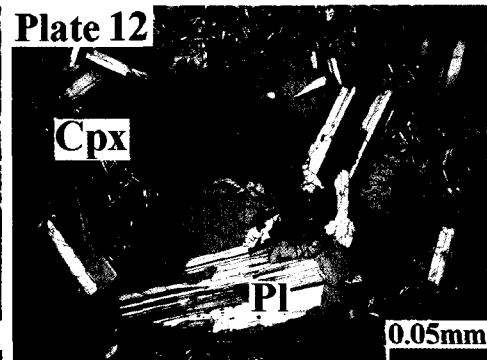
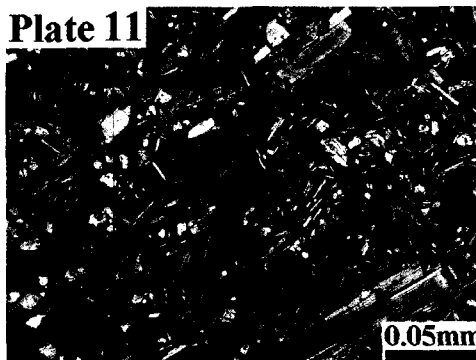
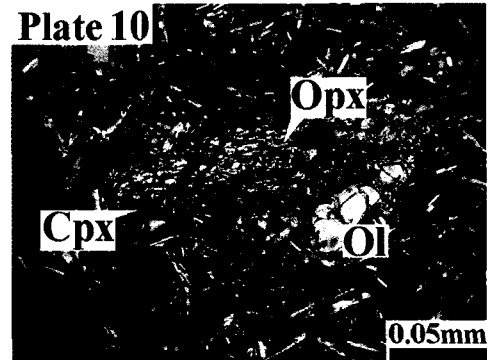
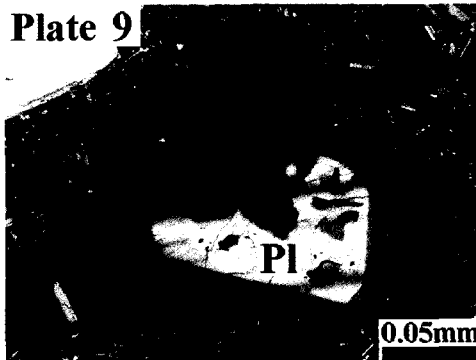
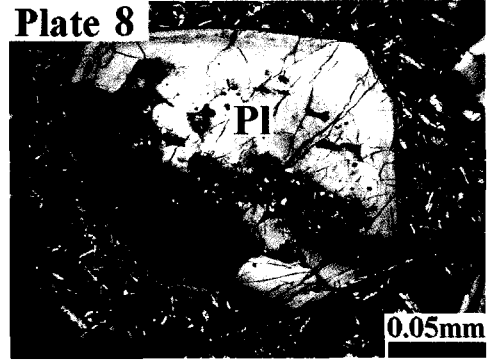
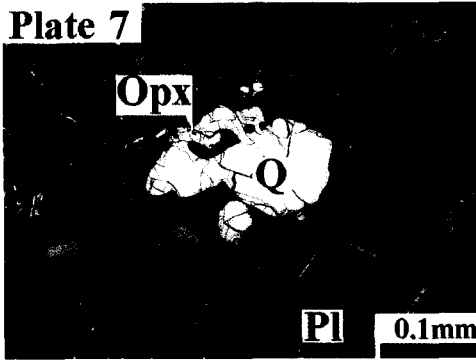


Plate 7. Photomicrograph of corroded quartz phenocryst in the lower basalt (crossed polars).

Plate 8. Photomicrograph of corroded plagioclase phenocryst showing zonal structure in the lower basalt. The corroded parts are filled with clinopyroxene, olivine and opaque minerals of very fine-grained (crossed polars).

Plate 9. Photomicrograph of plagioclase phenocryst showing complex zonal texture in the lower basalt (crossed polars).

Plate 10. Photomicrograph of the lower basalt showing orthopyroxene phenocryst surrounded clinopyroxene and olivine (crossed polars).

Plate 11. Photomicrograph of the upper basalt showing intersertal texture in which clinopyroxene and olivine occurred between plagioclase lath and glass remained on the groundmass (crossed polars).

Plate 12. Photomicrograph of the upper basalt showing glomeroporphyritic texture with clinopyroxene and plagioclase (crossed polars).

회석 반정이 사방회석 반정보다 더 우세하며, 단사회석은 약한 다색성을 보인다. 드물게는 사방회석 반정 주위를 단사회석과 감람석이 둘러싸고 있는 모습(시료 0908-10)을 나타내기도 한다. 기질부는 전체적으로 사

장석, 감람석으로 채워져 있는 인터그래놀라 조직과 이들 광물 사이를 유리질 물질이 채우고 있는 인터서탈 조직을 나타낸다(Plate 11). 일부에서는 사장석이 회석을 가로질러 놓여있는 오펜트 조직을 보이기도 하며,

Table 2. Representative microprobe analyses of plagioclases from the volcanic rocks in the Eoil area.

Sample	0725-2		0725-6		0725-6		0725-7		0725-7		0725-7		0725-6		0725-5		E01		E01		E01		E01		E01		E01											
	#03	#36	#37	#38	#39	#61	#62	#63	#64	#48	#35	#25	ph	WT	ph	WT	ph	WT	#E10	#E20	ph	WT	ph(c4)	WT	ph(r4)	WT	#E56	#E55	#E56	#E55	#28a	ph	WT					
	ph	ph	ph(c1)	ph(m1)	ph(r1)	ph(c2)	ph(m2)	ph(m2a)	ph(r2)	mph	mt	ph	WT	ph	WT	ph	WT	ph	WT	ph	WT	ph(c4)	WT	ph(r4)	WT	ph	WT	ph	WT	ph	WT							
	BL(U)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)				
SiO ₂	53.32	53.17	47.23	53.00	53.59	49.04	49.62	54.91	53.28	53.64	55.26	63.50	62.16	61.06	59.84	62.38	60.59	63.11																				
TiO ₂	0.06	0.10	0.04	0.06	0.09	0.02	0.04	0.08	0.03	0.04	0.07	0.06	0.00	0.00	0.03	0.04	0.03	0.06																				
Al ₂ O ₃	28.37	28.65	33.13	28.80	28.66	31.72	31.44	27.73	28.39	28.40	27.33	22.20	62.16	61.06	59.84	62.38	60.59	22.46																				
FeO	0.74	0.77	0.50	0.58	0.58	0.56	0.57	0.65	0.93	0.75	0.83	0.32	0.41	0.38	0.48	0.36	0.53	0.37																				
MnO	0.01	0.06	0.03	0.01	0.00	0.01	0.02	0.06	0.01	0.04	0.03	0.00	0.02	0.00	0.01	0.03	0.00	0.02																				
MgO	0.02	0.02	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.05	0.07	0.03	0.02	0.00	7.92	7.74	7.02	8.27	7.87	0.00																				
CaO	11.74	12.06	17.05	12.66	12.06	15.77	15.12	11.62	12.10	12.19	10.77	3.88	5.89	6.28	7.71	5.56	6.66	4.47																				
Na ₂ O	4.84	4.47	1.93	4.19	4.47	2.39	2.62	4.58	4.37	4.47	5.10	9.13	7.92	7.74	7.02	8.27	7.87	8.71																				
K ₂ O	0.24	0.24	0.08	0.21	0.25	0.10	0.09	0.31	0.29	0.18	0.30	0.67	0.40	0.36	0.24	0.39	0.31	0.53																				
P ₂ O ₅	0.15	0.19	0.18	0.13	0.11	0.11	0.15	0.13	0.18	0.15	0.07	0.03	0.06	0.10	0.08	0.08	0.04	0.06																				
Cr ₂ O ₃	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																				
Total	99.48	99.72	100.17	99.65	99.83	99.73	99.69	100.12	99.64	99.88	99.79	99.79	146.94	144.72	142.27	147.76	144.49	99.78																				
(O=8)																																						
Si	2.434	2.421	2.170	2.415	2.434	2.252	2.275	2.482	2.430	2.437	2.504	2.820	1.907	1.904	1.901	1.903	1.896	2.804																				
Al	1.525	1.536	1.793	1.546	1.533	1.715	1.697	1.476	1.524	1.519	1.459	1.161	2.246	2.242	2.239	2.242	2.233	1.175																				
Ti	0.002	0.003	0.001	0.002	0.003	0.001	0.001	0.003	0.001	0.001	0.003	0.002	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002																				
Fe ²⁺	0.028	0.029	0.019	0.022	0.022	0.022	0.022	0.025	0.035	0.028	0.031	0.012	0.011	0.010	0.013	0.009	0.014	0.014																				
Mn	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001																				
Mg	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.003	0.004	0.002	0.001	0.000	0.362	0.360	0.332	0.376	0.367	0.000																				
Ca	0.574	0.588	0.859	0.618	0.587	0.776	0.743	0.563	0.591	0.593	0.523	0.184	0.194	0.210	0.262	0.182	0.223	0.213																				
Na	0.428	0.395	0.172	0.370	0.393	0.213	0.233	0.401	0.386	0.394	0.448	0.786	0.471	0.468	0.432	0.489	0.478	0.750																				
K	0.014	0.014	0.004	0.012	0.015	0.006	0.005	0.018	0.017	0.010	0.017	0.038	0.016	0.014	0.010	0.015	0.012	0.030																				
Ab	42.1	39.6	16.9	37.0	39.5	21.4	23.8	40.8	38.8	39.5	45.3	78.0	69.2	67.6	61.4	71.3	67.0	75.5																				
An	56.5	59.0	82.7	61.8	59.0	78.0	75.7	57.3	59.5	59.5	52.9	18.3	28.5	30.3	37.2	26.5	31.3	21.5																				
Or	1.4	1.4	0.4	1.2	1.5	0.6	0.5	1.8	1.7	1.0	1.7	3.8	2.3	2.0	1.4	2.2	1.7	3.0																				

ph, phenocryst; mph, microphenocryst; mt, matrix; c, center; m, middle; r, rim. Total Fe as FeO. BL(U), BL(L), WT are the same as those in Table 1.

Table 3. Representative microprobe analyses of clinopyroxenes from the volcanic rocks in the Eoil area.

Sample	0725-6		0725-2		0725-2		0725-2		0725-2		0725-2		0725-2		0725-5		0725-5		0725-5		E01		E01		E01		E01		E01						
	#46	#49	#01	#02	#05	#06	#53	#54	#57	#58	#29	#30	#E01	#E03	#E11	#E53	#E02	#E30	#E31	#E01	#E02	#E30	#E31	#E01	#E02	#E30	#E31	#E01	#E02	#E30	#E31				
	ph	ph	mph	mph	mph	mph	mph(r)	mph(r)	mt	mt	ph	ph	ph	ph	ph	ph	ph	mph	mph	mph	mph	mph	mph	mph	mph	mph	mph	mph	mph	mph	mph	mph			
	BL(L)	BL(L)	BL(U)	BL(U)	BL(U)	BL(U)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	WT	WT	WT	WT	WT	WT	WT	WT	WT	WT	WT	WT	WT	WT	WT	WT	WT	WT	WT	WT	WT	WT			
SiO ₂	52.02	51.95	51.66	50.18	49.68	50.73	51.98	52.93	49.21	49.55	52.85	52.35	53.41	53.61	52.14	52.40	53.86	52.90	52.78	52.40	53.86	52.90	52.78	52.40	53.86	52.90	52.78	52.40	53.86	52.90	52.78	52.40	53.86	52.90	52.78
TiO ₂	0.68	0.58	0.77	1.22	1.43	1.03	0.78	0.65	1.67	1.75	0.46	0.46	0.44	0.35	0.64	0.31	0.36	0.35	0.43	0.31	0.36	0.35	0.43	0.31	0.36	0.35	0.43	0.31	0.36	0.35	0.43	0.31	0.36	0.35	0.43
Al ₂ O ₃	2.72	2.67	1.31	2.66	2.56	2.14	1.98	1.42	3.10	3.55	1.68	1.58	1.30	1.01	1.96	0.79	0.89	1.12	1.15	0.79	0.89	1.12	1.15	0.79	0.89	1.12	1.15	0.79	0.89	1.12	1.15	0.79	0.89	1.12	1.15
FeO	8.80	9.04	12.42	10.59	12.21	11.23	11.70	12.57	12.41	11.95	8.41	8.81	8.26	7.86	8.70	8.49	8.06	7.90	7.99	8.49	8.06	7.90	7.99	8.49	8.06	7.90	7.99	8.49	8.06	7.90	7.99	8.49	8.06	7.90	7.99
MnO	0.31	0.22	0.31	0.32	0.28	0.31	0.35	0.42	0.33	0.28	0.92	1.15	1.22	1.05	0.92	1.25	1.10	0.92	0.90	1.25	1.10	0.92	0.90	1.25	1.10	0.92	0.90	1.25	1.10	0.92	0.90	1.25	1.10	0.92	0.90
MgO	15.71	15.69	15.13	14.46	14.28	15.40	16.15	17.40	12.44	13.00	14.74	14.56	14.52	14.83	14.79	14.87	15.01	15.17	14.88	14.87	15.01	15.17	14.88	14.87	15.01	15.17	14.88	14.87	15.01	15.17	14.88	14.87	15.01	15.17	14.88
CaO	18.43	18.94	17.35	19.53	18.84	18.13	16.20	14.46	19.59	19.08	20.36	19.94	19.77	20.45	19.97	21.02	20.10	20.36	20.69	21.02	20.10	20.36	20.69	21.02	20.10	20.36	20.69	21.02	20.10	20.36	20.69	21.02	20.10	20.36	20.69
Na ₂ O	0.34	0.37	0.32	0.37	0.37	0.36	0.25	0.26	0.39	0.34	0.50	0.47	0.53	0.51	0.54	0.48	0.44	0.49	0.49	0.48	0.44	0.49	0.49	0.48	0.44	0.49	0.49	0.48	0.44	0.49	0.49	0.48	0.44	0.49	
K ₂ O	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00		
P ₂ O ₅	0.20	0.20	0.16	0.23	0.20	0.21	0.18	0.10	0.21	0.18	0.26	0.24	0.26	0.23	0.21	0.23	0.27	0.20	0.23	0.21	0.23	0.27	0.20	0.23	0.21	0.23	0.27	0.20	0.23	0.21	0.23	0.27	0.20	0.23	
Cr ₂ O ₃	0.32	0.30	0.02	0.08	0.02	0.06	0.10	0.08	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Total	99.54	99.98	99.45	99.65	99.89	99.62	99.66	100.28	99.38	99.70	100.18	99.57	99.71	99.90	99.87	99.85	100.13	99.37	99.54	99.87	99.85	100.13	99.37	99.54	99.87	99.85	100.13	99.37	99.54	99.87	99.85	100.13	99.37	99.54	
(O=6)																																			
TSi	1.937	1.925	1.945	1.882	1.867	1.899	1.944	1.961	1.873	1.874	1.962	1.959	1.995	1.994	1.941	1.952	2.000	1.975	1.969	1.941	1.952	2.000	1.975	1.969	1.941	1.952	2.000	1.975	1.969	1.941	1.952	2.000	1.975	1.969	
TAI	0.063	0.075	0.055	0.118	0.113	0.094	0.056	0.039	0.127	0.126	0.038	0.041	0.005	0.006	0.059	0.035	0.000	0.025	0.031	0.059	0.035	0.000	0.025	0.031	0.059	0.035	0.000	0.025	0.031	0.059	0.035	0.000	0.025	0.031	
M1Al	0.056	0.042	0.004	0.000	0.000	0.000	0.031	0.023	0.012	0.032	0.036	0.028	0.053	0.038	0.026	0.000	0.039	0.024	0.020	0.026	0.000	0.039	0.024	0.020	0.026	0.000	0.039	0.024	0.020	0.026	0.000	0.039	0.024	0.020	
M1Ti	0.019	0.016	0.022	0.034	0.040	0.029	0.022	0.018	0.048	0.050	0.013	0.013	0.012	0.010	0.018	0.009	0.010	0.010	0.012	0.018	0.009	0.010	0.010	0.012	0.018	0.009	0.010	0.010	0.012	0.018	0.009	0.010	0.010	0.012	
M1Fe ³⁺	0.000	0.018	0.030	0.074	0.079	0.068	0.000	0.000	0.048	0.018	0.013	0.022	0.000	0.000	0.036	0.065	0.000	0.014	0.022	0.036	0.065	0.000	0.014	0.022	0.036	0.065	0.000	0.014	0.022	0.036	0.065	0.000	0.014	0.022	
M1Fe ²⁺	0.044	0.048	0.094	0.081	0.080	0.042	0.044	0.000	0.186	0.167	0.123	0.125	0.126	0.129	0.099	0.100	0.120	0.108	0.118	0.099	0.100	0.120	0.108	0.118	0.099	0.100	0.120	0.108	0.118	0.099	0.100	0.120	0.108	0.118	
M1Cr	0.009	0.009	0.001	0.002	0.001	0.002	0.003	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
M1Mg	0.872	0.867	0.850	0.809	0.800	0.860	0.900	0.956	0.706	0.733	0.816	0.812	0.809	0.822	0.821	0.826	0.831	0.844	0.828	0.821	0.826	0.831	0.844	0.828	0.821	0.826	0.831	0.844	0.828	0.821	0.826	0.831	0.844	0.828	
M2Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
M2Fe ²⁺	0.230	0.214	0.267	0.178	0.205	0.236	0.322	0.389	0.161	0.193	0.125	0.129	0.132	0.115	0.136	0.086	0.130	0.124	0.109	0.136	0.086	0.130	0.124	0.109	0.136	0.086	0.130	0.124	0.109	0.136	0.086	0.130	0.124	0.109	
M2Mn	0.010	0.007	0.010	0.010	0.009	0.010	0.011	0.013	0.011	0.009	0.029	0.036	0.039	0.033	0.029	0.039	0.035	0.029	0.028	0.029	0.039	0.035	0.029	0.028	0.029	0.039	0.035	0.029	0.028	0.029	0.039	0.035	0.029	0.028	
M2Ca	0.735	0.752	0.700	0.785	0.758	0.727	0.649	0.574	0.799	0.773	0.810	0.800	0.791	0.815	0.796	0.839	0.800	0.814	0.827	0.796	0.839	0.800	0.814	0.827	0.796	0.839	0.800	0.814	0.827	0.796	0.839	0.800	0.814	0.827	
M2Na	0.024	0.026	0.024	0.027	0.027	0.026	0.018	0.019	0.029	0.025	0.036	0.034	0.038	0.037	0.039	0.035	0.035	0.032	0.035	0.039	0.035	0.035	0.032	0.035	0.039	0.035	0.035	0.032	0.035	0.039	0.035	0.032	0.035		
M2K	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
Wo	38.89	39.46	35.89	40.54	38.87	37.33	33.70	29.62	41.81	40.84	42.28	41.57	41.72	42.56	41.55	42.62	41.75	42.10	42.80	41.55	42.62	41.75	42.10	42.80	41.55	42.62	41.75	42.10	42.80	41.55	42.62	41.75	42.10	42.80	
En	46.11	45.49	43.56	41.78	41.00	44.13	46.74	49.61	36.95	38.71	42.59	42.21	42.64	42.94	42.81	41.95	43.38	43.65	42.83	42.81	41.95	43.38	43.65	42.83	42.81	41.95	43.38	43.65	42.83	42.81	41.95	43.38	43.65	42.83	
Fs	15.01	15.06	20.56	17.69	20.13	18.54	19.57	20.78	21.24	20.45	15.14	16.22	15.64	14.50	15.64	15.44	14.87	14.26	14.37	15.64	15.44	14.87	14.26												

Table 4. Representative microprobe analyses of orthopyroxenes from the volcanic rocks in the Eoil area.

Sample	0725-6		#74		#E01		#E01		#E01		#E01		#E01		#E01		#E01		#E01		#E01		#E01		#E01		#E01		#E01		#E01		#E01				
	ph	BL(L)	ph	WT	ph	WT	ph	WT	ph	WT	ph	WT	ph	WT	ph	WT	ph	WT	ph	WT	mph	WT	mph	WT	mph	WT	mph	WT	mph	WT	mph	WT	mph	WT			
SiO ₂	53.59	52.05	54.03	54.55	54.08	54.54	54.17	54.14	53.71	54.09	54.81	54.48	54.36	54.45	53.77	54.47	54.07	54.47	54.45	53.77	54.47	54.47	54.07	54.07	53.83	54.17	54.07	54.07	53.83	54.17	54.07	54.07	53.83	54.17			
TiO ₂	0.36	0.16	0.35	0.23	0.18	0.25	0.23	0.22	0.17	0.23	0.24	0.11	0.31	0.30	0.29	0.24	0.28	0.35	0.30	0.29	0.24	0.24	0.24	0.35	0.30	0.30	0.28	0.35	0.30	0.28	0.35	0.30	0.28	0.35	0.30		
Al ₂ O ₃	1.48	1.48	0.81	0.51	0.49	0.82	0.55	0.51	0.35	0.56	0.59	0.34	0.79	0.55	0.64	0.58	0.82	0.98	0.82	0.64	0.58	0.58	0.82	0.98	0.85	0.82	0.98	0.85	0.82	0.98	0.85	0.82	0.98	0.85	0.82		
FeO	16.98	22.36	17.34	17.49	17.54	16.92	17.80	17.21	17.76	17.01	17.09	17.24	16.72	16.81	17.68	17.44	16.95	17.21	16.62	16.81	17.44	17.44	17.44	16.95	17.21	16.62	17.44	17.44	17.44	17.44	16.95	17.21	16.62	17.44	17.44		
MnO	0.41	1.17	1.61	1.96	2.29	1.63	2.12	1.94	2.81	1.81	2.14	2.41	1.69	2.21	2.27	2.35	1.76	1.73	1.63	2.27	2.35	2.35	2.35	1.76	1.73	1.63	2.35	2.35	2.35	2.35	1.76	1.73	1.63	2.35	2.35		
MgO	24.39	21.94	24.33	24.11	24.11	24.80	24.02	24.43	23.74	24.39	23.91	24.10	24.61	24.45	23.70	23.30	24.23	24.23	23.70	23.70	23.30	23.30	24.23	23.90	24.23	24.23	23.90	24.23	24.23	23.90	24.23	24.23	23.90	24.23	24.23		
CaO	2.22	0.48	1.52	1.26	1.24	1.31	1.29	1.25	1.29	1.21	1.16	1.10	1.32	1.22	1.59	1.38	1.55	1.93	1.36	1.59	1.38	1.38	1.55	1.93	1.36	1.36	1.55	1.38	1.55	1.93	1.36	1.36	1.55	1.38	1.55		
Na ₂ O	0.03	0.03	0.03	0.06	0.03	0.01	0.04	0.05	0.04	0.02	0.04	0.03	0.05	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
P ₂ O ₅	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Cr ₂ O ₃	0.09	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Total	99.61	99.69	100.02	100.20	99.98	100.32	100.22	99.78	99.89	99.34	99.98	99.81	99.85	100.08	100.00	99.82	99.69	99.99	99.21	100.00	99.82	99.82	99.69	99.99	99.99	99.21	99.99	99.69	99.99	99.21	99.99	99.99	99.21	99.99	99.99	99.21	99.99
(O=6)	1.966	1.948	1.981	2.001	1.989	1.990	1.989	1.990	1.983	1.996	2.016	2.007	1.992	1.995	1.981	2.013	1.989	2.000	1.981	1.995	2.013	2.013	1.989	1.978	2.000	2.000	1.989	2.013	1.989	2.013	1.989	2.013	1.989	2.013	1.989	2.013	1.989
TSi	0.034	0.052	0.019	0.000	0.011	0.010	0.013	0.010	0.015	0.004	0.000	0.000	0.008	0.005	0.019	0.000	0.011	0.000	0.008	0.005	0.019	0.000	0.011	0.022	0.000	0.000	0.011	0.000	0.011	0.000	0.011	0.000	0.011	0.000	0.011	0.000	
TAI	0.030	0.013	0.016	0.022	0.010	0.025	0.013	0.013	0.000	0.020	0.026	0.015	0.026	0.019	0.009	0.025	0.024	0.037	0.009	0.019	0.025	0.025	0.024	0.020	0.037	0.000	0.000	0.024	0.025	0.024	0.020	0.037	0.000	0.037	0.000	0.037	
M1Al	0.010	0.004	0.010	0.006	0.005	0.007	0.006	0.006	0.005	0.006	0.007	0.003	0.009	0.008	0.008	0.007	0.008	0.008	0.008	0.008	0.007	0.007	0.008	0.010	0.008	0.000	0.000	0.008	0.007	0.008	0.010	0.008	0.010	0.008	0.010	0.008	0.010
M1Fe ³⁺	0.000	0.032	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
M1Fe ²⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
M1Cr	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
M1Mg	0.957	0.950	0.974	0.972	0.985	0.968	0.981	0.981	0.984	0.973	0.968	0.982	0.965	0.973	0.983	0.968	0.968	0.955	0.955	0.973	0.968	0.968	0.968	0.970	0.955	0.955	0.955	0.968	0.968	0.955	0.955	0.968	0.955	0.955	0.968	0.955	0.955
M2Mg	0.377	0.274	0.356	0.347	0.337	0.381	0.334	0.358	0.323	0.369	0.343	0.341	0.380	0.363	0.318	0.316	0.361	0.379	0.316	0.363	0.318	0.316	0.361	0.339	0.379	0.316	0.316	0.361	0.339	0.379	0.316	0.316	0.361	0.339	0.379	0.316	0.316
M2Fe ²⁺	0.521	0.668	0.532	0.536	0.540	0.516	0.547	0.529	0.535	0.525	0.525	0.531	0.512	0.515	0.545	0.539	0.521	0.513	0.515	0.545	0.539	0.521	0.521	0.529	0.513	0.513	0.521	0.529	0.513	0.529	0.513	0.529	0.513	0.529	0.513	0.529	
M2Mn	0.013	0.037	0.050	0.061	0.071	0.050	0.066	0.060	0.088	0.057	0.067	0.075	0.052	0.069	0.071	0.074	0.055	0.051	0.052	0.069	0.071	0.074	0.055	0.054	0.051	0.051	0.055	0.054	0.055	0.054	0.055	0.054	0.055	0.054	0.055	0.054	
M2Ca	0.087	0.019	0.060	0.050	0.049	0.051	0.051	0.049	0.051	0.048	0.046	0.043	0.052	0.048	0.063	0.055	0.061	0.054	0.052	0.063	0.055	0.061	0.055	0.076	0.054	0.054	0.055	0.061	0.055	0.076	0.054	0.055	0.076	0.054	0.055	0.076	
M2Na	0.002	0.002	0.002	0.004	0.002	0.001	0.003	0.004	0.003	0.001	0.003	0.002	0.004	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002	0.004	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	
M2K	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Wo	4.46	0.98	3.03	2.52	2.47	2.60	2.57	2.49	2.56	2.43	2.35	2.20	2.64	2.44	3.17	2.80	3.11	2.76	2.64	3.17	2.80	2.80	3.11	3.86	2.76	2.76	3.11	2.80	3.11	3.86	2.76	2.76	3.11	2.80	3.11		
En	68.24	61.81	67.46	67.08	66.71	68.59	66.47	67.70	65.53	68.07	67.26	67.07	68.55	67.89	65.74	65.80	67.58	68.34	68.55	67.89	65.74	65.80	67.58	66.53	68.34	68.34	65.80	67.58	68.34	66.53	68.34	65.80	67.58	68.34	66.53	68.34	
Fs	27.30	37.21	29.51	30.40	30.83	28.81	30.97	29.81	31.91	29.50	30.39	30.73	28.80	29.67	31.09	31.40	29.31	28.91	28.80	29.67	31.09	31.40	29.31	29.61	28.91	28.91	31.09	29.31	29.61	28.91	29.31	29.61	28.91	29.31	29.61	28.91	

BL(L), WT are the same as those in Table 1.

Table 5. Representative microprobe analyses of olivines from the basaltic rocks in the Eoil area.

Sample	0725-2		0725-2		0725-2		0725-2		0725-2		0725-6		0725-6		0725-6		0725-6		0725-6			
	#07	#10	#11	#12	#14	#15	#16	#33	#42	#43	#45	#51	#44	#55	#56	#50	ph	BL(U)	BL(L)	BL(L)	BL(L)	
SiO ₂	37.80	37.62	37.01	37.47	37.63	37.71	37.49	36.72	37.23	37.11	36.76	36.60	35.80	35.68	35.44	35.02						
TiO ₂	0.05	0.01	0.03	0.01	0.06	0.03	0.01	0.04	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.05						
Al ₂ O ₃	0.05	0.01	0.03	0.02	0.00	0.03	0.06	0.02	0.03	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02						
FeO	23.25	24.27	24.90	24.55	22.99	23.19	22.93	29.50	28.55	28.12	32.09	31.09	36.06	37.19	37.06	39.22						
MnO	0.43	0.38	0.45	0.48	0.32	0.34	0.37	0.53	0.41	0.42	0.65	0.50	0.75	0.68	0.64	0.79						
MgO	38.47	37.24	36.93	37.19	38.31	38.60	38.74	32.37	33.16	33.99	30.24	30.26	26.68	25.21	26.20	24.37						
CaO	0.22	0.24	0.24	0.22	0.20	0.22	0.19	0.31	0.25	0.25	0.25	0.30	0.29	0.29	0.31	0.31						
Na ₂ O	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.05	0.00	0.03						
K ₂ O	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00						
P ₂ O ₅	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.04	0.03	0.04	0.02	0.09	0.07	0.00	0.21	0.00	0.00						
Cr ₂ O ₃	0.04	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.03	0.03	0.01	0.00						
Total	100.31	99.78	99.64	99.94	99.55	100.13	99.87	99.54	99.71	99.96	100.14	98.87	99.64	99.36	99.72	99.81						
(O=4)																						
Si	0.987	0.992	0.983	0.988	0.989	0.986	0.982	0.997	1.002	0.995	1.003	1.008	1.004	1.009	0.999	0.998						
Al	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001						
Ti	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001						
Fe ²⁺	0.508	0.535	0.553	0.542	0.505	0.507	0.502	0.670	0.643	0.631	0.733	0.716	0.846	0.879	0.874	0.935						
Mn	0.010	0.008	0.010	0.011	0.007	0.007	0.008	0.012	0.009	0.010	0.015	0.012	0.018	0.016	0.015	0.019						
Mg	1.497	1.464	1.461	1.463	1.501	1.504	1.513	1.310	1.331	1.359	1.231	1.242	1.116	1.062	1.101	1.036						
Cu	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006	0.006	0.005	0.009	0.007	0.007	0.007	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009						
Na	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.003	0.000	0.001						
K	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000						
Cr	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000						
Mg#	0.75	0.73	0.73	0.73	0.75	0.75	0.75	0.66	0.67	0.68	0.63	0.63	0.57	0.55	0.56	0.53						

Mg# = Mg/(Mg+Fe²⁺), BL(U) and BL(L) are the same as those in Table 1.

Table 6. Representative microprobe analyses of hornblende from the dacitic-rhyolitic welded ash-flow tuff in the Eoil area.

Sample	0725-5	0725-5	E01	E01	E01	E01	E01	E01	E01	E01
	#20	#21	#E27	#E29	#E44	#E45	#E46	#E48	#E49	#E52
	ph	ph	ph	mph	ph	ph	ph	ph	ph	mph
	WT	WT	WT	WT	WT	WT	WT	WT	WT	WT
SiO ₂	47.77	47.38	48.66	46.68	46.68	45.56	46.57	46.60	47.00	46.53
TiO ₂	2.27	2.32	1.95	2.53	1.95	2.97	2.44	2.56	2.46	2.77
Al ₂ O ₃	7.04	7.12	6.09	7.38	5.84	7.74	6.95	7.15	7.02	7.54
FeO	11.48	11.37	10.85	11.70	10.43	11.63	11.65	11.45	11.71	11.22
MnO	0.89	0.87	1.17	0.84	1.16	0.86	0.94	1.07	0.97	0.73
MgO	15.54	15.50	15.94	15.14	15.77	15.26	15.95	15.37	15.59	15.36
CaO	10.51	10.40	10.33	10.46	11.83	10.71	10.71	10.81	10.68	10.84
Na ₂ O	2.56	2.54	2.40	2.60	2.30	2.71	2.53	2.64	2.56	2.77
K ₂ O	0.40	0.41	0.38	0.35	0.38	0.41	0.38	0.38	0.37	0.40
P ₂ O ₅	0.15	0.15	0.09	0.11	1.71	0.16	0.12	0.13	0.12	0.14
Total	98.64	98.06	97.86	97.79	98.05	98.01	98.24	98.16	98.48	98.30
(O=23)										
TSi	6.91	6.90	7.06	6.83	6.93	6.68	6.80	6.81	6.84	6.77
TAl	1.09	1.11	0.94	1.17	1.02	1.32	1.20	1.19	1.16	1.23
CAI	0.11	0.12	0.10	0.10	0.00	0.02	0.00	0.04	0.04	0.07
CTi	0.25	0.25	0.21	0.28	0.00	0.33	0.00	0.28	0.27	0.30
CMg	3.35	3.36	3.45	3.30	3.49	3.34	3.47	3.35	3.38	3.33
CFe ²⁺	1.29	1.27	1.24	1.32	1.29	1.32	1.42	1.34	1.31	1.30
CMn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00
BFe ²⁺	0.10	0.11	0.08	0.11	0.00	0.11	0.00	0.06	0.11	0.07
BMn	0.11	0.11	0.14	0.10	0.00	0.11	0.01	0.13	0.12	0.09
BCa	1.63	1.62	1.61	1.64	1.81	1.68	1.68	1.69	1.66	1.69
BNa	0.16	0.16	0.17	0.15	0.19	0.10	0.32	0.11	0.10	0.15
ANa	0.56	0.56	0.51	0.59	0.47	0.67	0.40	0.63	0.62	0.63
AK	0.07	0.08	0.07	0.07	0.07	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07

WT is the same as those in Table 1.

사장석, 휘석, 감람석 반정이 모여 취반상 조직(Plate 12)을 나타내기도 한다(시료 0908-10).

광물 화학

현미경 하에서 관찰되는 광물들의 정량분석은 대덕 연구단지 내 한국기초과학지원연구원에 설치되어 있는 CAMECA-50 전자현미분석기(EPMA: Electron Probe X-ray Micro Analyzer)를 이용하여 분석하였다.

3개의 현무암 시료(0725-2(상부현무암), 0725-6, 0725-7(하부현무암))와 2개의 테사이트질 용결회류용회암 시료(0725-5, E01) 중에 함유되어 있는 사장석, 휘석(단사휘석과 사방휘석), 그리고 소량의 각섬석과 감람석, 석영, 불투명 광물을 선택하여 약 100여 점의 분석치

를 구하였다. 분석 조건은 조사 전류(probe current) 20 nA, 가속전압 15 kV, 빔 직경 1 μm, 측정시간 10초 간 3회이다. 전자현미분석에서 FeO와 Fe₂O₃의 함량을 따로 구할 수 없으므로, 철의 총량을 FeO로 가정하였다.

분석된 광물의 조성은 상부현무암과 하부현무암, 그리고 테사이트질 용결 회류용회암으로 분류하여 Table 2(사장석), Table 3(단사휘석), Table 4(사방휘석), Table 5(감람석), Table 6(각섬석)에 나타내었다. 사장석은 Or-Ab-An 단성분 분류도(Deer *et al.*, 1972)에, 휘석은 CaSiO₃-MgSiO₃-FeSiO₃ 단성분 분류도(Morimoto, 1988)에, 감람석은 Mg₂SiO₄-Fe₂SiO₄ 성분도(Deer *et al.*, 1972)에, 각섬석인 경우에는 (Ca + Na)B에 대한 NaB 비에 대한 분류도(Leak, 1978)에 도시해 보았다.

사장석

테사이트질~유문암질 용결 회유용회암 시료 0725-5와 E01에 나타나는 사장석 반정은 Or-Ab-An 단성분 분류도에서 안데신(andesine; An_{30.1-37.3}) 영역과 올리고클래이스(oligoclase; An_{18.3-28.5}) 영역에 도시된다(Fig. 3a).

현무암류 시료 0725-2, 0725-6, 0725-7을 Or-Ab-An 단성분 분류도에 도시해 보면, 하부현무암에서 반정으로 산출되는 것은 비토우나이트(An_{75.7-82.7})와 라브라도라이트(An_{57.3-65.4})의 영역에 해당되며, 기질부에 나타나는 사장석 래쓰 성분은 라브라도라이트(An_{52.9}) 영역에 해당된다. 상부현무암에서 나타나는 사장석 반정은 An_{56.5-57.4}의 라브라도라이트 영역에 도시된다(Fig. 3b). 하부현무암에 나타나는 누대구조는 An_{82.7} → An_{61.8} → An_{59.0}로 변화되는 정상누대구조(normal zonal texture)를 보이는 것과, An_{78.0} → An_{75.7} → An_{57.3} → An_{59.5}로 정상누대구조에서 역누대구조(reverse zonal texture)로 변화되는 것이 나타나며, An_{64.4} → An_{81.8} → An_{64.4} → An_{59.6}로 변화되어 역누대구조에서 정상누대구조로 변하는 것도 나타난다.

휘석

테사이트질~유문암질 용결 회유용회암은 반정과 미반정으로 단사휘석과 사방휘석 모두를 가진다. 단사휘석의 조성은 반정이 Wo_{41.46-43.33}En_{42.98-42.46}Fs_{15.56-14.21}, 미반정은 Wo_{41.27-42.80}En_{42.45-42.83}Fs_{16.28-14.37}로 모두 보통휘석(augite) 영역에 해당된다. 사방휘석은 반정은 Wo_{2.49-2.64}En_{67.70-68.55}Fs_{28.80-29.81}와 Wo_{2.35-2.56}En_{65.53-67.26}Fs_{30.39-31.91}로 브론자이트~하이퍼신의 영역에 걸쳐서 나타나며, 미반정 역시 Wo_{2.20-3.11}En_{67.58-67.97}Fs_{29.31-29.83}와 Wo_{2.28-2.80}En_{65.80-67.72}Fs_{30.01-31.40}로 브론자이트~하이퍼신의 영역에 걸쳐서 나타난다(Fig. 4a).

현무암류는 단사휘석과 사방휘석을 모두 가지는 양휘석(兩輝石) 현무암(two-pyroxene basalt)이다. 하부현무암의 단사휘석은 반정, 미반정으로 산출될 뿐 아니라 기질부에서도 나타나며, 그 조성은 반정이 Wo_{38.89-39.46}En_{46.11-45.49}Fs_{15.01-15.06}, 미반정은 Wo_{29.62-39.67}En_{49.61-44.55}Fs_{20.78-15.78}, 기질부는 Wo_{40.84-41.81}En_{38.71-36.95}Fs_{20.45-21.24}로 모두 보통휘석 영역에 해당된다. 상부현무암의 단사휘석 미반정의 조성은 Wo_{31.62-40.54}En_{46.48-41.78}Fs_{21.90-17.69}이며, 사방휘석 반정의 조성은 Wo_{4.46}En_{68.24}Fs_{27.30}의 브론자이트 영역과 Wo_{0.98}En_{61.81}Fs_{37.21}의 하이퍼신 영역에 걸쳐서 나타난다(Fig. 4b).

감람석

감람석은 현무암 시료 중 0725-2(반정)와 0725-6(미

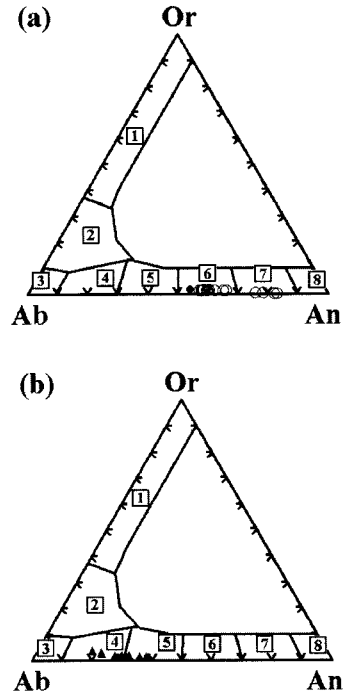


Fig. 3. Or-Ab-An diagram showing plagioclase compositions of the basaltic rocks (a) and crystal-vitric welded ash-flow tuff (b). [1; sanidine, 2; anorthoclase, 3; albite, 4; oligoclase, 5; andesine, 6; labradorite, 7; bytownite, 8; anorthite] (Deer et al., 1972). Symbols [○; phenocryst, ●; matrix (in the basaltic rocks), ▲; phenocryst (in the crystal-vitric welded ash-flow tuff)].

반정, 기질부)에서 나타난다. Mg#값은 반정이 0.63~0.75, 미반정은 0.55~0.57, 기질부에서는 0.53으로 감람석의 크기가 작아짐에 따라 Mg#값이 감소한다(Fig. 5). 반정은 크리솔라이트(chrysolite)와 하이알로시데라이트(hyalosiderite) 영역에 걸쳐서 나타나며, 미반정과 기질부의 감람석은 모두 하이알로시데라이트 영역에 해당된다.

각섬석

테사이트질~유문암질 용결 회유용회암내의 각섬석은 0725-5와 E01의 시료에서 나타나며, 반정과 미반정으로 산출된다. 각섬석의 (Ca+Na)_B에 대한 Na_B 비를 나타낸 분류도에서 반정과 미반정 모두 (Ca+Na)_B ≥ 1.34, Na_B < 0.67인 칼식 각섬석군(calcic amphibole group)에 속한다(Fig. 6a). 이를 칼식 각섬석군을 더 세분하기 위해 Si_T에 대한 Mg/(Mg+Fe²⁺) 비의 분류도에 도시하여 보면, 반정의 성분 영역은 에테나이트(edenite)와 에테나이트 각섬석(edenitic hornblende)에 걸쳐서 나

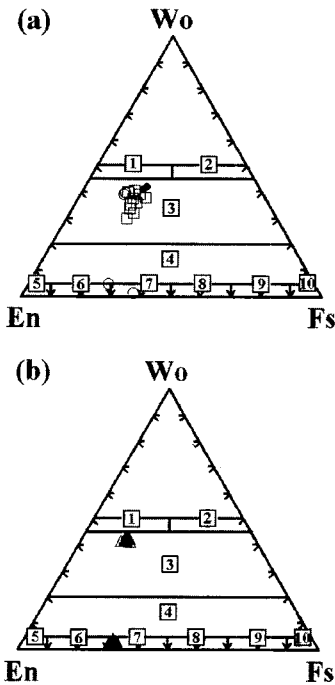


Fig. 4. Pyroxene compositions of the basaltic rocks (a) and crystal-vitric welded ash-flow tuff (b). [1; Diopside, 2; Hedenbergite, 3; Augite, 4; Pigeonite, 5; Enstatite, 6; Bronzite, 7; Hypersthene, 8; Ferrohypersthene, 9; Eulite, 10; orthoferrosillite] (Morimoto, 1988). Symbols [○; phenocryst, □; microphenocryst, ●; matrix (in the basaltic rocks), ▲; phenocryst, △; microphenocryst.(in the crystal-vitric welded ash-flow tuff).

타나며, 미반정은 에테나이트 영역에 속한다(Fig. 6b).

화산활동 양상

어일분지내에서의 초기 화산활동은 감포역암의 퇴적과 동시에 또는 직후에 간헐적인 테사이트질 화산활동이 있었으며, 이로 인해 감포역암 내에는 사장석과 흑운모의 결정편을 포함하는 테사이트질 응회암과 응회질 사암이 협재된다. 그 후 감포역암 퇴적 말기에는, 약 8 m 두께의 측방 연속성이 양호하고 누적라필리를 가지고 백색 부석을 함유한 응회암층의 산출로 보아 큰 규모의 규질 마그마의 분출이 있었던 것으로 사료된다.

어일층의 퇴적 초기에 허부현무암의 분출, 응회질 역암과 사암의 퇴적, 상부현무암의 분출 및 집괴암의 형성 외 현무암질 화산활동이 있었으며, 그 후 응회암을 협재하는 호성퇴적암의 형성이 뒤따랐다. 현무암의 새

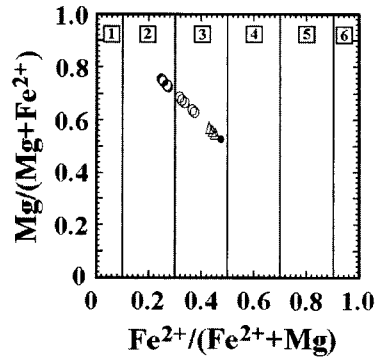


Fig. 5. Fo($Mg/(Mg+Fe^{2+})$) versus Fa($Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$) in olivine from basaltic rocks. [1; Forsterite, 2; Chrysolite, 3; Hyalosiderite, 4; Hortonolite, 5; Ferro-hortonolite, 6; Hayalite] (Deer *et al.*, 1972). Symbols [○; phenocryst, △; microphenocryst, ●; matrix].

끼구조, 화산탄낭구조(최위찬 외, 1988), 그리고 용암류가 일정한 두께로 측방으로 연속성을 보이는 것으로 보아 현무암의 분출 화산작용이 있었음을 짐작할 수 있다.

한편, 페페라이트(윤선 외, 1990), 현무암질 유리쇄설암(hyaloclastite)의 산출과 배계구조의 관찰로부터 현무암의 분출시 분지는 수분을 많이 함유한 육상 또는 얇은 호수였음을 시사한다. 이 현무암 화산작용 직후, 호수는 더욱 깊어져 호성퇴적층을 형성하였고, 그 후 다시 알아져서 송전층의 역암층이 퇴적되었다.

이상에서와 같이, 본 역에서는 퇴적분지의 형성과 동시기에 테사이트질~유문암질의 규질 화산활동이 선행하였으며, 곧이어 현무암질 화산활동이 일어났음을 알 수 있다.

고찰

본 역에서 산출되는 암석은 크게 현무암과 규질 화산암류로 구분된다. 즉 안산암에 해당되는 중성 화산암류(SiO_2 56~67wt.%)가 결핍되어 나타나므로, 쌍모식(bimodal) 화산활동의 특성을 나타낸다. 이러한 쌍모식 화산활동은 일반적으로, 맨틀에서 유래된 현무암질 마그마와 지각 암석의 부분 용융에 의해 형성되는 더욱 규질의 마그마 사이의 밀접한 관계로 인해 화산 도호에서 흔히 일어나는 현상이다. 전혀 다른 기원을 가지는, 즉 맨틀에서 기원되는 현무암과 허부 지각에서 기원되는 규질 화산암이 어떻게 관련되는가에 대해서는, 1200~1300°C의 높은 온도에서 맨틀로부터 유래된 현무암질 마그마의 열이 마그마가 상승하는 과정에서 지

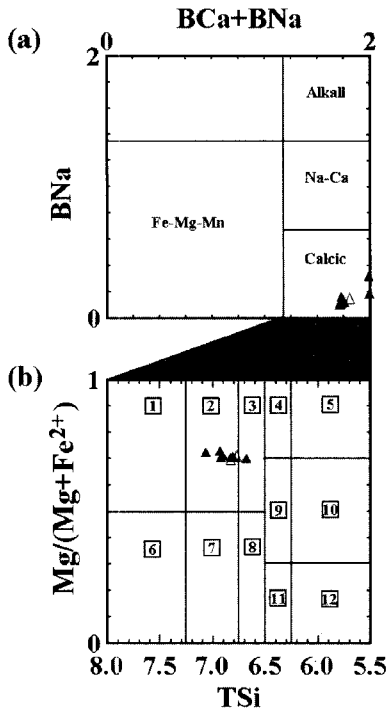


Fig. 6. (a) Classification of amphiboles according to Na_B vs. Na_B+Ca_B for the crystal-vitric welded ash-flow tuff (Leake, 1978). (b) Classification of calcic amphiboles according to $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ vs. SiT for the crystal-vitric welded ash-flow tuff in the study area (Hawthorne, 1981). [1; silicic edenite, 2; edenite, 3; edenitic hornblende, 4; pargasitic hornblende, 5; pargasite, 6; silicic ferro-edenite, 7; ferro-edenite, 8; ferro-edenitic hornblende, 9; ferroan pargasitic hornblende, 10; ferroan pargasite, 11; ferro-pargasitic hornblende, 12; ferro-pargasite]. Symbols [▲; phenocryst, △; microphenocryst].

각을 부분적으로 용융시킬 수 있으며, 이로 인해 규질의 마그마가 형성된다고 설명하는 것이 일반적이다. 따라서 쌍모식 화산활동은 열개(rifting) 환경에 관련지을 수 있으며, 한반도에서 이러한 열개 환경은 동해의 열림(opening)과 관련지어 생각할 수 있다.

본 역에서의 쌍모식 화산활동에 부분적으로 마그마 혼합이 작용하였다는 것을 알 수 있다. 즉 다른 조성의 마그마들 사이의 혼합이 빈번하게 일어났다는 것에 대한 증거의 하나는 구성 광물의 불균형을 들 수 있다. 본 역에서 산출되는 규질 화산암류에서는 사방휘석과 단사휘석 반정이 나타난다. 일반적으로 평형 상태의 규질 마그마계에서는 염기성 광물인 휘석이 극히 드물게 나타난다. 따라서 이는 맨틀에서 상승하던 현무암질 마그마에 의한 영향이라고 생각할 수 있다. 이와 마찬가지로

지로 현무암에는 감람석, 유리질 물질, 그리고 사방휘석과 수반된 용식된 석영 반정이 관찰된다. 일반적인 경우 염기성암에서 감람석과 공존하는 석영 반정을 관찰하기란 쉽지 않다. 그러므로 이것 역시 맨틀에서 상승하던 현무암질 마그마가 하부 지각 기원의 규질 마그마와 혼합된 것으로 생각할 수 있다.

결론

한반도 동남부 어일분지내 충전물의 특징과 암상변화, 화산물질의 암석학적 연구를 통해 화산활동 양상 및 마이오세 지각변형과 화산활동과의 연관성을 살펴본 결과는 다음과 같다.

화산암 암상으로는 규질암인 테사이트질~유문암질 용결 회류용회암과 부석을 함유하는 응회암이 있으며, 염기성암인 현무암이 산출되며, 중성 성분이 결여된 쌍모식 화산활동의 양상을 나타낸다.

어일분지에서 일어난 쌍모식 화산활동은 구성 광물상의 불균형으로부터 부분적으로 마그마의 혼합이 작용하였음을 시사해준다. 현무암에서 감람석, 사방휘석이 수반된 용식된 석영 반정이 관찰되고, 테사이트질~유문암질 용결 회류용회암에서 단사휘석과 사방휘석 반정이 관찰된다. 이는 조성을 달리하는 마그마들 사이의 혼합이 있었던 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문을 읽고 유익한 비평과 조언을 주신 한국해양연구소 이종익 박사과 익명의 심사자, 그리고, 전북대 오창환 교수에게 감사드린다.

참고문헌

김광호, 도성재, 1994. 양남분지에 분포하는 제 3기 지층의 고지자기 연구. 지구과학회지, 15권, p. 36-45.
 김근수, 김종열, 정규귀, 황진연, 이준동, 1995. 경상북도 경주-감포 일원에 분포하는 화강암류의 Rb-Sr 연대. 지구과학회지, 16권, p. 272-280.
 김봉균, 1964. 연천 및 포항지구의 현무암에 대한 고자기 연구. 지질학회지, 1권, p. 50-56.
 김봉균, 1970. 한국의 신제3기 퇴적층에 관한 연구. 지질학회지, 6권, p. 77-96.
 김봉균, 정창희, 김수진, 1975. 경북 영일 지역에 발달하는 갈탄층의 층서적 연구. 지질학회지, 11권, p. 240-252.
 김봉균, 윤 선, 1978. 한국 포항분지 신 제3기층 최상부의 연체 동물 화석. 지질학회지, 14권, p. 1-12.
 김영라, 임성아, 고정선, 윤성효, 2000. 우리 나라 동남부

- 제3기 양남분지와 장기지역 내의 화산암류의 암석학적 연구. 2000년도 한국암석학회·한국광물학회 공동학술발표회 논문집, p. 17.
- 김인수, 강희철, 1989, 어일분지 일대에 분포하는 제3기 층에 대한 고자기학적 연구. 지질학회지, 25권, p. 273-293.
- 민경덕, 김원균, 이대하, 이윤수, 김인수, 이영훈, 1994, 포항일원에 분포하는 제3기 암류에 대한 고자기 연구. 자원환경지질, 27권, p. 49-63.
- 박선애, 1993, 경북 연일 지역에 분포하는 신생대 제3기 화산암류에 대한 암석학적 및 암석화학적 연구. 경북대학교 대학원 박사학위 논문. 109 p.
- 박주희, 김춘식, 김진섭, 성중규, 김인수, 이준동, 백인성, 1999, 장기 지역에 분포하는 중생~염기성 용암에 관한 암석학적 연구(I): 일반 지질 및 암석화학적 특징. 암석학회지, 8권, p. 149-170.
- 손문, 김인수, 1996, 남한 제3기 분지지역에 대한 고자기 연구: 2. 포항분지 중부의 현무암질암. 자원환경지질, 29권, p. 369-380.
- 손문, 김인수, 옥수석, 2001, 한반도 동남부 제3기 마이오세 어일분지내 동지형 화산암류구조. 암석학회지, 10권, p. 121-131.
- 위수민, 이선구, 1999, 양남분지 내에 분포하는 제3기 화산암류에 대한 지화학적 연구. 지구과학회지, 20권, p. 423-436.
- 윤선, 1988, 한반도 남부의 제3기 층서. 한국과학재단 연구보고서, 25 p.
- 윤선, 황진연, 차연정, 1990, 한국 제3기 양남분지의 페페라이트 -1. 매곡의 페페라이트-. 지질학회지, 26권, p. 187-194.
- 윤성효, 김진섭, 옥수석, 홍현근, 김형식, 1994, 영일반도 일원의 화산암류에 대한 암석학적 연구. 지구과학회지, 15권, p. 126-138.
- 이문원, 원종관, 노진환, 1986, 구룡포 지역의 지질 및 화산암류에 대한 연구. 한국지구과학회지, 7권, p. 11-17.
- 이문원, 원종관, 김광호, 노진환, 1988, 구룡포 지역에 분포하는 신생대 화산암의 지질과 암석학적 연구. 지질학회지, 24권, p. 1-15.
- 이현구, 문희수, 민경덕, 김인수, 윤혜수, 板谷徹丸, 1992, 포항 및 장기분지에 대한 고자기, 층서 및 구조연구: 화산암류의 K-Ar 연대. 광산지질, 25권, p. 337-349.
- 장기홍, 1985, 한국지질론. 민음사, 270 p.
- 진명식, 김성재, 신성천, 1988, K-Ar 및 횡선트랙법에 의한 포항-감포 일대 화산암류의 암석연령 추정연구. 연구보고서 KR-87-27 동위원소 지질연구. 한국동력자원연구소, p. 51-88.
- 최위찬, 황재하, 윤 옥, 김동학, 1988, 대한민국 지질도 어일(1:25,000) 도폭 및 도폭설명서. NI 52-2-07-4, 한국동력자원연구소, 도폭연구실, 42 p.
- Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J., 1972, Rock forming minerals Vol. 1, ortho- and ring silicates. Longmans, Group Ltd, London, England, p. 77-112.
- Hawthorne, F., 1981, Crystal chemistry of the amphiboles. Min. Soc. Ame. Reviews in Mineralogy, Vol. 9A, 102 p.
- Kim, K. H., Won, J. K., Matsuda, J., Nagao, K. and Lee, M. W., 1986, Paleomagnetism and K-Ar age of volcanic rocks for Guryongpo area. Jour. Kor. Inst. Min. Geol., Vol. 19, p. 231-239.
- Leak, B. E., 1978, Nomenclature of amphiboles. Mineral Magazine, Vol. 42, p. 533-563.
- Lee, Y. G., 1975, Neogene diatoms of Pohang and Gampo areas, Kyongsangbug-do, Korea. Jour. Geol. Soc. Korea, Vol. 11, p. 99-114.
- Lee, Y. G., 1976, Fossil diatoms in the upper part of the Eoil Formation, Eoil area, Gyeongsangbuk-do, Korea. Jour. Kor. Inst. Min. Geol., Vol. 9, p. 77-84.
- Morimoto, N., 1988, Nomenclature of pyroxenes. Amer. Min., Vol. 73, p. 1123-1133.
- Nelson, S.T. and Montana, A., 1992, Sieve-textured plagioclase in volcanic rocks produced by rapid decompression. Ame. Min., Vol. 77, p. 1242-1249.
- Shimazu, M., Kawano, Y. and Kagami, H., 1990, Major and minor element compositions and Sr, Nd isotope ratios of basaltic rocks from the Pohang-Yangnam area, Korea. J. Min. Petr. Econ. Geol., Vol. 85, p. 405-415.
- Son, M., Seo, H. J. and Kim, I. S., 2000, Geological structures and evolution of the Miocene Eoil Basin, southeastern Korea. Geos. Jour., Vol. 4, p. 73-88.
- Song, S. H., Lee, H. K. and Yun, H. S., 1997, Petrogenesis of the Tertiary volcanic rocks from the southeastern part of Korea. Tectonic Evolution of Eastern Asian Continent: Short papers for the International Symposium on the occasion of the 50th Anniversary of the Geol. Soc. Korea, p. 219-224.
- Song, S. H., Lee, H. K. and Yun, H. S., 1998, Petrogenesis of the Tertiary volcanic rocks from the southeastern part of Korea. Jour. Min. Petr. Econ. Geol., Vol. 93, p. 441-461.
- Tateiwa, I., 1924, Geological Atlas of Chosen. No. 2, Enrichi, Kyuroho and Choyo sheets. Geol. Surv. Chosen (in Japanese).
- Yoon, S., 1986, Tectonic history of the Tertiary Pohang and Yangnam basins, Korea. Essays in Geology Professor Nobu Kitamura Commemorative Volume. p. 637-644.

(2004년 3월 25일 접수; 2004년 6월 18일 채택)