

제주도 우도 tholeiite 현무암에 대한 암석학적 연구

고정선^{1*}, 윤성효¹, 현경봉¹, 이문원², 길영우³

1. 부산대 지구과학교육과(jskoh812@pusan.ac.kr)

2. 강원대 과학교육학과,

3. 한국기초과학지원연구원 나노소재팀

1. 서론

제주도는 해안 가까이에 여러 개의 아주 작은 부속 섬들을 거느리고 있다. 이들 섬 중 가장 큰 것이 우도(牛島)이며, 제주도 동쪽 끝 성산포항으로부터 북동쪽으로 약 3km 지점에 위치한다. 우도 화산체는 일윤회(一輪廻) 분출에 의해 형성된 단성화산(單成火山)으로 이의 화산과정이 비교적 상세히 밝혀져 있고(황상구, 1992, 1993), 응회구의 퇴적학적 연구가 상세히 연구되어졌다(Sohn, 1992). 그러나, 우도의 대부분을 차지하며 분포하는 우도 소머리현무암(원종관 외, 1993)은 1:50,000 성산도폭 지질도에 기재된 후 현재까지 화산암석학적 연구는 자세하게 이루어지지 않고 있다. 본 연구는 우도에 넓게 분포하는 현무암의 암석기재적 특징과 주구성광물의 화학성분을 알아보고자 함을 목적으로 한다.

2. 지질개요

우도는 섬의 남동부에 분화구가 위치하며, 이의 동쪽과 남쪽 외곽부에 응회구, 분화구 중앙에 분석구, 섬의 대부분에 현무암 용암삼각주로 연속되는 일윤회 분출물로 구성되는 단성화산도(monogenetic volcanic island)이다(황상구, 1993).

우도 화산체 하위의 구성암층은 응회구를 이루는 응회암층 속에 포함되어 있는 유질(類質)과 이질(異質) 암괴(block)로부터 추정할 수 있다. 유질 암괴는 대부분 현무암질로 구성되며 이질 암괴는 백악기 용결응회암, 응회암과 흑운모화강암이 포함된다(Kim *et al.*, 1986).

우도응회구(凝灰丘: tuff cone)는 대부분 현무암질 성분의 라필리응회암과 응회암으로 구성되며, 이들은 화산회, 라필리, 화산탄, 암괴 등을 다양한 비율로 포함한다. 분석구(cinder cone)는 응회구 분화구 내부의 중심부에 놓인다. 이의 표층부는 모우트(moat)에 채워진 현무암류에 의하여 피복되며, 이의 기저부에 가까운 것이 남서측 해안절벽의 현무암 아래에 아주 작게 노출되는 데, 응회구와는 환상단층에 의해 경계지워진다. 분석구의 구성원은 표층부에서는 암회색 내지 암갈색의 암괴와 스패터(spatter) 등이고 이의 약간 아래쪽에서는 다량의 분석(cinder)으로 구성되며, 이들은 스트롬볼리안분출상에 의한 산물이다.

용암삼각주를 이루는 현무암질 용암류는 응회구와 분석구 사이의 모우트에 채워져 용암연을 형성하다가 응회구의 북서쪽으로 뻗어 나가서 만든 것으로 우도화산체의 대부분을 차지한다. 이 용암의 표면은 로피구조(ropy structure)가 잘 발달되어 있는 유동성이 큰 파호이호이용암(pahoehoi lava)이며, 로피구조에 의한 이동방향의 추적에 의하면 현무암질 용암의 기원지는 분석구의 방향이다. 본 현무암류를 성산도폭(1/50,000: 원종관 외, 1993)에서는 기저부의 2단계 온평리알칼리현무암과 그 상위의 3단계 소머리현무암으로 구분하여 기재하였다. 그러나 본 연구결과를 종합하여 보면, 현무암류는 우도응회구의 분화구로부터 나온 단일 용암류로 판단되어 용암삼각주를 형성하는 전체 현무암을 소머리현무암으로 칭한다(Fig. 1).

소머리현무암(시료 405-9)에 대한 전암 K-Ar연대가 0.114±0.003Ma(Table 1)로 우도화산체에서의 화산활동 시기는 후기 플라이스토세에 해당한다.

제이동테프라층은 응회구의 외측부의 북동사면과 내측부의 대부분의 지역에 분포한다. 이

는 응회구 사면의 급경사가 끝나는 부분으로부터 비교적 완경사의사면과 현무암질 용암위를 부정합으로 덮으며 완만한 경사의 재이동층을 형성한다.

Table 1. K-Ar whole rock age determination of the basalt lava from Udo, Jeju Island, Korea.

Sample	K(%)	Wt(g)	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	^{40}Ar radiogenic	air(%)	^{40}Ar radiogenic ($\times 10^{-8}$ ccSTp/s)	$\Delta 40$ radiogenic ($\times 10^{-8}$ ccSTp/s)	T(Ma) $\pm\Delta T$
405-9	0.383	0.12482	296.418	2.1E-10	99.69	0.16943	0.00065	0.114 \pm 0.003
Date: 2003-09-26								
Lab: KBSI(Korea Basic Science Institute)								

3. 현무암의 암석기재

우도화산체내의 용암삼각주와 용암연에 분포하는 소머리현무암에 대한 암석기재는 아래와 같다. 야외조사 결과 신선한 현무암에 대한 현미경 관찰을 하였으며, 결정의 크기에 따라 반정(0.7 mm 이상), 미반정(0.1~0.7 mm), 그리고 석기(0.1 mm 이하)로 구분하여 암석 기재 및 모드 분석을 하였다. 정밀한 광물 조합과 함량을 알아보기 위해 2000점 모드 분석을 실시하였다.

채취한 시료들의 대부분은 다공질(기공의 함량은 5.1~18.2%)로 반상조직이 뚜렷하지 않으나, 시료 채취 위치에 따라 기공의 함량과 반정 및 미반정 입자의 크기는 약간씩 차이가 난다. 전반적으로 석기(groundmass)의 목편상(lath)의 사장석의 결정 크기가 커져 미반정의 감람석, 휘석의 크기와 비슷할 정도로 다른 시료 내의 미반정과 구별의 의미가 없어질 정도로 사장석의 함량이 많아진다. 이러한 조직의 형태는 제주 동부지역의 전형적인 솔레이아이트 암석에서 나타나는 조직과 유사한 양상을 보여준다.

현미경 관찰 결과, 전체적으로 약한 반상조직(porphyritic texture)을 가지고 있으며, 반정 광물은 주로 감람석, 사장석, 사방휘석으로 구성되며, 드물게 반정과 미반정으로 단사휘석이 산출된다. 대부분의 암석이 5% 이상의 반정과 미반정 결정을 포함하며, 20%에 달하는 경우도 있다. 석기들은 주로 목편상의 사장석과 아원형 내지 단주상의 단사휘석, 감람석 및 이들 사이를 채우는 불투명 광물들로 구성되어 있다. 몇몇의 시료에서는 침상의 불투명 광물이 나타나기도 하며 그 함유량은 시료에 따라 다양하다. 야외 조사와 현미경적 관찰 결과, 본 연구지역은 전체적으로 암석 시료에 따라 입자의 크기가 달라지는 것 외에 각 암석들에서 나타나는 조직은 거의 유사하다. 석기 부분은 감람석과 휘석과 같은 매픽광물(mafic mineral)이 목편상의 사장석 결정 사이의 공간을 채우고 있는 입간상 조직(intergranlar texture)과 소량의 유리질이 석기를 이루고 있는 미정질의 사장석, 휘석, 감람석 결정 사이를 채우고 있는 인터서털(intersetal) 조직을 나타내고 있다.

사장석은 시료에 따라 반정으로 나타나지 않는 경우도 있으며 대부분의 경우 미반정으로 산출된다. 이러한 반정과 미반정 결정은 대부분 알바이트쌍정(albite twin) 혹은 알바이트-칼스바드 쌍정(albite-Carlsbad twin), 및 진동누대구조(oscillatory zoning)를 나타낸다. 반정과 미반정의 사장석은 대개 주상형이며, 서브이퀀트형(subequant)나 쐐기형(wedge)으로 산출되기도 한다. 반정 결정은 부분적으로 용식(resorption)되어 불투명광물과 휘석으로 채워져 있는 체(sieve) 구조를 보이거나, 혹은 용융이 아주 많이 진행되어 결정을 구분하기 힘들 정도로 결정 전체가 용식되어 있는 조직이 자주 발견되기도 하는데, 이는 부분적으로 사장석 반정들이 비평형 상태였음을 의미하기도 한다. 석기의 사장석은 알바이트 쌍정으로 주로 목편상

(lath)상으로 나타난다.

감람석은 반정과 미반정 및 석기를 이루고 있다. 주로 아원형의 타형이 우세하며 간혹 자형으로 나타나기도 한다. 대부분 균열이 발달되어 있으나 전체적으로 신선하게 나타난다. 드물게 자형의 외곽구조를 가진 골격구조(skeletal texture)가 나타나기도 한다. 간혹 변질에 의해 균열을 따라 혹은 외곽부가 이딩사이트(iddingsite)화되어 있기도 한다. 현미경적 관찰과 EPMA 분석 결과, 드물게 석기 부분의 감람석 결정의 외곽부가 멜트(melt)와의 반응에 의해 만들어진 Ca-poor 단사회석(정확하게 EPMA 분석 결과에 의하면 pigeonite에 해당)으로 되어 있기도 한다.

사방회석은 많은 박편에서 반정과 미반정 광물로서 산출되고 있다. 단주상의 반정과 미반정이 우세하나, 긴 주상의 형태도 간혹 관찰된다. 대부분의 반정과 미반정의 외곽부를 현미경으로 자세히 관찰하면 melt와 반응에 의해 다소 용융된 조직을 나타낸다. 미반정의 사방회석이 멜트(melt)와 반응에 의해 용융된 불규칙한 외곽부 주위를 감람석이 성장하여 둘러싸고 있거나 혹은 단사회석에 의해 둘러싸여 있는 경우도 관찰된다. 또한 석기에서도 드물지만 사방회석이 나타나기도 하는데, 미반정과 마찬가지로 결정의 외곽부 주위에 미정질의 단사회석이 부분적으로 불규칙하게 성장하여 있는 것이 관찰된다. 단사회석의 반정과 미반정은 대부분의 시료에서는 나타나지 않으며, 현미경적 관찰에 의해 일부 시료에 드물게 나타난다. 석기를 이루고 있는 회석은 주로 아원형 내지 단주상의 결정들로 나타나며, 석기의 목편상의 사장석 결정들에 의해 부분적으로 둘러싸여 있는 서브오피틱(subophitic) 조직을 나타내기도 한다.

불투명광물(Fe-Ti 산화광물)은 대개 석기 입자로서 석기를 이루고 있는 감람석, 회석, 사장석의 간극을 채우는 형태로 나타나지만, 일부 시료에서는 침상의 형태로 나타나기도 한다.

4. 주요 조암광물의 광물화학 조성

분석된 주요 조암광물은 사장석, 감람석, 회석(사방회석, 단사회석), 불투명광물 등이다. 대부분의 분석된 시료에서 각 광물의 성분은 거의 균질한 성분을 가진다. 하지만 성분 누대구조를 가지는 반정은 중심부(core)와 연변부(rim)로 구분하였다. 각 광물의 성분 변화는 반정 또는 미반정과 석기에 따라 구분하여, 단성분 분류도에 나타내었다.

4-1. 사장석

연구 지역내의 사장석 성분을 An-Ab-Or 삼각도에 도시해 보면 석기의 목편상 사장석과 미반정의 대부분이 라브라도라이트 영역에 해당한다. 즉, 미반정은 An_{66~49}이며, 석기는 An_{65~51}로 거의 모두 라브라도라이트에 해당한다. 시료 405-08, 405-14에서 미반정은 각각 중심부(An₆₃)에서 주변부로 갈수록 증가하다가(An_{66~64}) 다시 An₅₈로, 중심부(An₆₄)에서 주변부로 갈수록 감소(An₆₃) 증가하다가(An₆₆) 다시 감소(An₅₅)하다 증가(An₅₉)하는 진동누대구조(oscillatory zonal structure)를 나타낸다. 시료 405-08에서 미반정은 중심부(An_{58~59})에서 주변부로 갈수록 함량이 감소(An₄₈)하는 누대구조를 나타낸다.

4-2. 감람석

분석된 시료 중에는 감람석이 반정으로 나타나는 것과 석기내의 작은 감람석, 그리고 회석의 반응환을 가진 것이 관찰된다. 반정으로 나타나는 감람석의 대부분은 Fo_{80~77}이며, 미반정은 Fo_{80~78}로 반정과 비슷한 조성을 가진다. 석기의 작은 감람석은 Fo_{74~71}로 반정에 비하여 낮은 MgO 함량을 나타낸다. 그리고 시료 405-08에서 반정 감람석은 중심부(Fo₈₀)에서 주변부로 갈수록(Fo₇₉) Fo함량이 미약하게 감소하는 누대구조를 나타낸다. 시료 405-18에서 단

사회석 반응연으로 둘러싸이는 기질부의 작은 감람석은 Fo₅₈의 성분 조성을 나타낸다.

4-3. 단사회석

분석된 시료 중에는 단사회석은 주로 석기 부분에만 나타난다. 석기를 이루는 작은 결정으로 나타나는 단사회석은 성분 영역이 Wo_{20~35}En_{34~58}Fs_{16~32}로서 보통회석(Mg값은 75~53)에 해당하는 것과 Wo_{7~10}En_{63~69}Fs_{24~28}로 피지오나이트(Mg#=75~70)에 해당하는 것으로 구분되며, 감람석 결정의 반응연으로 산출되는 것은 Wo₁₅En₅₁Fs₃₅로 피지오나이트(Mg#=70)에 해당하는 성분을 나타낸다. 보통회석의 TiO₂의 함량은 0.44~1.68 wt.%로 피지오나이트의 0.25~0.47 wt.%에 비하여 약간 높은 경향을 나타낸다.

4-4. 사방회석

분석된 시료(405-08, 405-11, 405-12) 중에는 사방회석이 반정으로 산출되는 것을 주로 분석하였다. 사방회석 반정은 성분이 Wo_{3.1~4.0}En_{77.4~80.3}Fs_{17.2~20.0}이며, 브론자이트 영역에 해당하고, Mg#는 80~83으로 결정의 중심 부분과 연변부가 거의 균질한 성분을 나타낸다.

4-5. 불투명광물

시료 405-12와 405-18에서 불투명광물은 티탄철석(ilmenite)으로 구성된다. 우도 소머리현무암내의 티탄철석은 TiO₂함량이 49~50wt.%, FeO^T이 47~48wt.%이며, Fe₂O₃-FeTiO₃-MnTiO₃ 성분도에서 MnTiO₃성분영역에 치우쳐 도시된다. 티탄철석내의 Mn비는 박준범과 권성택(1993)에 의한 분석 자료에 비하여 약간 낮은 값을 나타낸다.

5. 결론

우도는 섬의 남동부에 분화구가 위치하며, 이의 동쪽과 남쪽 외곽부에 응회구, 분화구 중앙에 분석구, 섬의 대부분에 현무암 용암삼각주로 연속되는 일윤회 분출물로 구성되는 단성화산도이다. 용암삼각주를 이루는 현무암 용암류는 육안상 반상조각이 뚜렷하지 않으며, 경하에서 사장석, 감람석, 사방회석, 단사회석(보통회석과 피지오나이트), 불투명광물 등으로 구성된다. 사장석은 미반정이 An_{66~49}이며, 석기는 An_{65~51}로 거의 모두 라브라도라이트에 해당한다. 감람석의 반정의 대부분은 Fo_{80~77}이며, 미반정은 Fo_{80~78}로 구성된다. 단사회석은 주로 석기 부분에만 나타나며, Wo_{20~35}En_{34~58}Fs_{16~32}의 보통회석에 해당하는 것과 Wo_{7~10}En_{63~69}Fs_{24~28}로 피지오나이트에 해당하는 것으로 구분된다. 사방회석 반정은 성분이 Wo_{3.1~4.0}En_{77.4~80.3}Fs_{17.2~20.0}이며, 브론자이트 영역에 해당하고 Mg#는 80~83으로 결정의 중심 부분과 연변부가 거의 균질한 성분을 나타낸다. 불투명광물은 티탄철석으로 구성된다.

6. 참고문헌

- 박준범, 권성택, 1993, 제주도 화산암의 지화학적 진화: 제주 북부 지역의 화산층서에 따른 화산암류의 암석기재 및 암석화학적 특징. 지질학회지, 29, 39-60.
- 원종관, 이문원, 이동영, 박계현, 1993, 성산도폭설명서. 제주도청.
- 황상구, 1992, 우도응회구의 분출기구와 분출과정, 암석학회지, 1(2), 91-103.
- 황상구, 1993, 우도 분화구에서의 일윤회 화산과정, 광산지질, 26(1), 55-65.
- Kim, D. H., Hwang, J. H., and Hwang, S. K., 1986, Tuff rings and cones on Jeju Island, Korea., J. Geol. Soc. Korea., 22, 1-9.
- Sohn, Y.K., 1992, Depositional models of basaltic tuff rings and tuff cones in Cheju Island, Korea. Ph. D dissertation, SNU, 121-163.