

오대산 지역에 나타나는 맨거라이트와 반려암의 특징과 트라이아스기 한반도 지체구조 해석에 대한 의미

김태성¹ · 오창환^{1*} · 김정민²

¹전북대학교 지구환경과학과, 전북대 지구환경시스템 연구소, ²한국기초과학지원연구원

The Characteristic of Mangerite and Gabbro in the Odaesan Area and its Meaning to the Triassic Tectonics of Korean Peninsula

Taesung Kim¹, Chang Whan Oh^{1*}, Jeongmin Kim²

¹Department of Earth and Environmental Sciences and The Earth and Environmental Science System Research Center
Chonbuk National University, Jeonju 664-14, Korea

²Division of Earth and Environmental Sciences, Korea Basic Science Institute, Chungbuk 363-883, Korea

요약: 경기육괴 동부에 위치하는 오대산 지역에서는 맨거라이트와 반려암으로 구성된 화성암체가 원생대 초기에 형성된 혼성편마암을 관입하고 있다. 맨거라이트는 사방휘석, 단사휘석, 각섬석, 흑운모, 사장석, 퍼어 사이틱 K-장석, 석영으로 이루어져 있으며 반려암의 광물군은 맨거라이트와 유사하나 반려암내에서는 각섬석이 사방휘석 주변에 적은 양으로 나타나며 퍼어사이틱 K-장석이 나타나지 않는다. 맨거라이트내에 반려암이 포획암 형태나 불규칙한 형태로 나타나며 두 암석의 경계가 불분명하다. 반려암질 포획암내에는 맨거라이트에서 볼 수 있는 퍼어사이틱 K-장석을 포함한 우백질부가 렌즈상으로 포함되어 있다. 이러한 것들은 두 개의 화성암이 액체상태에서 서로 혼합되었음을 지시한다. SHRIMP 저어콘 연대 측정결과 맨거라이트와 반려암으로부터 각각 234 ± 1.2 Ma와 231 ± 1.3 Ma의 트라이아스기 중기에 해당하는 연령을 얻었다. 이 연령은 홍성(226-233 Ma)과 양평(227-231 Ma)지역의 트라이아스기 대륙충돌 후 화성암들의 연령과 유사하다. 맨거라이트와 반려암은 고함량 Ba-Sr 화성암(high Ba-Sr granite)이고 쇼쇼나이틱(shoshonitic) 하며, 대륙충돌 후 판 내부 환경에서 만들어졌다. 한편, 이 암석들은 대부분 경회토류와 친석원소가 부화되어 있으며 Nb-Ta-P-Ti 부(-) 이상을 보이는 섭입대 화성암의 특징도 보여준다. 위의 지화학적 특징들은 오대산 맨거라이트와 반려암은 대륙충돌 이전에 있었던 섭입시기에 지각물질에 의해 부화된 맨틀이 대륙충돌 후 분리된 대륙판과 해양판 사이 공간으로 유입된 연약권의 열에 의해 부분용융이 되면서 만들어졌음을 지시한다. 오대산 지역의 맨거라이트와 반려암을 포함한 경기육괴와 임진강대 북부에 나타나는 약 230 Ma의 대륙충돌 후 화성암의 분포는 이 시기에 일어난 한반도내 북중국판과 남중국판 충돌의 경계가 홍성 지역을 지나 양평-오대산지역과 옥천변성대 사이 지역으로 연결될 것임을 강하게 시사한다.

핵심어: 경기육괴, 오대산, 맨거라이트, 반려암, 트라이아스기, 대륙충돌 후 환경

Abstract: The igneous complex consisting of mangerite and gabbro in the Odaesan area, the eastern part of the Gyeonggi Massif, South Korea, intruded early Paleo-proterozoic migmatitic gneiss. The mangerite is composed of orthopyroxene, clinopyroxene, amphibole, biotite, plagioclase, perthitic K-feldspar, quartz. The gabbro has similar mineral assemblage but gabbro has minor amounts of amphibole and no perthitic K-feldspar. The gabbro occurs as enclave and irregular shaped body within the mangerite, and the boundary between the mangerite and gabbro is irregular. Leucocratic lenses with perthitic K-feldspar are included in the gabbro enclaves. These textures represent mixing of two different magmas in liquid state. SHRIMP U-Pb zircon age dating gave 234 ± 1.2 Ma and 231 ± 1.3 Ma for mangerite and gabbro, respectively.

*Corresponding author

Tel: 063-270-3397

E-mail: ocwhan@jbnu.ac.kr

These ages are similar with the intrusion ages of post collision granitoids in the Hongseong (226~233 Ma) and Yangpyeong (227~231 Ma) areas in the Gyeonggi Massif. The mangerite and gabbro are high Ba-Sr granites, shoshonitic and formed in post collision tectonic setting. These rocks also show the characters of subduction-related igneous rock such as enrichment in LREE, LILE and negative Nb-Ta-P-Ti anomalies. These data represent that the mangerite and gabbro formed in the post collision tectonic setting by the partial melting of an enriched lithospheric mantle during subduction which occurred before collision. The heat for the partial melting was supplied by asthenospheric upwelling through the gap between continental and oceanic slabs formed by slab break-off after continental collision. The distribution of post-collisional igneous rocks (ca. 230 Ma) in the Gyeonggi Massif including Odaesan mangerite and gabbro strongly suggests that the tectonic boundary between the North and South China blocks in Korean peninsula passes the Hongseong area and further extends into the area between the Yangpyeong-Odaesan line and Ogcheon metamorphic belt.

Key word: Gyeonggi Massif, Odaesan, Mangerite, Gabbro, Triassic, Post collision tectonic setting

서론

1980년도 말에 북중국판과 남중국판의 충돌에 의해 다비-수루 충돌대가 형성되었음이 확인되었으며, 그 이후 다비-수루 충돌대가 한반도로 연결될 것이라고 생각되어 왔다(Li *et al.*, 1993; Yin and Nie, 1993; Li *et al.*, 1994; Ernst and Liou, 1995; Chang, 1996; Zhang, 1997; Zhai and Liu, 1998). 여러 학자들이 임진강대로 다비-수루 충돌대가 이어질 것이라는 제안을 하였으나(Yin and Nie, 1993; 조문섭 외, 1995; Ree *et al.*, 1996; Zhang, 1997). 충돌대에서 나타나는 고압 변성작용이나 오피올라이트(ophiolite)와 같은 확실한 증거를 제시하지 못하였다. 최근에 임진강대가 아닌 경기육괴 서남부에 위치한 홍성에서 충돌대의 증거인 고압변성작용을 지시하는 에클로자이트(eclogite)가 발견되었고 변성작용 시기가 트라이아스기 중기임이 인지되었으며(Oh *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2006), 경기육괴 동부에 위치한 오대산 인근 지역에서는 페름기 후기의 연대를 보이는 대륙 충돌 후 환경(post collision tectonic setting)에서 형성된 맨저라이트(mangerite)와 역시 대륙 충돌시에 일어난 초고온 변성작용이 인지되었다(Oh *et al.*, 2006a; 2006b).

최근에는 트라이아스기 중기에 대륙 충돌 후 환경에서 일어난 마그마활동이 오대산 지역뿐 아니라 경기육괴 여러 지역에서 인지 되었다. 경기육괴 서부에 위치한 홍성 지역에서 233 Ma 해미 화강암(Choi *et al.*, 2008)과 232 Ma의 맨저라이트(Seo *et al.*, 2010)가 발견되었고 남양 지역에서 227 Ma의 화강암이 발견되었으며(Sagong *et al.*, 2005), 경기육괴 중부 지

역인 양평 지역에서 227~231 Ma의 섬장암과 반려암(Williams *et al.*, 2009; Lee and Oh, 2010) 그리고 춘천 후동리 지역에서 228 Ma 섬록암(박영록, 2009)이 발견되었다. 경기육괴뿐 아니라 임진강대의 북쪽에 위치한 황해도 지역에서도 트라이아스기 중기에 대륙 충돌 후 환경에서 만들어진 마그마 활동이 인지되었으며 이와 함께 휴전선 북쪽에 동서에 걸쳐 분포하는 트라이아스기의 화성암들도 대륙 충돌 후 환경에서 만들어진 것으로 추정되었다(Peng *et al.*, 2008). 이러한 증거들은 중국의 다비-수루 충돌대가 임진강대가 아닌 경기육괴에 위치하는 홍성으로 이어진 후 오대산 지역으로 연결될 가능성을 제시하고 있으며(Fig. 1; Oh, 2006; Oh and Kusky, 2007) 홍성-오대산 충돌대 이북에 대륙 충돌 후 형성된 트라이아스기 화성암들이 광범위하게 생성되었음을 지시한다.

본 연구 대상인 경기육괴 동부에 위치한 오대산 지역에서 발견된 페름기 후기의 충돌 후 화성암인 맨저라이트 역시 트라이아스기 중기 일 것이라는 주장이 제기되었다(정연중 외, 2008; 이기욱 외, 2009). Oh *et al.* (2006a)이 오대산 맨저라이트 형성시기를 페름기말로 추정하였지만 다른 충돌 화성암 연구들에서 주로 쓰인 SHRIMP로 연대측정을 하지 않았고 단결정을 사용하였기에 신뢰성이 부족했었다. 그리고 Oh *et al.* (2006a)은 오대산 맨저라이트를 충돌 후 화강암으로 정의하였지만 충돌 후 화강암을 처음 소개하는 논문이었기 때문에 광천 맨저라이트에 대한 논문(Seo *et al.*, 2010)에서처럼 그 생성원인이 자세하게 연구되지 못하였으며, 본 연구를 통하여 오대산 맨저라이트 화성암체가 단일 암체가 아니라 맨저라이트와

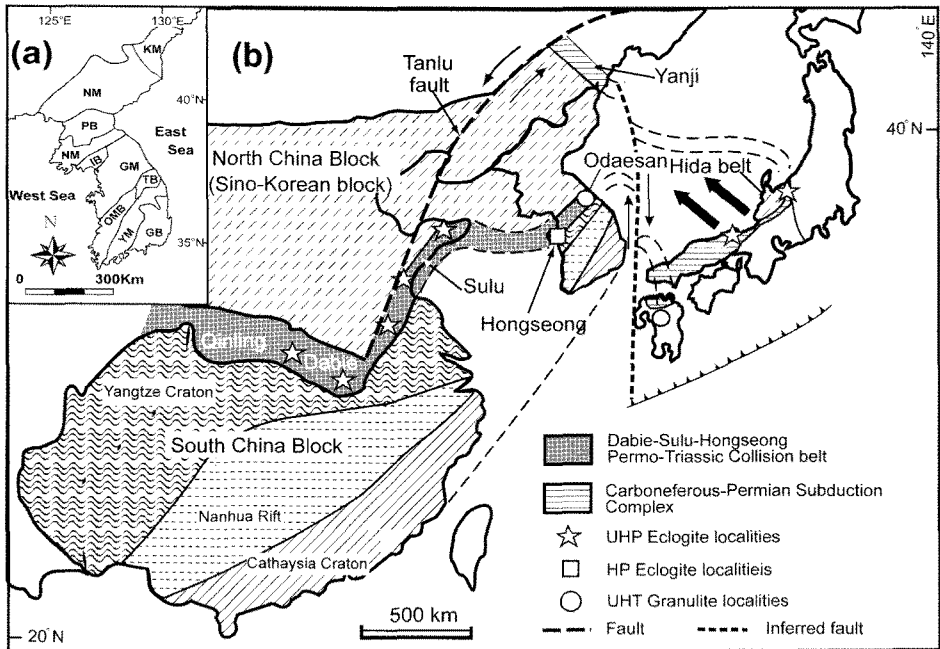


Fig. 1. (a) Simplified geologic map of Korean Peninsula and (b) Simplified tectonic map and metamorphic trend along the Dabie-Hongseong collision belt (modified after Oh and Kusky, 2007). Westward along the Dabie-Hongseong collision belt, the metamorphism changes from UHT (ultrahigh-temperature metamorphism, stars) to HP (high-pressure metamorphism, square) and UHP (ultrahigh-pressure metamorphism, circle). Abbreviations: KM, Kwanmo Massif; NM, Nangrim Massif; PB, Pyeongnam Basin; IB, Imjingang belt; GM, Gyeonggi Massif; OMB, Okcheon metamorphic belt; TB, Taebaeksan Basin; YM, Youngnam Massif; GB, Gyeonggang Basin.

반려암의 복합체임을 확인하였다. 따라서 이러한 기존 연구의 문제점들을 해결하기 위하여 오대산 맨거라이트에 대한 재검토가 필요하다.

본 연구에서는 오대산 지역 맨거라이트 암체내에 나타나는 맨거라이트와 기존 연구와는 달리 새롭게 기재된 반려암의 연령과 암석 및 광물학적 특성을 밝히고 이들 암체간의 관계와 이들 암석이 생성된 원인과 지구조환경을 밝혔다. 그리고 이들 암체가 형성된 지구조 모델을 제시하고 연구 결과를 기존 트라이아스기 후기의 충돌 후 화강암들에 대한 연구 결과와 종합하여 경기육괴내 북중국판과 남중국판의 충돌대의 가능한 위치를 제시하고자 한다.

지질개요

경기육괴는 한반도에서 중앙부에 위치하며 북쪽으로는 임진강대에 의해 남령육괴와 분리되며 남쪽으로는 옥천변성대에 의해 영남육괴와 분리된다. 경기육괴는 오랫동안 원생대 초기(약 18-19억년)의 변성연령을 보여주는 변성암들과 주라기 대보 화성암류(약

1.8-1.6억년)로 주로 이루어졌으며 부분적으로 트라이아스기 이후에 퇴적된 대동계 퇴적암이 분포하는 것으로 생각되어왔다(김옥준, 1971; Kim, 1972; 김옥준, 1973; Lee *et al.*, 1997; 정창희 외, 1999; 조문섭 외, 1999; Kim *et al.*, 1999). 원생대 초기 변성암들은 호상편마암, 혼성질 편마암 그리고 우백질 편마암과 같은 편마암류들로 주로 구성되고 편암류와 규암을 포함하며, 경기육괴의 제한된 지역에서 시생대의 변성퇴적암류가 나타난다(오창환 외, 2006; 조동룡 외, 2006; Cho *et al.*, 2008).

이러한 기존 해석과 달리 최근 연구에 의해 경기육괴에서 대륙 충돌에 연관된 트라이아스기 화성작용과 변성작용이 여러 곳에서 인지되고 있을 뿐 아니라 경기육괴 서남부에 위치한 홍성-태안 지역에서는 원생대 말기의 화성작용과 고생대 중기의 화성 및 변성작용이 인지되고 있으며 이제까지 한반도에 존재하지 않을 것이라고 생각되었던 고생대 중기(420~280 Ma)의 퇴적암들이 존재할 가능성이 보고되고 있다(임순복 외, 2005; Jeon *et al.*, 2007; Oh *et al.*, 2009, 2010; Cho *et al.*, 2010; Kim and Oh, 2010).

본 논문의 연구 지역인 오대산지역은 경기육괴 동부에 위치하고 있으며 주로 편마암 복합체로 이루어져 있다. 편마암복합체는 혼성질 편마암, 반상변정질 편마암으로 주로 이루어져 있으며(Fig. 2), 소규모의 규암, 각섬암, 결정질 석회암 및 우백질 편마암 등을 협재하고 있다(김봉균 외, 1975; 이대성 외, 1975; 권용완, 1996). 이들 편마암 복합체는 원생대 초기에 변성작용을 받아서 형성되었으며 이 변성작용 시기의 오대산 지역의 변성 정도가 동쪽에서 서쪽으로 증가하며 서쪽지역은 백립암상의 중압형 변성작용(5.4~7.4 kb, 776~789°C)을 받았다(권용완 외, 1997). 이들 편마암 복합체는 1850 Ma경 화성암체에 의해 관입되었다(Oh *et al.*, 2006b). 구룡층군은 편마암복합체를 부정합적으로 피복하고 있으며 오랫동안 원생대 변성암으로 생각되어왔으나 최근 구룡산층군으로

부터 고생대 중기(378~420 Ma)의 쇄설성 저어콘이 확인되어 구룡층군이 고생대 중기 내지 후기의 퇴적암층일 가능성이 제시되었다(조동룡, 2010). 구룡산층군은 규암층을 경계로 상위는 흑운모 편암, 각섬암, 결정질 석회암, 대리암 등으로 구성되어 있다(김봉균 외, 1975; 이대성 외, 1975; 권용완, 1996).

권용완 외(1997)은 오대산 지역에서 일어난 두 번째 변성작용은 저압형 변성작용(6kb이하, 680~750°C)으로써 맨저라이트 주변에 집중되어 나타나며 최고 변성작용은 상부 각섬암상에 해당한다고 밝혔지만, Oh *et al.* (2006b)은 맨저라이트 주변 변성암을 다시 연구하여 이들 암석이 폐름기 말기인 245 Ma 경에 초고온 변성작용(914~1157°C)을 받았으며 그 이후 저압형 상부 각섬암상의 후퇴 변성작용을 받았음을 밝혔다.

오대산 편마암복합체는 부분적으로 맨저라이트를 포함하는 화성암체에 의하여 관입되었다. Oh *et al.* (2006a)은 맨저라이트 암체가 실제로는 불균질하며 우백질 맨저라이트(felsic mangerite)와 우흑질 맨저라이트(mafic mangerite)로 구성되어 있고 폐름기 말기에 충돌 후 환경에서 만들어진 화성암체임을 밝혔다. 본 연구에서는 우백질 맨저라이트만이 실제 맨저라이트이며 우흑질 맨저라이트라고 기재된 암석은 맨저라이트가 아니라 반려암임을 확인하였고 이 두 암석이 모두 트라이아스기 중기(약 230 Ma)에 만들어졌음을 확인하였다. 그리고 편마암 복합체는 다시 부분적으로 주라기에 다시 화강암에 의해 관입되거나 백악기 퇴적암층에 의해 부정합으로 덮힌다.

암석각론

본 연구지역에서 혼성질 편마암을 관입하고 있는 맨저라이트 암체는 권용완(1996)에 의해서 처음으로 보고되었다. 맨저라이트는 하이퍼신(hyperthene) 문조 나이트라고도 하는데(Streckeisen, 1974), 퍼어사이틱 K-장석과 하이퍼신이 함께 존재하는 것이 특징적이다. 맨저라이트가 처음 보고된 이후, Oh *et al.* (2006a)은 맨저라이트 암체를 우백질과 우흑질 맨저라이트로 구분하였다. 하지만, 본 연구에서는 상대적으로 우백질 맨저라이트만이 퍼어사이틱(perthitic) K-장석과 하이퍼신을 포함하는 맨저라이트로 확인되었고 상대적으로 고철질인 우흑질 맨저라이트는 퍼어사이틱 K-장석이 존재하지 않았다. 이 암석은 암석 분류도를

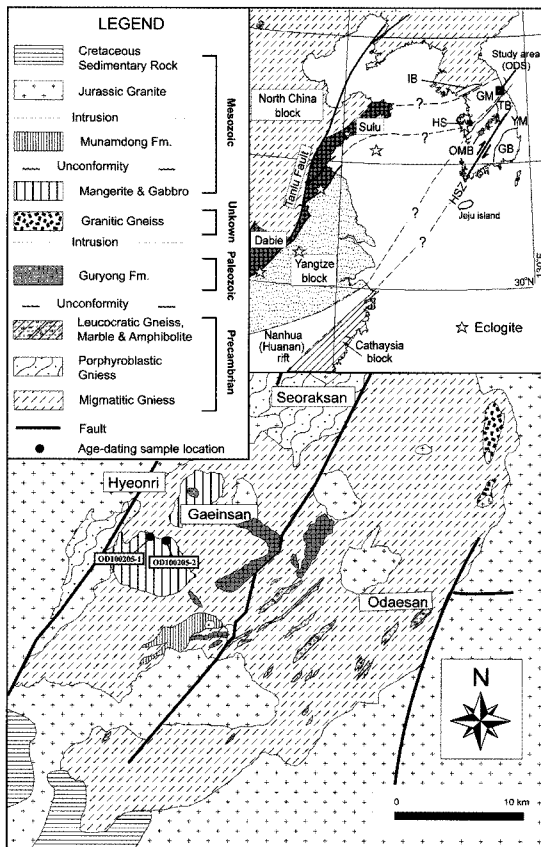


Fig. 2. Simplified geologic map of the Odaesan Area (modified after Oh *et al.*, 2006a) with simplified tectonic map of northeast Asia. Abbreviations: HS, Hongseong area; ODS, Odaesan area. Other abbreviations are the same as those used in Figure 1.

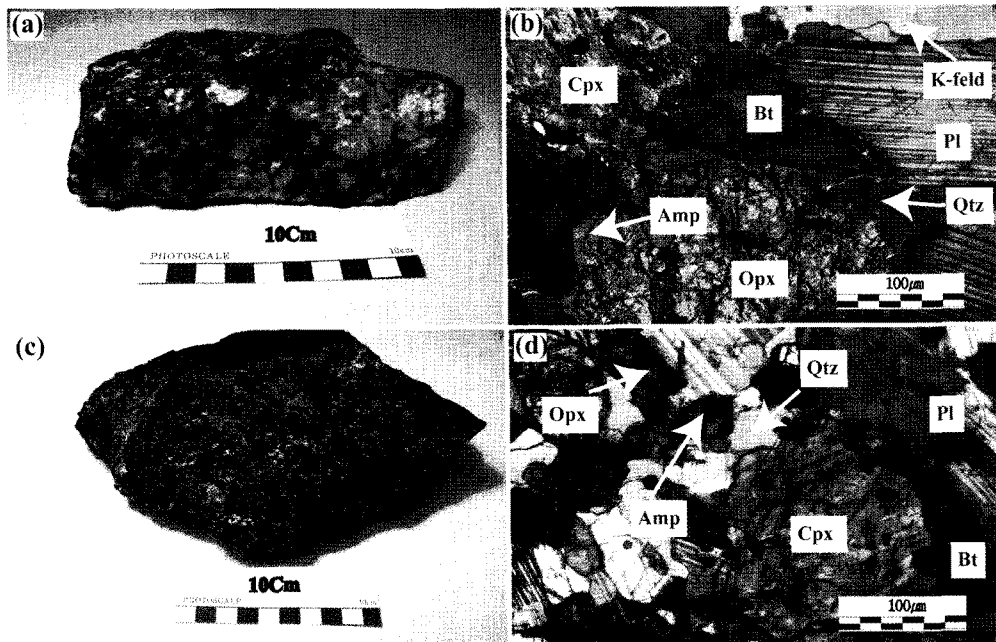


Fig. 3. Photographs of rock slabs and photomicrographs of samples from the Odaesan area. (a, b) Rock slab and photomicrograph of the Odaesan mangerite showing porphyritic texture with the assemblage orthopyroxene (Opx) + clinopyroxene(Cpx) + amphibole(Amp) + biotite(Bt) + plagioclase(Pl) + K-feldspar(K-feld) + quartz(Qtz). (c, d) Rock slab and photomicrograph of the Odaesan gabbro showing granular texture with the assemblage Opx + Cpx + Amp + Bt + Pl + Qtz .

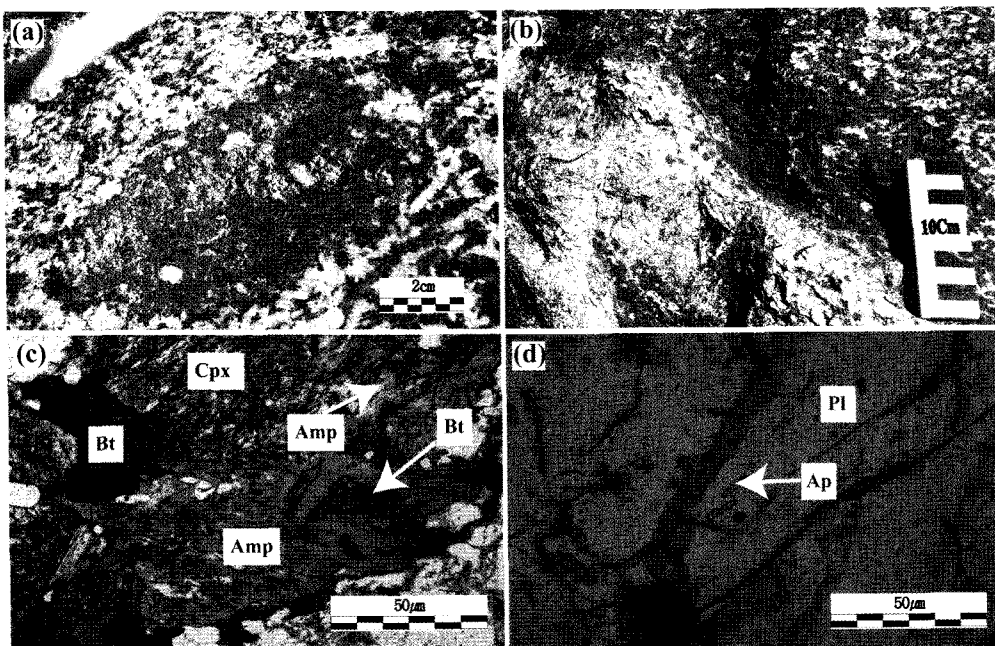


Fig. 4. (a) Photograph of the outcrop showing gabbro enclaves within the Odaesan mangerite and leucocratic lenses with K-feldspar in the gabbro enclaves. (b) Photograph of outcrop showing irregular boundary between the mangerite and gabbro. (c) Photomicrograph of the Odaesan mangerite showing biotite(Bt) inclusions in amphibole(Amp). (d) Photomicrograph of the Odaesan gabbro showing acicular apatite(Ap) inclusions in plagioclase(Pl).

이용하여 반려암임을 확인하였다.

맨거라이트는 반려암보다 입자들이 크며 퍼어사이틱 K-장석이 거정의 반정으로 나타나는 반정질 조직을 보여준다(Fig. 3a). 일부 지역 특히 화성암체의 경계부에서는 K-장석 반정들이 방향성을 보여주기도 한다. 맨거라이트는 주로 단사휘석, 사방휘석, 흑운모, 퍼어사이틱 K-장석, 각섬석, 사장석으로 이루어져있고 부수적으로 석영, 인회석, 저어콘, 불투명광물을 포함한다(Fig. 3b). 각섬석은 휘석류 주변을 둘러싸고 있는 코로나 조직을 보이는데 이는 마그마 고화시 점진적인 온도의 하강으로 먼저 만들어진 휘석 주변에 각섬석이 만들어진 조직으로 판단된다. 사방휘석 대부분이 강하게 각섬석화 작용을 받았으며 사방휘석내 각섬석으로 추정되는 라멜라가 나타나는 반면 단사휘석은 사방휘석에 비해 각섬석화가 덜 되어 있다. 반려암은 주로 단사휘석, 사방휘석, 흑운모, 사장석으로 이루어져 있고, 부수적으로 석영, 각섬석, 인회석, 저어콘, 불투명광물을 포함한다(Figs. 3c & d). 반려암에서는 맨거라이트에 비하여 사방휘석이 자형으로 잘 나타나며 주변이 각섬석화 되는 정도가 미약하며 K-장석은 나타나지 않는다.

Figs. 4a & b에서 볼 수 있는 것처럼, 노두에서 맨거라이트내에 나타나는 반려암질의 포획암과 그 주변 경계가 매우 불규칙하며 반려암질 포획암내에 주변의 맨거라이트 마그마로부터 유입된 K-장석과 석영으로 구성된 우백질 포유체가 나타난다. 또한, 맨거라이트와 반려암의 광물이 두 암석의 경계부를 중심으로 상대 암석 쪽으로 성장하여 들어가며 그 결과 두 암석의 경계는 불분명하다. 이러한 노두에서 관찰되는 조직은 이 두 마그마가 서로 액체 상태에서 혼합되었음을 지시한다(Barbarin *et al.*, 1992; Baxter *et al.*, 2002). 현미경하에서도 맨거라이트 마그마와 반려암질 마그마가 액체 상태에서 혼합된 증거를 보여준다. Figs. 4c & d에서와 같이 맨거라이트내의 각섬석 내부에 나타나는 흑운모 포획물과 반려암내의 사장석 반정 안에 성장한 침상으로 성장한 인회석이 마그마 혼합의 증거로써 관찰된다(Janoušek *et al.*, 2000; Baxter *et al.*, 2002).

광물화학

광물의 화학조성을 알기 위해 연마된 박편에 대하여 전자현미분석(EPMA)을 실시하였다. 전자현미분석

은 한국기초과학연구원 전주센터에서 SHIMADZU사의 EPMA-1600을 사용하였다. 분석환경의 가속전압은 15 kv, 빔(beam) 직경은 1 μm , 그리고 빔 전류는 20 nA이다.

휘 석

맨거라이트와 반려암에는 사방휘석과 단사휘석이 모두 나타난다. 전자현미분석에 의한 휘석의 조성은 산소 6개의 값으로 표준화 하였다(Table 1). 맨거라이트내의 단사휘석(Wo_{48-52} , En_{34-37} , Fs_{14-17})과 반려암내의 단사휘석(Wo_{47-51} , En_{42-44} , Fs_{14-17})은 Fig. 5a에서와 같이 오자이트(augite) 영역에 포함되며 맨거라이트내 사방휘석(Wo_{2-4} , En_{54-60} , Fs_{38-44})과 반려암 내 사방휘석은(Wo_{2-4} , En_{59-62} , Fs_{35-38})은 모두 하이퍼신 영역에 도시된다. 두 암석내의 휘석은 뚜렷한 성분의 차이는 보이지 않으며 맨거라이트내 휘석이 반려암내 휘석에 비해 Mg 함량이 약간 적고 Fe 함량이 좀 더 많음을 알 수 있다. 반려암에 나타나는 사방휘석은 대부분 자형을 잘 보여주며 각섬석화가 약하나 맨거라이트에서 보이는 사방휘석은 강하게 각섬석화가 진행되면서 자형을 찾아보기가 힘들고 사방휘석내에 각섬석 라멜라가 존재한다. 그 결과 맨거라이트내의 사방휘석은 각섬석과 미세한 규모로 섞여 pyribole을 형성하고 있어 정확한 사방휘석 성분 분석을 할 수 없었다(Table 1). 이러한 pyribole은 여러 열기성 심성암에서 많이 나타난다 (Francis, 1976; Smith, 1977; Buseck and Veblen, 1978; Veblen and Buseck, 1981).

장 석

맨거라이트에서만 볼 수 있는 퍼어사이틱 K-장석과 두 암석에서 나오는 사장석의 조성은 산소 32개의 값으로 표준화 하였다(Table 2). 맨거라이트에 큰 반정으로 나타나는 퍼어사이틱 K-장석의 성분은 Or_{84-89} 이며 모달(modal) %는 사장석과 거의 비슷하다. 맨거라이트내 사장석(An_{35-51})은 반려암에서 나오는 사장석(An_{39-51})에 비해서 성분 범위가 약간 넓지만 큰 차이는 없다(Fig. 5b). 이는 두 마그마 불균질 혼합에 의한 결과로 판단된다(김종선 외, 2000; 진미정 외, 2000). 그리고 사장석 반정에서 위치에 따라 성분의 차이가 있음을 알 수 있는데(Fig. 6), 후방산란영상(BSE: back-scattered electron image)에서 내연부

Table 1. Representative chemical compositions of clinopyroxenes and orthopyroxenes in the mangerite and gabbro

Rock type	Gabbro	Gabbro	Gabbro	Mangerite	Mangerite	Mangerite	Gabbro	Gabbro	Gabbro	Mangerite	Mangerite	Mangerite
Sample	OD1002 05-1D	OD1002 05-1D	OD1002 05-1D	OD1002 05-2C	OD1002 05-2C	OD1002 05-2C	OD1002 05-1D	OD1002 05-1D	OD1002 05-1D	OD1002 05-2C	OD1002 05-2C	OD1002 05-2C
Mineral	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Opx	Opx	Opx	Opx pyribole*	Opx pyribole*	Opx pyribole*
SiO ₂	52.28	53.01	52.21	53.77	53.07	53.47	52.25	52.57	52.26	54.94	52.87	54.56
TiO ₂	0.24	0.10	0.31	0.22	0.25	0.14	0.27	0.22	0.18	0.07	0.10	0.09
Al ₂ O ₃	1.28	0.59	1.35	0.82	0.92	0.59	0.79	0.86	0.75	0.34	0.38	0.35
FeO*	8.96	8.33	9.00	9.50	9.61	10.08	22.66	23.29	23.30	20.86	23.59	22.23
MnO	0.24	0.26	0.24	0.31	0.31	0.42	0.56	0.53	0.53	0.90	1.16	1.27
MgO	14.23	14.62	14.13	12.18	12.51	12.01	21.06	21.27	21.24	16.51	16.20	15.69
CaO	22.57	23.56	22.31	23.35	22.74	22.83	1.98	1.01	0.88	1.29	0.89	1.02
Na ₂ O	0.28	0.17	0.27	0.17	0.24	0.22	0.02	0.00	0.00	0.05	0.04	0.04
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
Total	100.06	100.65	99.82	100.53	99.90	99.89	99.59	99.75	99.13	95.01	95.29	95.30
Number of ions on the basis of 6 O												
Si	1.94	1.96	1.95	2.02	2.00	2.02	1.97	1.98	1.98	2.20	2.13	2.20
Al	0.06	0.03	0.06	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02
Fe ²⁺	0.22	0.19	0.23	0.30	0.30	0.32	0.69	0.73	0.73	0.70	0.80	0.75
Fe ³⁺	0.06	0.07	0.05	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Ti	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Mg	0.79	0.81	0.79	0.68	0.70	0.68	1.18	1.19	1.20	0.99	0.97	0.94
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04
Ca	0.90	0.93	0.89	0.94	0.92	0.93	0.08	0.04	0.04	0.06	0.04	0.04
Na	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wo*	49	50	48	49	48	48	4	2	2	3	2	3
En*	43	43	42	36	37	35	61	61	61	57	54	54
Fs*	8	7	10	16	16	17	35	37	37	40	44	43

Wo* = Ca/(Ca+Mg+Fe)×100, En* = Mg/(Ca+Mg+Fe)×100 and Fs* = Fe/(Ca+Mg+Fe)×100.
 Opx pyribole*: pyroxene-amphibole intergrowth. FeO* = Fe as total FeO.

Table 2. Representative chemical compositions of feldspars in the mangerite and gabbro

Rock type	Gabbro	Gabbro	Mangerite	Mangerite	Mangerite	Mangerite	Mangerite	Mangerite	Mangerite	Mangerite
Sample	OD1002 05-1D	OD1002 05-1D	OD1002 05-2C	OD1002 05-2C	OD1002 05-2C	OD1002 05-2C	OD1002 05-2C	OD1002 05-2C	OD1002 05-2C	OD1002 05-2C
Mineral	Pl	Pl	Pl	Pl	Pl	Pl	Pl	Pl	Ksp	Ksp
SiO ₂	55.44	53.85	60.08	58.06	55.19	54.31	63.02	66.86	63.98	65.18
TiO ₂	0.03	0.04	0.01	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00	0.08	0.06
Al ₂ O ₃	28.98	30.23	24.15	26.41	28.36	28.82	23.28	20.24	19.74	19.18
FeO*	0.23	0.12	0.04	0.06	0.05	0.08	0.03	0.02	0.06	0.05
MnO	0.02	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00
MgO	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	9.51	10.65	7.31	7.80	9.93	10.70	3.00	1.80	0.00	0.00
Na ₂ O	6.30	5.54	7.56	7.04	6.06	5.75	9.90	10.70	1.64	1.74
K ₂ O	0.29	0.26	0.09	0.39	0.24	0.16	0.11	0.12	13.69	14.07
Total	100.81	100.72	99.26	99.81	99.87	99.86	99.34	99.75	99.20	100.27
Number of ions on the basis of 32 O										
Si	9.92	9.67	10.79	10.42	9.96	9.83	11.20	11.76	11.81	11.92
Al	6.11	6.39	5.11	5.58	6.03	6.14	4.87	4.19	4.29	4.13
Fe ²⁺	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	1.82	2.05	1.41	1.50	1.92	2.08	0.57	0.34	0.00	0.00
Na	2.19	1.93	2.63	2.45	2.12	2.02	3.41	3.65	0.59	0.62
K	0.07	0.06	0.02	0.09	0.06	0.04	0.02	0.03	3.22	3.28
Ab*	54	48	65	61	52	49	85	91	15	16
An*	45	51	35	37	47	50	14	8	0	0
Or*	2	1	1	2	1	1	1	1	85	84

Ab* = Na/(Na+Ca+K)×100, An* = Ca/(Na+Ca+K)×100, Or* = K/(Na+Ca+K)×100, FeO* = Fe as total FeO

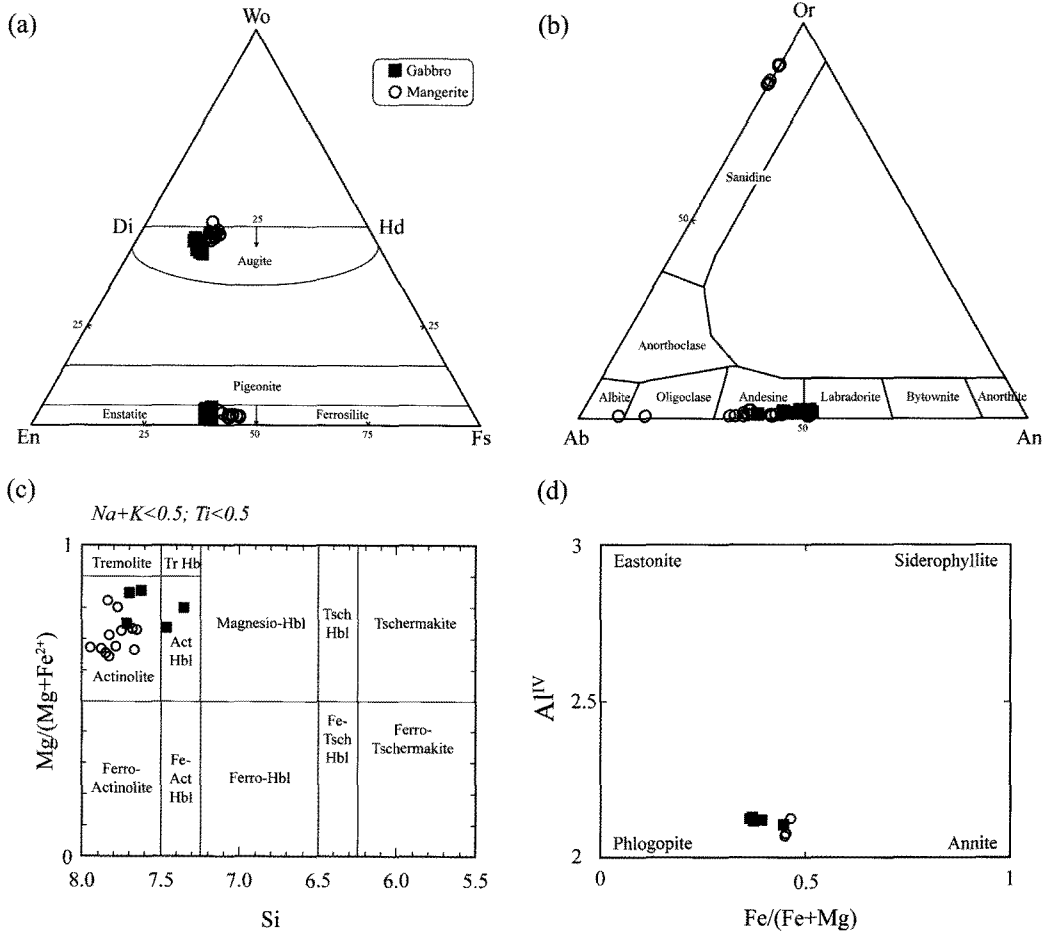


Fig. 5. Chemical compositions of the minerals in the Odaesan mangerite and gabbro. (a) Compositions of pyroxenes plotted in the Wo-En-Fs ternary diagram. (b) Compositions of feldspars plotted in the Or-Ab-An ternary diagram. (c) Compositions of amphibole plotted in the Mg/(Mg+Fe²⁺) vs. Si diagram, compiled by Leake (1978). (d) Classification of biotite in the Al^{IV} vs. Fe/(Fe+Mg) diagram.

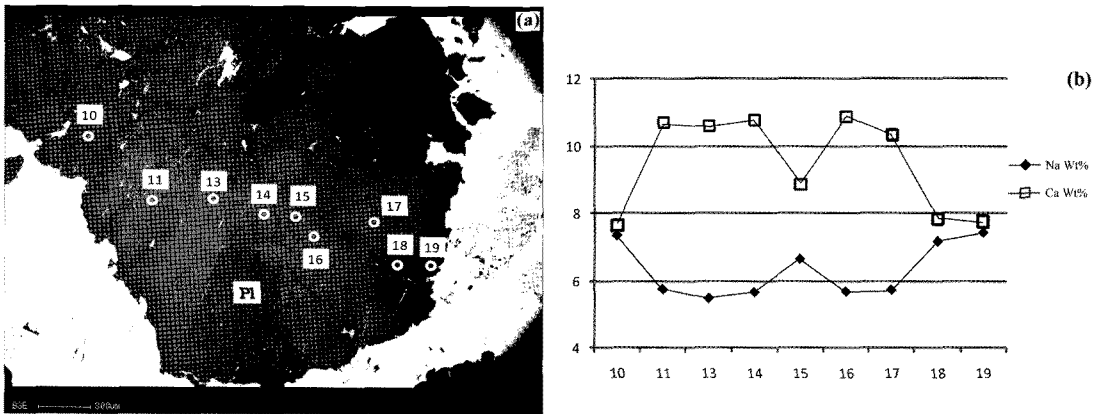


Fig. 6. (a) Back scattered electron image of plagioclase in the Odaesan mangerite with the analyzed positions (circles). (b) Variation in plagioclase composition.

인 밝은 부분이 Ca가 높고 외연부인 어두운 부분이 Ca가 낮음을 알 수 있다.

맨저라이트내에 K-장석 반정 주변에는 반려암과는 달리 올리고클래스(Oligoclase)와 알바이트(Albite) 영역에 도시가 되는 사장석이 아주 드물게 나타나는데(Fig. 5b), 이는 화성암 형성 이후 국부적인 변질작용에 의해 형성된 것으로 판단되나 정확한 원인에 대해서는 좀 더 자세한 연구가 필요하다.

각섬석, 흑운모

전자현미 분석된 각섬석과 흑운모는 각각 산소 23개의 값과, 24개의 값을 이용하여 표준화 하였다(Table 3). 각섬석은 휘석 주변에서 자라나면서 코로나구조를 보여주며 혹은 휘석을 치환하며 형성되고 있다. 반려암에서 자형을 갖추지 못한 각섬석의 X_{Fe} 는 0.13~0.30이며 양기석(actinolite)-혼블렌드(hornblende) 영역에서 양기석질 각섬석의 범위를 보여주나

맨저라이트에 나타나는 반자형의 각섬석은 $X_{Fe}=0.20\sim 0.36$ 의 성분을 보여주며 모두 양기석 영역에 도시된다(Fig. 5c).

맨저라이트와 반려암내에 들어 있는 흑운모는 금운모(phlogopite)와 애나이트(annite)의 중간정도에 해당한다(Fig. 5d). 반려암내에 흑운모가 맨저라이트내 흑운모에 비해서 금운모 성분이 좀 더 강하지만 큰 차이는 없다. 또한, Ti 함량도 거의 유사하다.

이와 같이 두 암석에서 각섬석과 흑운모의 성분이 유사함은 두 마그마의 불균질 혼합의 결과로 해석된다(Barbarin, 1986; 진미정 외, 2000).

암석화학

오대산 지역에 나오는 2개의 맨저라이트와 2개의 반려암의 주원소, 미량원소와 희토류원소는 캐나다에 있는 Activation Laboratories Ltd에서 ICP-AES와 ICP-MS를 이용하여 구하였다(Table 4). 그리고 반려

Table 3. Representative chemical compositions of amphiboles and biotites in the mangerite and gabbro

Rock type	Gabbro	Gabbro	Gabbro	Mangerite	Mangerite	Mangerite	Gabbro	Gabbro	Mangerite	Mangerite
Sample	OD1002 05-1D	OD1002 05-1D	OD1002 05-1D	OD1002 05-2C	OD1002 05-2C	OD1002 05-2C	OD1002 05-1D	OD1002 05-1D	OD1002 05-2C	OD1002 05-2C
Mineral	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Bt	Bt	Bt	Bt
SiO ₂	51.59	51.70	52.98	52.04	53.89	53.09	36.70	36.82	36.22	36.32
TiO ₂	0.95	0.13	0.01	0.63	0.44	0.21	5.75	5.68	4.75	4.74
Al ₂ O ₃	4.33	3.74	1.50	3.79	2.36	0.94	14.10	14.49	14.20	14.13
FeO*	10.94	14.01	12.91	12.41	11.29	14.11	14.60	14.78	17.15	17.34
MnO	0.18	0.32	0.33	0.26	0.39	0.25	0.11	0.09	0.19	0.17
MgO	16.48	14.68	15.73	13.77	15.45	14.39	14.28	13.95	11.71	11.77
CaO	12.10	12.03	12.28	13.03	12.19	12.93	0.00	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	0.73	0.35	0.13	0.55	0.35	0.09	0.14	0.13	0.09	0.06
K ₂ O	0.31	0.21	0.03	0.28	0.17	0.04	9.60	9.17	9.13	9.78
Total	97.61	97.16	95.89	96.64	96.50	95.97	95.28	95.10	93.43	94.30
Number of ions on the basis of 23 O						Number of ions on the basis of 24 O (O, OH, F, Cl)				
Si	7.39	7.50	7.74	7.66	7.83	7.85	5.75	5.76	5.85	5.83
Al ^{IV}	0.61	0.50	0.25	0.34	0.17	0.15	2.25	2.24	2.16	2.17
Al ^{VI}	0.12	0.14	0.01	0.32	0.23	0.01	0.35	0.43	0.54	0.51
Ti	0.10	0.01	0.00	0.07	0.05	0.02	0.68	0.67	0.58	0.57
Fe ²⁺	1.10	1.36	1.27	1.53	1.37	1.69	1.91	1.93	2.31	2.33
Fe ³⁺	0.21	0.34	0.31	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.02	0.04	0.04	0.03	0.05	0.03	0.01	0.01	0.03	0.02
Mg	3.52	3.17	3.42	3.02	3.35	3.17	3.33	3.25	2.82	2.82
Ca	1.86	1.87	1.92	2.06	1.90	2.05	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.20	0.10	0.04	0.16	0.10	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02
K	0.06	0.04	0.01	0.05	0.03	0.01	1.92	1.83	1.88	2.00
Fe/ (Fe+Mg)	0.24	0.30	0.27	0.34	0.29	0.35	0.36	0.37	0.45	0.45

FeO*= Fe as total FeO

Table 4. Whole rock compositions of representative mangerites and gabbros in the Odaesan area

Rock type	Gabbro		Mangerite		Mangerite(Oh et al., 2006a)									
	Gabbro	Gabbro	Mangerite	Mangerite	Felsic mangerites(mangerite)					Mafic mangerites(gabbro)				
	Sample	OD1002 05-1C	OD1002 05-1D	OD1002 05-2B	OD1002 05-2C	041005 -2A	041015 -2B	041015 -4A	041015 -6	041015 -7A	041015 -4B	041015 -7C	041015 -7D	041015 -8
<i>Major elements(wt.%)</i>														
SiO ₂	52.00	51.25	55.55	56.69	60.60	57.30	56.55	57.29	55.90	52.40	54.20	53.09	53.43	
Al ₂ O ₃	11.78	13.34	14.24	15.49	13.99	15.91	15.98	14.97	14.30	13.13	13.54	13.23	12.56	
Fe ₂ O ₃	1.18	1.26	0.90	0.74	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	
FeO	8.06	7.36	6.31	5.12	5.90	6.45	6.06	6.57	6.66	9.61	8.06	8.66	9.37	
MnO	0.16	0.15	0.12	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	0.14	0.11	0.12	0.14	
MgO	8.52	8.28	5.91	4.51	3.61	4.03	4.43	5.05	4.95	8.67	6.92	7.71	8.37	
CaO	8.32	8.45	5.74	5.29	3.28	3.99	4.61	5.68	4.30	7.59	5.80	7.07	7.84	
Na ₂ O	1.97	2.21	2.24	2.42	2.80	2.98	2.78	2.70	2.51	2.19	2.43	2.17	2.15	
K ₂ O	2.56	2.31	4.60	5.01	3.48	5.07	5.06	4.15	4.21	2.64	3.37	2.57	2.62	
TiO ₂	1.22	1.15	1.38	1.29	0.67	1.13	1.20	1.22	1.24	1.29	1.22	1.25	1.07	
P ₂ O ₅	0.60	0.60	0.50	0.39	0.29	0.35	0.40	0.42	0.41	0.60	0.52	0.58	0.56	
LOI	2.22	1.32	1.66	1.13	4.53	2.22	1.94	0.90	4.22	1.18	3.30	3.29	1.34	
Total	99.51	98.50	99.87	98.72	99.23	99.52	99.10	99.04	98.78	99.43	99.49	99.75	99.45	
<i>Trace elements (ppm)</i>														
Sc	32	27	20	16	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	
Be	2	2	2	2	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	
V	208	202	146	118	79	92	105	110	114	183	150	181	176	
Cr	510	480	300	240	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	
Co	39	37	29	22	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	
Ni	110	110	80	60	42	62	58	63	63	115	86	110	111	
Cu	20	40	40	30	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	
Zn	160	120	120	80	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	
Ga	22	20	21	20	20	23	20	21	20	21	21	19	18	
Ge	2.1	1.8	1.7	1.5	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	
Rb	96	87	140	124	116	183	115	124	139	121	118	104	94	
Sr	690	929	1110	1184	569	709	1141	1142	920	928	997	914	774	
Y	29	25	24	17	20	17	13	16	16	27	20	22	26	
Zr	145	115	131	123	266	492	341	93	330	159	115	94	111	
Nb	23.2	18.5	22.3	23.9	18.4	26.2	20.2	22.8	25.5	16.4	19.6	17.7	17.9	
Ag	0.7	0.5	0.6	0.6	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	
Cs	1.9	2.3	3.3	2.2	2.8	5.3	1.9	2.1	3.1	1.8	2.2	3.2	2.3	
Ba	1710	1628	3018	3697	2136	2099	3672	3966	2344	2323	3885	1957	1906	
La	56.6	56.6	57.7	49.1	53.3	57.0	40.3	44.5	48.3	57.2	48.3	53.2	53.5	
Ce	117.0	114.0	112.0	92.7	98.4	108.3	77.0	85.4	93.2	117.8	98.2	104.7	108.0	
Pr	13.3	12.6	12.1	9.8	10.7	12.0	8.7	9.7	10.4	13.7	11.5	12.3	12.5	
Nd	51.5	48.2	47.1	36.1	38.2	42.8	32.7	37.0	38.9	51.5	42.8	46.4	47.7	
Sm	9.52	8.52	8.50	6.09	6.40	7.10	5.60	6.50	6.80	9.50	7.70	8.30	8.50	
Eu	1.84	2.18	2.62	2.80	1.60	2.30	3.20	3.10	2.50	2.40	2.50	2.40	2.10	
Gd	7.26	6.53	6.51	4.54	4.90	5.40	4.50	5.10	5.10	7.80	6.10	6.70	7.20	
Tb	1.03	0.94	0.91	0.62	0.80	0.80	0.70	0.87	0.70	1.20	0.90	1.00	1.10	
Dy	5.50	5.06	4.76	3.34	4.00	3.80	3.10	3.60	3.70	5.80	4.40	4.80	5.30	
Ho	1.01	0.94	0.87	0.62	0.80	0.70	0.60	0.60	0.70	1.10	0.80	0.90	1.00	
Er	2.69	2.58	2.36	1.70	2.20	2.00	1.60	1.70	1.90	3.00	2.30	2.50	2.90	
Tm	0.37	0.36	0.33	0.24	0.30	0.30	0.20	0.20	0.30	0.40	0.30	0.30	0.40	
Yb	2.30	2.26	2.04	1.50	2.20	1.80	1.50	1.50	1.70	2.80	2.00	2.20	2.60	
Lu	0.34	0.35	0.31	0.23	0.30	0.30	0.20	0.20	0.30	0.40	0.30	0.30	0.40	
Hf	3.5	3.0	3.3	3.1	7.4	12.4	8.0	2.7	8.2	4.1	3.2	2.9	3.3	
Ta	0.83	0.79	1.22	1.27	1.50	1.40	1.10	1.20	1.50	0.60	1.10	1.00	1.00	
Tl	0.36	0.35	0.54	0.47	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	N. A	
Pb	16	14	34	26	31	32	32	32	31	14	29	18	28	
Th	3.41	4.93	5.31	4.77	9.40	7.50	2.00	2.40	6.60	1.00	3.90	5.50	4.80	
U	0.94	1.18	1.57	1.21	2.40	2.80	0.70	1.00	1.60	0.50	1.30	1.60	1.30	

N. A : Not Analyzed

암과 맨거라이트의 암석화학적 특성을 연구하기 위하여 이번 연구에서 분석된 암석과 Oh *et al.* (2006a)에서 분석된 암석을 함께 도시하였다. Oh *et al.* (2006a)에서 우백질과 우흑질 맨거라이트는 각각 본

연구에서 맨거라이트와 반려암에 해당한다.

Table 4에서 보여지는 바와 같이 맨거라이트의 SiO₂(55.55~56.69 wt.%), 총 알칼리(Na₂O+K₂O, 6.84~7.43 wt.%) 함량은 반려암보다(SiO₂ 51.25~52.00 wt.%,

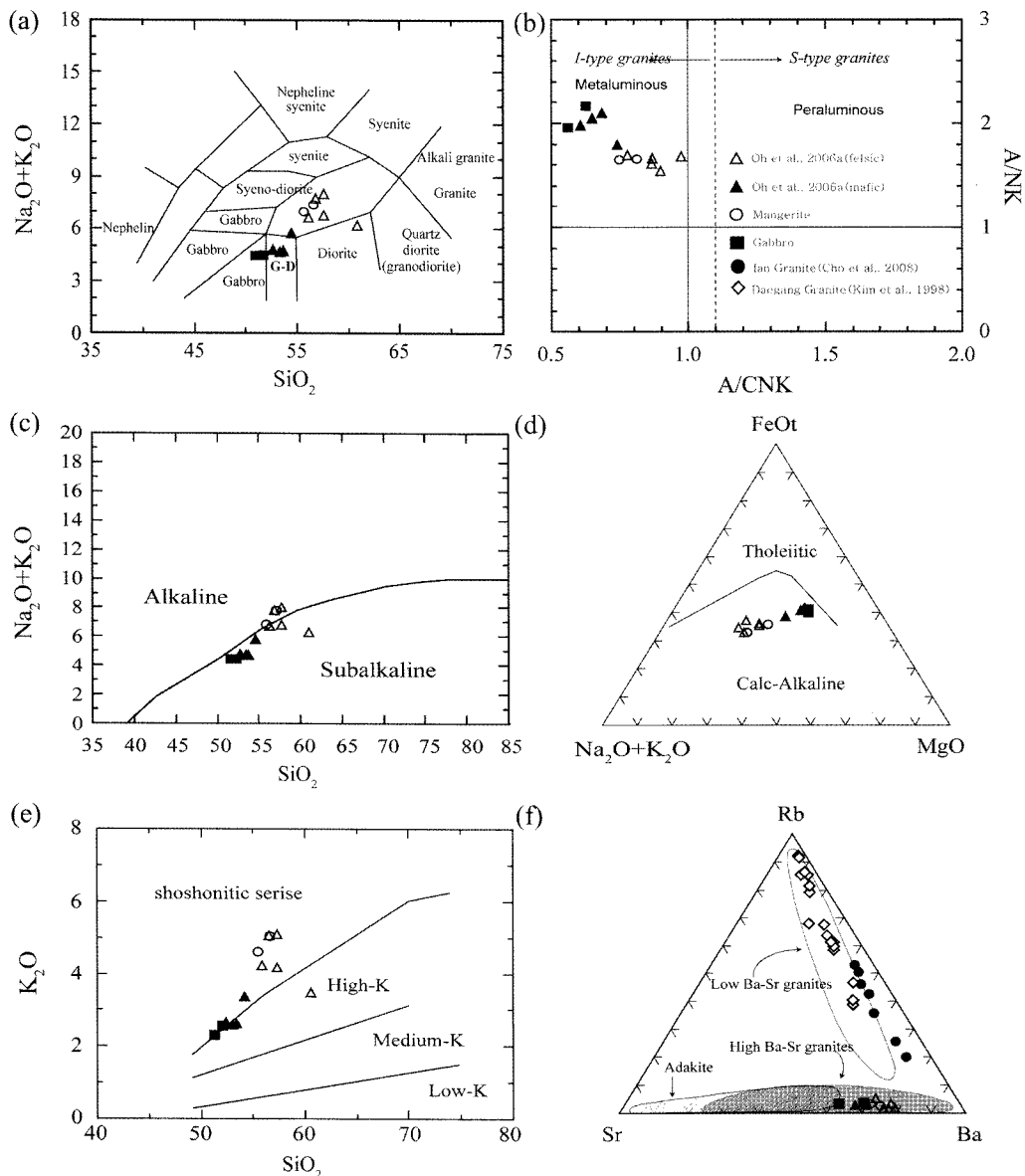


Fig. 7. Geochemical classification of the mangerite and gabbro in the Odaesan area and granitoids in the Ian (Cho *et al.*, 2008) and Daegang (Kim *et al.*, 1998) areas using (a) Total alkalis vs. silica (TAS) diagram (after Cox *et al.*, 1979; Wilson, 1989), (b) A/NK vs. A/CNK diagram (after Maniar and Piccoli, 1989), A=Al₂O₃, N=Na₂O, K=K₂O, and C=CaO (molar), Chappell and White (1974) classified I- and S-type granites, (c) Total alkalis vs. silica diagram, (d) AFM diagram illustrating the dominant calc-alkaline nature of the Odaesan plutonic rocks, the boundary between tholeiite and calc-alkaline series is from Irvine and Baragar (1971), (e) Subdivision of subalkalic rocks based on the K₂O vs. SiO₂ diagram (after Peccerillo and Taylor, 1976), (f) Rb-Sr-Ba ternary diagram for high and low Ba-Sr granite fields, after Tarney and Jones (1994).

$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 4.52~4.53 wt.%) 높고, FeO (5.12~6.31 wt.%), MgO (4.51~5.91 wt.%), CaO (5.29~5.74 wt.%), P_2O_5 (0.39~0.50 wt.%) 함량은 반려암보다(FeO 7.36~8.06 wt.%, MgO 8.28~8.52 wt.%, CaO 8.32~8.45 wt.%, P_2O_5 0.60 wt.%) 낮다.

맨거라이트는 석영-정장석-사장석 광물들의 모달 %를 이용한 분류도에서는 하이퍼신을 포함한 몬조나이트이며(Streckeisen, 1974), SiO_2 vs. $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 암석 분류도에서 맨거라이트의 전암 성분은 섬장암질 섬록암과 섬록암에 도시되고 반려암은 반려암 혹은 반려암질 섬록암 영역에 도시가 된다(Fig. 7a). A/NK vs. A/CNK (molar $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ vs. $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{K}_2\text{O})$)와 AFM 다이어그램에서 맨거라이트와 반려암 모두 화성기원 영역에 도시되며 대륙지각의 영향을 받은 칼크-알칼리(calc-alkaline) 계열 영역에

포함됨을 보여준다(Figs. 7b & d). 그리고 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ vs. SiO_2 와 K_2O vs. SiO_2 다이어그램에서 맨거라이트는 주로 알칼리(alkaline)와 비알칼리(subalkaline) 경계와 쇼쇼나이트(shoshonite) 영역에 도시되며 반려암은 비알칼리 영역 그리고 쇼쇼나이트 영역과 High-K 알칼리 경계에 도시가 된다(Figs. 7c & e). 또한, 맨거라이트와 반려암 모두 고품량 Ba-Sr 화강암 영역에 도시가 된다(Fig. 7f).

반려암은 판 내부환경(within plate)에 도시 되고(Figs. 8a & b), Rb vs. Y+Nb의 다이어그램에서 Oh *et al.* (2006a)의 우백질 맨거라이트와 본 연구의 맨거라이트 모두 충돌 후 영역에 도시가 된다(Fig. 8c). 하지만, Rb/Zr vs. SiO_2 다이어그램에서 본 연구의 맨거라이트는 충돌시와 충돌 후 영역 경계 혹은 그 가까이에 도시되고 Oh *et al.* (2006a)의 우백질

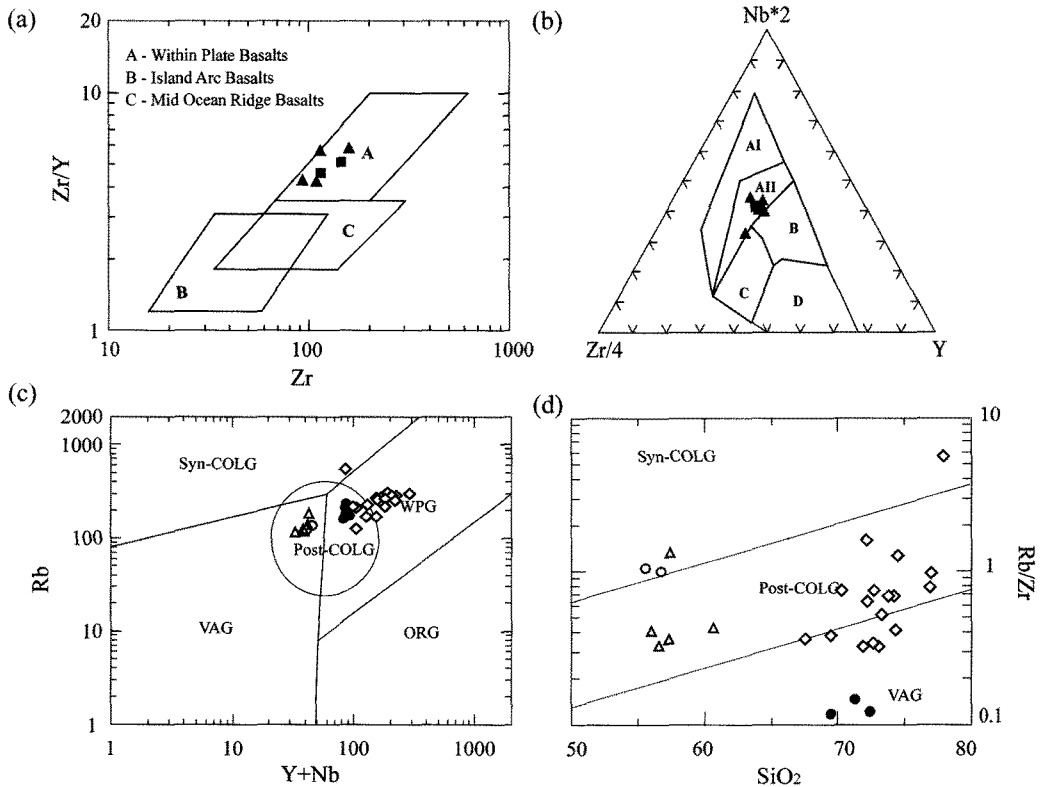


Fig. 8. The discrimination of tectonic settings for the mangerite and gabbro in the Odaesan area and granitoids in the Ian (Cho *et al.*, 2008), and Daegang (Kim *et al.*, 1998) areas using (a) Zr/Y vs. Zr diagram (after Pearce and Norry, 1979), (b) Zr-Nb-Y discrimination diagram (after Meschede, 1986), the fields are defined as follows: A1, within-plate alkali basalts; All, within-plate alkali basalts and within-plate tholeiites; B, E-type MORB; C, within-plate tholeiites and volcanic-arc basalts; D, N-type MORB and volcanic-arc basalts, the plotting coordinates for the boundary lines given by Meschede (1986), (c) Y+Nb vs. Rb diagram, after Pearce *et al.* (1984) and Pearce (1996), (d) SiO_2 (wt.%) vs. Rb/Zr diagram (Harris *et al.*, 1986). Symbols are the same as in Fig. 7.

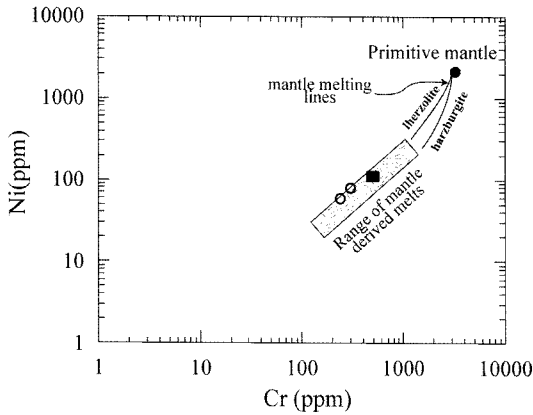


Fig. 9. Cr vs. Ni binary diagram for the mangerite and gabbro in the Odaesan area. The expected range of Ni and Cr relationships is from Tsuchiya *et al.* (2005). Symbols are the same as in Fig. 7.

맨거라이트는 하나의 샘플을 제외하고는 총돌 후 영역에 도사가 된다(Fig. 8d). 또한, Ni vs. Cr 다이아그램은 본 연구의 맨거라이트와 반려암이 맨틀기원임을 나타내준다(Fig. 9).

콘드라이트(chondrite)에 의해서 표준화된 맨거라이트와 반려암의 희토류원소(REE: rare earth elements)

패턴은 Fig. 10a & c에 보이는 것처럼 경희토류 원소들(LREE: light rare earth elements)이 부화되어 있으며 일부 맨거라이트가 반려암에 비해서 Eu 함량이 부화된 것을 제외하고 맨거라이트와 반려암이 거의 유사한 패턴을 보여준다. 원시 맨틀(primitive mantle)에 의해 표준화된 맨거라이트와 반려암의 미량원소 패턴은 Oh *et al.* (2006a)이 제시한 분석결과에서는 덜 뚜렷하지만 (Fig. 10d), 맨거라이트와 반려암을 체계적으로 구분하여 분석한 이번 결과에서는 두 암석이 모두 고장력원소(HFSE: high field strength element)에 비해 친석원소(LILE: large ion lithophile elements)가 상대적으로 부화된 특징과 Nb-Ta-P-Ti 부(-)이상을 잘 보여준다(Fig. 10b). 그리고 Oh *et al.* (2006a)이 제시한 분석결과에서 일부 맨거라이트가 Zr, Hf의 정(+)이상을 보여주는데 이에 대해서는 좀 더 자세한 연구가 필요하다.

연대 측정

오대산 지역에 나오는 맨거라이트(OD100205-2; 북위 37° 52' 17.8", 동경 128° 18' 33.0")와 반려암(OD100205-

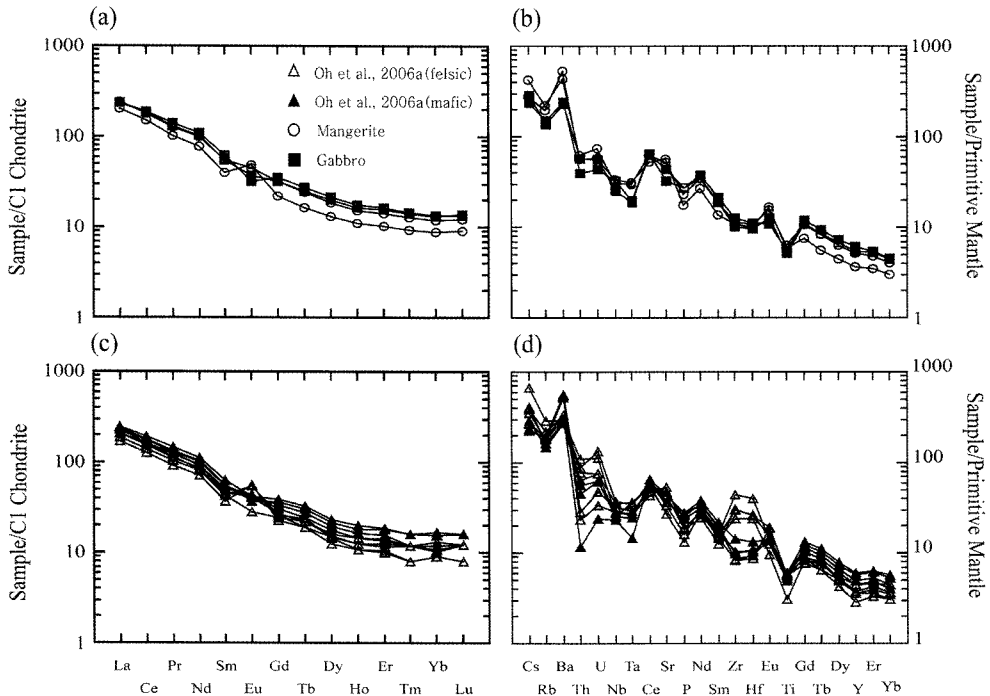


Fig. 10. REE and spider diagrams for the mangerite and gabbro. (a) Chondrite-normalized (Sun and McDonough, 1989) rare earth element (REE) patterns. (b) Primitive mantle-normalized (Sun and McDonough, 1989) trace element distribution diagrams. Symbols are the same as in Fig. 7.

1; 북위 37° 52' 17.9", 동경 128° 17' 52.7")의 저어콘 U-Pb 연대 측정을 위해 두 암석을 부경대학교 지구 환경과학과에서 조분쇄기(Jaw crusher)로 분쇄 후 표준 망체를 이용하여 180 메쉬에 해당하는 부분을 따로 분리하였다. 분리된 시료는 비이커를 사용해 패닝(panning)하여 중광물 만을 회수하고, 이후 실제 현미경하에서 저어콘을 찾아 골라내었다. 골라낸 저어콘들은 100~200 μm 크기이고 한국기초과학지원연구원 오창캠퍼스 SHRIMP센터에서 에폭시 마운트로 제작되었고 JEOL JSM-6610LV 전자주사현미경(SEM: scanning electron microscope)을 이용하여 저어콘의 후방산란영상과 음극발광영상(CL: cathodoluminescence image)을 얻었다. 그리고 SHRIMPITE를 이용하여 맨거라이트와 반려암으로부터 분리된 저어콘의 U-Pb 연대측정을 하였으며, 분석방법과 절차는 Williams *et al.* (1998)과 Ireland and Williams(2003)을 따랐다. 분석점 직경은 20~30 μm 이고 한 점의 U-Pb분석마다 필요한 모든 질량의 동위원소를 5번 반복 정량하였다. U 함량측정과 U/Pb 연대보정을 위해 저어콘 표준물질은 FC-1을 사용하였고 연대 계산은 Isoplot/Ex, Squid 프로그램(Ludwig, 2008, 2009)을 사용하여 처리하였다.

맨거라이트와 반려암으로부터 추출된 13개의 저어콘에서 각각 15, 16점의 SHRIMP U-Pb 분석이 이루어졌으며 결과는 Table 5에 제시되었다. 맨거라이트내 저어콘의 U함량은 130~563 ppm, Th함량은 73~366 ppm 그리고 Th/U의 값은 0.48~0.91이며 반려암내 저어콘의 U함량은 86~704 ppm, Th함량은 49~941 ppm 그리고 Th/U의 값은 0.25~1.3이다.

맨거라이트와 반려암에서 나오는 저어콘은 약간 노란색을 띠며 자형이고 파동형 누대와 줄무늬 누대를 보여주는 것으로 보아 전형적인 화성기원 저어콘이다. 맨거라이트내 저어콘은 상속핵이나 과성장 없이 트라이아스기 연대만을 보이며(Fig 11a), 반려암에서도 대부분은 저어콘의 상속핵이나 과성장없이 트라이아스기 연대를 보이지만 1704~2368 Ma의 원생대 초기의 연대를 보이는 상속핵을 보여주는 저어콘도 일부 발견된다(Fig. 11b).

맨거라이트와 반려암의 연대는 Fig. 12에서 보여지는 것처럼 조화선상에 도시가 되며 맨거라이트의 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 가중평균값은 234 ± 1.2 Ma (MSWD=1.2), 반려암의 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 가중평균값은 231 ± 1.3 Ma(MSWD =2.4)의 연대를 보인다. 이 두 암석의 연대는 모두 트

라이아스기 중기 연대로 최근에 경기육괴에서 보고된 충돌 후 화성암들과 유사한 연대를 보인다(227 Ma 남양 화강암, Sagong *et al.*, 2005; 233 Ma 해미 화강암, Choi *et al.*, 2008; 227~231 Ma 양평 반려암, 몬조나이트, Williams *et al.*, 2009; Lee and Oh, 2010; 228 Ma 후동리 섬록암, 박영록, 2009; 232 Ma 광천 맨거라이트, Seo *et al.*, 2010).

토의 및 결론

맨거라이트-반려암 화성암체의 암석 지화학적 특징

맨거라이트가 발견되었던 오대산 지역의 화성암체를 오랫동안 단일암체로 보아왔지만(예, Oh *et al.*, 2006a), 본 연구에서는 맨거라이트를 포함한 화성암체가 단일암체가 아니라 맨거라이트, 반려암 두 암체로 구성되었음을 확인하였다. 그리고 아의 노두 조사와 현미경 관찰과 두 암석에 대한 SHRIMP 저어콘 연령 측정을 통하여 맨거라이트질 마그마와 반려암질 마그마가 동시에 관입하여 혼합되었음을 확인하였다.

오대산 지역에서 발견된 맨거라이트와 반려암은 K 성분이 높아 쇼쇼나이트 영역에 도시되며 Ba, Sr 함량이 높아 고함량 Ba-Sr 화성암에 속한다. 이러한 특징을 보이는 암석들은 정상적인 맨틀보다 더 많은 친석원소를 함유한 부화된 맨틀로부터 기원한 것으로 해석된다(Mcculloch and Gamble, 1991). 그리고 오대산 지역의 맨거라이트와 반려암은 대륙지각의 영향을 많이 받은 칼크-알칼리 성분을 보이며 지구조 환경 분별도에서는 대륙 충돌 후 환경에 도시된다. 이러한 특징 외에 이들 충돌 후 화성암들이 경회토류 원소들의 부화된 특징과 Nb, Ta, Ti, P 등이 부(-)이상을 보여주는데 이러한 특징들은 섭입대 환경에서 만들어진 화성암에서 관찰된다(Briqueu *et al.*, 1984). 이는 오대산 지역에 나타나는 반려암과 맨거라이트 암석의 원암이 경기육괴에 나타나는 다른 트라이아스기 중기의 화성암들과 함께 충돌 이전에 존재했던 섭입 작용시 영향을 받은 맨틀이나 하부 지각일 가능성을 지시한다. 에클로자이트가 발견된 홍성 지역에서도 본 지역의 암석들과 거의 동일한 암석화학적 특징들을 가진 화성암들이 발견되었다(Choi *et al.*, 2008, Seo *et al.*, 2010). 이는 오대산과 홍성 지역에 나타나는 충돌 후 화성암의 원암인 대륙지각 하부 맨틀과 대륙 하부지각이 충돌 전 섭입되던 지각 물질에 의해

Table 5. SHRIMP U-Pb zircon data from the mangerite and gabbro in the Odaesan area

Sample & Spot	Pb ⁺ (ppm)	U (ppm)	Th (ppm)	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb ±	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ±	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ±	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ±	AGE (Ma) ²⁰⁸ Pb/ ²³² Th ±	AGE (Ma) ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ±	AGE (Ma) ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ±								
<i>Gabbro (OD100205-C)</i>																		
IC-1.1	6	144	115	0.79	0.23507	0.00990	0.03645	0.00071	0.25726	0.04453	0.05116	0.00865	216.84	10.13	230.79	4.39	232.45	36.62
IC-2.1	6	145	141	0.98	0.32321	0.01443	0.03704	0.00085	0.23207	0.02647	0.04573	0.00497	246.29	12.58	234.49	5.29	211.91	22.05
IC-3.1	13	353	165	0.47	0.14002	0.00536	0.03700	0.00060	0.23293	0.01348	0.04594	0.00246	222.76	9.30	234.21	3.75	212.61	11.16
IC-4.1	6	150	102	0.68	0.19962	0.01582	0.03533	0.00100	0.22627	0.02046	0.04668	0.00384	209.66	17.72	223.82	6.25	207.12	17.08
IC-5.1	14	348	196	0.56	0.17819	0.00820	0.03725	0.00071	0.24126	0.01301	0.04719	0.00227	237.05	11.83	235.78	4.40	219.45	10.70
IC-6	4	107	86	0.80	0.24086	0.01599	0.03625	0.00115	0.20379	0.01891	0.04126	0.00344	218.09	16.12	229.55	7.14	188.32	16.08
IC-7	13	327	148	0.45	0.13888	0.00522	0.03737	0.00062	0.27994	0.01494	0.05411	0.00263	230.21	9.54	236.52	3.82	250.61	11.92
IC-8	68	499	128	0.26	0.07965	0.00450	0.13287	0.00237	1.91303	0.04777	0.10442	0.00161	815.74	47.61	804.20	13.50	1085.64	16.79
IC-9	14	371	156	0.42	0.13081	0.00664	0.03643	0.00059	0.26757	0.01033	0.05311	0.00176	227.39	12.11	230.69	3.65	240.75	8.31
IC-10	7	168	144	0.86	0.28031	0.01560	0.03546	0.00068	0.26175	0.01407	0.05336	0.00256	232.94	13.76	224.61	4.23	236.07	11.39
IC-11	3	86	50	0.58	0.18131	0.01259	0.03627	0.00108	0.24745	0.04002	0.04955	0.00768	229.08	17.75	229.68	6.69	224.50	33.11
IC-12	4	111	84	0.75	0.25252	0.01171	0.03598	0.00097	0.23413	0.03575	0.04739	0.00695	241.87	13.25	227.88	6.06	213.61	29.85
IC-13	272	704	942	1.34	0.32504	0.00485	0.30402	0.00481	6.37314	0.12250	0.15204	0.00140	1440.59	30.75	1711.20	23.81	2028.58	17.01
IC-14	6	168	68	0.41	0.13253	0.01298	0.03570	0.00089	0.19927	0.03772	0.04172	0.00768	228.69	23.12	221.92	5.54	184.51	32.45
IC-15	5	112	88	0.79	0.25802	0.01108	0.03770	0.00098	0.25902	0.03117	0.04989	0.00569	247.78	12.75	238.59	6.09	233.87	25.45
IC-16	8	197	121	0.62	0.19778	0.00874	0.03609	0.00071	0.22760	0.01926	0.04600	0.00367	233.02	11.40	228.58	4.44	208.22	16.05
<i>Mangerite (OD100205-2C)</i>																		
2C-1	6	141	114	0.81	0.25413	0.01025	0.03742	0.00093	0.24510	0.01395	0.04770	0.00230	237.22	11.45	236.82	5.81	222.59	11.44
2C-2	8	219	117	0.53	0.17286	0.00877	0.03603	0.00077	0.20972	0.02191	0.04265	0.00424	234.67	13.12	228.15	4.81	193.32	18.56
2C-3	12	287	262	0.91	0.28344	0.00817	0.03691	0.00061	0.21564	0.01811	0.04280	0.00343	230.28	7.70	233.66	3.80	198.27	15.24
2C-4	15	381	256	0.67	0.20556	0.00558	0.03717	0.00068	0.29382	0.01361	0.05690	0.00229	228.77	7.55	235.27	4.25	261.56	10.73
2C-5	5	130	89	0.68	0.21727	0.00989	0.03704	0.00089	0.25972	0.01509	0.05085	0.00255	237.98	12.51	234.49	5.54	234.44	12.23
2C-6	22	563	323	0.57	0.17342	0.00575	0.03742	0.00061	0.26761	0.01124	0.05181	0.00190	227.18	8.47	236.81	3.81	240.78	9.05
2C-7	19	443	367	0.83	0.25771	0.00918	0.03738	0.00079	0.25753	0.01055	0.05002	0.00163	233.81	9.97	236.59	4.88	232.67	8.55
2C-8	18	448	284	0.64	0.20574	0.00733	0.03712	0.00061	0.24555	0.01404	0.04814	0.00253	241.39	9.53	234.95	3.82	222.95	11.51
2C-9	8	193	113	0.58	0.18759	0.00746	0.03801	0.00071	0.19587	0.03818	0.03798	0.00727	245.67	10.90	240.49	4.44	181.63	32.95
2C-10	9	200	179	0.89	0.27769	0.01220	0.03729	0.00087	0.26767	0.01370	0.05198	0.00223	233.39	11.87	236.04	5.40	240.83	11.04
2C-11	5	132	93	0.70	0.22250	0.01426	0.03642	0.00107	0.14969	0.05008	0.03056	0.01006	231.36	16.52	230.60	6.65	141.63	45.22
2C-12	11	294	164	0.56	0.17438	0.00821	0.03538	0.00070	0.24701	0.01248	0.05064	0.00224	221.90	11.33	224.11	4.33	224.15	10.21
2C-13	5	131	75	0.58	0.18588	0.00926	0.03731	0.00084	0.26731	0.02139	0.05190	0.00384	242.15	13.31	236.14	5.23	240.54	17.28
2C-14	6	149	73	0.49	0.15188	0.01056	0.03708	0.00078	0.24227	0.02168	0.04759	0.00401	231.00	16.82	234.69	4.88	220.28	17.88
2C-15	5	135	74	0.55	0.16985	0.01422	0.03614	0.00107	0.21931	0.03693	0.04437	0.00718	223.36	19.91	228.83	6.66	201.33	31.23

a: Radiogenic Pb, corrected for common Pb using ²⁰⁴Pb or ²⁰⁸Pb.

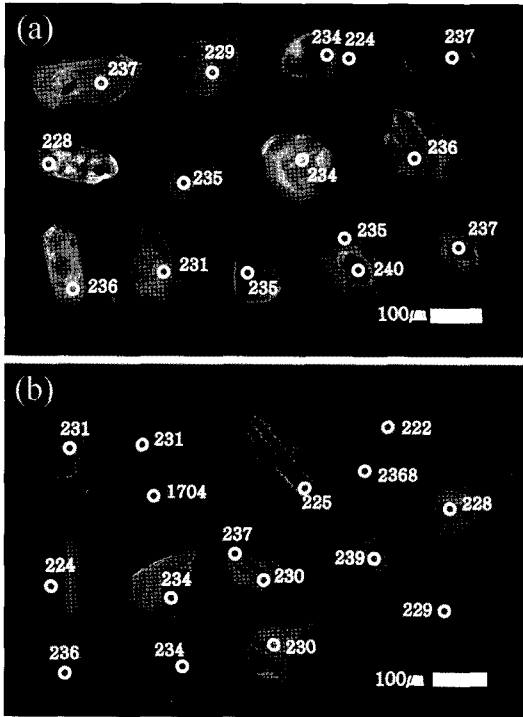


Fig. 11. Cathodoluminescence (CL) images of sectioned zircon grains and analyzed positions with $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages for (a) Mangerite and (b) Gabbro.

혼화 작용을 받았음을 지시한다. 이러한 충돌 후 화성암의 특징은 서론에서 언급했던 경기육괴와 낭림육괴 남쪽 경계에 나타나는 다른 충돌 후 화성암류의 지화학적 특징과 동일하다. 이러한 지화학적 특징을 보이는 충돌 후 화성암은 수루 대륙 충돌대 지역에서도 발견되며 티벳과 스코틀랜드에 나타나는 고생대 중기의 충돌대와 히말라야 충돌대에서도 발견된다 (Turner *et al.* 1996; Qian *et al.*, 2003; Yang *et al.* 2005, Ye *et al.*, 2008; Fowler *et al.*, 2008).

육천 변성대내 이안 화강암과 대강 화강암 역시 충돌 후 화성암으로 보고되었다(Cho *et al.*, 2008). 하지만 이들 화강암들은 저함량 Ba-Sr 화성암에 속하며 (Fig. 7f), Fig. 8c에서와 같이 대강 화강암은 Rb vs. Y+Nb 지구조환경 분류도에서, 그리고 이안 화강암은 Rb/Zr vs. SiO₂ 분류도에서 각각 충돌 후 환경에 포함되지 않는다(Fig. 8d). 따라서 이안, 대강 화강암은 경기육괴와 낭림육괴 남쪽 경계부에 걸쳐 광역적으로 나타나는 충돌 후 화성암류와는 성인이 다른 것으로 판단되며 성인에 대한 좀 더 많은 연구가 필요하다.

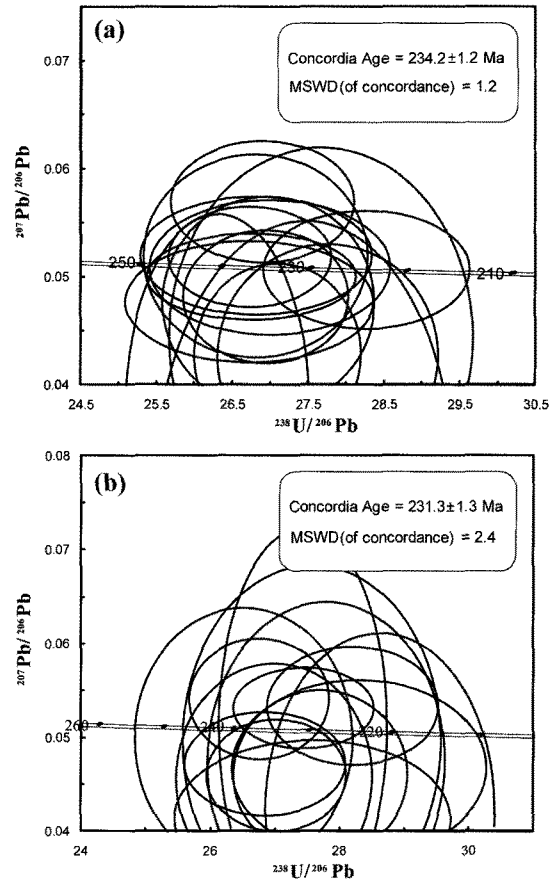


Fig. 12. Concordia plots of SHRIMP U-Pb isotopic analyses of zircons from (a) Mangerite and (b) Gabbro in the Odaesan area.

맨거라이트-반려암 화성암체의 트라이아스기 중기 연대

최근에 경기육괴의 여러 곳에서 충돌 후 화성암이 보고되었다(Fig. 13; Sagong *et al.*, 2005; Choi *et al.*, 2008; Williams *et al.*, 2009; 박영록, 2009; Lee and Oh, 2010; Seo *et al.*, 2010). Fig. 13에서 볼 수 있는 것처럼 다른 충돌 후 화성암류는 약 230 Ma 경에 형성된 것으로 밝혀졌고 정연중 외(2008), 이기욱 외(2009)는 오대산 맨거라이트의 관입 연대 역시 약 230 Ma 일 가능성을 제시하였다. 본 연구 역시 SHRIMP 연대 측정 방법을 이용하여 오대산 맨거라이트와 새롭게 기재 된 반려암을 확인해 본 결과 이 두 암석의 연대는 각각 $234 \pm 1.2 \text{ Ma}$ 와 $231 \pm 1.3 \text{ Ma}$ 로 경기육괴의 다른 충돌 후 화성암들처럼 약 230 Ma에 형성된 것임을 밝혔다. 그리고 경기육괴뿐만 아니라

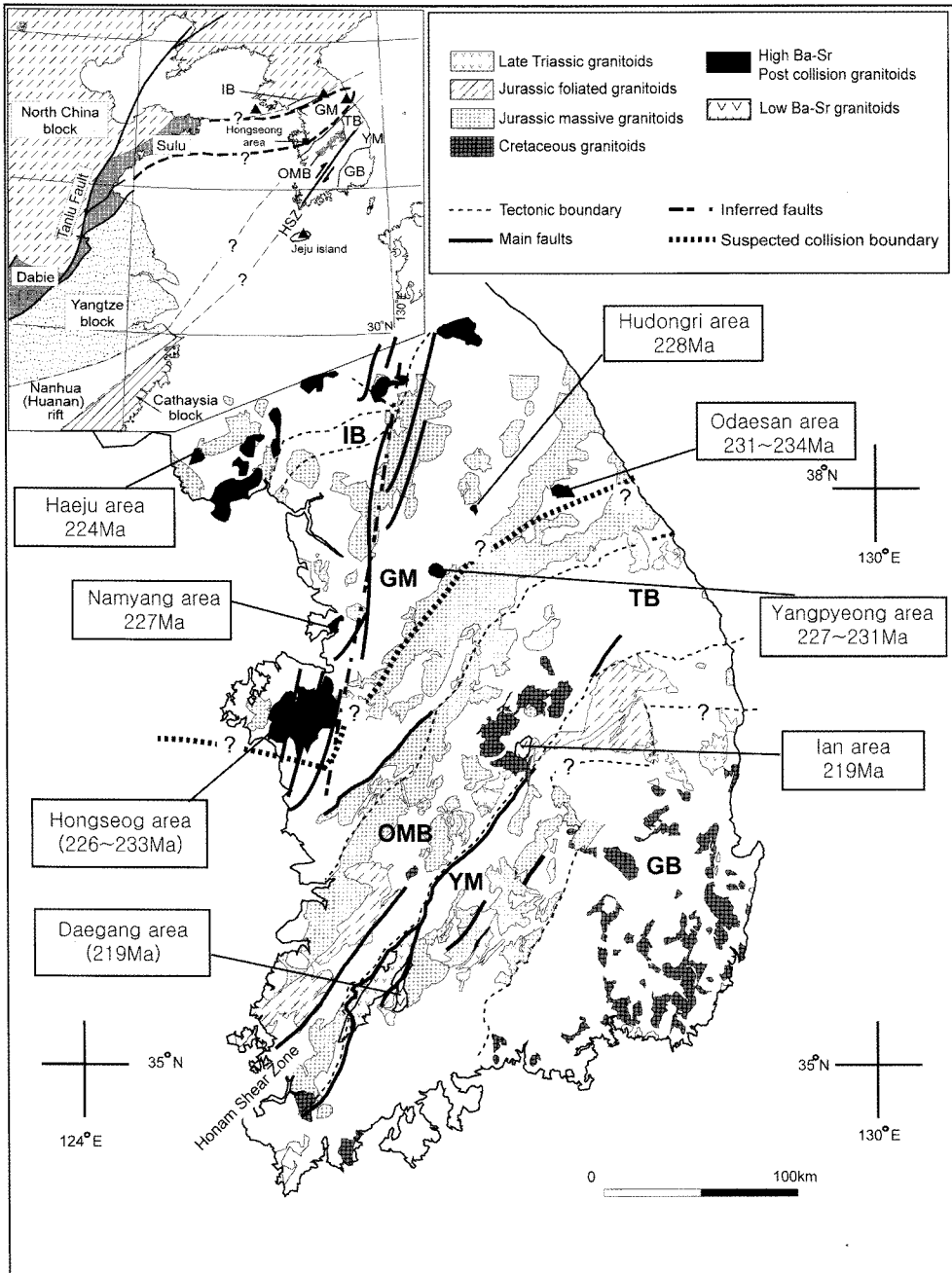


Fig. 13. The distribution of Triassic plutonic rocks in South Korea. Abbreviations are the same as those used in Fig. 1. Ages for Triassic plutonic rocks were obtained from the following sources: Sagong *et al.*, 2005; Cho *et al.*, 2008; Choi *et al.*, 2008, Peng *et al.*, 2008; Williams *et al.*, 2009; Park, 2009; Seo *et al.*, 2010; Lee and Oh, 2010; this study.

휴전선 바로 이북 지역인 낭림육괴 남쪽 경계부에서도 충돌 후 환경에서 형성된 224 Ma의 심장암이 나타난다(Peng *et al.*, 2008). 이러한 최근의 연구 결과

들은 한반도에서 일어난 남중국판과 북중국판의 충돌 결과 약 230 Ma 시기에 충돌 후 화성암이 경기육괴와 낭림육괴 남쪽 경계부에 걸쳐 광역적으로 형성되

있음을 의미한다. 충돌 후 화성암의 연대가 홍성 지역 남동부에서 나타나는 에클로자이트의 변성시기인 230 Ma경과 비슷한 사실은 에클로자이트로부터 얻어진 230 Ma경의 연대는 에클로자이트 형성시기가 아니라 에클로자이트가 지표로 상승하는 과정에서 백립암상의 후퇴변성작용을 받을 때의 연대일 가능성을 제시한다. 그리고 중국의 수루 지역에서 초고압 변성작용과 후퇴 변성 작용간의 시간차가 20 Ma(Ernst *et al.*, 2007)인 것을 고려할 때 홍성 지역의 에클로자이트는 230 Ma경 보다 약 20 Ma 이전인 약 250 Ma 경에 형성되었을 가능성이 높다.

맨거라이트-반려암 화성암체 성인 지구조 모델

Seo *et al.* (2010)은 홍성지역에서 발견된 충돌 후 화성암들을 대상으로 대륙 충돌 후 화성암의 성인을

설명하였다. 오대산 지역에 나타나는 충돌 후 화성암인 맨거라이트와 반려암의 성인을 Seo *et al.* (2010)이 제시한 이론에 대비하여 설명하면 다음과 같다 (Fig. 14). 대륙 충돌 이전에 존재했던 섭입작용에 의해 섭입된 해양판이 추와 같은 작용을 하면서 대륙판을 섭입시켰고 일정 깊이까지 대륙판이 섭입되었을 때 대륙의 부력이 섭입된 해양판이 하부로 잡아당기는 힘보다 커져 두 판이 분리되어 대륙판이 상승하게 되고 그 결과 만들어진 대륙판과 해양판 사이의 공간을 통해 연약권이 밀려들어오면서 열이 공급되어 대륙판 하부의 맨틀이 용융되었다. 이렇게 맨틀이 용융되어 만들어진 염기성 마그마가 상승하다 일부는 대륙지각을 관입하고 지표로 분출하기도 하지만 대부분은 대륙지각보다 높은 밀도에 의해 대륙지각 하부에서 상승이 정지되고 그곳에서 냉각되어 대륙지각 하

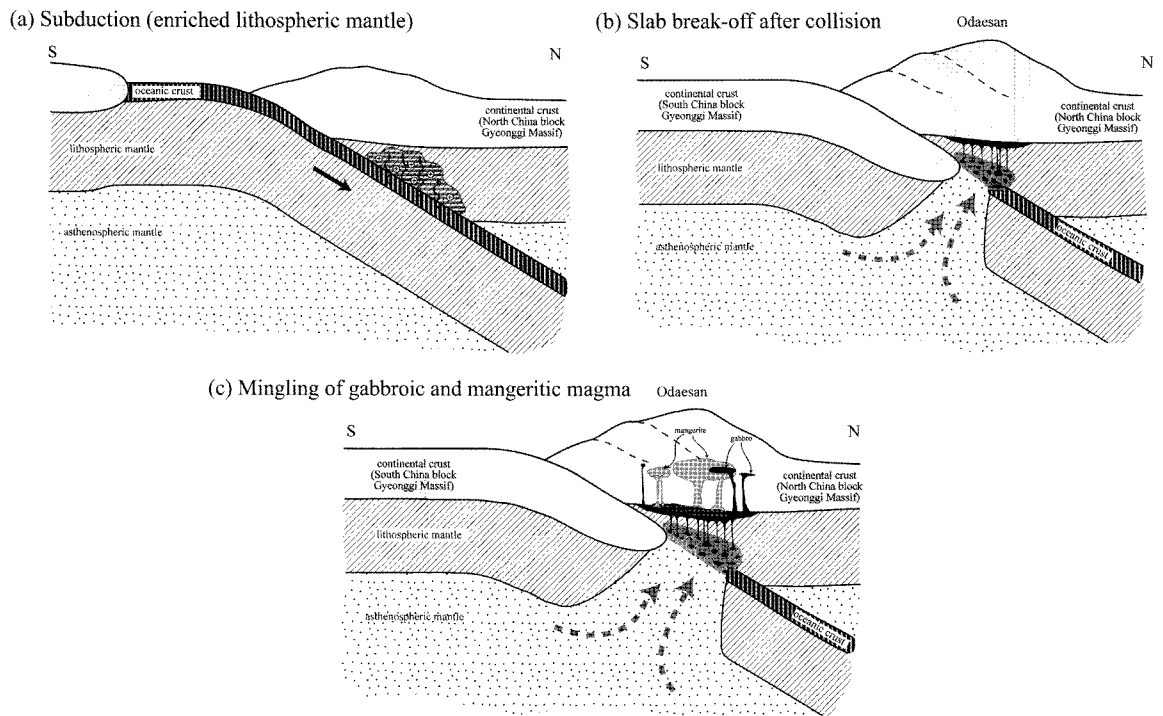


Fig. 14. Tectonic model of the evolution of the Hongseong area (modified after Seo *et al.*, 2010). (a) Subduction stage before continental collision. Water and crustal elements were supplied to the lithospheric mantle from the subducted oceanic crust and sediments. As a result, lithospheric mantle was enriched with water and crustal elements. (b) During the final stages of collision, the oceanic slab broke off from the continental slab, making an opening between the continental and oceanic slabs. The heat of the asthenosphere supplied through this opening to the lithospheric mantle. Partial melting of the lithospheric mantle occurred in response to heat derived from the asthenosphere and formed gabbroic magma which underplated the lower crust. (c) The opening became wider resulting more heat supply from the asthenosphere. As a result, the underplated gabbro was partially melted to produce shoshonitic mangeritic magma. The mangeritic magma intruded the crust together with gabbroic magma formed by partial melting of lithospheric mantle. In some places of the crust, these two magmas mingle together.

부에 첨가(underplating) 되면서 염기성 성분의 하부 지각을 구성하게 된다. 대륙판과 해양판의 분리 이후 해양지각의 침강과 대륙지각의 융기에 의해 두 판 사이의 공간이 더 확대되어 더 많은 열이 대륙지각 하부 맨틀로 공급되어 더 많은 용융이 일어나고 이때 생성된 마그마가 상승하여 앞서 대륙 하부에 첨가된 염기성 하부 지각에 열을 공급하여 용융시킴으로서 염기성 하부 지각으로 부터 맨거라이트를 형성한 중성 마그마가 생성되었다. 중성질 맨거라이트 마그마와 동시에 맨틀로부터 만들어진 염기성 마그마의 일부가 대륙지각내로 관입하여 맨거라이트와 마그마 상태에서 혼합되면서 오대산 지역의 맨거라이트와 반려암으로 구성된 화성암체가 형성되었다. 이러한 동시 관입은 두 암석에서 관찰된 여러 조직과 거의 동일한 관입 연령에 의해 잘 증명된다.

Fig. 14에서 보이듯이 대륙 충돌 후 화강암은 대륙 충돌시 섭입되는 대륙의 반대편에 주로 형성된다. 기존 연구의 대부분은 남중국판이 북중국판 밑으로 섭입하는 것으로 판단하고 있으며 따라서 충돌 후 화성암류는 북중국판에 형성되었을 것이다. 따라서 한반도내의 남중국판과 북중국판의 충돌 경계는 충돌 후 화강암류의 분포지역 보다 남쪽에 존재할 것이다. 홍성 지역에서는 충돌 후 화성암류가 북서쪽에 나타나는 반면 남동부에는 에클로자이트가 나타나기 때문에 이 두 지역 사이에 충돌경계가 존재할 가능성이 높다. 그리고 경기육괴에서 충돌 후 화성암류가 나타나는 최남단은 양평과 오대산 지역이다. 따라서 한반도내 남중국판과 북중국판의 충돌 경계는 Fig. 13에서와 같이 홍성 지역을 지나 양평과 오대산을 연결하는 선과 옥천변성대 북부 경계와의 사이 지역을 지나갈 것으로 판단된다. 하지만 남중국판과 북중국판의 충돌대로 예상되는 지역에는 쥘라기 화성암이 매우 광역적으로 강하게 관입하고 있는데 이는 이 지역이 충돌 경계부로서 많은 약선대가 존재하였기 때문일 가능성이 있다. 그 결과 한반도에서는 쥘라기 화성암의 광역적 관입으로 충돌 경계부를 찾는 작업이 어려울 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 한국과학재단(연구과제: RO1-2007-999-29951-0), 한국연구재단(2010-0027347)과 전북대학교 장학지원사업에 의해 지원을 받아 수행된 연구이다.

EPMA 분석에 많은 시간을 할애 해주었던 한국기초과학지원연구원 전주센터 조성환 연구원, 저어콘 연대 측정에 많은 도움과 조언을 해준 오창 SHRIMP 센터 김정민 박사, 이기욱 박사, 김윤섭 박사, 그리고 암석 파쇄와 저어콘 분리에 도움을 준 부경대학교 지구환경과학과 박계현 교수와 서재현 학생에게 감사한다.

참고문헌

- 권용완, 1996, 강원도 설악산-오대산일대 변성암복합체의 변성과정과 변성환경에 관한 연구. 고려대학교 박사학위논문. 163p.
- 권용완, 김형식, 오창환, 1997, 경기육괴 북동부지역에 분포하는 오대산 편마암 복합체의 다변성작용. 암석학회지, 6, 226-243.
- 권용완, 1998, 오대산편마암복합체내에 산출되는 앵피블라이트의 지화학적 특성과 변성작용. 암석학회지, 7, 111-131.
- 김봉균, 지정만, 이돈영, 소철섭, 1975, 한국지질도(1:50,000), 현리 지질도폭 및 설명서 국립지질광물연구소, 19p.
- 김옥준, 1971, 남한의 신기 화강암류의 관입 시기와 지각 변동. 광산지질, 4, 1-9.
- 김옥준, 1973, 경기육괴 북서부의 변성암 복합체의 층서와 지질구조. 광산지질, 6, 201-218.
- 김용준, 조동룡, 이창신, 1998, 한반도 남서부 남원 일대에 분포하는 A형 대강 화강암의 암석학, 지화학 및 지구조적 의미. 자원환경지질학회지, 31, 399-413.
- 김종선, 이준동, 2000, 거제도 화강암질암의 지화학적 특성에 의한 마그마 불균질혼합 증거. 지질학회지, 36, 19-38.
- 박영록, 2009, 춘천 후동리 일대에 분포하는 중기 트라이아스기 관입암의 부화된 지화학 및 Sr-Nd 동위원소 특성: 부화된 맨틀로부터 기원. 암석학회지, 18, 255-267.
- 오창환, 김정빈, 박영석, 김성원, 2006, 경기육괴의 고원생대 암류들에 대한 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대와 그 의미. 지질학회지, 42, 587-606.
- 이기욱, Williams, I.S., 정연중, 정창식, 2009, 경기육괴 동부지역에서 산출하는 맨거라이트의 트라이아스기 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대. 대한자원환경지질학회 춘계 지질과학기술 공동학술대회 논문집, 270.
- 이대성, 윤석규, 김정진, 1975, 한국지질도(1:50,000), 창춘 지질도폭 설명서 국립지질광물연구소, 19p.
- 임순복, 전희영, 김유봉, 김복철, 조동룡, 2005, 서북옥천대 비봉~연무지역 변성퇴적암층의 지질시대, 층서 및 지질구조. 지질학회지, 41, 335-368.
- 정연중, 이기욱, Kamo, S.L., 정창식, 2008, 경기육괴 동부 맨거라이트에 대한 저어콘 단일 입자 열이온화질량분석법 연대측정. 지질학회지, 44, 425-433.
- 정창희, 이상만, 이종혁, 박희인, 원종관, 김정환, 이창진, 김형식, 나기창, 박용안, 박창업, 양승영, 오민수, 윤선, 이동영, 이종혁, 조성권, 진명식, 최덕근, 최현일, 1999, 한

- 국의 지질, 시그마프레스, 서울, 802p.
- 조등룡, 김용준, Armstrong, R., 2006, 서산층군 함철규암의 쇠설성 저어콘에 대한 SHRIMP U-Pb 연대: 시대와 층서의 제한. *암석학회지*, 15, 119-127.
- 조등룡, 2010, 경자육괴 구룡층군 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대: 임진강대 연천층군과의 대비와 지체구조적 의의. *한국암석학회·한국광물학회 공동학술발표회 논문집*, 33.
- 조문섭, 권성택, 이진한, Nakamura, E., 1995, 연천-전곡 지역에 분포하는 임진강대의 고압각섬암. *암석학회지*, 4, 1-19.
- 조문섭, 이기욱, 이승렬, Stern, R., 1999, 남한에서 가장 오래된 지각물질의 나이: SHRIMP 연대 측정, 1999년도 한국광물학회·한국암석학회 공동학술발표회 논문집, 89.
- 진미정, 김종선, 이준동, 김인수, 백인성, 2000, 양산시 원효산 화강암에 산출되는 포획암에 대한 암석학적 연구. *암석학회지*, 9, 142-168.
- Barbarin, B., 1986, Comparison of mineralogy of mafic magmatic enclaves and host granitoids, Central Sierra Nevada, California. *Meet. Cordilleran Sect. Geol. Soc. Am., Los Angeles, Calif., Abstr. Progr.*, 18, 83.
- Barbarin, B. and Didier, J., 1992, Genesis and evolution of mafic microgranular enclaves through various types of interaction between coexisting felsic and mafic magmas. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83, 145-153.
- Baxter, S. and Feely, M., 2002, Magma mixing and mingling textures in granitoids: example from the Galway Granite, Connemara, Ireland. *Mineralogy and Petrology*, 76, 63-74.
- Briqueu, L., Bougault, H. and Joron, J.L., 1984, Quantification of Nb, Ta, Ti and V anomalies in magmas associated with subduction zones: petrogenetic implications. *Earth Planet. Sci. Letters*, 68, 297-308.
- Buseck, P.R. and Veblen, D.R., 1978, Trace elements, crystal defects, and high resolution electron microscopy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42, 669-678.
- Chang, E.Z., 1996, Collisional orogene between north and south China and its eastern extension in the Korean Peninsula. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 13, 267-277.
- Chappell, B.W., 1999, Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplo granites. *Lithos*, 46, 535-551.
- Chen, J. and Zhou, T., 1997, Geochemical and Geochronological Constraints on Evolution of the Dabie-Sulu Terrane, China. *Basic Science and Engineering*, 1, 1097-1103.
- Cho, D.L., Lee S.R. and Armstrong, R., 2008, Termination of the Permo-Triassic Songrim (Indosinian) orogeny in the Ogcheon belt, South Korea: Occurrence of ca. 220 Ma post-orogenic alkali granites and their tectonic implications. *Lithos*, 5, 191-200.
- Cho, M., Kim, H., Lee, Y., Horie, K. and Hidaka, H., 2008, The oldest (ca. 2.51 Ga) rock in South Korea: U-Pb zircon age of a tonalitic migmatite, Daejajak Island, western Gyeonggi massif. *Geosciences Journal*, 12, 1-6.
- Cho, M., Na, J. and Yi, K., 2010, SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons in metasediments of the Taean Formation, western Gyeonggi massif, Korea: Tectonic implications. *Geosciences Journal*, 14, 99-109.
- Choi, S.G., Rajesh, V.J., Seo, J., Park, J.W., Oh, C.W., Pak, S.J. and Kim, S.W., 2008, Petrology, geochronology and tectonic implications of Mesozoic high Ba-Sr granites in the Haemi area, Hongseong Belt, South Korea. *Island Arc*, 18, 266-281.
- Cox, K.G., Bell, J.D. and Pankhurst, R.J., 1979, The interpretation of igneous rocks. *George Allen and Unwin, London*.
- Ernst, W.G., and Liou, J.G., 1995, Contrasting plate-tectonic styles of the Qinling-Dabie-Sulu and Franciscan metamorphic belt. *Geology*, 23, 353-356.
- Ernst, W.G., Tsujimori, T., Zhang, R. and Liou, J.G., 2007, Permo-Triassic Collision, Subduction-Zone Metamorphism, and Tectonic Exhumation Along the East Asian Continental Margin. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 35, 73-110.
- Fowler, M.B., Kocks, H., Darbshire, D.P.F. and Greenwood, P.B., 2008, Petrogenesis of high Ba-Sr plutons from the Northern Highlands Terrane of the British Caledonian Province. *Lithos*, 105, 129-148.
- Francis, D.M., 1976, Amphibole pyroxenite xenoliths: Cumulate or replacement phenomena from the upper mantle, Nunivak Island, Alaska. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58, 51-61.
- Harris, N.B.W., Pearce, J.A. and Tindle, A.G., 1986, Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward, M.P., Reis, A.S. (Eds.), *Collision Tectonics: Geological Society of London, Special Publication*, 19, 67-81.
- Ireland, T.R. and Williams, I.S., 2003, Consideration in Zircon Geochronology by SIMS. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 53, 215-241.
- Janoušek, V., Bowes, D.R., Braithwaite, Colin J.R. and Rogers, G., 2000, Microstructural and mineralogical evidence for limited involvement of magma mixing in the petrogenesis of a Hercynian high-K calc-alkaline intrusion: the Kozárovce granodiorite, Central Bohemian Pluton, Czech Republic. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Science*, 91, 15-26.
- Jeon, H.J., Cho, M., Kim, H., Horie, K. and Hidaka, H., 2007, Early Archean to Middle Jurassic Evolution of the Korean Peninsula and Its Correlation with Chinese Cratons: SHRIMP U-Pb Zircon Age Constraints. *Journal of Geology*, 115, 525-539.
- Kim, C.-B., Turek, A., Chang, H.-W., Park, Y.-S. and Ahn, K.-S., 1999, U-Pb zircon ages for Precambrian and Mesozoic plutonic rocks in the Seoul-Cheongju-Chooncheon area, Gyeonggi massif, Korea. *Geochemical Journal*, 33,

- 379-397.
- Kim, O.J., 1972, Precambrian geology and structures of the central region of South Korea. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, 4, 231-240.
- Kim, S.W., Oh, C.W., Williams, I.S., Rubatto, D., Rye, I.C., Rajesh, V.J., Kim, C.B., Guo, J. and Zhai, M., 2006, Phanerozoic high-pressure eclogite and intermediate-pressure granulite facies metamorphism in the Gyeonggi Massif, South Korea: Implications for the eastward extension of the Dabie-Sulu continental collision zone. *Lithos*, 92, 357-377.
- Kim, T. and Oh, C.W., 2010, The subduction and collision related middle Paleozoic metamorphic events in the SW of Gyeonggi Massif in South Korea and its meaning to the tectonics in Northeast Asia. 2010 Proceedings of the Annual Joint Conference, *Petrol. Soc. Korea and Miner. Soc. Korea*, 1.
- Leake, B.E., 1978, Nomenclature of amphiboles. *Can. Min.*, 16, 501-520.
- Lee, S.R., Cho, M., Cheong, C.-S. and Park, K.-H., 1997, An early Proterozoic Sm-Nd age of mafic granulite from the Hwachon area, South Korea. *Geoscience Journal*, 1, 136-142.
- Lee, S.Y. and Oh, C.W., 2010, Triassic post collisional igneous activity and granulite facies metamorphic event in the Yangpyeong area, South Korea and its meaning to the tectonics of Northeast Asia. 2010 Proceedings of the Annual Joint Conference, *Petrol. Soc. Korea and Miner. Soc. Korea*, 8.
- Li, S., Xiao, Y., Liu, D., Chen, Y., Ge, N., Zhang, Z., Sun, S., Cong, B., Zhang, R., Hart, S.R. and Wang, S., 1993, Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites: timing and process. *Chemical Geology*, 109, 89-111.
- Li, Z.-X., 1994, Collision between the North and South China blocks: A crustal-detachment model for suturing in the region east of the Tanlu fault. *Geology*, 22, 739-742.
- Ludwig, K.R., 2008, *Isoplot 3.6. A User's Manual*. Berkeley Geochronology Center Special Publication 4, 2455 Ridge Road, Berkeley, CA 94709, USA, 78p.
- Ludwig, K.R., 2009, *SQUID 2.50. A User's Manual*. Berkeley Geochronology Center, 2455 Ridge Road, Berkeley, CA 94709, USA, 102p.
- Maniar, P.D. and Piccoli, P.M., 1989, Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin* 101, 635-643.
- McCulloch, M.T. and Gamble, J.A., 1991, Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 102, 358-374.
- Meschede, M., 1986, A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, 56, 207-218.
- Oh, C.W., Kim, S.W., Choi, S.G., Zhai, M., Guo, J. and Sajeev, K., 2005, First finding of eclogite facies metamorphic event in South Korea and its correlation with the Dabie-Sulu collision belt in China. *Journal of Geology*, 113, 226-232.
- Oh, C.W., 2006, A new concept on tectonic correlation between Korea, China and Japan: Histories from the late Proterozoic to Cretaceous. *Gondwana Research*, 9, 47-61.
- Oh, C.W., Krishnan, S., Kim, S.W. and Kwon, Y.W., 2006a, Mangerite magmatism associated with a probable Late-Permian to Triassic Hongseong-Odesan collision belt in South Korea. *Gondwana Research*, 9, 95-105.
- Oh, C.W., Kim, S.W. and Williams, I.S., 2006b, Spinel granulite in Odesan area, South Korea: Tectonic implications for the collision between the North and South China blocks. *Lithos*, 92, 557-575.
- Oh, C.W. and Kusky, T.M., 2007, The Late Permian to Triassic Hongseong-Odesan collision belt in South Korea, and its tectonic correlation with China and Japan. *International Geology Review*, 49, 639-657.
- Oh, C.W., Choi, S.G., Seo, J., Rajesh, V.J., Lee, J.H., Zhai, M. and Peng, P., 2009, Neoproterozoic tectonic evolution of the Hongseong area, southwestern Gyeonggi Massif, South Korea; implication for the tectonic evolution of Northeast Asia. *Gondwana Research*, 16, 272-284.
- Oh, C.W., Rajesh, V.J., Seo, J., Choi, S.G. and Lee, J.H., 2010, Spinel compositions and tectonic relevance of the Bibong ultramafic bodies in the Hongseong collision belt, South Korea. *Lithos*, 117, 198-208.
- Pearce, J.A., 1996, Source and setting of granitic rocks. *Episodes* 19, 120-125.
- Pearce, J.A. and Norry, M.J., 1979, Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 69, 33-47.
- Pearce, J.A., Harris, N.B. and Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25, 957-983.
- Peccerillo, A. and Taylor, S.R., 1976, Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks in the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 58, 63-81.
- Peng, P., Zhai, M., Guo, J., Zhang, H. and Zhang, Y., 2008, Petrogenesis of Triassic post-collisional syenite plutons in the Sino-Korean craton: an example from North Korea. *Geological Magazine*, 145, 1-11.
- Qian, Q., Chung, S.-L., Lee, T.-Y. and Wen, D.-J., 2003, Mesozoic high-Ba-Sr granitoids from North China: geochemical characteristics and geological implications. *Terra Nova*, 15, 272-278.
- Ree, J.H., Cho, M., Kwon, S.T. and Nakamura, E., 1996, Possible eastward extension of Chinese collision belt in South-Korea: the Imjingang belt. *Geology*, 24, 1071-1074.
- Sagong, H., Kwon, S.-T. and Ree, J.-H., 2005, Mesozoic

- episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics*, 24, TC5002, doi:10.1029/2004TC001720.
- Seo, J., Choi, S.G. and Oh, C.W., 2010, Petrology, geochemistry, and geochronology of the post-collisional Triassic mangerite and syenite in the Gwangcheon area, Hongseong Belt, South Korea. *Gondwana Research*, 18, 479-496.
- Smith, P.P.K., 1977, An electron microscope study of amphibole lamellae in augite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 59, 317-322.
- Streckeisen, A.L., 1974. Classification and Nomenclature of Plutonic Rocks. Recommendations of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. *Geologische Rundschau*, 63, 773-785.
- Sun, S.S and McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematic of oceanic basalt: implications for mantle composition and process. In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (Eds.), *Magmatism in the Ocean Basins: Geological Society of London, Special Publication*, 42, 528-548.
- Tarney, J. and Jones, C.E., 1994, Trace element geochemistry of orogenic igneous rocks and crustal growth models. *Journal of the Geological Society of London*, 151, 855-868.
- Tsuchiya, N., Suzuki, S., Kimura, J.I. and Kagami, H., 2005, Evidence for slab melt/ mantle reaction: Petrogenesis of Early Cretaceous and Eocene high-Mg andesites from the Kitakami Mountains, Japan. *Lithos*, 79, 179-206.
- Turner, S., Arnaud, N., Liu, J., Rogers, N., Hawkesworth, C., Harris, N., Kelley, S., Van Calsteren, P. and Deng, W., 1996, Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan plateau: implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts. *Journal of Petrology*, 37, 45-71.
- Veblen, D.R. and Buseck, P.R., 1981, Hydrous pyroboles and sheet silicates in pyroxenes and uranities: intergrowth microstructures and reaction mechanisms, *American Mineralogists*, 66, 1107-1134.
- Williams, I.S., 1998, U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. Mckibben, M.A. Shanks III, W.C., Ridley, W.I. (Eds.). *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Reviews in Economic Geology*, 1-35.
- Williams, I.S., Cho, D.L. and Kim, S.W., 2009, Geochronology, and geochemical and Nd-Sr isotopic characteristics, of Triassic plutonic rocks in the Gyeonggi Massif, South Korea: Constraints on Triassic post-collisional magmatism. *Lithos*, 107, 239-256.
- Wilson, M., 1989, *Igneous Petrogenesis*. Unwin Hyman, London, 466p.
- Yang, J.H., Chung, S.L., Wilde, S.A., Wu, F.Y., Chu, M.F., Lo, C.H. and Fan, H.R., 2005, Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. *Chemical Geology*, 214, 99-125.
- Ye, H.-M., Li, X.-H., Li, Z.-X. and Zhang, C.-L., 2008, Age and origin of high Ba-Sr appinite-granites at the northwestern margin of the Tibet Plateau: Implications for early Paleozoic tectonic evolution of the Western Kunlun orogenic belt. *Gondwana Research*, 13, 126-138.
- Yin, A. and Nie, S., 1993, An indentation model for the north and south china collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, Eastern Asia. *Tectonics*, 12, 801-813.
- Zhai, M. and Liu, W., 1998, The boundary between Sino-Korea Craton and Yangtze Craton and its extension to the Korean Peninsula. *Journal of Petrological Society of Korea*, 7, 15-26.
- Zhang, K.J., 1997, North and South China collision along the eastern and southern North China margins. *Tectonophysics*, 270, 145-156.

2010년 12월 30일 접수

2011년 1월 4일 심사개시

2011년 4월 20일 채택