

한반도 동남부 제3기 연일, 어일분지에 나타나는 현무암질암의 암석학적 연구

심성호¹ · 박병준² · 김태형³ · 장윤득^{1*} · 김정훈^{1,4} · 김정진⁵

¹경북대학교 자연과학대학 지질학과, ²한국석유공사 개발생산1처, ³한국광물자원공사 탐사사업실
⁴한국해양연구원 심해·해저자원연구부, ⁵안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과

Petrology of the Tertiary Basaltic Rocks in the Yeonil and Eoil Basins, Southeastern Korea

Sung-Ho Shim¹, Byeong-Jun Park², Tae-Hyeong Kim³, Yun-Deuk Jang^{1*},
Jung-Hoon Kim^{1,4} and Jeong-Jin Kim⁵

¹Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu, 702-701, Korea

²Dept. of Development & Production 1, Korea National Oil Corporation, Anyang, 431-711, Korea

³Exploration Department, Korea Resources Corporation, Seoul, 156-706, Korea

⁴Deep-sea & Marine Georesources Research Department,

Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan, 425-600, Korea

⁵Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong, 760-749, Korea

요약: 한반도 남동부에 자리잡고 있는 제3기 분지 중에서 장기, 어일 분지에 대한 암석학적인 기제 및 지화학적 자료를 바탕으로 과거 조구조적 위치와 현무암질암을 생성한 기원마그마의 특성을 고찰하였다. 어일 현무암질 암내 사장석 반정에서는 여러 형태의 누대구조와 음식구조 및 체구조가 나타나며 반정의 성분변화에서 핵부분은 $An_{63.46-98.38} Ab_{1.62-32.96} Or_{0.3-58}$ 의 영역(anorthite-labradorite)에 도시되고, 최외각은 $An_{40.89-82.44} Ab_{17.10-46.43} Or_{0-12.68}$ 의 영역(bytownite-labradorite)에 해당한다. 주원소 분석결과, 이들 암석들은 현무암질 안산암 영역에 점시되며, 비알칼리암(sub-alkaline)계열에 해당한다. TAS도에 현무암과 현무암질 안산암의 영역에 점시되며, 비알칼리암(sub-alkaline)계열에 해당한다. SiO_2 값이 커질수록 Na_2O 와 K_2O 는 증가하며 TiO_2 , FeO^* , CaO , MgO , P_2O_5 는 감소하는 경향을 보여준다. K_2O-SiO_2 도표에서도 중-K계열의 칼크알칼리계열에 해당함을 보여준다. 미량원소 및 희토류 원소의 경향은 분화가 진행됨에 따라 Co, Ni, V, Zn, Sc 등과 같은 호정성 원소는 감소하고, Ba, Rb 등의 불호정성 원소들은 증가하는 특징을 보여준다. 0.81~1.00의 Eu/Eu^* 값은 사장석 분별작용이 일부 암석에서는 거의 일어나지 않았거나 사장석의 분별이 약했다는 것을 시사한다. 동위원소 분석결과, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 은 0.704090~0.704717, $^{143}Nd/^{144}Nd$ 은 0.512705~0.512822로서 Nd에 비해 Sr의 변화폭이 크지만 0.0007 내외의 변화폭을 보인다. 이러한 동위원소의 변화는 연구지역 현무암이 해양판의 섭입에 의해 결핍맨틀과 부화맨틀이 혼합되어 형성된 마그마에 기원함을 추정할 수 있게 한다. 동위원소비는 맨틀 경향에 잘 따르며 결핍맨틀(DMM)과 부화맨틀(EM)의 섞임 현상에 의한 맨틀조성을 갖는 마그마에 기원을 두고 있다.

핵심어: 현무암, 칼크알칼리, 맨틀, 섭입, 마그마

Abstract: Eoil basalt in the Eoil basin and Yeonil basalt and its related volcanic rocks in Guryongpo and Daebo area were researched and analyzed to pursue the tectonic settings and magma characteristics of those Tertiary volcanic rocks in the south-east Korean peninsula. It is highly suggested that zoning, resorption and sieve texture in plagioclase and reaction rim in pyroxene indicate unstable tectonic environments and complex volcanism in the study area. Volcanic rocks from Janggi basin are identified as basalt and basaltic

*Corresponding author

Tel: 053-950-5358

E-mail: jangyd@knu.ac.kr

andesite in TAS diagram and sub-alkaline series in terms of magma differentiation. Na_2O and K_2O show positive trend however FeO , CaO , MgO and P_2O_5 indicate negative trend in Harker variation diagram with SiO_2 . Basaltic rocks from Eoil area are identified as calc-alkaline series in AFM diagram and show medium K series calc-alkaline in K_2O - SiO_2 diagram. Compatible trace elements of Co, Ni, V, Zn, and Sc in Yeonil basalt show negative trend with crystallization but incompatible trace element of Ba, Rb show positive trend with SiO_2 . 0.81~1.00 of Eu/Eu^* value suggests minor effect of plagioclase fractionation in Yeonil basaltic rocks. Plagioclase composition of Eoil basalt ranges from $\text{An}_{63.46-98.38}$ $\text{Ab}_{1.62-32.96}$ $\text{Or}_{0-3.58}$ (anorthite-labradorite) in core to $\text{An}_{40.89-82.44}$ $\text{Ab}_{17.10-46.43}$ $\text{Or}_{0-12.68}$ (bytownite-labradorite) in rim. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ranges 0.704090~0.704717 and 0.512705~0.512822 respectively. Negative linear trends in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ correlation diagram indicate that magma produced Yeonil basalt and basaltic andesite has been originated as partial melting product of mantle wedge by subducting Pacific plate affected by oceanic crust with less effect of continental crust indicating calc-alkaline magma characteristics.

Key words: Basalt, Calc-alkaline, Mantle, Subduction, Magma

서론

한반도 남동부에서 관찰되는 신생대 제3기의 화산 활동은 에오세에서 마이오세 말 (54 Ma-4.6Ma)까지 공간적으로 제한된 여러 지역에서 분포하며, 시간적으로는 매우 간헐적으로 나타난다. 에오세에는 주로 규질의 화산암이 분출하였고, 그 이후에는 소량의 규질 화산암을 수반한 염기성-중성 화산암의 분출 또는 관입하는 활동이 있었다. 특히 이 시기는 동해의 열림이 있었던 시기로 환동해 지역의 지구조 운동 및 그와 관련된 화성활동에도 큰 영향을 주었던 것으로 알려져 있으며(김봉균, 1970; 윤선 외, 1991; 손문 등, 2001; 김진섭 등, 2002), 한반도에서의 화성활동 및 화성암의 암석학적, 지화학적 특성은 중요한 의미를 갖는 것으로 사료된다. 이들 신생대 화산암은 주로 현무암, 현무암질 안산암 및 용회암 상태로 산출되고, 둥근 원형의 분포를 가지며, 연변부에서는 진주암이나 그들 암편이 함유되는 곳도 있다. 일반적으로 이들 용회암질 암석은 속성작용으로 유리질 화산회가 제올라이트와 스�멕타이트로 변질되어 고령석광상을 이룬 곳도 있다. 한반도 남동부의 화산암류들은 지역적·시기적·학술적인 중요성을 가지고 있고, 판구조론에 입각하여 동해가 섭입대 후방의 배호분지로 생성되었는지 등의 여러 가지 사건의 증거가 될 수 있는 위치에 존재한다. 이에 따라 제3기 분지의 구룡포와 장기지역 및 어일분지 지역에서 제 3기 화산암에 관한 암석학적인 연구가 지속적으로 수행되어 왔지만(Kim *et al.*, 1986; 이문원 외, 1986, 1988; 윤성호 외, 1994, 2000; 박주희 외, 1999b; Song *et al.*, 1997; 김진섭 외, 2002; 이정현 외, 2004), 여전

히 이 지역 각 화산암의 층서 및 세부적인 연구는 아직 많이 부족한 상태이다. 본 연구에서는 한반도 남동부 해안에 위치한 제3기 분지들 중 어일 분지 내에 분포하는 어일 현무암과 포항분지 중 구룡포, 대보일대에 분포하는 연일 현무암을 비롯한 화산암류에 대한 암석학적인 기재 및 지화학적 자료를 바탕으로 연구 지역의 암석학적 특성 및 과거 조구조적 위치와 현무암을 생성한 기원마그마의 특성을 파악하는데 중점을 두고자 한다.

지질개요

제3기 장기분지에 대한 연구는 Tateiwa(1924)가 최초로 실시하였고, 퇴적암층의 성질, 식물화석 등에 기초하여 초기 올리고세로 추정하여 크게 하부의 장기층군과 상부의 범곡리층군으로 나누고, 이를 제4기의 연일 현무암이 부정합적으로 피복된다고 하였다. 그러나 Huzioka(1972)는 대형식물화석에 근거로서, 김봉균 외(1975)는 포자 및 화분화석에 근거하여 장기층군의 시대를 초기 마이오세(23-16Ma)로 추정하였고, Yoon(1986, 1989, 1991)은 Tateiwa(1924)와 달리 하부를 범곡리, 상부를 장기층군으로 재정의 하였다. 윤선 외(1991)와 박성준(1988)은 장기지역의 제3기 퇴적암류를 상부의 망해산층과 하부의 오천층으로 구분하였고, 두 층은 부정합으로 보았다. 장기분지의 기반암인 에오세 전기-중기의 화산암류는 왕산층이라고 총칭되며, 석영 안산암, 석영 안산암질 용결 용회암 및 화산각력암으로 구성되어 있다고 보았다(Yoon, 1989; Shimadzu *et al.*, 1990; 윤선 외, 1991). 이현구 외(1992)는 제4기 연일 현무암(Tateiwa, 1924)

으로 기재된 현무암의 K-Ar 연대가 초기 마이오세 (23-16 Ma)임을 밝히고 이들을 장기층군의 퇴적과 같은 시기의 화산활동에 의한 것이라고 주장하였다.

연일 현무암에 해당하는 화산암류는 구룡포와 오천, 모포, 양포 일대에 산재되어 분포하고 주로 산능선부 또는 산봉우리를 중심으로 고지를 형성하고 있다. 또한 고제3기의 산성 화산암류의 기반암위에 부정합 관계로 퇴적된 신제3기 마이오세의 퇴적암과 화산암류로 구성되어 있고(Yoon, 1989), 신제3기 지층은 많은 단층의 영향으로 지층이 반복되거나 교란되어 분포한다(노진환, 1989). 그 중 신제3기 지층은 하부로 늘대리 응회암, 하부 함탄층 하부 현무암질암, 상부 함탄층, 금오리 응회암, 연일현무암 및 양휘석 안산암, 상부 현무암질암, 방산리 진주암, 망해산 응회암으로 구성되어 있다(박주희 외, 1999). 늘대리 응회암과 연일 현무암은 이 지역에서 비교적 높은 구릉을 이루며 분포하고 양자 간의 관계는 야외에서 분명한 관입관

계와 암상의 현격한 차이로 쉽게 구분된다. 그 중 늘대리 응회암은 화학조성, 구성광물 및 조직의 특징을 근거로 안산암류, 진주암질 데사이트 및 진주암, 각력질 데사이트, 유문암류 등으로 구분되나 야외에서 이들 간의 선후 관계는 분명하지 않다.

어일 분지는 경북 경주시 감포읍 양북면의 동부 일원에 위치하며, 길이 약 12 Km, 최대 폭 약 5 Km인 북동 방향의 함몰지로서 북동 방향이 우세한 수 개의 단층으로 구획된 여러 개의 지구(graben)내지 반지구(half-graben)로 구성된다(손본 외, 2001). 분지 내에는 현무암, 안산암등의 화산암류가 광범위하게 분포하지만(Fig. 1), 제3기 분지의 기저암인 경상계 퇴적암의 상부에는 응회질암들과 함께 산출되며 어일 도폭 북부에 주로 분포하고 있다. 이들은 감포 역암층 상부로부터 나타나기 시작하여 호암리층까지 모든 제3기 지층에서 퇴적암들을 동반 산출되며, 어일리 일대에 산재하여 분포하고 주로 고지를 형성하고 있다. 어일

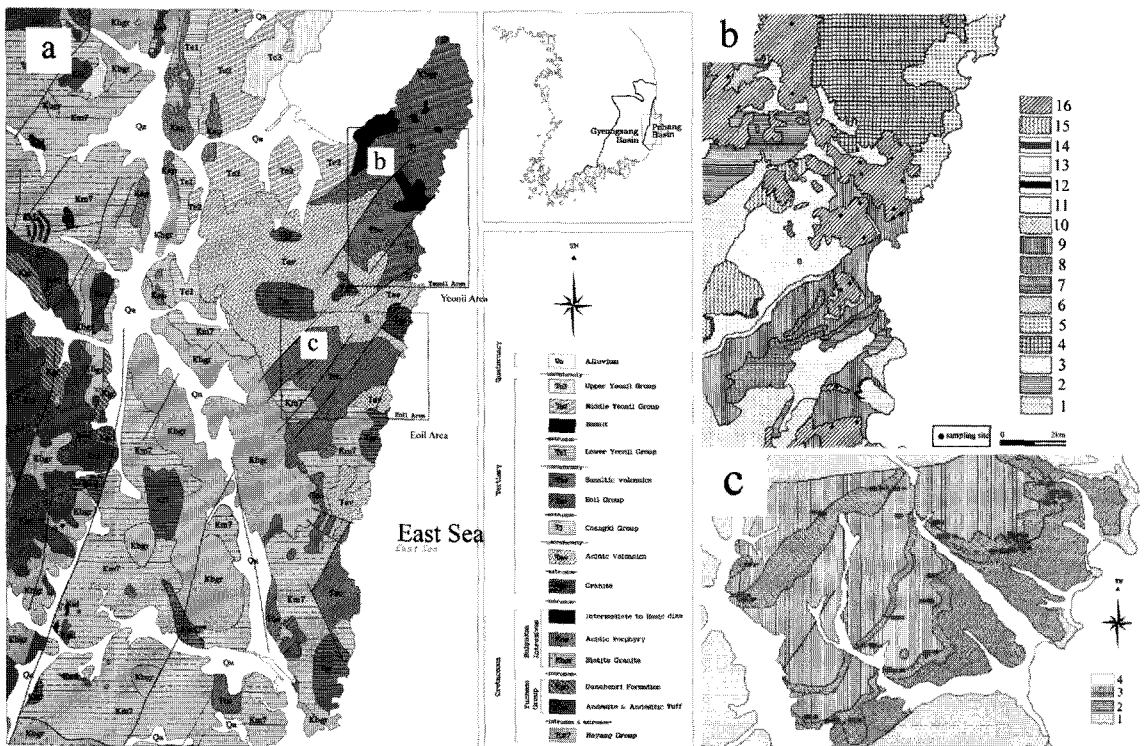


Fig. 1. Geological and sample location maps around Yeonil and Eoil area. (a) Geologic map of study area modified from 1/250,000 Busan geologic map (b) Geologic map of Yeonil area modified from Tateiwa(1924). 1. Gyungsang group 2. Janggi conglomerate 3. Nuldaeri trachytic tuff 4. Nuldaeri trachyt 5. Guryongpo andesite 6. Sinjeongdong andesite 7. Lower coal bearing Fm. 8. Lower basaltic tuff 9. Upper coal bearing Fm. 10. Geumori andesitic tuff 11. Upper basaltic tuff 12. Changam perlite 13. Changam andesite or andesitic tuff 14. Bangsanni perlite 15. Manghaesan andesite or andesitic tuff 16. Yeonil Basalt. (c) Geologic map of Eoil area (modified from Tateiwa, 1924). 1. Pre-Miocene Basement rocks 2. Gampo Fm. 3. Eoil Fm. 4. Alluvium

분지는 감포층과 어일층 그리고 송전리층으로 구성되며, 감포층은 주로 역암으로 구성되어 있어 감포 역암층이라 호명하기도 하였지만, 사암과 이암, 응회암을 협재하고 있어 현재 감포층이라 명명되고 있다.

감포층은 구조적으로 하부에서 상부로 갈수록 45°~50°의 고경사에서 10°미만의 저경사를 가지며 이는 퇴적 동시성 구조활동에 의해 규제되었다고 보고된 바 있다. 감포층의 퇴적환경은 하성환경의 특징을 잘 보여주며 선-선상퇴적, 호성퇴적의 퇴적운회를 보여 주기도 한다. 역암에 포함된 역들은 고기의 역들로 구성되며 백악기에서 고제3기의 퇴적암 및 감포층 퇴적 직전의 유문암질 화산쇄설물도 포함하고 있다. 감포층의 상부에는 팔조리 응회암이 협재되며, 이는 테사이트질 응회암으로 어일 분지의 북동 소분지 전역에 걸쳐 분포하고 있어 어일 분지 층서 해석에 건층(key-bed)으로 이용되고 있어, 팔조리 응회암의 특성과 기원에 대한 연구의 중요성이 제기된다(이정현 외, 2002).

어일층은 염기성 화산활동에 의한 용암류와 화성쇄설암류, 그리고 퇴적암으로 구성되는데, 암상과 지층의 층서적 위치에 따라 하부현무암, 응회질 역암과 사암, 상부현무암, 화산죄피암, 그리고 응회암을 협재하는 호성퇴적암으로 구성된다(손문 외, 2001). 현무암질 용암류는 윤선(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 20.42-19.3 Ma, 상부현무암 용암의 연대는 19.2-18.7 Ma로 알려져 있다(이현구 외, 1992; Song *et al.*, 1998).

어일현무암은 층서적으로 응회질 사암과 역암층을 경계로 하부에 있는 현무암과 상부에 놓여 있는 현무암으로 구분된다. 암회색 내지 암녹색 혹은 흑색을 띠고, 하부에는 거의 기공을 가지지 않는 치밀한 현무암이 나타난 반면, 상부로 갈수록 기공을 많이 가지는 현무암이 나타난다. 풍화가 많이 진행된 곳의 현무암에는 양파구조를 보이며, 표면에는 사장석 래쓰(lath)들을 다량 함유하고 있다. 산출상태는 분지의 북동지괴 중앙부와 남서지괴 북동부에서 수 십 m의 두께로 나타나지만, 그 외의 지역에서는 수 m의 두께를 보이며 측방으로 갈수록 연속성이 양호하다. 곳

에 따라 하부의 현무암에는 베계구조를 보이는 것으로 보아 수증 분출의 가능성을 시사하고, 육안으로 반상조각이 관찰된다. 현무암 내에 현무암이 분출하기 전에 형성되었던 기존의 암석편이 포함되어 있기도 하며, 정동구조를 가지는 세립질 화강암, 알칼리장석과 석영이 주된 광물인 중립질 화강암, 규질암편들이 다양한 크기로 나타난다(이정현 외, 2004). 어일 분지의 구성 층 중 최상부에 해당하는 송전층은 하부의 감포층과는 달리 신생대 중기 마이오세 해성층 내의 연체동물화석인 *Patinopecten*, *Anadara*, *Crassostrea*, *Vicarya* 등의 화석이 발견되고(우경식 외, 1991), 해양 생물의 잔해로 생성되어진 구조토가 발달하고 있는 등의 증거를 통해 해성환경에서 퇴적되었음이 밝혀진 바 있으며, 특히 송전층에서는 어일분지의 북반부에 분포하는 화산암류를 포함하지 않는 것이 특징적이다.

연구방법

암석화학적 특징을 밝히기 위해 채취한 시료를 서울대학교 공동기기의 XRF(Shimadzu XRF-1700)로 주원소 분석을 실시하였고, 동시에 휘발성분(loss on ignition)을 측정하였으며, FeO와 Fe₂O₃의 함량은 자동적정기기(METTLER TOLEDO DL-50)를 이용하였다. 미량원소는 한국기초과학지원연구원의 ICP-AES를 이용하여 분석하였다. 사장석의 분석에는 경북대학교 공동실험실습관의 EPMA(Shimadzu EPMA-1600)를 사용하였다. 사장석 분석조건으로는 15 kV의 가속전압에 빔의 직경은 3 μm이며, 빔 전류는 20 nA로 측정하였고, 원소 분석은 각 원소당 50초의 시간을 두고 분석하였다. 분석치 보정은 ZAF프로그램을 이용하였다. 결과값은 근접한 3지점을 측정하고, 평균값을 사용하였다. 동위원소분석은 기초과학지원연구원의 열이온화 질량분석기(TIMs, VG54-30 모델)로 수행되었다. ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr값은 0.1194로, 그리고 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd값은 0.7219로 동위원소 분별효과를 보정하였다. 측정된 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr은 표준시료 NBS 987의 값인 0.710246±0.000004(n=30, 2sSE)로, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd은 La Jolla의 0.511832±0.000006(n=30, 2sSE)에 대한 상대적인 값으로 보고한다. 실험의 전 과정에 대한 배경 값은 Sr은 0.1 ng, Nd은 40 pg 보다 작은 수준이었다.

암석기재

야외조사 시 채취한 시료들을 대상으로 표준 암석 박편을 제작하여 편광현미경 하에서 구성광물과 조직을 관찰하였다. 구성광물 중 누대구조가 특징적으로 발달하는 사장석 반정에 대해서는 전자현미분석을 실시하였다.

연일 현무암과 현무암질안산암에서 관찰되는 반정 광물로는 단사휘석, 사장석이 대부분이며 감람석 반정의 산출은 매우 드물다. 휘석반정의 일부에서는 반응연 구조가 관찰된다(Fig. 2A). 사장석 반정에서는

대부분에서 누대조직(Fig. 2A & 2B)을 관찰할 수 있으며 일부에서는 용식구조(Fig. 2B)와 체구조(Fig. 2C)가 관찰되었다. 사장석으로 구성된 미반정(Fig. 2A)도 산점해 있는 것을 관찰할 수 있으며 일부에서는 유동의 흔적을 나타내는 조면암질조직(Fig. 2C)을 나타내고 드물게 유리질 기질로도 관찰된다. 또한 기질의 대부분은 사장석 미반정과 유색광물들의 혼재로 이루어진 입간조직(Fig. 2E)을 보여주며, 사장석 래스들이 큰 반정광물에 포함되어 있는 오퍼틱 조직도 관찰된다(Fig. 2F).

어일 현무암에서 관찰되는 반정광물로는 연일 현무

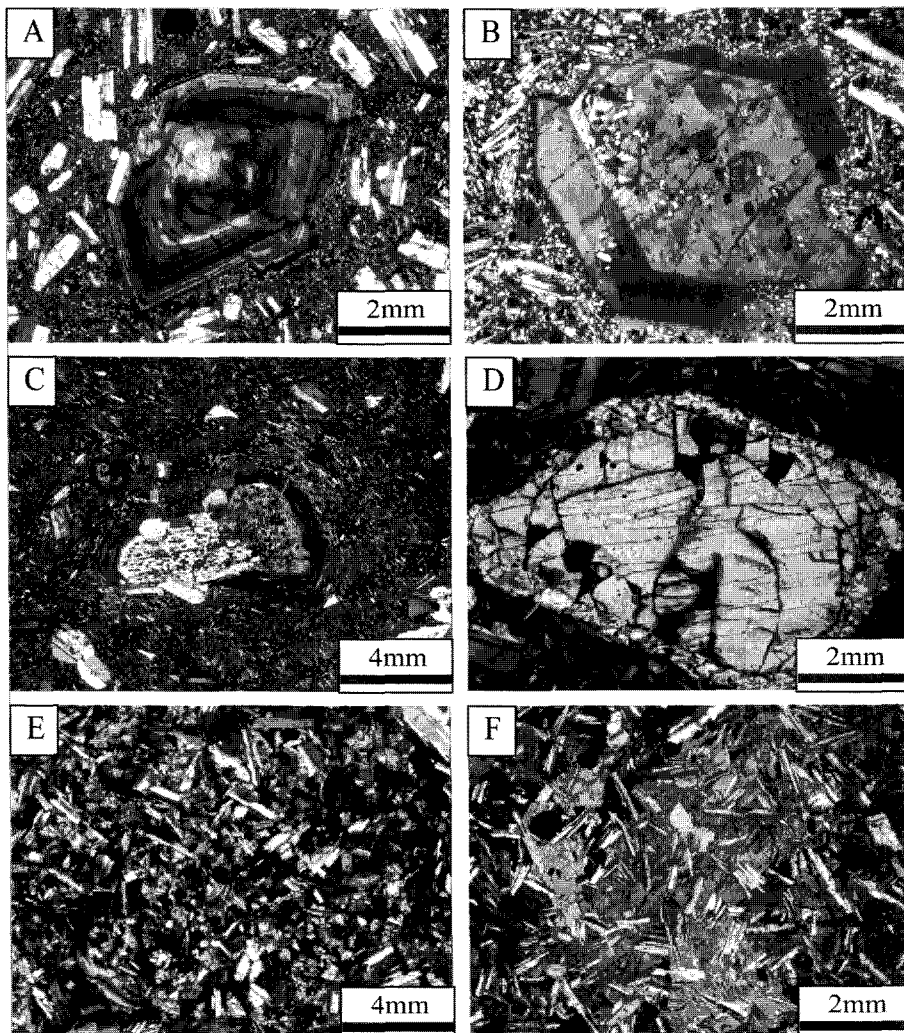


Fig. 2. Photomicrographs of Yeonil basaltic rocks. A: Zoning in plagioclase phenocryst with scattered plagioclase microphenocrysts, B: Zoning and resorption texture in plagioclase phenocryst, C: Zoning and sieve texture in plagioclase with trachytic groundmass, D: Reaction rim texture in pyroxene phenocryst, E: Intergranular texture of basaltic rock, F: Ophitic texture of basaltic rock.

암류와 유사하게 감람석, 휘석, 사장석, 불투명광물 등으로 산출하며, 사장석 반정에서 특징적인 누대구조가 관찰된다. 사장석 반정에서 알바이트쌍정, 체구조 및 누대구조를 관찰할 수 있으며 사장석 반정의 테두리 부분에서 반응연조직도 관찰된다. 휘석 반정은 연일 현무암에서보다 자주 관찰되며 사장석 반정에서와 같이 휘석반정에서도 반응연 조직이 관찰된다. 휘석과 감람석이 미반정으로 관찰되기도 하며 이 경우에는 기질부가 좀 더 세립질인 경향이 있다. 반정광물 중의 일부에서 변질된 조직을 보이는 경우도 드물게 관찰된다.

이상에서 관찰된 특징적인 조직들 중에서 특히 사장석 반정에서 관찰되는 여러 형태의 누대구조와 응식구조 및 체구조, 휘석반정을 둘러싼 반응연 조직은 마그마의 조성화 결정화 잘 나타낼 수 있는 장점 때문에 마그마의 진행과정, 마그마 변화의 물리적, 화학적 변화의 기록등에 아주 유용한 광물이다(Gimibre *et al.*, 2002).

광물화학

어일 현무암의 박편시료 중에서 누대구조가 확연하게 관찰되는 사장석 반정을 대상으로 사장석 반정의 핵(core) 부분과 누대의 최외각(rim) 부분을 분석하였다. 철의 총량은 FeO로 가정하여 주원소에 대한 정량분석을 실시하였다. 그리고 분석 결과를 통해 An:Ab:Or의 함량비를 계산해 보았다.

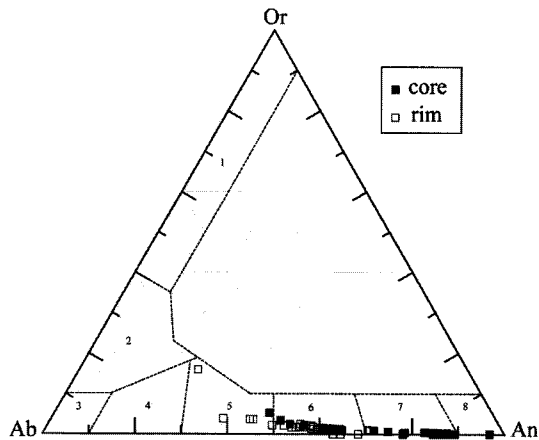


Fig. 3. Or-Ab-An diagram showing plagioclase compositions of Eoil basaltic rocks (1; sanidine, 2; anorthoclase, 3; albite, 4; oligoclase, 5; andesine, 6; labradorite, 7; bytownite, 8; anorthite, from Deer *et al.*, 1972).

사장석

사장석 결정의 핵과 최외각을 분석한 결과에 따르면, 핵은 $An_{63.46-98.38} Ab_{1.62-32.96} Or_{0.3-58}$ 의 영역(bytownite-labradorite)에서, 최외각은 $An_{40.89-82.44} Ab_{17.10-46.43} Or_{0-12.68}$ 의 영역(labradorite-andesite)에 도시된다(Table 3, Fig. 3). 누대구조에는 반정의 핵부분에서 외각 부분으로 갈수록 An값이 감소하는 정누대구조와 이와는 반대로 An값이 증가하는 역누대구조로 나타난다. 정누대구조에서는 핵에서 89-91, 외각에서 68-79의 An값을 나타내고 있다. 한편 역누대구조에서는 핵에서 63-72, 외각에서 73-77의 An값을 보여준다.

암석지화학

주원소

주원소 분석을 바탕으로 실리카 함량에 따라 분류하면 장기분지 지역 화산암류는 염기성 내지 중성 화산암에 도시된다. 이를 TAS($Na_2O + K_2O$ vs SiO_2)도에 세분해 보면 현무암과 현무암질 안산암의 영역에 점시되며, 비알칼리암(sub-alkaline)계열에 해당함을 알 수 있다(Fig. 4). SiO_2 는 47.6-61.5 wt.%로 분포하고, 현무암은 47.6-52.9 wt.% 사이에서, 현무암질 안산암은 54.3-61.5 wt.% 사이로 분포하며, 비교적 현무암질 안산암의 SiO_2 함량이 높게 나타난다. Al_2O_3 는 14.4-19.5 wt.% 안에서 변화하고, 현무암의 Al_2O_3 함량비는 15.5-19.5 wt.%, 현무암질 안산암은 14.4-18.7 wt.%로 비교적 좁은 범위에 존재한다(Table 1). AFM(Alkali -FeO* -MgO)도표를 이용하여 비 알칼

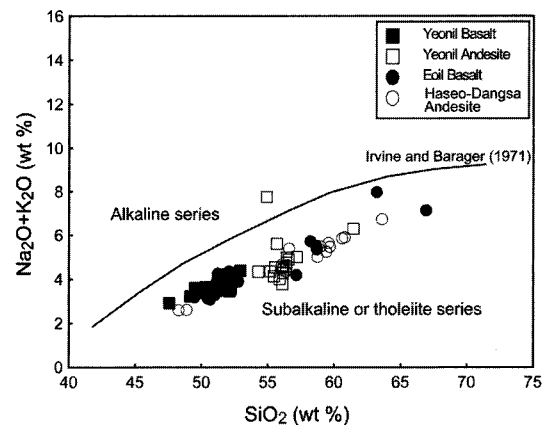


Fig. 4. TAS(Na_2O+K_2O vs SiO_2) diagram. Boundary line dividing Alkaline series and Subalkaline series(Irvine and Barager, 1971).

Table 1. Major element analysis of the basaltic rocks in the study area

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total
YB-01	52.12	0.93	18.15	8.28	0.17	4.95	10.15	2.73	0.73	0.23	0.85	99.29
YB-02	55.46	0.88	17.77	7.44	0.15	3.99	7.78	3.05	1.09	0.24	0.59	98.44
YB-03	56.41	0.97	17.70	7.76	0.22	3.33	7.09	3.26	1.49	0.23	0.50	98.96
YB-04	55.89	0.89	17.84	7.60	0.17	3.98	7.70	2.85	1.17	0.27	0.61	98.97
YB-05	56.14	0.87	17.75	7.65	0.15	3.90	7.47	2.95	1.34	0.24	0.34	98.80
YB-06	56.10	0.88	18.04	7.67	0.18	4.01	7.70	2.93	0.85	0.26	0.81	99.43
YB-07	51.66	1.39	16.87	9.73	0.18	5.48	9.30	3.16	0.62	0.30	0.33	99.02
YB-08	52.22	1.19	18.86	8.04	0.20	4.05	9.15	3.01	0.54	0.42	0.59	98.27
YB-09	50.36	1.50	18.43	9.58	0.19	4.17	9.44	2.95	0.70	0.33	0.72	98.37
YB-10	49.52	1.61	18.21	9.95	0.17	4.65	9.74	2.94	0.68	0.37	0.50	98.34
YB-11	52.03	1.70	15.61	11.12	0.20	4.12	8.86	2.80	0.89	0.36	1.27	98.96
YB-12	52.02	1.33	17.13	9.27	0.18	4.84	9.24	3.03	0.77	0.31	0.65	98.77
YB-13	51.95	1.67	15.45	11.04	0.21	4.39	8.52	3.10	1.13	0.35	0.80	98.61
YB-14	51.54	1.64	15.48	11.08	0.20	4.52	8.56	2.94	1.04	0.36	0.85	98.21
YB-15	50.70	1.56	18.16	10.20	0.19	4.32	9.77	2.89	0.51	0.35	0.30	98.95
YB-16	57.20	0.88	18.02	7.76	0.12	3.00	6.78	3.35	1.65	0.22	1.12	100.10
YB-17	56.58	0.86	17.98	7.73	0.20	3.72	7.40	3.53	1.36	0.26	0.09	99.71
YB-18	56.19	0.90	18.73	6.96	0.11	3.14	7.60	3.31	1.32	0.26	0.71	99.23
YB-19	56.39	0.87	17.98	7.72	0.14	3.77	7.35	3.26	1.31	0.25	0.69	99.73
YB-21	56.08	0.89	17.93	7.63	0.15	3.94	7.60	3.18	1.36	0.24	0.38	99.38
YB-22	55.54	0.89	17.70	7.79	0.15	4.08	7.57	3.23	1.31	0.24	0.35	98.85
YB-24	61.45	0.59	17.69	4.70	0.16	1.83	5.04	4.36	1.93	0.36	0.94	99.05
YB-25	54.90	1.59	14.44	6.19	0.10	6.11	6.38	4.53	3.22	0.40	2.13	99.99
YB-27	56.42	0.81	17.14	7.25	0.63	3.25	6.50	3.35	1.63	0.22	2.23	99.43
YB-28	55.67	0.91	17.95	7.59	0.11	2.77	7.25	4.13	1.48	0.26	1.56	99.68
YB-30	50.28	1.19	18.16	8.66	0.18	4.32	10.43	2.83	0.55	0.26	1.41	98.27
YB-31	49.15	1.39	19.46	8.62	0.16	3.91	10.42	2.82	0.41	0.31	2.53	99.18
YB-32	47.57	1.53	17.27	9.29	1.20	6.86	9.97	2.34	0.58	0.36	2.67	99.64
YB-33	55.18	0.87	17.98	7.72	0.17	3.65	7.17	3.37	0.99	0.25	1.05	98.40
YB-34	52.92	1.49	16.92	9.01	0.21	3.19	8.53	3.41	0.97	0.36	1.61	98.62
YB-37	56.19	0.80	17.80	7.34	0.16	3.45	7.01	3.34	1.10	0.22	0.96	98.37
YB-40	54.28	0.90	17.66	6.55	0.12	4.54	7.72	2.97	1.37	0.21	2.23	98.55
EO-01	51.32	1.66	15.59	11.27	0.20	4.34	8.71	2.94	1.01	0.34	1.80	99.18
EO-02	51.38	1.61	15.56	11.17	0.20	4.34	8.74	2.97	1.05	0.33	1.52	98.87
EO-03	51.60	1.64	15.63	11.03	0.19	4.37	8.69	3.10	1.08	0.33	1.08	98.74
EO-04	49.48	1.32	18.64	9.71	0.18	5.32	10.52	2.70	0.49	0.24	0.15	98.75
EO-05	50.76	1.42	16.93	10.13	0.19	5.22	9.46	2.77	0.79	0.27	0.27	98.21
EO-06	52.00	1.33	19.48	7.94	0.14	3.34	9.73	3.25	0.80	0.32	0.66	98.99
EO-07	51.55	1.34	19.38	8.36	0.17	3.49	9.90	3.17	0.61	0.31	0.73	99.01

FeO* is the total Fe as FeO

Abbreviations: EO; Eoil basalt, YB; Yeonil basalt.

Table 1. Continued

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total
EO-08	52.07	1.75	16.57	10.08	0.21	3.89	8.80	2.75	0.95	0.45	1.18	98.70
EO-09	50.70	1.40	17.84	10.12	0.20	4.71	9.83	2.75	0.73	0.31	0.48	99.07
EO-10	50.52	1.37	18.12	10.11	0.16	4.32	9.86	2.81	0.73	0.30	0.72	99.02
EO-11	51.41	1.40	18.30	8.12	0.14	4.19	10.55	2.91	0.57	0.26	0.89	98.74
EO-12	50.81	1.38	17.37	9.74	0.20	5.20	9.94	2.91	0.58	0.27	0.36	98.76
EO-13	50.86	1.44	16.82	10.13	0.21	5.04	9.47	2.91	0.75	0.29	0.54	98.46
EO-14	51.60	1.62	16.14	10.63	0.21	4.29	8.41	2.88	1.25	0.41	0.53	97.97
EO-15	50.70	1.41	16.87	10.09	0.19	5.34	9.60	2.89	0.75	0.27	0.26	98.37
EO-16	66.93	0.61	15.07	3.19	0.14	1.12	1.91	3.22	3.91	0.12	3.82	100.04
EO-17	50.39	1.35	17.70	10.07	0.19	4.90	9.86	2.71	0.65	0.29	0.42	98.53
EO-18	51.42	1.38	18.81	7.78	0.14	3.58	9.71	3.14	0.72	0.32	1.74	98.74
EO-19	50.99	1.33	19.00	8.89	0.18	3.76	10.31	2.74	0.55	0.30	1.63	99.68
EO-20	51.55	1.35	18.99	8.40	0.16	3.78	9.67	3.19	0.72	0.33	0.88	99.02
EO-21	52.33	1.62	18.31	8.48	0.17	3.01	9.15	3.28	1.01	0.42	1.34	99.12
EO-22	51.17	1.36	18.67	8.58	0.15	3.96	9.50	3.15	0.80	0.32	0.48	98.14
EO-23	51.28	1.58	18.51	8.74	0.16	3.54	9.63	3.11	0.80	0.39	0.58	98.32
EO-25	51.45	1.36	19.07	8.47	0.16	4.00	9.57	3.19	0.70	0.33	0.56	98.86
EO-26	51.84	1.42	18.54	8.77	0.17	3.73	9.43	3.30	0.88	0.35	0.30	98.73
EO-27	57.16	0.83	17.97	6.58	0.13	3.39	6.80	2.39	1.80	0.19	2.33	99.57
EO-28	52.24	1.37	19.50	8.23	0.18	3.27	9.82	3.21	0.64	0.34	0.87	99.67
EO-29	52.13	1.43	16.66	10.06	0.19	4.41	8.71	2.96	0.98	0.36	0.52	98.41
EO-30	51.31	1.57	18.53	9.24	0.19	3.98	9.54	3.15	0.69	0.39	0.40	98.99
EO-31	51.59	1.58	18.74	9.29	0.16	3.81	9.65	3.18	0.67	0.39	0.38	99.44
EO-32	51.23	1.47	20.68	8.14	0.15	3.04	9.02	3.36	0.89	0.35	0.90	99.23
EO-33	63.20	0.61	18.40	3.96	0.09	0.52	3.89	5.00	2.97	0.29	0.72	99.65
EO-34	58.65	0.86	18.66	6.33	0.18	2.06	6.78	3.93	1.59	0.26	0.90	100.20
EO-35	58.22	0.82	18.29	6.68	0.13	2.34	5.89	4.24	1.48	0.31	0.71	99.11
EO-36	50.45	1.41	16.97	10.11	0.19	5.19	9.95	2.81	0.37	0.27	0.91	98.63
EO-37	50.73	1.43	16.71	10.19	0.20	5.02	9.65	2.77	0.68	0.27	0.28	97.93
EO-38	50.55	1.44	16.68	10.28	0.20	5.41	9.67	2.91	0.58	0.28	0.40	98.40
EO-39	50.65	1.39	17.26	9.92	0.19	5.00	10.02	2.72	0.37	0.27	1.15	98.94
EO-40	50.52	1.32	18.08	9.10	0.17	4.72	10.40	2.76	0.36	0.24	1.16	98.83
EO-41	51.12	1.40	18.24	9.49	0.16	4.31	10.22	2.83	0.56	0.30	0.74	99.37
EO-42	58.70	1.28	16.79	7.81	0.13	2.67	6.11	3.84	1.51	0.32	0.38	99.54
EO-43	52.08	1.51	16.62	10.39	0.18	4.86	8.06	3.17	1.18	0.42	0.73	99.20
EO-44	52.76	1.40	20.01	7.13	0.13	2.47	10.10	3.18	0.72	0.31	0.85	99.06

리암계열 중에서 분화가 진행됨에 따라 Fe의 부화 없이 Fe와 Mg가 일정한 비율로 감소하고 알칼리원소의 양이 증가하는 칼크알칼리계열로 구분되며(Fig. 5), K₂O-SiO₂ 도표에서도 중K계열의 칼크알칼리계열에 해

당함을 알수 있다(Fig. 6). Harker 도표에서 SiO₂ 변화에 따른 주원소의 변화 양상은 SiO₂가 증가 할 때 Na₂O와 K₂O는 증가하며 TiO₂, FeO*, CaO, MgO, P₂O₅는 감소하는 경향을 보여준다(Fig. 7). 또한 알칼

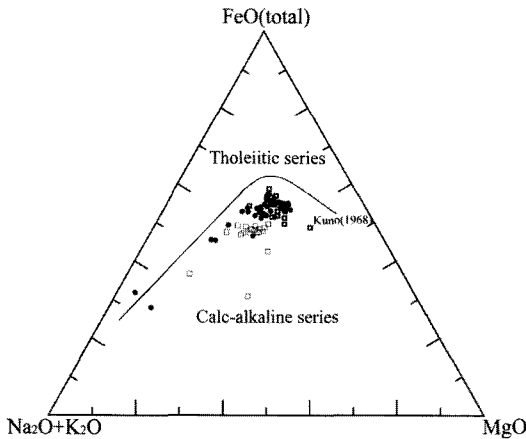


Fig. 5. AFM diagram showing the boundary between the calc-alkaline field and the tholeiitic field after Kuno(1968). Symbols are the same as those in Fig. 3.

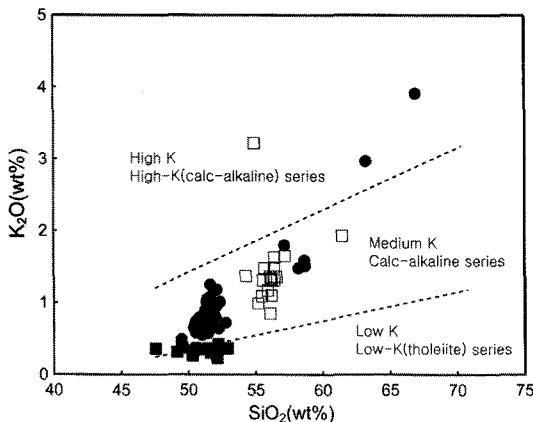


Fig. 6. K₂O vs SiO₂ diagram showing subdivision of subalkaline rocks. Broken lines are from Le maitre et al.(1989). Symbols are the same as those in Fig. 3.

리 원소 중 K의 증가 양상이 Na보다 더 뚜렷하다.. Total-Fe와 Ti의 감소는 자철석의 분별정출과의 연관성을 시사한다. Mg가 감소할수록 Ca도 감소하는 것은 분화가 진행될수록 단사휘석이나 사장석의 분별정출에 기인한 것으로 생각되는데, 이는 MgO-Al₂O₃/CaO 도표에서도 역시 Mg가 감소할수록 Ca도 감소하여 Al/Ca비가 증가되는 단사휘석이나 사장석의 분별을 지시하는 것으로 생각된다(Fig. 7).

어일분지 지역 화산암류의 전체시료에서도 또한 전형적인 칼크-알칼라인 계열 마그마의 분화양상과 일치한다. 먼저 SiO₂는 48.2-66.9 wt.%까지 점이적으로 증가하고 있으며, 현무암은 48.2-52.8 wt.%사이에서,

안산암은 52.6-60.8 wt.%사이에서 변화한다. 그러나 장기분지 지역 화산암과는 달리, 규장질의 데사이트와 조면암이 각각 63.2 wt.%와 66.9 wt.%의 함량비를 보인다. 또한 Al₂O₃는 15.1-20.7 wt.%안에서 변화하고, 안산암의 Al₂O₃ 함량비는 16.8-19.0 wt.%로 비교적 좁은 범위에 존재한다. Harker 도표에서 SiO₂ 변화에 따른 주원소의 변화 양상은 SiO₂가 증가 할 때 Na₂O는 증가, TiO₂, FeO, CaO, MgO는 감소하는 경향을 보여준다(Fig. 7).

미량원소

연구지역 화산암류의 미량원소분석결과, 조사지역의 미량원소 함량치가 유사하게 나타났다. 분화가 진행됨에 따라 Co, Ni, V, Zn, Sc 등과 같은 호정성 원소는 감소하고, Ba, Rb 등의 불호정성 원소들은 증가하는 특징을 보여준다(Fig. 8). 감람석이나 휘석에 대해 호정성 원소인 Ni는 1~82 ppm, Cr은 1~82 ppm, Co는 12~42 ppm, Sc은 4~38 ppm, V은 47~351 ppm, 그리고 Cu는 4~100 ppm의 다소 넓은 범위를 보여주며, 초생마그마의 Ni, Cr 함량(Ni; 250~350 ppm, Cr; 500~600 ppm from Perfit *et al.*, 1980)에 비해 상당히 낮은 Ni, Cr의 함량을 가진다. 불호정성 원소인 Rb은 3~64 ppm, Sr은 354~655 ppm, Ba은 73~383 ppm, Nb은 1~12 ppm, Hf은 0.5~5 ppm, 그리고 Y은 15~36 ppm의 함량을 가진다(Table 2). Zr은 77~226 ppm의 범위를 가지며 이는 조산대의 화산암류에 해당하는 수치이다. 미량원소의 변화경향은 분화가 진행됨에 따라 Ba, La, Hf은 뚜렷한 증가를 보이며, 그 외 Y, Cr, Cu, Sc, V, Co, Nb, Ni, Zn은 감소하는 경향을 보여준다. Zr은 분화가 진행됨에 따라 조금 증가하는 경향을 보이며, Sr은 일부 시료를 제외하고는 398~567 ppm의 범위에 분포한다. 또한 Ni의 경우, 연구지역 현무암에서 일반적인 현무암보다 부화가 많이 된 점과 Sr함량이 다소 높은 것으로 사료 할 때, 연구지역의 화산암류를 생성시킨 근원 마그마가 해양지각과 연관함을 시사하는 것으로 해석되었다(박선애, 1994).

특히 미량원소의 변화경향을 알아보기 위해서 연일 현무암과 연일현무암질 안산암을 나누어 평균 N-type MORB(Mid-Ocean Ridge Basalt)값으로 표준화시킨 거미도표(spider diagram)로 나타내어 보았는데, 이들 원소의 배열은 함수유체에 대한 유동성과 마그마에서 불호정성의 순서로 구성되어 있다(Fig. 9). Sr, Rb,

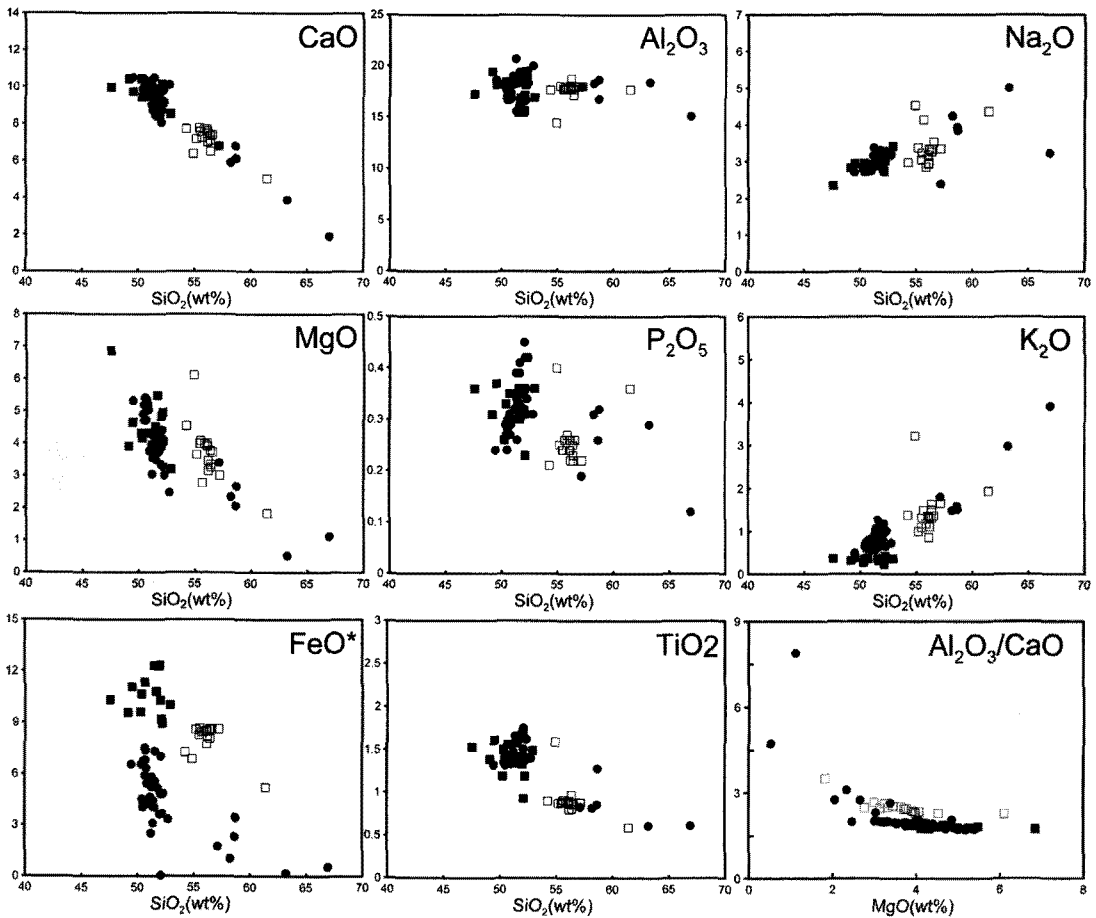


Fig. 7. Major element variation diagram. Symbols are the same as those in Fig. 3.

Ba의 유동성이 높은 원소들은 왼쪽으로 갈수록 호정성이 증가하는 순서로, 나머지 비유동성원소들은 오른쪽으로 갈수록 호정성이 증가하는 순서로 배열한 Pearce (1983)의 도표를 사용하였다. LIL (Large Ion Lithophile) 원소인 Sr, Rb, Ba, Th 등의 원소는 상대적으로 높은 값을 가지는데 이들은 함수 유체에 녹기 쉬운 원소들이라서 섭입 시에 탈수작용으로 형성된 함수 유체에 부화되어 있다가 섭입되는 해양지각으로부터 맨틀에 공급되어 섭입과 관련된 환경에서 높게 부화되는 경향을 가진다. 그 외 HFS(High Field Strength) 원소인 Zr, Hf, Nb, Ta 등은 중앙해령현무암에 비해 약간 부화된 특징을 보인다. 이들 원소들의 양이 상대적으로 낮은 것은 이들은 함수 유체에 녹기 어려워서 고체상에 잔류하는 이동성이 적은 원소들이기 때문이다. 특히 Nb가 전체적인 경향에서 음의 이상치를 보이는 것은 이들 원소가 섭입된 후 부분 용

융될 때 맨틀의 금홍석, 티탄철석 등과 같은 광물 속에 잔류하기 때문인 것으로 해석된다(Foley and Wheller, 1990). Ce, Sm 등의 원소가 중앙해령현무암에 비해 약간 부화되어 나타나는 것은 화산호와 관련된 암석에서 칼크알칼리 계열의 암석에서만 나타나는 특징인데, 이들 원소는 섭입되는 해양지각의 부분용융으로 생성된 규질 용융물(silicate melt)에 의해 운반되는 것과 해양퇴적물에 풍부한 Ce 함량에 기인한 것으로 해석된다(Hawkesworth and Powell, 1980). 조산대 화산호에서는 중앙해령현무암과 비교하여 Rb이 Zr, Hf, Nb, Y에 비해 부화되는 특징을 보여주며, Ba, Sr, Rb의 함량의 변화가 두드러져 나타난다고 한다(Pearce, 1983; Wilson, 1989). 이러한 특징들은 본 역의 연구지역 화산암류가 조산대 화산호와 연관된 암석임을 지시한다.

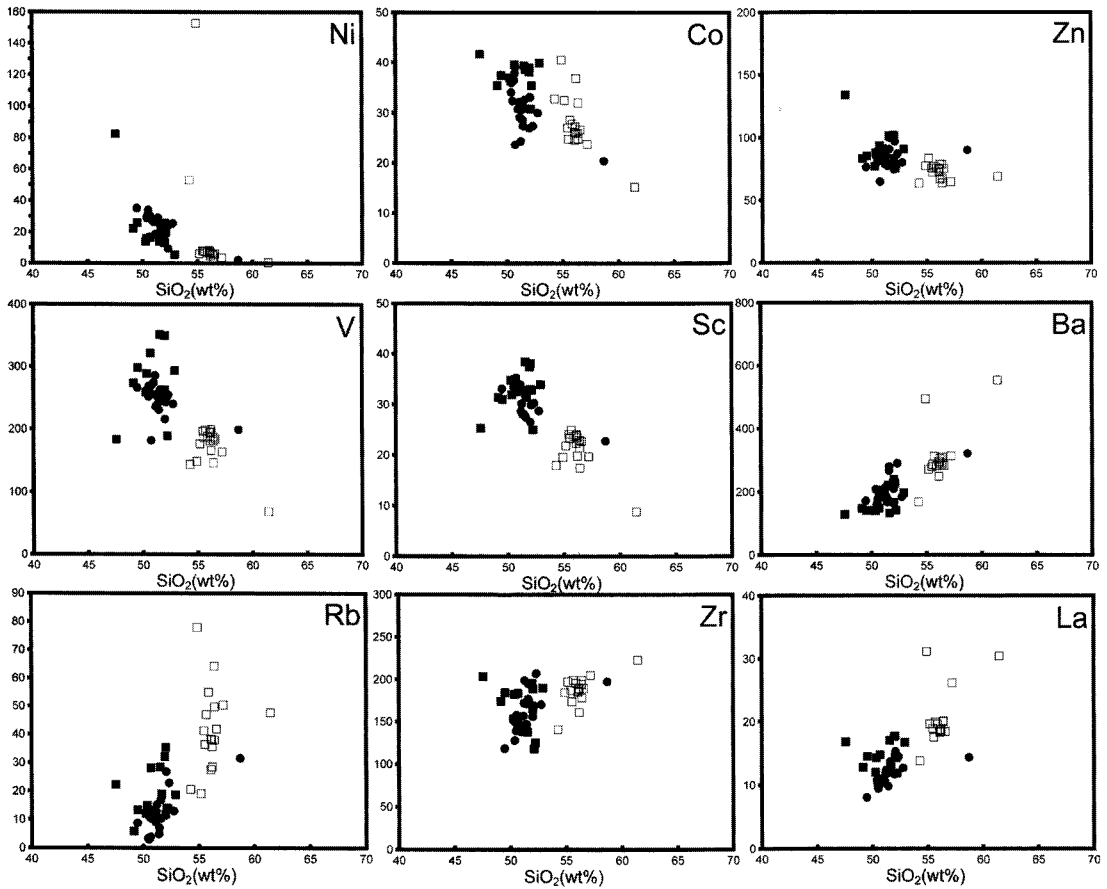


Fig. 8. Trace element variation diagram. Symbols are the same as those in Fig. 3.

희토류원소

희토류 총량은 약 88~117 ppm으로 콘드라이트에 비해 약 100배정도 부화되어 있으며 모든 암종에서 경희토류원소(LREE)가 중희토류원소(HREE)보다 부화되어 있다(Fig. 10). 또한 (La/Yb)_n 값은 2.7~5.7을 가진다. 약한 LREE/HREE의 분별작용이 관찰되며 이러한 결과는 연구지역 현무암 기원의 마그마 분화정도가 그리 크지 않았음을 나타낸다.

연일현무암에 비해 연일현무암질 안산암에서 보다 뚜렷한 사장석의 분별을 받았음을 알 수 있다. 그러나 0.8~1.0의 Eu/Eu*값은 사장석 분별작용이 일부 암석에서는 거의 일어나지 않았으며, 연일현무암과 연일현무암질 안산암의 희토류원소의 경향이 유사한 것을 볼 수 있는데, 이는 두 암류가 동일기원의 마그마에서 유래하였음을 지시한다. 어일지역 화산암류의 희토류원소(REE)는 콘드라이트에 표준화시켜보면 Eu/Eu*는 0.8~1.0까지 값으로 약한 부의 Eu 이상을 보

여주며, 모든 암종에서 경희토류원소(LREE)가 중희토류원소(HREE)보다 부화되어 있다. 현무암질 안산암류들은 현무암보다는 비교적 강한 Eu 이상을 보여 주며, 경희토류원소의 경우 현무암보다 현무암질 안산암류의 부화정도가 높고 중희토류원소의 경우 현무암보다 낮거나 유사한 부화 정도를 보여주고 있다.

Sr-Nd 동위원소

현무암 및 현무암질 안산암의 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr은 0.704090~0.704717, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd은 0.512705~0.512822로서 Nd에 비해 Sr의 변화폭이 크지만 0.0007 내외의 좁은 변화폭을 보인다(Table 4). 이는 현무암 및 현무암질 안산암의 기원 마그마 분화 시 대륙지각 물질과 해수의 혼입 등의 혼성작용이 발생했을 가능성이 낮음을 보여준다. 그리고 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr과 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd의 상관도에서 음의 상관성을 보이며 선형으로 분포하는 것도 마그마 분화과정에서 혼성되지 않았음을 지시한다. 또한

Table 2. Trace element and REE analysis of the basaltic rocks in the study area

	YB01	YB02	YB03	YB04	YB05	YB06	YB07	YB08	YB09	YB10	YB11	YB12	YB13	YB14	YB15	YB16	YB17	YB18	YB19	YB21	YB22
Ba	228	279	287	283	291	240	132	141	139	140	239	167	228	221	148	313	283	296	291	296	286
Sr	575	466	466	459	443	438	384	455	432	416	386	425	354	377	453	468	454	460	464	455	445
Co	30	27	24	27	24	38	35	36	37	39	39	38	39	39	39	23	26	26	25	26	24
Cr	44	6.1	-	5.9	5.1	5.3	52	7.5	18	35	21	53	29	30	16	1.8	3.8	4.8	3.7	7.2	7.3
Ga	6	7.7	1.6	6	7.9	5.6	6.2	2.7	7.3	7.2	6.1	6.7	3.7	6.5	6.1	12	4.7	13	9.9	9	9.6
Li	9.3	7.1	10.4	7.8	10.3	9.5	8.2	6.8	7.6	8.4	10	6.8	12	9.2	9.4	11.2	10	10	10	12.1	10.6
Ni	19	7.9	2.1	7.3	7.9	6.9	21	24	15	25	12	25	13	13	16	3.7	6.2	6.6	6.2	8.3	8
Sc	32	24	21	23	24	22	31	25	31	31	38	33	37	38	35	19	22	23	22	23	23
V	252	196	181	188	195	181	246	189	288	298	349	263	349	351	321	163	184	199	187	194	186
Zn	75	75	63	75	74	72	79	78	87	85	101	83	101	101	93	64	75	78	78	74	72
Cu	41	37	21	36	30	32	54	27	50	80	100	59	100	96	79	19	28	26	35	31	27
Rb	14	41	49	54	38	27	18	13	14	13	35	11	32	28	28	50	41	35	37	38	36
Y	20	27	29	28	26	25	27	25	33.1	33	37	28	36	35	35	27	25	24	29	25	24
Zr	118	187	199	195	188	186	171	125	182	184	189	164	195	137	183	204	189	188	194	184	173
Nb	5.3	9.4	11.5	10.2	10	7.4	11.8	6.1	9.3	5.6	11.2	5.9	10	10.3	6.1	11.6	9.9	9.2	8.9	8.9	9.3
Mo	0.8	1.5	1.3	1.5	1.2	1	1	0.6	1	1	1.1	0.9	2	1	1.1	1.3	1.2	1	1.1	1	1.1
Sn	1.1	1.4	1.4	1.5	1.3	1	1.5	1.1	1.2	1.2	1.8	1.2	2.3	0.8	1.5	1.3	1.4	1.6	1.4	1.3	1.2
Sb	0.9	0.3	0.2	0.4	0.3	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
Cs	0.5	2.8	3.1	3.1	2.3	6	0.7	0.4	0.2	0.1	4.2	0.2	1.1	0.5	4.4	1.8	2.9	1.1	1.2	1	0.9
Hf	3.1	4.6	5.1	5	4.9	5	4.2	3.1	4.6	4.4	4.8	4	5	3	4.5	5.3	4.7	4.8	4.9	4.9	4.6
Ta	0.2	1	0.8	0.3	1.1	0.4	2	0.3	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.2	0.5	1.1	0.7	0.7	0.2	0.4	0.9
Pb	6.9	10.8	12.5	11.2	8.4	10.6	5	5.2	5.4	5.7	8.5	5.5	7.9	7.7	6.6	12.6	9.4	7.3	8.4	7.6	8.9
Th	2.4	4.1	5.5	4.2	4	4.1	1.7	1.6	1.8	1.8	2.8	2.1	2.9	2.5	2	6.4	3.8	3.7	3.9	4.2	4
U	0.6	1.1	1.5	1.1	1.1	1.1	0.5	0.4	0.5	0.5	0.7	0.6	0.7	0.7	0.5	1.7	1	1.1	1	1.1	1
La	14.3	18.9	20	19.6	18.7	18.3	12.9	11.9	14.3	14.5	17.7	14.4	17.6	17	14.8	26.2	18.4	18.4	20	18.4	17.5
Ce	32.2	42.5	44.9	44	42	42	31	29.3	36.1	36.3	42.7	34.3	42.7	41.1	37.1	47.4	42	40.9	43.6	42.1	39.6
Pr	4.2	5.5	5.6	5.7	5.4	5.4	4.4	4.1	5.1	5.1	5.8	4.7	5.8	5.7	5.3	7.2	5.4	5.4	5.7	5.4	5
Nd	18.3	23.2	23.7	24	22.6	22.1	19.3	18.3	23.3	23.1	26.4	21	26.4	25.6	24.4	29.5	22.3	22.8	24	22.9	21
Sm	4.4	5.4	5.5	5.7	5.4	5.4	5	4.7	5.9	6	7	5.2	6.7	6.5	6.4	6.2	5.2	5.3	5.6	5.2	5.1
Eu	1.5	1.5	1.6	1.5	1.5	1.4	1.7	1.6	1.9	1.9	2	1.7	2	2	2	1.8	1.5	1.5	1.6	1.5	1.4
Gd	4.6	5.5	5.5	5.8	5.5	5.4	5.6	5.1	6.7	6.4	7.4	5.8	7.4	7.3	6.9	6.1	5.3	5.4	5.9	5.4	5.2
Tb	0.7	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.9	0.8	1	1	1.2	0.9	1.1	1.1	1.1	0.9	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8
Dy	4.2	5.2	5.3	5.5	5	5.1	5.4	4.9	6.4	6.4	7	5.7	7	6.9	6.9	5.5	5	5.1	5.6	5	4.8
Ho	0.9	1.1	1.1	1.1	1	1.1	1.1	1	1.4	1.3	1.5	1.2	1.5	1.4	1.4	1.1	1	1	1.2	1	1
Er	2.5	3.2	3.3	3.3	3.1	3	3.2	2.9	4	3.8	4.2	3.4	4.3	4.2	4.1	3.2	3.1	2.9	3.4	3	2.9
Tm	0.3	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4
Yb	2.3	3	3.2	3.1	2.9	3	3.1	2.7	3.7	3.6	3.9	3.1	4	3.9	3.9	3.2	2.9	2.7	3.1	2.8	2.7
Lu	0.3	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.4	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4

Table 2. Continued.

	YB24	YB25	YB27	YB28	YB30	YB31	YB32	YB33	YB34	YB37	YB40	EO04	EO05	EO06	EO11	EO14	EO15	EO17	EO19	EO21	EO22
Ba	553	493	308	312	141	147	128	271	197	304	167	171	186	210	167	280	205	208	184	290	202
Sr	558	774	498	462	463	486	472	500	429	482	655	454	432	538	430	407	426	439	488	537	520
Co	15	40	32	28	36	35	41	32	39	36	32	37	39	27	28	32	37	34	30	27	29
Cr	0.7	151	1.6	5.2	34	30	60	4.7	6.7	-	38	38	34	29	49	16	42	31	32	9.6	29
Ga	7	10.2	4.9	12	6.1	9.3	3.9	7.5	4.6	5.5	9.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Li	8.1	36	15	11	6.5	8.1	33	8.6	5.2	7.5	9	7.1	5.6	6.1	6.9	6.9	6.2	6.6	5.9	6.6	7
Ni	0.5	152	5.6	7.7	13	22	82	6.2	5.5	4.6	53	35	28	17	29	25	29	28	26	9.5	18
Sc	8.8	19	17	24	34	31	25	21	33	19	18	33	32	26	32	27	33	32	32	30	28
V	68	149	146	198	258	273	183	176	294	166	144	266	269	216	242	254	256	262	274	254	236
Zn	68	77	67	77	76	83	133	83	90	66	63	76	88	74	77	99	85	85	87	87	78
Cu	6.5	48	18	33	64	73	4.7	25	67	19	31	54	68	45	65	67	70	74	80	59	45
Rb	47	77	64	47	12	5.9	22	19	18	28	20	8.7	13	11	4.9	16	13	13	10	22	12
Y	24	19	24	27	25	30	29	25	35	23	18	20	23	23	22	25	25	23	24	30	24
Zr	222	184	178	199	153	174	203	197	190	160	140	118	155	156	143	195	156	127	137	207	156
Nb	13	42	6.7	9.4	5.6	6.7	12	11	4.1	5.2	3.2	4.8	6	7	3.4	10.7	6.7	5.7	4.7	8.2	6.9
Mo	2	1	2.3	1.5	0.8	0.8	0.9	1	1.2	1.3	0.5	0.5	0.8	0.7	0.5	1.1	0.8	0.7	0.6	1.1	0.6
Sn	1.5	1	1.3	1.4	0.5	1.2	1.4	1.1	1.1	1.2	0.9	1.8	1.6	1.5	0.8	1.5	1.3	1.2	1.7	1.7	1.1
Sb	0.2	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	1.7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cs	2.5	7.7	14.1	3	0.6	0.5	6.2	0.7	1.2	1.3	0.6	1.3	0.6	0.2	0.2	1.4	0.6	0.8	0.7	1.1	0.2
Hf	5.6	4.2	4.6	5.1	3.6	4	4.6	4.8	3.7	4	3.2	2.5	3.6	3.1	2.8	3.7	3.1	2.3	2.8	3.9	2.9
Ta	1.9	9.1	0.5	0.5	0.3	0.3	0.5	0.6	0.3	0.3	-	0.1	0.4	0.3	0.1	0.6	0.5	0.2	0.2	0.1	0.5
Pb	15	10.4	13.8	10.6	4.9	5.3	5.8	9	7.7	10.2	6.5	3.2	5.4	4.4	4.3	7.6	5.1	5.7	5.7	7	5
Th	7.5	5	6.3	4.5	1.4	1.7	1.3	3.9	2.5	4.4	2.3	1.7	2.3	1.9	1.6	2.8	1.6	1.3	1.4	2.2	1.6
U	1.7	1.8	1.7	1.2	0.4	0.4	0.3	1	0.7	1	0.7	0.4	0.5	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.9	0.6	0.6
La	30.4	31.1	20.1	19.9	12	12.8	16.8	19.6	16.7	18.6	13.8	8	10.7	11.7	9.8	13.7	10.9	10.8	10.8	14.5	11.8
Ce	65.9	68.3	43.6	44.3	29.4	33.3	40.6	43.5	41.8	39.9	32.1	20.3	25.1	28.7	24.1	30.1	26.6	26.2	26.4	36.2	29
Pr	7.6	8.5	5.3	5.8	4	4.8	5.6	5.4	5.8	4.9	4.3	3	3.7	4.1	3.5	4.3	3.8	3.7	3.7	5.1	4.1
Nd	29.7	33.7	21.5	24.2	18.5	21.6	24	22.1	25.7	20	18.1	13.8	16.4	18.6	15.7	18.8	17.6	17.1	17.1	23.2	18.7
Sm	6	6.6	5	5.9	4.7	5.7	6	4.9	6.3	4.5	4.3	3.7	4.2	4.7	4.1	4.8	4.6	4.6	4.5	6.1	4.7
Eu	1.7	1.8	1.4	1.6	1.6	1.8	1.8	1.5	2	1.4	1.4	1.2	1.3	1.4	1.3	1.3	1.4	1.3	1.4	1.7	1.4
Gd	5.4	5.5	4.8	5.8	5.3	6.1	6.1	5.1	6.7	4.7	4	4	4.5	4.8	4.4	5	5	4.9	4.8	6.3	4.9
Tb	0.7	0.7	0.7	0.9	0.8	1	1	0.7	1.1	0.7	0.6	0.6	0.7	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	1	0.8
Dy	4.5	4.1	4.5	5.4	5	6	5.9	4.7	6.8	4.3	3.7	4.1	4.5	4.6	4.4	5	4.9	4.7	4.6	6.1	4.7
Ho	1	0.8	1	1.1	1.1	1.2	1.2	1	1.4	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	1	1	1	1	1	1.2	1
Er	2.8	2.1	2.8	3.2	3	3.6	3.4	2.9	4.1	2.7	2.1	2.4	2.7	2.8	2.7	3.1	3	2.8	2.8	3.6	2.8
Tm	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.6	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4
Yb	3	1.8	2.8	2.9	2.8	3.4	3.2	2.7	3.9	2.7	2	2.2	2.5	2.5	2.4	2.8	2.7	2.5	2.6	3.2	2.5
Lu	0.5	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.6	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4

Table 2 Continued

	EO25	EO30	EO31	EO32	EO36	EO37	EO38	EO39	EO40	EO41	EO42	EO43	EO44
Ba	178	216	267	192	159	198	176	185	162	206	320	236	184
Sr	544	548	567	559	428	420	428	440	429	480	403	452	566
Co	27	30	30	24	36	23	36	36	32	32	20	33	30
Cr	26	14	15	29	36	33	48	39	65	32	2.4	15	28
Li	7.4	7.6	7.6	6.3	8.1	6.2	8.2	8.1	6.2	6.4	8.4	8.1	5.9
Ni	18	17	17	18	30	16	31	30	34	28	2.1	21	25
Sc	28	28	31	30	34	35	34	33	33	33	22	29	28
V	230	252	263	255	262	182	269	258	251	285	199	243	240
Zn	78	84	90	81	87	64	89	84	80	91	90	97	80
Cu	45	58	62	49	71	40	74	73	61	82	44	54	57
Rb	7	10	10	15	3.4	10	10	3.8	3	9.1	31	26	12
Y	24	26	29	23	24	25	25	24	23	25	26	29	31
Zr	146	198	176	171	148	148	157	142	139	144	197	169	170
Nb	7.2	9.1	6.2	7.7	5.2	3.7	4.2	4.3	2.8	0.2	9.7	2.6	5.5
Mo	0.7	0.9	0.8	0.7	0.7	0.5	0.7	0.7	0.4	0.3	1	1	0.8
Sn	1	1.4	1.7	1.1	0.7	0.9	0.7	1	0.1	0	1.1	0	0.9
Sb	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0.1	0.1	0.1
Cs	0.2	0.7	0.5	0.3	0.3	0.5	0.6	0.2	0.3	0.6	0.9	0.4	0.8
Hf	2.6	4.2	3	3.1	2.3	2.4	2.5	2	2.1	2.1	4.4	2.3	2.9
Ta	0.5	2.7	0.3	0.4	0.1	0.1	0	0	0	0	0.8	0	0.1
Pb	4.9	6	8.6	5.4	4.7	4.9	5.2	4.8	4.4	6.1	8.5	7.2	5.5
Th	1.5	1.5	1.5	1.4	1.3	1.4	1.4	1	1	1.6	3.7	2.9	1.7
U	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	0.5	0.6	0.5	0.4	0.6	0.8	0.9	0.7
La	11.9	11.8	13.1	12.4	10.1	10.6	10.4	10	9.4	10.5	14.4	15.3	12.7
Ce	28.8	29	32.6	29.9	24.9	26.3	25.6	24.7	23.5	25.9	34.5	36.8	28.9
Pr	4.1	4.3	4.7	4.2	3.6	3.7	3.6	3.5	3.4	3.7	4.5	5.1	4.1
Nd	18.7	19.8	21.8	19.4	16.4	17.1	16.7	15.8	15.3	16.8	19.7	22.5	18.9
Sm	4.8	5.1	5.7	4.7	4.3	4.4	4.5	4	4.1	4.5	4.9	5.6	4.8
Eu	1.4	1.5	1.6	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.4	1.5	1.4
Gd	5	5.4	5.8	4.9	4.6	4.8	4.8	4.5	4.3	4.7	5.1	5.7	5.1
Tb	0.8	0.8	0.9	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9	0.8
Dy	4.7	5.2	5.6	4.6	4.6	4.8	4.7	4.5	4.4	4.6	4.9	5.4	4.9
Ho	1	1.1	1.2	0.9	1	1	1	0.9	0.9	0.9	1	1.1	1
Er	2.8	3.1	3.3	2.8	2.8	2.9	2.9	2.8	2.7	2.8	2.9	3.2	3
Tm	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4
Yb	2.5	2.8	3	2.6	2.5	2.7	2.6	2.5	2.4	2.5	2.7	2.9	2.7
Lu	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

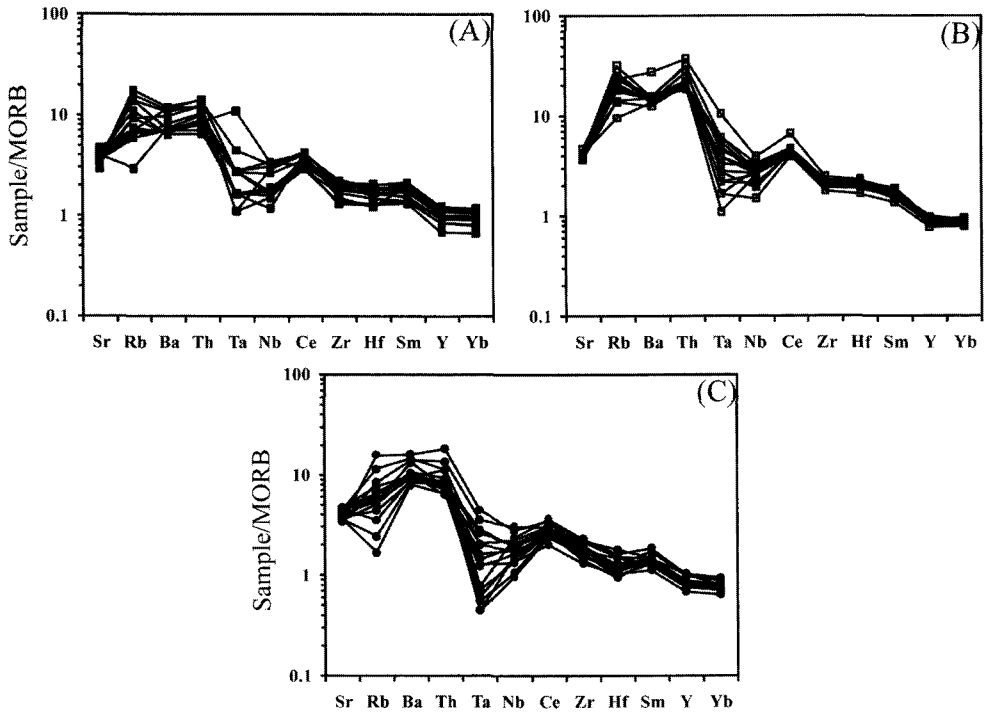


Fig. 9. MORB normalized spider diagram for the basaltic rocks in the study area. (A)Yeonil basalt (B)Yeonil basaltic andesite (C)Eoil basalt

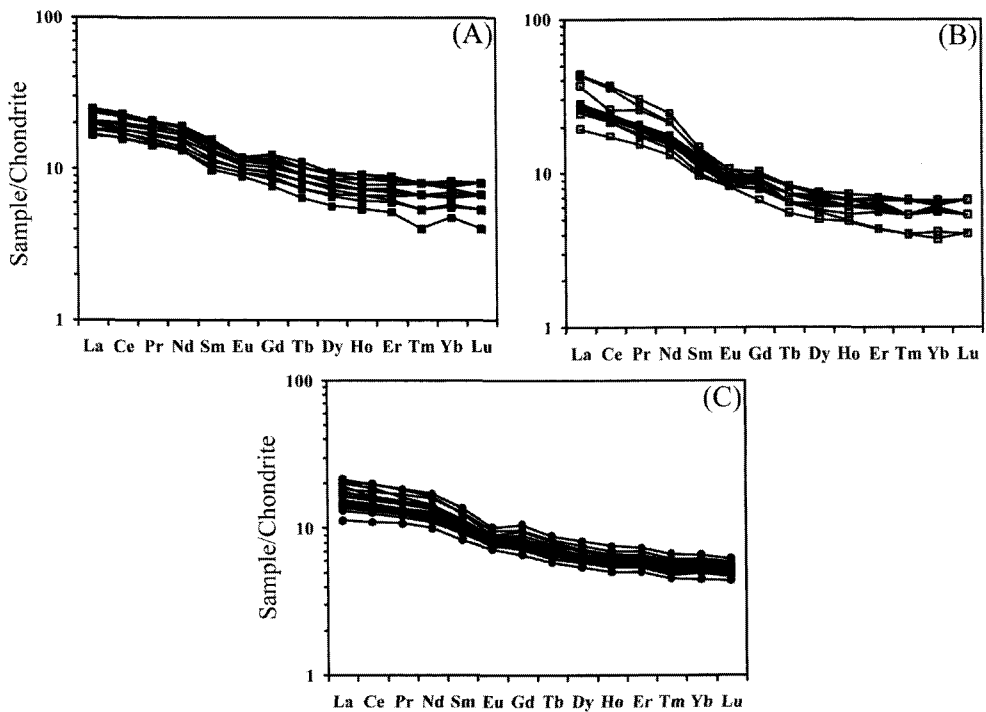


Fig. 10. Chondrite normalized REE patterns of the basaltic rocks in the study area. (A)Yeonil basalt (B)Yeonil basaltic andesite (C)Eoil basalt

Table 3. Representative microprobe analysis of plagioclase of the Eoil basaltic rocks in the study area

		SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	MnO	TiO ₂	Total	An	Ab	Or
EO 04-1	core	44.54	34.10	0.44	18.06	1.37	0.00	0.09	0.00	0.02	98.62	87.93	12.07	0.00
	rim	51.82	29.37	0.78	12.99	3.94	0.00	0.27	0.01	0.12	99.30	64.56	35.44	0.00
EO 06-1	core	54.57	27.05	0.48	12.49	4.36	0.20	0.14	0.02	0.07	99.38	60.58	38.27	1.15
	rim	55.49	26.79	0.94	11.68	4.61	0.23	0.32	0.00	0.10	100.17	57.55	41.10	1.35
EO 06-2	core	48.16	33.24	0.55	17.49	1.32	0.02	0.08	0.01	0.01	100.88	87.88	12.00	0.12
	rim	54.94	27.89	0.72	11.95	4.48	0.21	0.16	0.02	0.07	100.43	58.85	39.92	1.23
EO 06-3	core	52.60	29.23	0.53	12.98	3.87	0.16	0.12	0.00	0.07	99.57	64.34	34.71	0.94
	rim	54.19	28.92	0.64	12.06	4.31	0.20	0.14	0.03	0.08	100.57	60.01	38.81	1.18
EO 07-1	core	53.14	29.57	0.77	13.14	3.99	0.21	0.12	0.02	0.05	101.01	63.75	35.03	1.21
	rim	53.51	29.13	0.75	12.73	4.28	0.21	0.12	0.01	0.07	100.81	61.42	37.37	1.21
EO 07-2	core	53.57	29.16	0.55	12.91	4.20	0.19	0.13	0.00	0.02	100.73	62.26	36.65	1.09
	rim	52.96	28.72	0.75	12.81	4.11	0.21	0.17	0.01	0.09	99.82	62.50	36.28	1.22
EO 07-3	core	49.75	30.95	0.57	15.34	2.83	0.11	0.11	0.01	0.04	99.73	74.49	24.87	0.64
	rim	53.03	28.22	0.71	12.66	4.36	0.21	0.15	0.02	0.06	99.42	60.87	37.93	1.20
EO 07-4	core	48.69	31.52	0.63	18.03	1.19	0.01	0.05	0.02	0.00	100.15	89.28	10.66	0.06
	rim	55.92	26.27	0.66	12.15	4.56	0.23	0.11	0.01	0.09	99.99	58.76	39.91	1.32
EO 08-1	core	54.46	27.58	0.66	11.05	5.27	0.43	0.11	0.02	0.07	99.66	52.37	45.20	2.43
	rim	54.06	27.53	0.71	11.47	4.98	0.44	0.13	0.00	0.09	99.40	54.60	42.90	2.49
EO 08-2	core	47.66	31.60	0.39	16.09	2.43	0.07	0.11	0.02	0.03	98.38	78.22	21.38	0.41
	rim	54.81	25.43	0.77	9.16	6.08	0.64	0.10	0.00	0.10	97.09	43.78	52.58	3.64
EO 09-1	core	48.87	31.04	0.50	16.87	1.94	0.08	0.09	0.01	0.02	99.43	82.39	17.15	0.47
	rim	53.88	27.36	0.84	12.80	4.17	0.24	0.16	0.01	0.04	99.50	62.04	36.58	1.39
EO 10-1	core	49.79	31.30	0.49	16.69	1.29	0.05	0.07	0.03	0.06	99.77	87.46	12.23	0.31
	rim	53.45	27.76	0.79	11.93	4.62	0.31	0.13	0.01	0.11	99.11	57.75	40.47	1.79
EO 10-2	core	54.50	27.73	0.39	14.86	1.44	0.06	0.08	0.01	0.01	99.08	84.73	14.86	0.41
	rim	59.63	24.57	0.53	12.06	2.77	0.16	0.11	0.04	0.04	99.90	69.86	29.04	1.10
EO 10-3	core	56.92	20.05	8.54	6.84	3.93	0.65	3.15	0.14	0.51	100.73	46.45	48.30	5.26
	rim	62.37	22.67	0.91	5.01	6.29	2.61	0.16	0.02	0.15	100.18	25.69	58.37	15.94
EO 13-1	core	47.19	33.23	0.46	16.92	1.75	0.07	0.09	0.00	0.03	99.72	83.89	15.70	0.41
	rim	55.24	28.80	0.61	12.18	4.41	0.27	0.11	0.00	0.06	101.67	59.47	38.96	1.57
EO 13-2	core	46.66	33.35	0.45	17.22	1.58	0.06	0.07	0.02	0.03	99.44	85.46	14.19	0.35
	rim	53.94	28.12	0.62	11.41	4.79	0.30	0.13	0.01	0.05	99.37	55.83	42.42	1.75
EO 13-3	core	52.18	28.42	0.92	12.50	4.41	0.26	0.12	0.02	0.04	98.88	60.13	38.39	1.49
	rim	56.31	24.70	0.84	7.82	6.84	0.68	0.16	0.00	0.09	97.44	37.22	58.92	3.85
EO 14-1	core	56.09	27.16	0.67	10.24	5.32	0.58	0.08	0.01	0.09	100.25	49.81	46.83	3.36
	rim	53.46	27.90	0.81	11.89	4.70	0.37	0.15	0.00	0.09	99.37	57.07	40.82	2.11
EO 14-2	core	54.78	27.29	0.94	11.47	4.80	0.37	0.15	0.02	0.10	99.93	55.69	42.17	2.14
	rim	56.11	25.38	0.87	8.97	6.13	0.64	0.12	0.04	0.13	98.40	43.07	53.27	3.66
EO 15-1	core	49.66	30.97	0.62	14.67	3.16	0.16	0.09	0.00	0.04	99.38	71.29	27.79	0.93
	rim	54.06	28.00	0.70	11.44	5.00	0.33	0.13	0.01	0.10	99.76	54.79	43.33	1.88
EO 20-1	core	45.91	34.07	0.54	17.37	1.62	0.02	0.06	0.01	0.01	99.63	85.46	14.42	0.12
	rim	53.97	28.39	0.85	11.03	5.19	0.29	0.12	0.05	0.09	99.98	53.11	45.22	1.66
EO 20-2	core	45.90	33.84	0.61	16.84	1.59	0.03	0.06	0.01	0.01	98.88	85.25	14.57	0.18
	rim	54.71	27.39	1.09	10.10	5.65	0.38	0.14	0.02	0.13	99.58	48.61	49.21	2.18
EO 20-3	core	45.47	34.16	0.59	17.14	1.57	0.05	0.07	0.02	0.01	99.08	85.53	14.18	0.30
	rim	53.63	28.53	0.81	11.27	5.10	0.29	0.16	0.01	0.09	99.90	54.07	44.28	1.66

Table 3. Continued

		SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	MnO	TiO ₂	Total	An	Ab	Or
EO 21-1	core	53.06	2.05	12.46	16.95	0.31	0.00	14.82	0.36	1.20	101.22	96.80	3.20	0.00
	rim	52.51	29.12	1.16	12.61	4.12	0.00	0.26	0.00	0.07	99.84	62.84	37.16	0.00
EO 26-1	core	44.79	33.85	0.56	18.07	1.33	0.01	0.06	0.01	0.05	98.74	88.19	11.75	0.06
	rim	50.22	30.66	0.66	14.51	3.33	0.14	0.12	0.02	0.05	99.69	70.09	29.11	0.81
EO 26-2	core	46.78	33.28	0.58	17.64	1.43	0.03	0.10	0.01	0.01	99.86	87.05	12.77	0.18
	rim	52.07	29.09	0.70	13.00	4.15	0.19	0.12	0.02	0.07	99.41	62.69	36.22	1.09
EO 26-3	core	46.03	33.53	0.52	17.62	1.53	0.02	0.06	0.00	0.03	99.35	86.32	13.56	0.12
	rim	52.51	28.50	0.76	12.04	4.68	0.23	0.13	0.03	0.08	98.95	57.93	40.75	1.32
EO 36-1	core	46.98	33.47	0.56	17.18	1.51	0.00	0.08	0.00	0.01	99.80	86.28	13.72	0.00
	rim	53.60	30.07	0.65	13.35	3.42	0.00	0.12	0.02	0.04	101.26	68.33	31.67	0.00
EO 37-1	core	47.59	32.98	0.53	16.78	1.70	0.00	0.08	0.01	0.02	99.70	84.51	15.49	0.00
	rim	53.10	28.98	0.68	12.30	4.00	0.00	0.11	0.02	0.06	99.25	62.95	37.05	0.00
EO 38-1	core	49.77	32.20	0.58	15.83	2.47	0.00	0.11	0.01	0.04	101.06	77.98	22.02	0.00
	rim	52.75	29.87	0.59	13.09	3.97	0.00	0.14	0.01	0.05	100.47	64.56	35.44	0.00

Table 4. Sr-Nd isotopic ratios of the basaltic rocks in the study area

Sample No.	EO22	EO38	EO41	EO43	YB14	YB15	YB19	YB27	YB31
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.704717	0.704090	0.704342	0.704351	0.704498	0.704211	0.704595	0.704574	0.704156
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512715	0.512822	0.512771	0.512776	0.512740	0.512806	0.512705	0.512761	0.512821

이러한 선형 분포는 기원 마그마가 두 맨틀성분의 혼합으로 형성되었음을 시사한다(Fig. 11). 이는 Pb동위 원소나 여타 희토류원소의 정량분석을 통해서 보다

정확하게 판단할 수 있다.

암상별로 보았을 때는 현무암과 현무암질 안산암의 영역이 구분되어 있고 있어 분화에 따른 차이로 판단할 수 있지만 오차범위를 감안할 때 그 변화폭은 매우 작으며, 제주 화산암류의 경우, 암석 성분에 따른 변화양상이 Sr-Nd 동위원소비 분포양상과 일치하지 않아 동질 근원에서 유래하였으며 암상별로 차이가 없다고 판단하고 있다(박준범 외, 1996). 또한 백령도, 울릉도 화산암류의 분석결과에서도 암상 변화에 따라 분포가 일정하지 않음을 알 수 있다(김규한 외, 2002; Kim et al., 1999).

토 의

조구조적 위치

연구지역의 2개 분지에 분포하는 현무암들에 대한 미량원소를 이용한 지구조적 위치 연구 결과, 분지별로 지구조적 특성을 보이지는 않고 있다. 따라서 미량원소를 다양한 도표에 도시해 구조적 환경에 따라 다른 형태로 나타나는 현무암과 현무암질 안산암을 기준으로 연구를 수행하였다. 현무암 및 현무암질 안

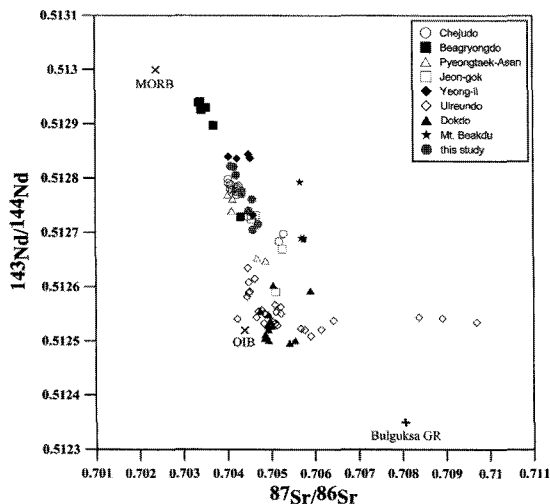


Fig. 11. ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd vs ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr variation diagram for Eoil and Yeonil Basalt. Proposed mantle components are shown as cross-hatched boxes and blobs labeled DMM, HIMU, PREMA, EM I, and EM II (Modified from Zndler and Hart, 1991)

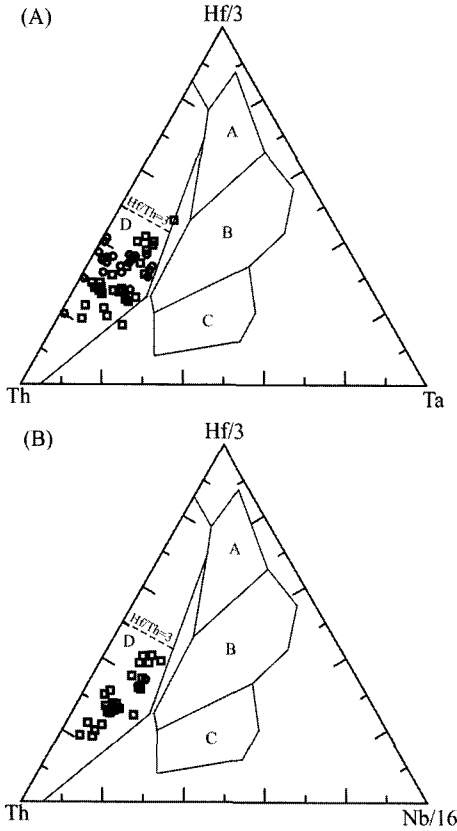


Fig. 12. Tectonomagmatic discrimination diagrams of the basaltic rocks in the study area (Wood, 1980). (A; N-type MORB, B; E-type MORB and within-plate tholeiites C; alkaline within-plate basalts, D; volcanic-arc basalts. Island-arc tholeiites plot in field D where $Hf/Th > 3$ and calc-alkaline basalts where $Hf/Th < 3$) (A) $Hf/3$ -Th-Ta diagram (B) $Hf/3$ -Th-Nb/16 diagram. Symbols are shown in Fig. 4.

산암의 미량원소와 희토류원소를 Wood(1980)의 도표에 도시해 보았을 경우에 분석대상은 화산호 현무암(Volcanic-arc basalt)의 영역에 넓게 분포하며, 칼크-알칼리 현무암의 특성을 보이고 있다(Fig. 12). Hf/Th 의 비교에서는, 현무암은 넓은 범위에 걸쳐 분포하는 반면, 현무암질 안산암은 칼크-알칼리 영역으로 조금 더 치우쳐 있음을 알 수 있다. Gill(1981)의 La-Th 도표에서 현무암은 조산대(Orogenic suite), 즉 화산호 현무암과 E-type MORB의 경계를 따라 분포하며, 현무암질 안산암은 조산대 안산암의 영역에 도시된다(Fig. 13). La-Ba 도표에서 분석대상은 MORB와 조산대 안산암의 영역에 넓게 분포하며, La-Th의 경우와 같이 현무암질 안산암은 medium-K 영역에 가깝게 분포한다.

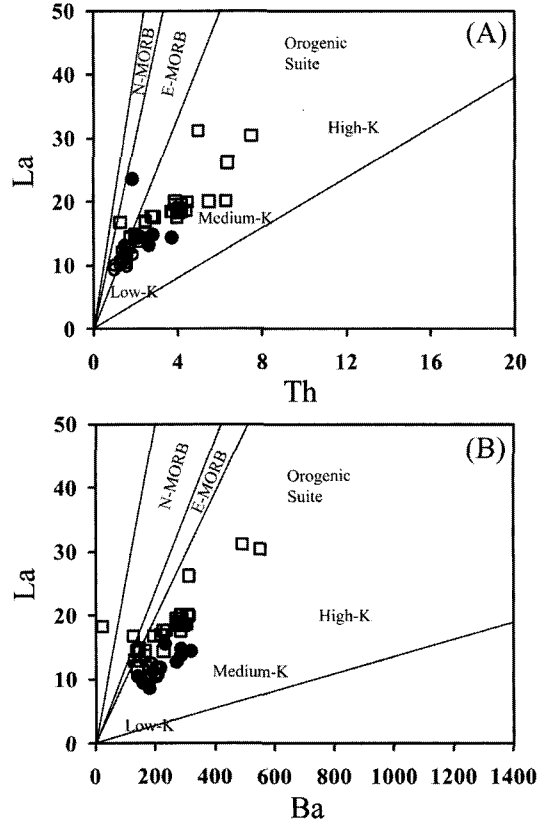


Fig. 13. Schematic diagram of incompatible trace element diagrams of (A) La-Th and (B) La-Ba (Gill, 1981). Symbols are shown in Fig. 4

맨틀 내에 혼재된 물질의 기원을 추적하기 위해 Weaver(1991)가 제안한 미량원소를 이용한 여러 가지 도표 중에서 Ba/Th-Th 도표에 분석 자료를 도시해 보았다(Fig. 14). 이에 따르면 분석대상 현무암은 EM I과 EM II 양쪽 영역에 분포하며, 현무암질 안산암은 EM II 영역에 도시되었다. 분석대상 현무암과 현무암질 안산암은 주원소와 미량원소의 분포양상이 유사한 것으로 보아 동일 마그마에 기원을 두고 있는 것으로 판단하고 있다. 그리고 마그마의 분화작용을 통해 현무암질 안산암이 형성되었으며, 이때 대륙지각의 혼입작용이나 분별결정작용은 약했음을 추정할 수 있다. 이는 동위원소 분석 결과와도 일치한다. 분석대상의 미량원소 분포양상은 칼크-알칼리 계열의 화산호 현무암 특징이 많이 나타나며, 일부는 판 내부 슐레이이트, 판 내부 현무암, 호상열도 현무암의 성질을 보이는 것도 있으나, 이처럼 다양한 결과는 섭입대 환경 하에서 나타난 특징으로 보인다. 동위원소 분석

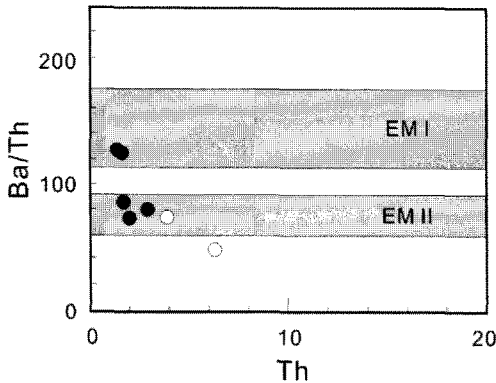


Fig. 14. Ba/Th-Th discrimination diagram(Weaver, 1991). Symbols are shown in Fig. 4.

결과에 따르면, 분석대상 화산암류는 결핍멘틀과 부화멘틀 성분의 혼합에 의한 마그마에 기원을 두고 있음을 볼 수 있다. 이에 대해 미량원소의 분석 결과를 보면 주로 부화멘틀II형의 혼합에 의한 것임을 알 수 있다.

마그마 기원

다양한 지화학적인 분석을 통해서 연구지역인 연일 분지와 어일분지에 넓게 분포하는 3기 현무암질 화산암을 형성시킨 근원 마그마의 기원과 생성환경을 유추하였다. 주원소분석을 통해서 연일현무암과 현무암질안산암, 어일현무암이 전형적인 칼크 알칼리 계열로 구분됨을 알 수 있었으며 이는 환태평양 조산대의 섭입활동과 관련된 환동해 분지의 지구조 변형사와 연관된 칼크알칼리계열의 마그마활동의 산물로 생각할 수 있다. 미량원소와 희토류원소 분석을 통해서 기원마그마의 성격을 좀 더 세밀히 구분할 수 있는데, LIL(Large Ion Lithophile)원소인 Sr, Rb, Ba, Th 원소의 경우, 상대적으로 높은 함량을 가지는데 이것은 함수 유체에 녹기 쉬운 원소들이라서 섭입 시에 탈수작용으로 형성된 함수 유체에 부화되어 있다가 섭입되는 해양지각으로부터 맨틀에 공급되어 섭입과 관련된 환경에서 높게 부화되는 경향을 가지기 때문이다. 또한 HFS(High Field Strength)원소인 Zr, Hf, Nb, Ta 등의 원소 함량이 상대적으로 낮은 것은 이들이 함수 유체에 녹기 어려워서 고체상에 잔류하는 이동성이 적은 원소들이기 때문이다. 또한 Ce, P, Sm 등의 원소가 부화되어 나타나는 현상은 화산호와 관련된 칼크알칼리계열의 암석에서 나타나는 특징으로 섭입되는 해양지각의 부분용융으로 생긴 규질 용

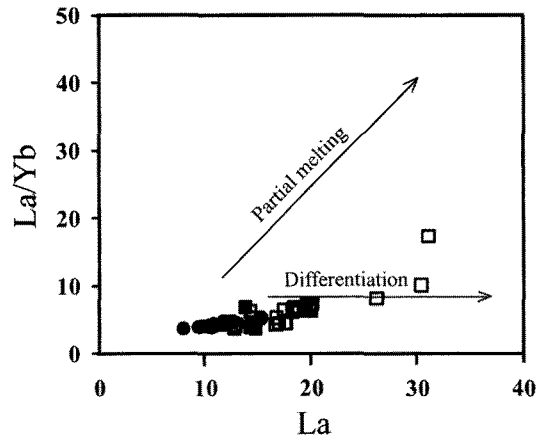


Fig. 15. La/Yb-La diagram(Martin, 1987) showing two different lines of both partial melting trend and differentiation trend. Symbols are shown in Fig. 4.

융물의 운반작용과 해양퇴적물에서 기원한 것을 유추할 수 있다. La에 대한 La/Yb비의 증가 경향으로 마그마의 진화양상을 추정한 Martin(1987)의 도표에 분석 자료를 도시해 보면 현무암과 현무암질 안산암의 경향성을 비교하였을 때 분화작용 (Differentiation)을 지시하는 방향으로 향하는 것으로 보아 현무암을 형성한 마그마가 마그마 분화작용에 의해 현무암질 안산암을 형성한 것으로 생각된다(Fig. 15). 또한 McMillan and Dungan(1988)은 La이 증가함에 따라 La/Yb가 증가하는 양상은 휘석, 사장석 및 저어콘의 분별정출 작용과 일치한다고 하였다.

이러한 결과를 바탕으로 연일현무암과 현무암질 안산암, 어일현무암을 형성시킨 마그마는 조산대 화산호와 연관되어 있음을 알 수 있다. 또한 희토류 패턴의 유사함으로 볼 때, 두 암류는 동일 기원의 마그마에서 유래하였음을 알 수 있다. Sr-Nd 동위원소 분석을 통해서 연구지역 현무암과 현무암질안산암의 경우 기원 마그마 분화 동안 대륙지각 물질과 해수의 혼합 등의 혼성작용이 발생했을 가능성이 낮음을 알 수 있다.

결론

1. 조사 대상 암석들은 염기성 내지 중성 화산암에 해당하며 TAS도에 현무암과 현무암질 안산암의 영역에 점시되며, 비알칼리암 계열에 해당한다. SiO₂가 증가 할 때 Na₂O와 K₂O는 증가하며 TiO₂, FeO*, CaO, MgO, P₂O₅는 감소하는 경향을 보여준다. K₂O-

SiO₂도표에서도 중K계열의 칼크알칼리계열에 해당함을 알 수 있다.

2. 분화가 진행됨에 따라 Co, Ni, V, Zn, Sc 등과 같은 호정성 원소는 감소하고, Ba, Rb 등의 불호정성 원소들은 증가하는 특징을 보여준다. 0.81~1.00의 Eu/Eu*값은 사장석의 분별작용이 약했다는 것을 지시한다. 또한 사장석 결정의 핵은 An_{63.46-98.38} Ab_{1.62-32.96} Or_{0-3.58}의 영역에서, 최외각은 An_{40.89-82.44} Ab_{17.10-46.43} Or_{0-12.68}의 영역에 해당한다.

3. 연구지역의 현무암 및 현무암질 안산암의 미량 원소와 희토류원소들은 판 내부 쏘래이트와 화산호 현무암의 영역에 넓게 분포함을 알 수 있다. 그리고 현무암질 안산암이 보다 칼크-알칼리 암석의 화학적 특성에 가까움을 알 수 있다. 현무암은 EM I과 EM II 양쪽 영역에 분포하며, 현무암질 안산암은 EM II 영역에 도시되지만, 주원소와 미량원소의 분포양상이 유사한 것으로 미루어 보아 동일 마그마에 기원을 두고 있는 것으로 판단된다. 그리고 현무암은 마그마의 분화작용을 통해 현무암질 안산암으로 진화되었으며, 이때 대류지각의 혼염작용이나 분별결정작용은 약했음을 추정할 수 있다.

사 사

본 논문의 심사과정에서 유익한 비평과 조언을 주신 윤성호 교수님과 박준범 박사님께 진심으로 감사드립니다. 시료분석에 도움을 주신 기초과학지원연구원에 감사를 표한다.

참고문헌

- 김규한, 2000, 독도 알칼리 화산암류의 K-Ar연대와 Nd-Sr 조성. 지질학회지, 36, 313-324.
- 김봉균, 1970, 한국의 신 제3기 퇴적층에 관한 연구. 지질학회지, 6, 77-96.
- 김봉균, 정창희, 김수진, 1975, 경북 영일지역에 발달하는 갈탄층의 층서적 연구. 지질학회지, 11, 240-252.
- 김진섭, 손문, 김종선, 김인수, 2002, 한반도 남동부 제3기 압맥군과 지구조적 중요성. 암석학회지, 11, 169-181.
- 노진환, 1989, 장기 지역 제3기층의 불석화작용. 지질학회지, 25, 30-43.
- 박선애, 1994, 경북 영일 지역에 분포하는 신생대 제3기 화산암류에 대한 암석학적 및 암석 화학적 연구. 경북대학교 대학원 이학박사 학위논문, 108p.
- 박성준, 1988, 장기지역의 층서에 관하여. 부산대학교 대학원 이학석사 학위논문, 109p.
- 박주희, 김춘식, 김진섭, 성종규, 김인수, 이준동, 백인성, 1999, 장기지역에 분포하는 중성-염기성 용암에 관한 암석학적 연구(1): 일반 지질 및 암석화학적 특징. 암석학회지, 8, 149-170.
- 박준범, 박계현, 정창식, 1996, 제주도 화산암류의 Sr-Nd-Pb 동위원소 연구. 암석학회지, 5, 89-107.
- 손문, 김인수, 옥수석, 2001, 한반도 동남부 제3기 마이오세 어일분지내 등지형 화산합물구조. 암석학회지, 10, 121-131.
- 우경식, 김덕미, 백광호, 1991, 포항, 어일 및 양남분지내에 분포하는 중기 마이오세 연체동물 화석의 미구조와 탄산염 속성작용. 지질학회지, 27, 293-308.
- 윤선, 1988, 한반도 남부의 제3기 층서. 한국과학재단 연구보고서, 25p.
- 윤선, 장기홍, 유현수, 이영길, 1991, 한반도 남부의 제3기 분지 발달사. 광산지질, 24, 301-308.
- 윤성호, 김진섭, 옥수석, 홍현근, 김형식, 1994, 영일반도 일원의 화산암류에 대한 암석학적 연구. 한국지구과학회지, 15, 126-138.
- 윤성호, 고정선, 박기호, 이영애, 2000, 울산 동부 마이오세 당사리화산암류에 대한 암석학적 연구. 암석학회지, 9, 169-186.
- 이문원, 원종관, 노진환, 1986, 구룡포 지역의 지질 및 화산암류에 대한 연구. 한국지구과학회지, 7, 11-18.
- 이문원, 원종관, 김광호, 노진환, 1988, 구룡포지역에 분포하는 신생대 화산암의 지질과 암석학적 연구. 지질학회지, 24, 1-15.
- 이정현, 윤성호, 고정선, 2002, 갑포지역의 마이오세 쌍모식(bimodal) 화산활동과 화산암류의 암석학적 연구. 한국암석학회 한국광물학회 2002년도 공동학술발표회 한국암석학회 창립 10주년 기념 국제학술발표회, 103-105.
- 이정현, 윤성호, 고정선, 2004, 한반도 남동부 어일분지의 마이오세 화산암의 암석기재적 연구. 암석학회지, 13, 64-80.
- 이현구, 문희수, 민경덕, 김인수, 윤혜수, Tesumaru Itaya, 1992, 포항 및 장기분지에 대한 고지자기, 층서 및 구조 연구; 화산암류의 K-Ar연대. 광산지질, 25, 337-349.
- 최위찬, 황재하, 윤옥, 김동학, 1988, 한국지질도(1:25,000) 어일도폭 및 설명서. 한국동력자원연구소, 42p.
- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1972, Rock forming minerals Vol. 1, orth- and ring silicates. Longmans, Group Ltd, London, England., 77-112.
- Foley, S.F. and Wheller, G.E., 1990, Parallels in the origin of the geochemical signatures of island arc volcanics and continental potassic igneous rocks: The role of residual titanates. Chem. Geol., 85, 1-18.
- Gill J.B., 1981, Orogenic andesites and plate tectonics. Springer, Berlin., 390p.
- Ginibre C., Wormoer G. and Kronz A., 2002 Minor- and trace element zoning in plagioclase: implications for magma chamber processes at Parinacota volcano, northern Chile. Contrib Minerla Petrol., 143, 300-315.
- Hawkesworth, C.J. and Powell, M., 1980, Magma genesis

- in the lesser Antilles island arc. *Earth and Planetary Science Letters.*, 51, 297-308.
- Huzioka, K., 1972, The Tertiary floras of Korea. *Jour. Mining College of Akida Univ.*, 5, 1-83.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.P.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Jour. of Earth Sci.*, 8, 523-548.
- Kim, K.H., Won, J. K., Matsuda, J., Nagao, K. and Lee, M. W., 1986, Paleomagnetism and K-Ar age of volcanic rocks from Guryongpo area, Korea. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology.*, 19, 231-237.
- Kim K.H., Tanaka, T., Nagao, K., Jang, S.K., 1999, Nd and Sr isotope and K-Ar ages of the Ulreungdo alkali volcanic rocks in the East Sea, South Korea. *Geochemical Journal.*, 33, 317-341.
- Kuno H., 1968, Differentiation of basalt magmas. In: Hess H.H. and Poldervaart A. (eds.), *Basalts: The Poldervaart treatise on rocks of basaltic composition.* 2, Interscience, New York., 623-688.
- Le matre, R.W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre, J., Le Bas, M.J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H., Streckeisen, A., Woolley, A.R. and Zanettin, B., 1989, A classification of igneous rocks and glossary of terms. Blackwell, London, 193p.
- Martin, H., 1987, Petrogenesis of Archaean trondhjemites, tonalites, and granodiorites from eastern Finland: major and trace element geochemistry. *J. Petrol.*, 28, 921-953.
- McMillan, N.J. and Dungan, M.A., 1988, Open system magmatic evolution of the Taos Plateau volcanic field, northern New Mexico. 3 - The petrology of andesites and dacites: *Journal of Petrology*, 29, 527-557.
- Pearce J.A., 1983, Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth C.J. and Norry M.J. (eds.), *Continental basalts and mantle xenolith.* Shiva, Nantwich., 230-249.
- Perfit M.R., Gust D.A., Bence A.E., Arculus R.J. and Taylor S.R., 1980, Chemical characteristics of island arc basalts: implications for mantle sources. *Chemical Geology.*, 30, 227-256.
- Shimadzu, M., Kawano, Y. and Kagam, H., 1990, Major and minor element compositions and Sr, Nd isotopic ratios of basaltic rocks from the Pohang-Yangnam area. *Korea. Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology.*, 85, 405-415.
- 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 Geological Society of Korea.* 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. *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology.*, 93, 441-461.
- Tateiwa, I., 1924, 1:50000 Geological Atlas of Chosen, No. 2, Ennichi, Kuryuho and Choyo sheets. *Geol. Surv. Chosen (in Japanese).*
- Weaver B.L., 1991, The origin of ocean island basalt end-member composition: trace element and isotopic constraints. *Earth and Planetary Science Letters.*, 104, 381-397.
- Wilson M., 1989, *Igneous petrogenesis.* Unwin Hyman, London., 466p
- Wood D.A., 1980, The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustercontamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth and Planetary Science Letters.*, 50, 11-30.
- Yoon, S., 1986, Tectonic history of the Tertiary Pohang and Yangnam basins, Korea. *Essays in Geology Professor Nobu Kitamura Commemorative Volume.*, 637-644.
- Yoon, S., 1989, Tertiary stratigraphy of the southern Korean Peninsula. *Proc. Internat. Pacific Neogene. conti. Mari. Events, IGCP-246, Nanjing Univ. Press.* 195-207.
- Yoon, S., 1991, Tertiary stratigraphy of Tertiary Pohang and Yangnam basins, Korea: With a remark on the origin of the Yamato basin of the Japan Sea. *Saito Ho-on Kai Spec. Pub.*, 3, pp.303-309.
- Zndler A. and Hart S.R., 1986, Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth and Planetary Science Letters.*, 14, 493-571.

2009년 9월 10일 접수
 2009년 9월 14일 심사개시
 2011년 1월 18일 채택