

춘천 후동리 일대에 분포하는 중기 트라이아스기 관입암의 부화된 지화학 및 Sr-Nd 동위원소 특성: 부화된 맨틀로부터 기원

박영록*

강원대학교 지질학과

Enriched Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of Middle Triassic Plutonic Rocks in Hudongri, Chuncheon: Derivation from Enriched Mantle

Young-Rok Park *

Department of Geology, Kangwon National University

요약: 경기육괴 중앙부 춘천 후동리 일대에 분포하는 관입암은 고철질의 조성을 가지는 반려암질 섬록암과 중성의 섬록암으로 이루어져 있다. 섬록암으로부터 분리한 흑운모에 대해 측정된 K-Ar 연령은 228Ma로서 중기 트라이아스기에 해당한다. 이 암석들은 Ba와 Sr과 같은 친석원소뿐만 아니라 MgO, Ni 및 Cr과 같은 호정원소들도 부화된 지화학적 특성을 보여주며, 이것은 연구지역의 관입암이 부화된 맨틀암의 부분용융으로부터 기원한 것임을 지시한다. 또한 연구지역의 관입암은 매우 부화된 Sr과 Nd 동위원소 조성을 보이는데 이러한 부화된 값은 지각물질의 혼염에 의한 가능성과 함께 오랜 기간에 걸쳐 불호정원소가 부화된 맨틀로부터 기원한 것에 기인한다고 보인다. 고철질암임에도 불구하고 주요 유색광물로 함수광물인 각섬석과 흑운모가 산출되는 점과 이 암석들이 조구조판별도에서 화산호 환경에 도시되는 점은 이 암석들이 섭입에 의해 영향을 받은 부화된 맨틀 물질로부터 기원하였음을 지시한다.

핵심어: 고철질-중성 관입암, 트라이아스기, 부화된 맨틀, 후동리

Abstract: The intrusive rocks in the Hudongri area, Chuncheon located in central Gyeonggi Massif consist of gabbroic diorite and diorite. K-Ar age of biotite separated from diorite sample records middle Triassic age of 228 Ma. The intrusives are characterized by enrichment of MgO, Ni and Cr as well as large ion lithophile elements such as Ba and Sr, which is indicative of derivation of magma from enriched mantle. The intrusives also have enriched Sr-Nd isotopic compositions, which appear to result from a long-term incompatible element enriched mantle source with an effect of crustal contamination. Occurrence of abundant hydrous minerals such as amphiboles and biotite rather than anhydrous minerals of pyroxene and olivine in mafic intrusive as well as being plotted in volcanic arc field in tectonic environment discrimination diagram indicate the mafic-intermediate intrusives in the Hudongri area, Chuncheon were derived from mantle material enriched by subduction.

Key words: Mafic-intermediate intrusives, Triassic, Enriched mantle, Hudongri

서 언

최근에 남중국과 북중국 지괴의 충돌대가 한반도의 경기육괴로 연장될 가능성이 제기되면서 경기육괴 일

대에서 일어난 트라이아스기 화성활동에 대한 관심이 증대되고 있다. 경기육괴에 분포하는 트라이아스기 관입암은 경기육괴 서부의 홍성과 남양 및 경기육괴의 중앙부인 양평일대에 분포하는 것으로 알려져 있다 (Choi *et al.*, 2009; Williams *et al.*, 2009). 이 암석들은 Tarney and Jones(1994)에 의해서 제안된 화강암 분류방법 중 하나인 고함량 Ba-Sr 화강암과 저

*Corresponding author

Tel: 033-250-8552

E-mail: yrpark @kangwon.ac.kr

함량 Ba-Sr 화강암 중에 고품량 Ba-Sr 화강암이 갖는 지화학적 특성을 보여준다(박영록, 2008; Choi *et al.*, 2009; Williams *et al.*, 2009). 춘천 후동리 일대에는 이런 암석들과 유사한 지화학적 특징을 갖는 중기 트라이아스기 관입암이 분포한다. 연구지역은 중기 트라이아스기(231Ma, Williams *et al.*, 2009)에 생성된 것으로 알려진 양평 화성암복합체로부터 북동쪽으로 약 50 km 떨어진 지점에 위치하는 암체로서 이 관입암체는 양평 화성암체와 유사하게 고철질-중성의 조성을 갖는 암석들로 이루어져 있다. 이 관입암체는 지화학 및 동위원소 조성이 부화된 특성을 보일 뿐만 아니라 고철질암임에도 불구하고 휘석과 감람석과 같은 무수광물이 아니라 각섬석과 흑운모와 같은 함수광물을 주요 유색광물로 갖는 광물학적인 특성을 보인다. 이 연구에서는 이러한 지화학적·광물학적 특성을 보이는 춘천 후동리 일대에 분포하는 소규모 관입암체에 대한 흑운모 K-Ar 연령결과(228 Ma)와 이 암석들이 갖는 부화된 지화학 및 Sr-Nd 동위원소 조성을 보고하고 이처럼 부화된 특성을 갖는 암석이 부화된 맨틀로부터 기원한 것임을 밝히고자 한다.

지질 및 암석 개요

연구지역의 지질은 선캄브리아기의 용두리 편마암 복합체와 이를 부정합으로 덮고 있는 의암층군이 기저를 이루며, 이를 관입한 중기 트라이아스기(228 Ma) 화성암으로 이루어져 있다. 연구지역에 대한 지질설명은 가평도폭 1:50,000에 잘 나와 있다(김옥준 외, 1974). 변성퇴적암으로 이루어진 연구지역의 의암층군은 아래에서부터 의암규암층, 구곡리층, 방곡리층, 창촌리층, 추곡리층, 동산층 등으로 구분된다(김옥준 외, 1974).

의암층군에 속하는 변성퇴적암류들을 관입한 심성암들은 춘천시 남면 후동리, 본산리 및 추곡리와 춘천시 남산면 창촌리 일대에 소규모로 분포한다. 이 관입암체는 남산면 창촌리와 남면 후동리의 경계지역에 위치하는 소주고개를 경계로 북쪽 남산면 창촌리 일대에 분포하는 암체와 남쪽 남면 후동리, 본산리 및 추곡리 일대에 걸쳐 분포하는 두 개의 암체로 이루어져 있다.

북쪽의 암체는 대체로 세립 내지 중립질의 크기를 갖는 입자들로 이루어져 있으며 흑운모가 각섬석보다

양적으로 우세한 반면에, 남쪽의 암체는 대체로 중립 내지 조립질 입자들로 이루어져 있으며 각섬석이 흑운모보다 양적으로 우세하게 나타난다. 흑운모에 비해 각섬석이 양적으로 우세하게 나오는 남쪽암체에서는 각섬석 입자가 흑운모 입자보다 더 큰 결정으로 산출된다.

연구지역의 화성암체는 어두운 색을 띠는 반려암질 섬록암과 이보다 좀 더 밝은 색을 띠는 섬록암이 혼재되어 나타나는 산출양상을 보인다. 섬록암은 대체로 세립질 내지 중립질의 크기를 갖는 입자들로 이루어져 있으며 흑운모를 주요 유색광물로 가지며 북쪽 암체에서 산출되는 반면에, 반려암질 섬록암은 대체로 중립 내지 조립질의 크기로 남쪽에서 각섬석을 주요 유색광물로 가지며 남쪽암체에서 산출되는 경향을 보인다.

섬록암과 반려암질 섬록암 모두 사장석, 흑운모 및 각섬석을 주구성광물로 가지며, 석영, 미사장석, 정장석, 녹니석, 스피넬, 저어콘, 인회석, 불투명광물을 부수광물로 갖는다. 장석류는 변질작용을 받아 일라이트로 변한 것이 관찰되기도 하며, 석영은 세립질 내지 중립질의 크기를 가지며 과동소광을 보인다.

분석 방법 및 결과

주원소, 미량원소 및 희토류원소

춘천 남면 후동리 일대에 분포하는 관입암의 대표적인 시료들을 선택하여 주원소, 미량원소 및 희토류원소 분석을 실시하였다. 시료를 채취한 위치는 Fig. 1에 제시되었다. 전암에 대한 주원소, 미량원소 및 희토류원소 분석은 캐나다의 Activation Laboratories Ltd. 와 한국기초과학지원연구원 서울분소에 의뢰하여 실시하였다. 캐나다의 Activation Laboratories Ltd.에서 수행된 주원소 분석은 fusion ICP(Inductively Coupled Plasma) 방법을 이용하여 실시하였고, 미량원소와 희토류원소는 fusion-MS(Mass Spectrometer)와 fusion ICP(Inductively Coupled Plasma) 방법을 이용하였다. 한국기초과학지원연구원 서울분소에서 수행한 주원소 분석은 X-선형광분광분석(XRF)법을 이용하였고, 미량원소와 희토류원소 분석은 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS)와 유도결합 플라즈마 분광기(ICP-AES)를 이용하여 수행하였다.

연구지역의 관입암에 대한 주원소, 미량원소 및 희토류원소 분석치는 Table 1에 제시되었다. SiO₂ 함량법

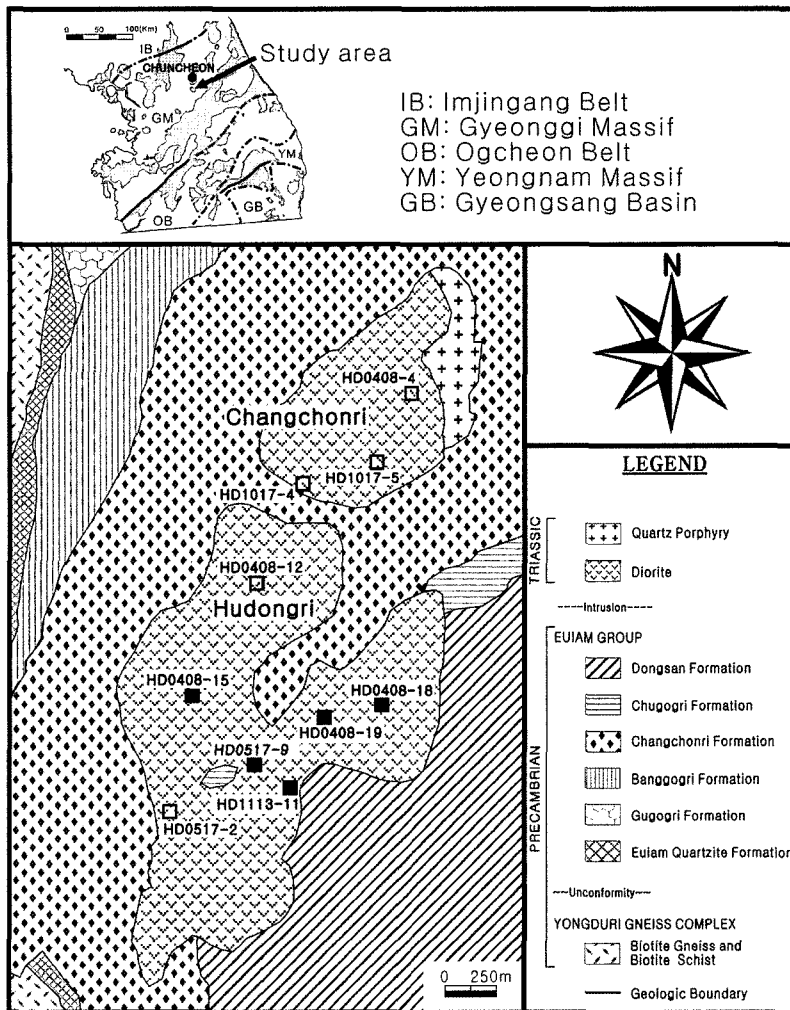


Fig. 1. Geologic map of the study area modified after Kim *et al.*(1974) and sampling locations. Open and closed rectangles represent sample site for diorite and gabbroic diorite, respectively.

위는 50.7-64.7 wt.%로서 넓은 범위의 값을 가진다. SiO₂ 함량 변화에 따른 주원소 함량 변화를 하거 변화도에 도시하면, SiO₂ 함량이 증가함에 따라 총 Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, TiO₂, P₂O₅는 감소하는 반면에, Na₂O는 증가하는 변화를 보인다(Fig. 2). 연구지역의 관입암을 SiO₂에 대한 Na₂O+K₂O 관계도 (Middlemost, 1994)에 도시하면 반력암에서 화강섬록암에 이르기까지 넓은 영역에 걸쳐 도시되는데(Fig. 3a), 비교적 낮은 SiO₂ 함량(50.7-53.8 wt%)을 가지며 상대적으로 어두운 색을 띠는 반력암질 섬록암과 이 보다는 좀 더 밝은 색을 띠며 높은 함량의 SiO₂ (57.7 - 64.7%)를 갖는 섬록암으로 나눌 수 있다. 이

관입암은 비알칼리(subalkaline) 계열에 속하며, AFM 도에서 비알칼리 계열 중에서도 Irvine and Baragar (1971)의 칼크-알칼리 계열에 도시된다(Fig. 3b). SiO₂에 대한 K₂O 변화도에서 고함량-K 칼크-알칼리암 또는 쇼쇼나이트(shoshonite) 영역에 도시된다(Fig. 3c). 이러한 특성은 경기육괴 남서부와 중앙부에 위치하는 해미, 흥성, 남양, 양평 지역에 분포하는 중기 트라이아스기 화강암질암들이 고함량 -K 칼크-알칼리 및 쇼쇼나이트 영역에 도시되는 것과 유사한 것으로서, 연구지역의 관입암 역시 이들 암석들과 마찬가지로 초-중기 트라이아스기에 북중국과 남중국 사이에 있었던 충돌사건의 말기 또는 충돌 이후에 관입한 것으로

Table 1. Concentrations of major, trace and rare earth elements of plutonic rocks in the Hudongri area, Chuncheon

| | Diorite | | | | | Gabbroic Diorite | | | | |
|----------------------------------|----------|-----------------------|----------|-----------|-----------------------|------------------|-----------|-----------|----------|-----------|
| | HD0408-4 | HD1017-5 [#] | HD1017-4 | HD0408-12 | HD0517-2 [#] | HD0408-15 | HD0408-18 | HD0408-19 | HD0517-9 | HD1113-11 |
| Major elements (wt.%) | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 57.69 | 59.08 | 58.11 | 64.70 | 62.45 | 53.80 | 50.71 | 52.55 | 53.00 | 52.28 |
| TiO ₂ | 1.21 | 1.07 | 1.02 | 0.69 | 0.77 | 1.28 | 1.07 | 1.42 | 1.14 | 0.59 |
| Al ₂ O ₃ | 16.55 | 17.57 | 14.85 | 16.41 | 14.59 | 14.35 | 10.02 | 15.29 | 15.60 | 14.61 |
| Fe ₂ O ₃ * | 7.90 | 6.44 | 8.40 | 4.79 | 6.03 | 8.87 | 8.66 | 9.62 | 8.64 | 8.67 |
| MnO | 0.10 | 0.06 | 0.12 | 0.05 | 0.10 | 0.11 | 0.14 | 0.12 | 0.12 | 0.13 |
| MgO | 3.96 | 3.65 | 4.71 | 2.62 | 4.26 | 6.87 | 11.35 | 7.06 | 6.30 | 9.55 |
| CaO | 4.90 | 4.44 | 5.53 | 2.77 | 3.97 | 6.17 | 10.28 | 7.08 | 6.67 | 9.32 |
| Na ₂ O | 3.15 | 3.23 | 2.29 | 3.60 | 2.63 | 3.07 | 1.34 | 2.94 | 2.86 | 2.20 |
| K ₂ O | 3.57 | 2.74 | 3.79 | 2.63 | 3.28 | 2.99 | 3.49 | 2.14 | 3.61 | 1.16 |
| P ₂ O ₅ | 0.32 | 0.33 | 0.21 | 0.19 | 0.19 | 0.36 | 0.54 | 0.36 | 0.39 | 0.12 |
| L.O.I | 0.51 | 0.82 | 0.53 | 1.25 | 1.02 | 1.27 | 1.87 | 1.07 | 0.94 | 0.64 |
| Total | 99.85 | 99.45 | 99.57 | 99.70 | 99.30 | 99.13 | 99.46 | 99.64 | 99.27 | 99.25 |
| Trace elements (ppm) | | | | | | | | | | |
| Ba | 1290 | 1328 | 1200 | 615 | 896 | 1196 | 1790 | 1180 | 1180 | 381 |
| Rb | 145 | 120 | 125 | 173 | 136 | 121 | 206 | 84 | 127 | 42 |
| Sr | 615 | 690 | 586 | 439 | 431 | 601 | 338 | 652 | 713 | 521 |
| Cs | 1.6 | 1.7 | 2.0 | 5.5 | 2.8 | 2.5 | 2.5 | 1.4 | 2.3 | 1.8 |
| Pb | 11 | 13 | 8 | 15 | 13 | 14 | 5 | 10 | 11 | 5 |
| Y | 17 | 12 | 17 | 10 | 12 | 19 | 20 | 21 | 20 | 14 |
| Zr | 272 | 80 | 212 | 197 | 52 | 208 | 187 | 176 | 135 | 79 |
| Hf | 6.4 | 1.0 | 5.4 | 4.8 | 1.3 | 4.9 | 4.6 | 4.3 | 3.6 | 2.1 |
| Nb | 19.1 | 4.9 | 12.9 | 13.4 | 7.8 | 19.4 | 10.8 | 13.5 | 17.4 | 5.8 |
| Ta | 0.96 | | 0.89 | 0.92 | | 1.25 | 0.58 | 0.71 | 1.05 | 0.38 |
| Th | 8.72 | 10.01 | 3.78 | 5.88 | 7.83 | 8.69 | 6.28 | 2.86 | 6.10 | 5.04 |
| U | 1.30 | 1.34 | 1.29 | 3.02 | 1.13 | 1.10 | 1.15 | 0.78 | 1.04 | 0.86 |
| Ni | 49 | 86 | 52 | 56 | 73 | 120 | 120 | 131 | 73 | 110 |
| Co | 21 | 20 | 18 | 11 | 19 | 33 | 44 | 35 | 25 | 41 |
| V | 87 | 79 | 95 | 57 | 78 | 127 | 181 | 139 | 130 | 161 |
| Cr | 88 | 163 | 87 | 93 | 212 | 260 | 792 | 269 | 217 | 390 |
| Sc | 11.7 | 11.4 | 15.9 | 7.9 | 11.0 | 17.0 | 32.3 | 16.4 | 17.5 | 24.0 |
| Zn | 130 | 78 | 80 | 70 | 90 | 130 | 100 | 120 | 100 | 70 |
| Ga | 24 | 44 | 23 | 25 | 35 | 21 | 14 | 20 | 19 | 17 |
| Rare earth elements (ppm) | | | | | | | | | | |
| La | 54.2 | 68.9 | 21.0 | 24.9 | 37.9 | 49.1 | 43.5 | 47 | 49.5 | 21.7 |
| Ce | 96.4 | 114.5 | 44.6 | 45.7 | 72.9 | 93.7 | 92.0 | 90.7 | 96.1 | 40.7 |
| Pr | 10.7 | 10.9 | 5.8 | 5.2 | 7.9 | 10.7 | 11.6 | 10.8 | 11.3 | 4.7 |
| Nd | 34.9 | 33.0 | 21.5 | 17.8 | 40.8 | 35.5 | 44.4 | 37.2 | 37.6 | 16.6 |
| Sm | 5.95 | 8.70 | 4.47 | 3.28 | 5.76 | 6.34 | 10.4 | 6.91 | 6.56 | 3.38 |
| Eu | 1.75 | 2.31 | 1.38 | 1.13 | 1.81 | 1.87 | 1.65 | 1.99 | 1.86 | 1.14 |
| Gd | 4.33 | 6.36 | 3.47 | 2.49 | 5.39 | 4.67 | 5.56 | 5.33 | 4.86 | 2.70 |
| Tb | 0.72 | 0.67 | 0.60 | 0.39 | 0.61 | 0.74 | 0.85 | 0.87 | 0.76 | 0.46 |
| Dy | 3.32 | 2.76 | 2.92 | 1.87 | 2.70 | 3.39 | 3.85 | 4.19 | 3.80 | 2.48 |
| Ho | 0.61 | 0.50 | 0.57 | 0.34 | 0.50 | 0.66 | 0.73 | 0.77 | 0.73 | 0.49 |
| Er | 1.62 | 1.45 | 1.66 | 0.97 | 1.40 | 1.80 | 1.92 | 2.17 | 1.96 | 1.34 |
| Tm | 0.23 | 0.17 | 0.32 | 0.16 | 0.18 | 0.29 | 0.28 | 0.40 | 0.30 | 0.22 |
| Yb | 1.29 | 1.12 | 1.48 | 0.87 | 1.17 | 1.45 | 1.52 | 1.70 | 1.72 | 1.20 |
| Lu | 0.20 | 0.17 | 0.20 | 0.12 | 0.18 | 0.21 | 0.19 | 0.24 | 0.22 | 0.17 |

*total iron

[#]Analyzed in Korea Basic Science Institute. Other samples are analyzed in Activation Lab. Ltd.

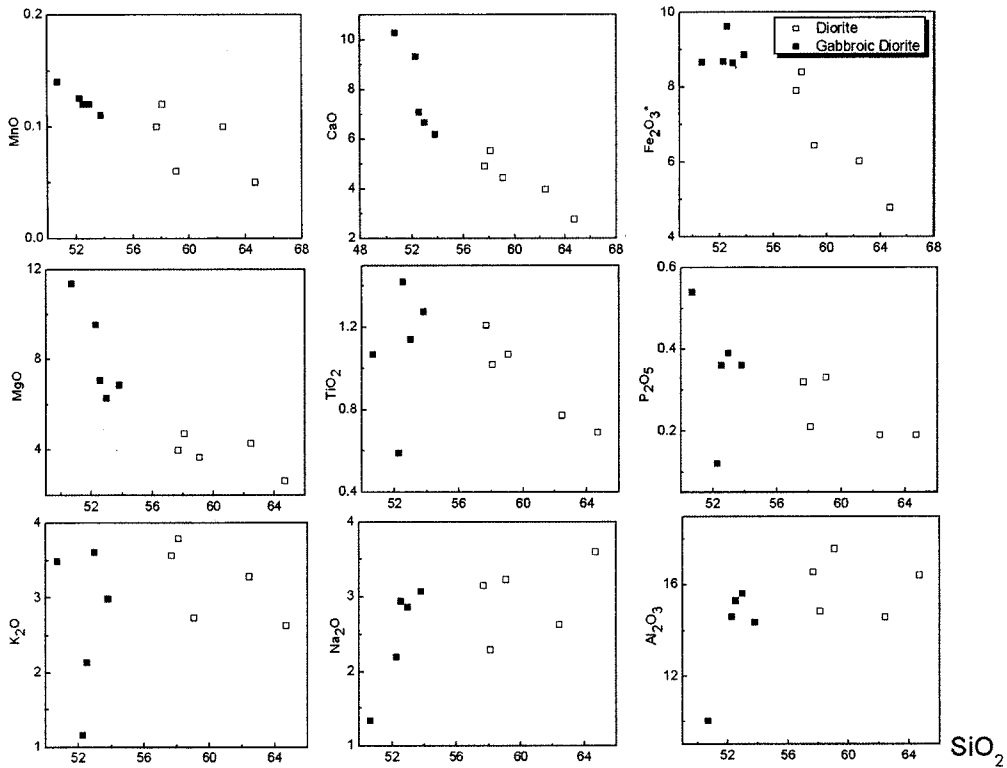


Fig. 2. Harker variation diagram of major elements for the plutonic rocks in the Hudongri area, Chuncheon.

볼 수 있다(Choi *et al.*, 2009; Williams, *et al.*, 2009). Al 포화지수를 이용한 화강암질암의 분류도인 몰 A/NK에 대한 A/CNK 그림(Maniar and Piccoli, 1989)에 도시하면 반려암질 섬록암은 중알루미나(metaluminous) 영역에, 섬록암은 중알루미나(metaluminous)와 과알루미나(peraluminous) 영역에 걸쳐 도시된다(Fig. 3d). 즉, 반려암질 섬록암에서 섬록암으로 가면서 Al 포화지수가 증가하는 변화를 보인다. 하나의 시료를 제외한 대부분의 시료들은 Chappell and White(1974)가 제안한 I-형, S-형 화강암의 구분 경계인 1.1 이하의 영역에 도시됨으로써 I-형 화강암에 해당함을 보인다(Fig. 3d).

연구지역 관입암들은 비교적 높은 함량의 친석원소(LILE, large ion lithophile elements)를 갖는다. 즉, 대부분의 시료들은 615-1790 ppm 정도의 Ba, 400-700 ppm 정도의 Sr을 함유한다. 따라서 이 암석은 Tarney and Jones(1994)에 의해서 제안된 화강암 분류방법 중의 하나인 고함량 Ba-Sr 화강암과 저함량 Ba-Sr 화강암 중에 고함량 Ba-Sr 화강암류로 분류된

다. 또한 연구지역의 관입암들은 높은 함량의 전이금속 원소들을 갖는다: Ni(49-131 ppm), V(57-181 ppm), Cr(87-792 ppm), Zn(70-130 ppm). 이처럼 연구지역 관입암들은 Sr과 Ba 같은 불호정원소 뿐만 아니라, Ni과 Cr 같은 호정원소 또한 부화된 특징을 보여준다. 하커 변화도에 미량원소 조성을 도시해보면, SiO₂ 함량이 증가함에 따라 Rb는 증가하는 반면에, Ba, Yb, V, Sc, Co는 감소한다(Fig. 4). 미량원소에서 관찰되는 이러한 변화경향은 야외에서 뚜렷한 경계 없이 혼재되어 나타나는 산출양상 및 주원소에 대한 하커 변화도에서 관찰되는 일련의 변화경향과 더불어 연구지역의 암석들이 동일한 근원물질로부터 분화된 산물임을 시사한다.

콘드라이트 값(Nakamura, 1974; Boynton, 1984)으로 표준화한 희토류원소 패턴에서 경희토류원소가 중희토류원소에 비해 부화되어 나타나며 ((La/Yb)_N = 9.48-41.32), Eu(-) 이상치는 관찰되지 않는다(Fig. 5). 원시맨틀 값(Wood *et al.*, 1979, 1981; McDonough *et al.*, 1991)으로 표준화한 거미그림(Fig. 6)에서는

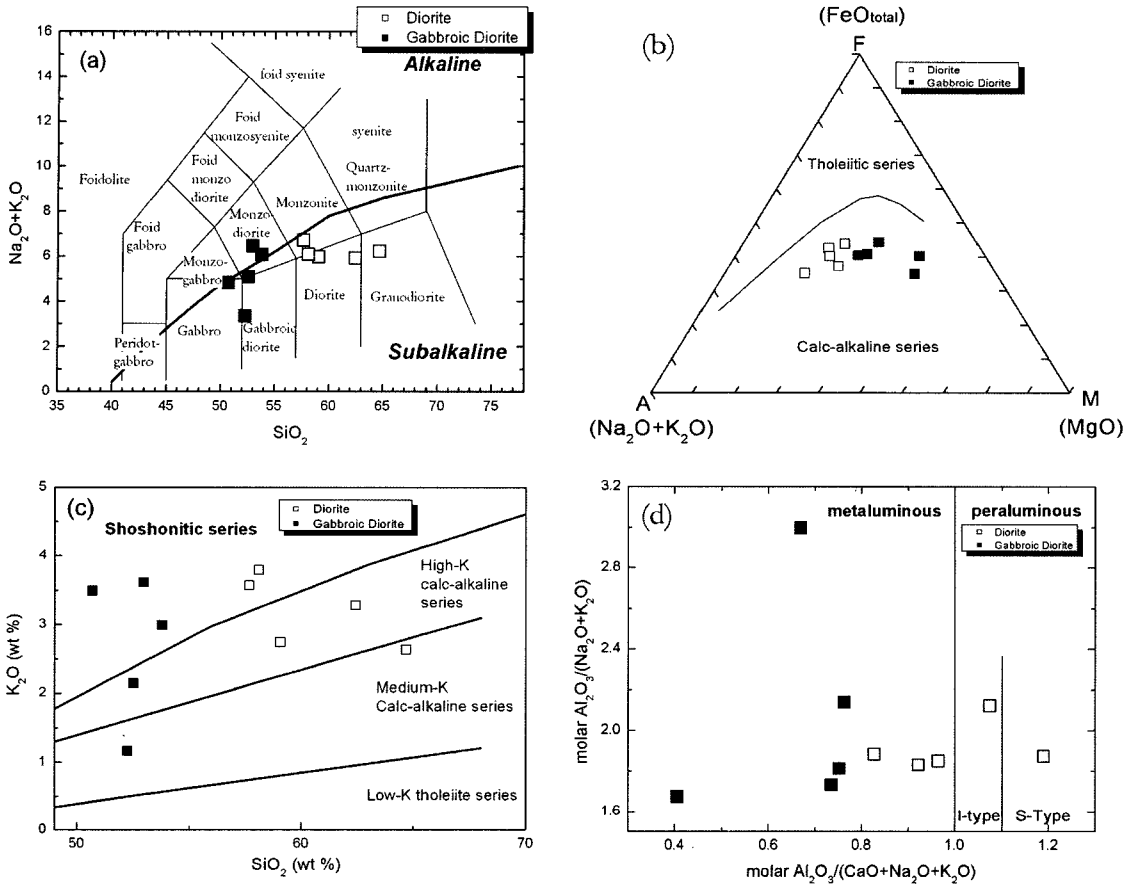


Fig. 3. (a) Lithological nomenclature for the intrusive rocks in the Hudongri area, Chuncheon on the basis of the plutonic TAS diagram of Middlemost(1994). (b) AFM diagram illustrating the calc-alkaline trend of the intrusives. The boundary between tholeiitic series and calc-alkaline series is after Irvine and Baragar(1971). (c) K_2O vs SiO_2 diagram. The boundary lines are from Le Maitre *et al.*(1989). (d) A/NK vs. A/CNK diagram(after Maniar and Piccoli, 1989).

뚜렷한 부의 Nb와 P 이상치가 나타나는데, 이것은 근원 마그마로부터 각석성과 인회석의 분별정출작용이 일어났음을 지시하는 것이다. K와 Pb가 보여주는 피크는 이 관입암체의 성인에 지각물질이 관련되어 있음을 지시한다.

흑운모 K-Ar 연령

흑운모에 대한 K-Ar 연령 측정을 위해 시료를 파쇄한 후에 표준망체로 분리하여 탈이온수로 세척하고 건조시킨 후 실체현미경 하에서 흑운모를 분리하였다. K-Ar 연대측정은 한국기초과학지원연구원에 의뢰하여 수행하였다. K 함량은 원자흡광분석기(Atomic Absorption Spectrometer, Unicam 989 모델)를 이용하여 측정하였고, Ar은 고정 진공 질량분석기(Static

Vacuum Mass Spectrometer, VG 5400 모델)를 이용하여 실시하였다.

흑운모에 대한 K-Ar 측정 결과 228.3 ± 4.3 Ma로서 트라이아스기 중기에 해당한다(Table 2). 이러한 생성 연대는 연구지역으로부터 남서쪽으로 약 50 km 떨어진 지점에 위치하는 양평 화성암 복합체에 대해 실시한 저어콘 U-Pb 생성연대인 231 Ma(Williams *et al.*, 2009)와 유사한 값으로 이들 암석들이 비슷한 시기에 생성되었음을 알려준다. 그러나 Ar에 대한 흑운모의 폐쇄온도가 약 $310^\circ C$ 정도인 점(McDougall and Harrison, 1999)을 고려할 때 연구지역에 분포하는 섬록암질암의 생성 시기는 이들 측정치보다 다소 더 오래되었을 가능성이 있다. 따라서 이 암석들의 생성시기에 대한 좀 더 정확한 연대를 알기 위해서는 저콘

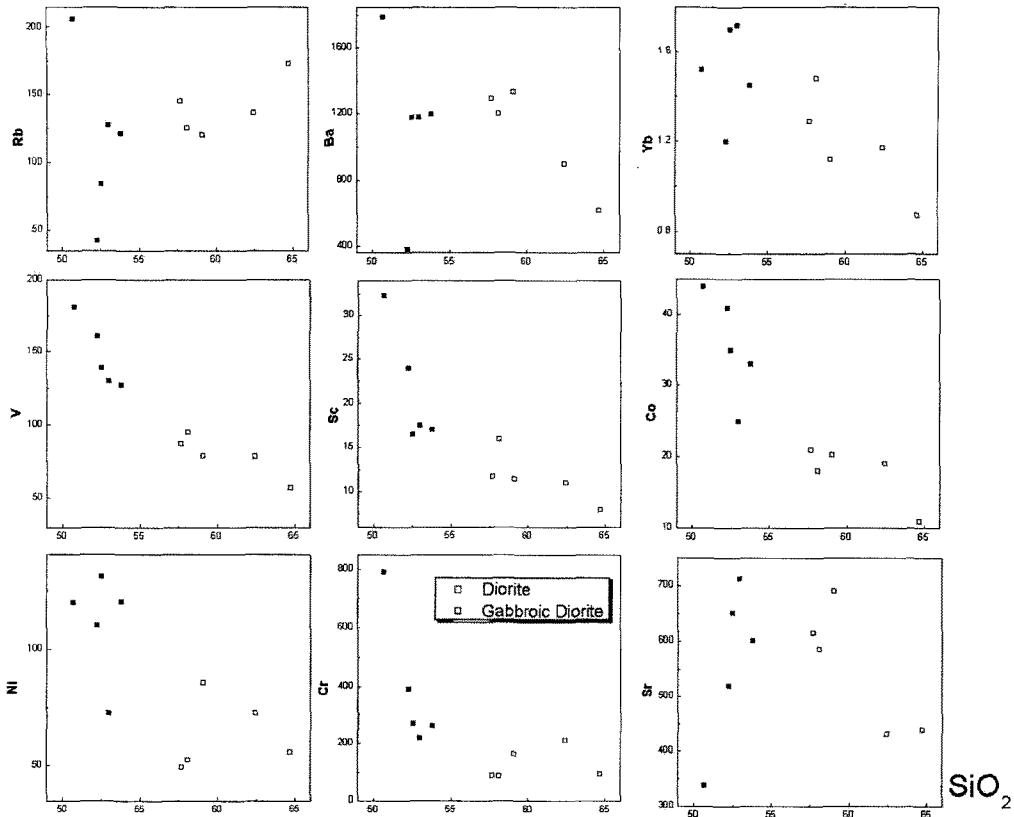


Fig. 4. Harker variation diagram of trace elements for the plutonic rocks in the Hudongri area, Chuncheon.

을 분리하여 U-Pb 연대측정을 실시하여야 할 것으로 판단된다.

Sr-Nd 동위원소

Sr과 Nd 동위원소비는 한국기초과학지원연구원 대전본원에서 열이온화질량분석기 (TIMS: Thermal Ionization Mass Spectrometer, 제작사: Micromass, 모델명: VG 54-30)를 이용하여 수행하였다. 암석에 대한 Sr 과 Nd 동위원소 조성은 Table 3과 같다. 섬록암을 구성하는 흑운모에 대한 K-Ar 연대인 228 Ma를 이용하여 계산한 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) 초기치와 ε_{Nd}(T) 값은 반려암질 섬록암이 각각 0.716192 와 -20.41이고 섬록암은 0.715190과 -21.17로서 상당히 부화된 값을 갖는다. 이러한 부화된 값은 연구지역 인근에 분포하는 중기 트라이아스기 암석인 양평화성암체가 갖는 값과 매우 유사하다(박영록, 2008; Williams *et al.*, 2009).

토의 및 결론

연구지역에 분포하는 반려암질 섬록암은 낮은 SiO₂ 함량(50.7-53.8 wt%), 높은 MgO (6.3-11.3 wt%), Ni (73-131 ppm) 및 Cr (260-792 ppm) 함량을 가지는 지화학적 특성을 보여주는데 이것은 이 관입암이 맨틀에서 기원하였음을 시사한다(Rudnick and Gao, 2003; Yang *et al.*, 2007). 또한 이 암석은 Ba와 Sr 같은 친석원소를 다량 함유하는데, 이처럼 고철질암에 친석원소들이 다량 함유되어 있는 것은 이 암석이 부화된 맨틀의 부분용융에 의해 유래하였을 가능성이 높음을 시사한다. 야외에서의 산출양상, 암석기재학적인 특징 및 지화학적인 자료는 연구지역의 관입암인 반려암질 섬록암과 섬록암이 성인적으로 밀접한 관련을 가지며 동일한 근원암으로부터 생성되었음을 시사한다. 따라서 고함량의 Ba와 Sr를 함유하는 연구지역의 반려암질 섬록암과 섬록암은 모두 부화된 맨틀로

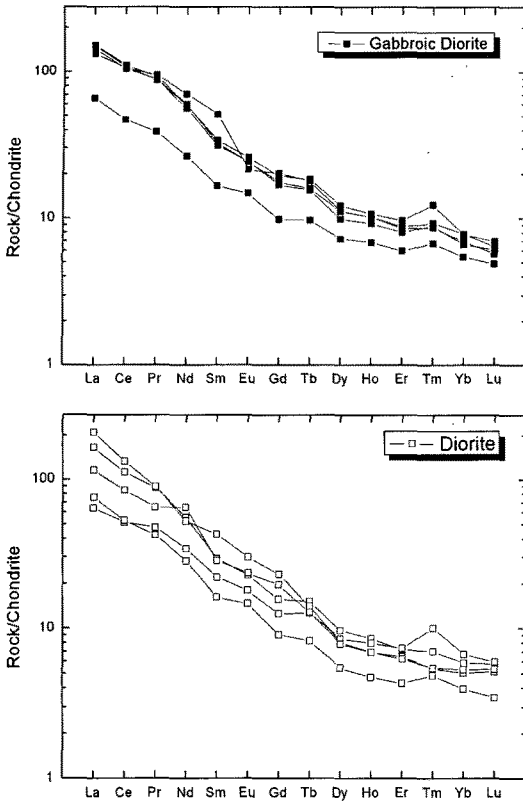


Fig. 5. Chondrite-normalized REE patterns of gabbroic diorite and diorite in the Hudongri area, Chuncheon normalized to the composition of the chondrite by Nakamura(1974) and Boynton(1984).

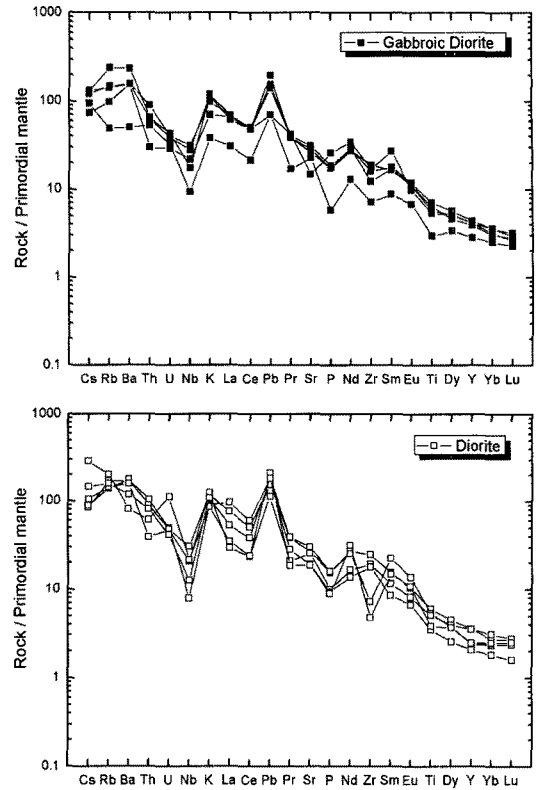


Fig. 6. Primordial mantle-normalized spider diagram of gabbroic diorite and diorite in the Hudongri area, Chuncheon.

부터 기원한 것으로 해석된다.

부화된 맨틀은 정상적인 맨틀 페리도타이트보다 훨씬 더 많은 양의 친석원소를 함유하며(e.g., Mcculloch and Gamble, 1991), 이런 부화맨틀이 부분적으로 용융되면 다량의 친석원소(e.g., Ba, Sr, LREE 등)를 가진 마그마가 생성되는데, 용융의 정도가 비교적 낮을 때 특히 그러하다(Shand et al., 1994; Gibson et al., 1995). 많은 연구자들이 맨틀기원의 마그마가 높은 함량의 친석원소(특히 Ba와 Sr)를 갖는 이유를 맨틀 부화에 의한 것으로 해석한 것처럼(Thompson et al., 1989; Shand et al., 1994; Gibson et al., 1995; Rogers et al., 1998; Benito et al., 1999), 춘천 후동리 일대에 분포하는 고철질-중성의 관입암 역시 부화된 맨틀물질의 부분용융에 의해 생성된 마그마로부터 유래한 것으로 해석된다. 연구지역에 분포하는 고철질암인 반려암질 섬록암이 부화된 맨틀로

부터 기원하였을 가능성은 Ni vs Cr 상관도(Fig. 7)에서도 잘 나타난다. Fig. 7에서 반려암질 섬록암과 섬록암 모두 맨틀기원의 마그마 영역과 약간 윗부분에 도시되는데, 이것은 이 암석이 부화된 맨틀로부터 유래하였음을 지시하는 것이다(Tsuchiya et al., 2005). 이러한 특징은 경기육괴 서남부에 위치하는 중기 트라이아스기(233 Ma) 고함량 Ba와 Sr를 가지는 해미화강암 내에 들어있는 중성의 포획암(mafic microgranular enclave)에서도 관찰되며, 이들이 부화된 맨틀로부터 기원하였음이 제안되었다(Choi et al., 2009).

연구지역 관입암인 반려암질 섬록암과 섬록암 시료 하나씩에 대해 분석한 Sr-Nd 동위원소 조성은 거의 동일한 값으로 매우 부화된 값을 보여준다(Table 3). 이처럼 부화된 동위원소 조성은 오랜 기간에 걸쳐 불호정원소가 부화된 맨틀로부터 기원하거나 아니면 지각물질의 부분용융에 의해 생성될 수 있다. 연구지

Table 2. K-Ar age of biotite separated from diorite in the Hudongri area, Chuncheon

| Sample No. | K (wt%) | Error (1σ) | ⁴⁰ Ar radiogenic (10 ⁻⁸ ccSTP/g) | Error (1σ) | ³⁶ Ar radiogenic (10 ⁻⁸ ccSTP/g) | Error (1σ) | Age (Ma) | Error (1σ) | Air (%) |
|------------|---------|------------|--|------------|--|------------|----------|------------|---------|
| HD1017-4 | 7.55 | 0.15 | 7131.79 | 5.39 | 136.61 | 0.14 | 228.27 | 4.29 | 5.36 |

Table 3. Rb-Sr and Sm-Nd isotopic data of plutonic rocks in the Hudongri area, Chuncheon

| Rock type | Sample No. | ⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr | ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr | 2σ | (⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i | ¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd | ¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd | 2σ | ε _{Nd} (T) |
|------------------|------------|------------------------------------|------------------------------------|----------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|----------|---------------------|
| Gabbroic diorite | HD0408-18 | 1.765602 | 0.720915 | 0.000031 | 0.715190 | 0.141620 | 0.511471 | 0.000015 | -21.17 |
| Diorite | HD1017-5 | 0.503290 | 0.717824 | 0.000013 | 0.716192 | 0.159665 | 0.511537 | 0.000015 | -20.41 |

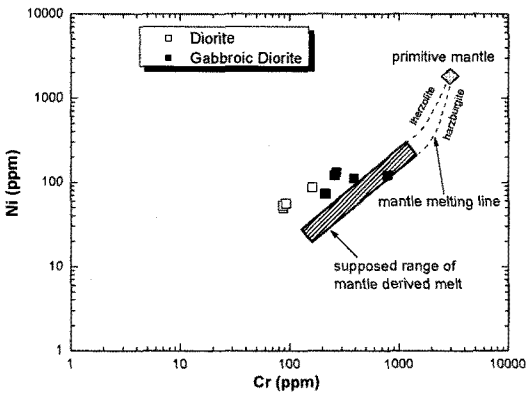


Fig. 7. Ni vs. Cr diagram(after Tsuchiya *et al.*, 2005) of the gabbroic diorite and diorite in the Hudongri area, Chuncheon.

역의 관입암은 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) 초기치와 ε_{Nd}(T) 값 사이의 상관관계를 나타내는 Fig. 8에서 상부지각을 구성하는 암석들이 갖는 영역에 도시됨으로써 이들 암석들이 마치 순수한 상부지각 물질의 부분용융에 의해 생성된 것처럼 보인다. 그러나 위에서 설명한 것처럼 연구지역의 관입암이 갖는 여러 가지 지화학적 특성들은 이 암석이 순수한 지각물질의 부분용융에 의해 생성된 것이 아니라 부화된 맨틀의 부분용융에 의해 유래한 마그마로부터 생성되었음을 강력하게 지시한다. 따라서 연구지역의 관입암이 갖는 부화된 Sr과 Nd 동위원소 조성은 순수한 지각물질의 부분용융에 의해서 결과된 것이라기보다는 오랜 기간에 걸쳐 불호정원소가 부화된 맨틀로부터 기원한 것으로 볼 수 있다. 이와 같이 오랜 기간에 걸쳐 불호정원소가 부화된 맨틀의 부분용융에 의해 부화된 지화학적 특성 및 방사성 동위원소 조성을 갖는 화성암에 대한 연구 결과는 북중국에 분포하는 중생대 화성암에 대한 연구에서도 보고되었다(e.g., Chen *et al.*, 2003).

연구지역의 고철질암이 지각물질이 아니라 초고철 질암으로 이루어진 부화된 맨틀의 부분용융에 의해 기원하였을 가능성은 현무암질 조성을 갖는 암석을 합리적인 정도로 용융시켰을 때 연구지역의 반력암질 섬록암처럼 낮은 실리카 함량을 갖는 마그마가 아니라 토날라이트 내지 화강섬록암질 조성을 갖는 멜트가 생성된다는 실험 결과와도 잘 일치한다(e.g., Rushmer 1991; Rapp and Watson, 1995).

그러나 연구지역의 관입암이 부화된 맨틀의 부분용융에 의해 유래하였지만 이 암석이 Fig. 8에서 상부지각을 구성하는 암석 영역에 도시되는 것으로 보아 지각을 향해 상승하는 동안에 대륙지각물질에 의해 혼염되었을 가능성이 있다. 연구지역의 관입암들이 지각물질에 의해 혼염되었을 가능성은 Fig. 6에서 볼 수 있는 것처럼 K와 Pb가 뚜렷한 피크를 보여줄 뿐만 아니라 Nb에 대한 뚜렷한 부의 이상치를 보여주는 것에서도 알 수 있다. 또한 Fig. 3d에서 보여주는 것처럼 후동리 일대에 분포하는 대부분의 암석은 I-형 화강암 영역에 도시되지만 S-형 화강암 영역에 도시되는 시료도 존재하는 것으로 보아 아마도 이질 조성을 갖는 지각물질의 혼염에 의해 마그마의 Al 포화 지수가 증가한 것으로 추정된다.

암석들에 대해 계산한 Nd 모델연령은 부화된 사건이 일어난 시기에 대한 최소 연령을 알려주는데 연구지역의 암석들에 대해 계산한 값은 이 시기에 대한 합리적인 연대를 제시하지 못한다. 그러나 연구지역의 암석과 유사한 암석들로 구성되며 비슷한 시기에 생성된 연구지역 인근의 양평 관입암들에 대해 계산한 시기가 2.30-1.95 Ma(미발표자료)로 초기 원생대를 나타내는데 연구지역 하부에서도 이와 비슷한 시기에 맨틀의 부화작용이 일어난 것으로 추정된다. 이를 위해서는 좀 더 많은 시료에 대한 Nd 동위원소 분석이 이루어져야 할 것이다.

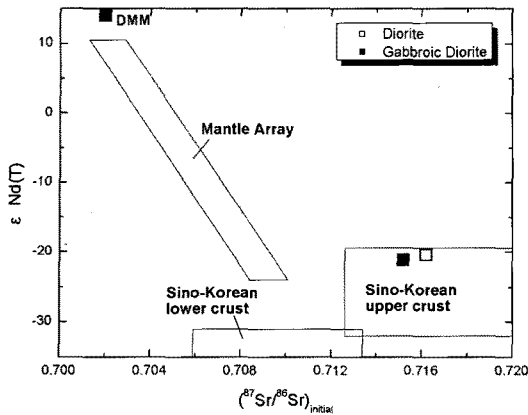


Fig. 8. $\epsilon_{Nd}(T)$ vs. initial $(^{87}Sr/^{86}Sr)_{Initial}$ diagram. Fields of Sino-Korean upper and lower crust are after Jahn *et al.*(1999).

맨틀의 부화는 섭입 초기 단계에 슬랩으로부터 기원한 유체와 암권맨틀의 상호작용에 의해 생성되거나 (McCulloch and Gamble, 1991), 그리고/또는 연약권으로부터 방출되어 상부의 암석권으로 계속적으로 유입된 휘발성 기체가 풍부하게 들어있는 저밀도 마그마와 암권맨틀과의 상호작용에 의해 생성되는 것으로 알려져 있다(McKenzie, 1989). 이러한 가능성 중에 연구지역 고철질암을 구성하고 있는 주요 유색광물의 종류를 고려할 때, 연구지역의 암석은 전자인 섭입에 의해 부화된 맨틀로부터 기원한 것으로 생각된다. 일반적으로 고철질암은 유색광물로 휘석이나 감람석과 같은 무수광물을 갖는다. 그러나 이와는 달리 연구지역 관입암은 암석에 대한 기재부분에서 기술한 것처럼 중성암인 섬록암뿐만 아니라 고철질암인 반력암질 섬록암(50.7-53.8 wt.% SiO_2) 또한 유색광물로서 각섬석과 흑운모와 같은 함수광물을 다량 함유하는 특징을 보여준다. 다량의 각섬석을 함유하는 고철질 관입암체의 기원에 대한 많은 암석학자들의 공통된 의견은 마그마의 근원물질, 초기 마그마 생성과정, 마그마분화과정, 암석의 형성단계에서 H_2O 가 결정적인 요인으로 작용했을 것이라는 것이다. 즉, 고철질 관입암체를 형성시킨 마그마의 기원지는 조구조 환경에 따라 다양하게 분포할 수 있겠지만, 고철질 마그마로부터 다량의 각섬석이 정출되기 위해서는 우선적으로 본원 마그마 또는 파생마그마 내에 다량의 H_2O 가 존재해야하고, 이러한 마그마의 분화작용, 동화작용 및 마그마혼합과 같은 암석형성 단계의 다양한 조합에 의해서 다양한 화학조성을 갖는 고철질-중성 관입암

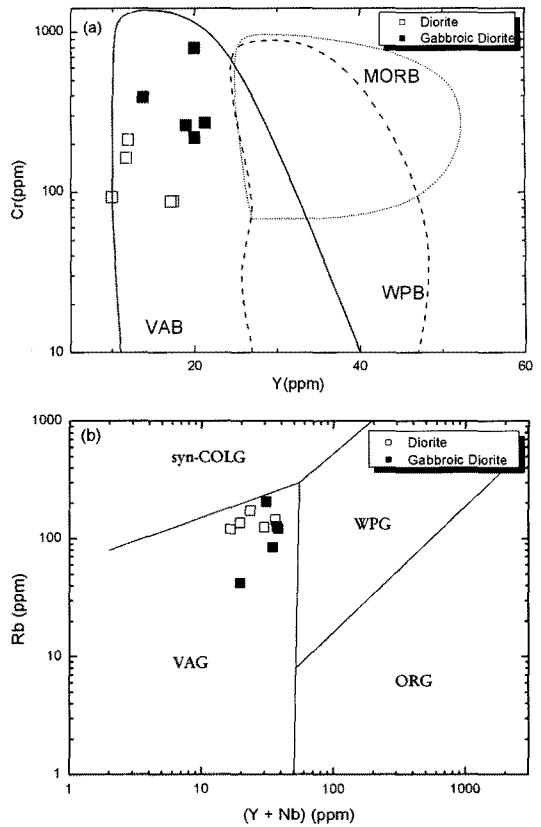


Fig. 9. (a) Cr-Y tectonic environment discrimination diagram (Pearce, 1982). VAB: volcanic-arc basalts, MORB: mid-ocean ridge basalts, WPB: within-plate basalts. (b) Rb vs. Y+Nb tectonic discrimination diagram (Pearce *et al.*, 1984). VAG: volcanic-arc granites, WPG: within-plate granites, ORG: oceanic-ridge granites, syn-COLG: syn-collisional granites.

체가 생성될 수 있다. 이처럼 물을 다량 함유하는 마그마는 대개 판과 판의 경계를 따라 섭입된 슬랩(slab)으로부터 방출된 유체가 관여함으로써 생성되며, 화산호와 대륙 가장자리에 분포하는 화성암의 생성에 있어서 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Davidson, 1987; Pawley and Holloway, 1993; Bea *et al.*, 1997; Elliot *et al.*, 1997; Kepezhinskis *et al.*, 1997; Grove *et al.*, 2000; Fershtater *et al.*, 2004). 이처럼 연구지역의 암석들도 섭입에 의해 영향을 받아 부화된 맨틀의 부분용융이 일어나면서 고철질암임에도 불구하고 휘석과 감람석과 같은 무수광물 대신에 각섬석과 흑운모와 같은 함수광물을 주요 유색광물로 함유하는 고철질-중성암이 된 것으로 생각된다.

사 사

이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술 연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2006-521-C00181)이며 이에 감사한다. 이 논문을 읽고 유익한 조언을 해주신 이승구 박사님께 감사드린다. 또한 야외지질조사 시 도움을 준 화성암석학 실험실 학부생들에게 감사하며 특히 그림 작성에 많은 도움을 준 김복수 학부생에게 진심으로 감사한다.

참고문헌

김옥준, 김서운, 유병화, 박병권, 1974, 한국지질도 (1:50,000), 가평도폭 및 설명서, 국립지질조사소, 26p.
 박영록, 2008, 양평에 분포하는 각섬석 반려암과 High Ba-Sr 화강암류의 성인: 지화학 및 Sr-Nd 동위원소 특성. 2007 추계지질과학연합학술대회 초록집, 163p.
 Bea, F., Fershtater, G.B. and Montero, M.P., 1997, Generation and evolution of subduction-related batholiths of the central Urals: constraints on the P-T history of the Uralian Orogen. *Tectonophysics*, 276, 103-116.
 Benito, R., Lopez-Ruiz, J., Cebria, J.M., Hertogen, M., Doblas, M., Oyarzun, R. and Demaiffé, D., 1999, Sr and O isotope constraints on source and crustal contamination in the high-K calc-alkaline and shoshonitic neogene volcanic rocks of SE Spain. *Lithos*, 46, 773-802.
 Boynton, W.V., 1984, Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson P. (ed), *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, 63-114.
 Chappell, B.W. and White, A.J.R., 1974, Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8, 173-174.
 Chen, B., Jahn, B.-M. and Zhai, M., 2003, Sr-Nd isotopic characteristics of the Mesozoic magmatism in the Taihang-Yanshan orogen, North China craton, and implications for Archean lithosphere thinning. *Journal of Geological Society, London*, 160, 963-970.
 Cho, M., 2001, A continuation of Chinese ultrahigh-pressure belt in Korea: evidence from ion microprobe U-Pb zircon ages. *Gondwana Research*, 4, 708.
 Choi, S.G., Rajesh, V.J., Seo, J., Park, J.W., Oh, C.W. Park, S.J. and Kim, S.W., 2009, Petrology, geochemistry and tectonic implications of Mesozoic high Ba-Sr granites in the Haemi area, Hongseong Belt, South Korea. *Island Arc*, 18, 266-281.
 Davidson, J.P., 1987, Crustal contamination versus subduction zone enrichment: example from the Lesser Antilles and implications for mantle source composition of Island arc volcanic rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 51, 2185-2198.

암석들이 생성된 조구조 환경을 알아보기 위한 조구조 판별도에 도시해 봄으로써 그 암석이 생성될 당시의 조구조환경 또는 마그마가 유래한 근원암의 성질을 유추할 수 있다. 현무암질암에 대한 조구조 환경 판별도중의 하나인 Y-Cr 분류도(Fig. 9a)와 화강암질암에 대한 판별도인 Rb vs. Y+Nb 분류도(Fig. 9b)에 각각 반려암질 섬록암과 섬록암을 점시하면 모두 화산호환경에 도시된다. 이와 같은 결과는 거미그림(Fig. 6)에서도 잘 나타난다. 거미그림의 좌측에 도시되는 Rb, Ba 및 Th 같은 친석원소의 함량이 부화된 값을 보여줄 뿐만 아니라 Nb와 P가 부의 이상치를 보여준다. 이러한 사실은 연구지역의 암석들이 생성될 당시의 조구조환경이 화산호환경이었음을 시사하거나, 그리고/또는 이전에 섭입에 의해 영향을 받은 근원암의 부분용융에 의해 이 암석이 생성되었음을 시사한다. 연구지역 관입암의 근원암인 맨틀 페리도타이트의 부화가 초-중기 트라이아스기에 있었던 것으로 추정되는 남중국과 북중국 지괴의 충돌(Lee *et al.*, 2000; Cho, 2001; Lee and Cho, 2003; Oh *et al.*, 2005, 2006; Oh, 2006; Kim *et al.*, 2006, 2008; Choi *et al.*, 2009; Williams *et al.*, 2009)과 관련하여 이루어진 섭입에 의해 이루어진 것인지 아니면 그 이전에 있었던 섭입에 의해 일어난 것인지에 대해서는 단정적으로 말할 수 없지만, 이 암석들이 갖는 부화된 Sr-Nd 조성은 일차적으로 이미 오래전에 일어난 섭입에 의해 영향을 받아 맨틀의 부화가 이루어졌을 가능성이 높음을 시사한다. 이와 같은 광물학적, 지화학적 및 동위원소 증거들에 기초하여 연구지역 관입암의 근원암인 맨틀의 부화는 섭입하는 슬랩으로부터 방출된 유체와 맨틀웨지(mantle wedge)를 구성하는 맨틀 페리도타이트와의 상호작용에 의해 생성된 것으로 해석된다(McCulloch and Gamble, 1991).

이처럼 고철질암이면서도 유색광물로 함수광물을 다량 함유하고 MgO, Ni 및 Cr과 같은 호정원소 뿐만 아니라 Ba와 Sr과 같은 친석원소를 다량 함유하는 연구지역의 고철질-중성 관입암은 오랜 기간에 걸쳐 불호정원소가 부화되었으며 섭입에 의해 영향을 받은 맨틀 물질로부터 기원하였음을 알 수 있다. 또한 연구지역의 관입암이 높은 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 초기치와 $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ 값을 갖는 것 역시 지각물질에 의한 혼염 가능성과 더불어 오랜 기간에 걸쳐 불호정원소가 부화된 맨틀로부터 기원한 것에 기인한다.

- Elliot, T., Plank, T. and Zindler, A., 1997, Element transport from slab to volcanic front at the Mariana Arc. *J. Geophys. Res.*, 102, 14991-15019.
- Fershtater, G.B., Bea, F., Montero, P. and Scarrow, J., 2004, Hornblende gabbro in the Urals: Types, Geochemistry, and Petrogenesis. *Geochemistry international*, 42, 610-629.
- Gibson, S.A., Thompson, R.N., Leonardos, O.H., Dickin, A.P. and Mitchell, J.G., 1995, The late Cretaceous impact of the Trindade mantle plume: evidence from large-volume, mafic, potassic magmatism in SE Brazil. *Jour. of Petrology*, 36, 189-229.
- Grove, T.L., Parman, S.W. and Bowring, S.A., 2000, The role of an H₂O-rich fluid in the generation of primitive basaltic andesites from the Mt. Shasta Region, N. California. *Cont. Mineral. Petrol.*, 142, 375-396.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. Jour. Earth Sci.*, 8, 523-548.
- Jahn, B.M., Wu, F.Y., Lo, C.H. and Tsai, C.H., 1999, Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. *Chem. Geol.*, 157, 119-146.
- Kepezhinskas, P., McDermott, F. and Defant, M.J., 1997, Trace element and Sr-Nd-Pb isotope constraints on a three component model of Kamchatka arc petrogenesis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61, 577-600.
- Kim, S.W., Oh, C.W., Williams, I.S., Rubbato, D., Ryu, 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 Block, South Korea: implications for the eastward extension of the Dabie-Sulu continental collision zone. *Lithos*, 92, 357-377.
- Kim, S.W., Williams, I.S., Kwon, S. Oh, C.W., 2008, SHRIMP zircon geochronology and geochemical characteristics of metaplutonic rocks from the south-western Gyeonggi Block, Korea: implications for Paleoproterozoic to Mesozoic tectonic links between the Korean Peninsula and eastern China. *Precambrian Research*, 162, 475-497.
- Lee, S.R., Cho, M., Yi, K.-W. and Stern, R., 2000, Early Proterozoic granulites in central Korea: tectonic correlation with Chinese cratons. *Journal of Geology*, 108, 729-738.
- Lee, S.R. and Cho, M., 2003, Metamorphic and tectonic evolution of the Hwacheon granulite complex, central Korea: composite P-T path resulting from two distinct crustal-thickening events. *Journal of Petrology*, 44, 197-225.
- Le Maitre, R.W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre 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, Oxford.
- 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.
- McDonough, W.F., Sun, S., Ringwood, A.E., Jagoutz, E. and Hofmann, A.W., 1991, K, Rb, and Cs in the earth and moon and the evolution of the earth's mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, Ross Taylor Symposium volume.
- McDougall, I. and Harrison, T.M., 1999, Geochronology and thermochronology by the ⁴⁰Ar/³⁹Ar method. Oxford University Press, New York.
- McKenzie, D.P., 1989, Some remarks on the movement of small melt fractions in the mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 95, 53-72.
- Middlemost, E.A.K., 1994, Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Sci Rev.*, 37, 215-224.
- Nakamura N., 1974, Determination of REE, Ba, Fe, Mg, and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 38, 757-775.
- Oh, C.W., Kim, S.W. and Williams, I.S., 2006, Late Permian HT spinel granulite in Korea and its tectonic implications for the collision between the North and South China Blocks. *Lithos*, 92, 557-575.
- 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.
- Pawley, A.R. and Holloway, J.R., 1993, Water source for subduction zone volcanism: New experimental constraints. *Science*, 260, 664-667.
- Pearce J.A., 1982, Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In *Andesites* (ed. R.S. Thorpe), Wiley, Chichester, 525-548.
- Pearce J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 2, 956-983.
- Rapp, R.P. and Watson, E.B., 1995, Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36, 891-931.
- Rogers, N.W., James, D., Kelley, S.P. and De Mulder, M., 1998, The generation of potassic lavas from the eastern Virunga province, Rwanda. *Journal of Petrology*, 39, 1223-1247.

Rudnick, J.J.W. and Gao, S., 2003, Composition of the continental crust. In *The Crust*, Vol. 3, *Treatise on Geochemistry*(ed. H.D. Holland and K.K. Turekian), Elsevier, Oxford, 1-64.

Rushmer, T., 1991, Partial melting of two amphibolites: contrasting experimental results under fluid-absent conditions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107, 41-59.

Shand, P., Gaskarth, J.W., Thirlwall, M.F. and Rock, N.M., 1994, Late Caledonian lamprophyre dyke swarms of South-Eastern Scotland. *Mineralogy and Petrology*, 51, 277-298.

Tarney, J. and Jones, C.E., 1994, Trace element geochemistry of orogenic igneous rocks and crustal growth models. *Jour. Geol. Soc. London*, 151, 855-868.

Thompson, R.N., Leat, P.T., Dickin, A.P., Morrison, M.A., Hendry, G.L. and Gibson, S.A., 1989, Strongly potassic mafic magmas from lithospheric mantle sources during continental rxtension and heating: evidence from Miocene minettes of northwest Colorado, U.S.A. *Earth Planetary DScience Letters*, 98, 139-153.

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.

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.

Wood, D.A., Joron, J.L., Treuil, M., Norry, M. and Tarney, J., 1979, Elemental and Sr isotopic variations in basic lavas from Iceland and the surrounding ocean floor. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 70, 319-339.

Wood, D.A., Tarney, J. and Weaver, B.L., 1981, Trace element variations in Atlantic ocean basalts and Proterozoic dykes from Northwest Scotland: their bearing upon the nature and geochemical evolution of the upper mantle. *Tectonophysics*, 75, 91-112.

Yang, J.-H., Wu, F.-Y., Wilde, S.A. and Liu, X.-M., 2007, Petrogenesis of late Triassic granitoids and their enclaves with implications for post-collisional lithospheric thinning of the Liaodong Peninsula, North China Craton. *Chemical Geology*, 242, 155-175.

2009년 7월 15일 접수

2009년 7월 16일 심사개시

2009년 9월 10일 채택