



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

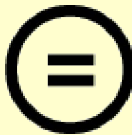
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

CHOSUN
UNIVERSITY
1946

2009년 2월

박사 학위논문

[UCI]I804:24011-200000237685

조선
대학교
CHOSUN

영남육괴 변암-함양일대
트라이아스기 중기-말기 및
쥐라기 초기 심성암류에 대한 지질특성,
지구화학 및 Nd-Sr 동위원소 연구

조선대학교 대학원

자원공학과

박 대 우

영남육괴 변암-함양일대
트라이아스기 중기-말기 및
쥐라기 초기 심성암류에 대한 지질특성,
지구화학 및 Nd-Sr 동위원소 연구

Geological characteristic, geochemical and
Nd-Sr isotope studies of Middle-Late Triassic
and Early Jurassic plutonic rocks near the
Bunam-Hamyang areas, Yeongnam Massif

2009년 2 월 일

조선대학교 대학원

자원공학과

박 대 우

영남육괴 변암-함양일대
트라이아스기 중기-말기 및
쥐라기 초기 심성암류에 대한 지질특성,
지구화학 및 Nd-Sr 동위원소 연구

지도교수 박 영 석

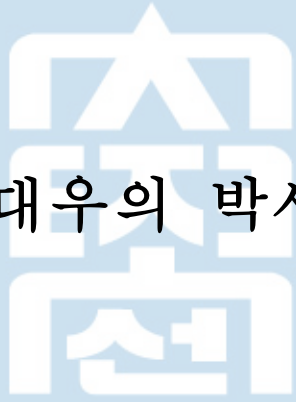
이 논문을 공학박사학위 논문으로 제출함

2008년 10 월 일

조선대학교 대학원

자원공학과

박 대 우

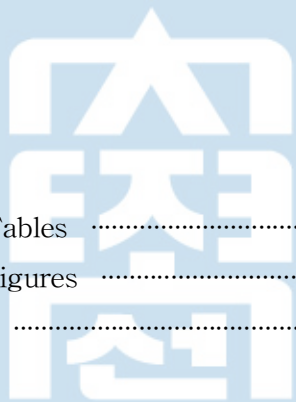


박대우의 박사학위 논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수	박 천 영	인
위 원	경북대학교	교수	유 인 창	인
위 원	(주)희송지오텍	이사	박 영 도	인
위 원	조선대학교	연구교수	김 성 원	인
위 원	조선대학교	교수	박 영 석	인

2008년 12월 일

조선대학교 대학원

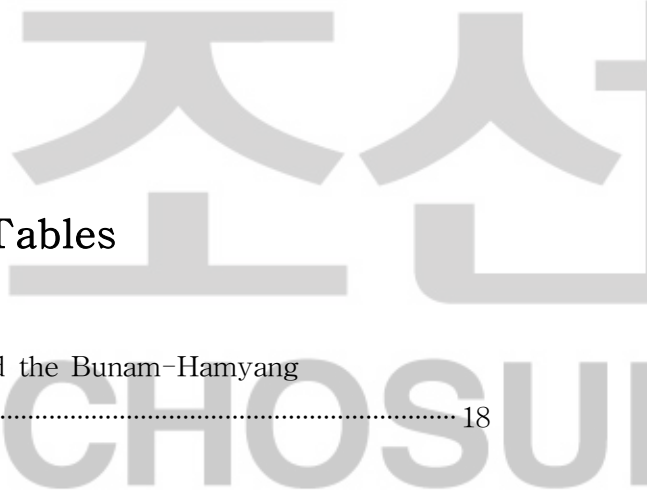
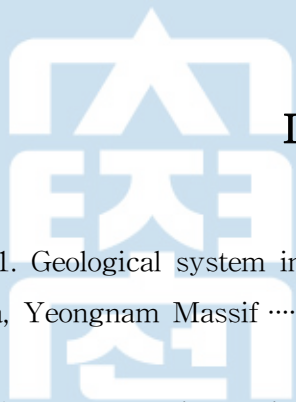


목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	ix
1. 서 론	1
2. 일반지질	9
2-1. 영남육괴의 일반지질	9
2-2. 영남육괴 연구지역 내 트라이아스기 중기-말기 및 쥐라기 심성암류 관한 분포현황 및 기존 연대연구	15
2-3. 변암-함양 지역의 일반지질	17
3. 주 연구지역의 선캠브리아기 편마암 및 중생대 관입암류의 암석기재	20
3-1. 지리산 편마암 복합체	20
3-1-1. 호상흑운모편마암	20
3-1-2. 화강편마암	22
3-1-3. 미그마타이트질 편마암	22
3-1-4. 반상변정질 편마암	23
3-2. 트라이아스기 중기-말기 심성암류	23
3-2-1. 트라이아스기 중기 엽리상 반상화강암류	23
3-2-2. 트라이아스기 말기 엽리상 조립질 화강암	25
3-2-3. 트라이아스기 말기 엽리상 우백질 화강암	25
3-2-4. 트라이아스기 말기 석영-장석 반암	27
3-3. 쥐라기 초기 심성암	27
3-3-1. 비엽리상 화강섬록암	27
3-3-2. 엽리상 각섬석-흑운모 화강섬록암-석영 몬조암	29
3-3-3. 엽리상 중립질 화강암-화강섬록암	29

4. 비교 연구지역의 중생대 심성암류의 암석기재	30
4-1. 트리아스기 중기-말기 심성암류	30
4-1-1. 상주-김천 트리아스기 중기 반상화강암류	30
4-1-2. 선산 트리아스기 중기 반상화강암류	30
4-1-3. 트리아스기 중기 마천 반려암	30
4-1-4. 트리아스기 말기 대강 엽리상 화강암	31
4-2. 쥐라기 초기 심성암	31
4-2-1. 김천 흑운모 화강섬록암	31
4-2-2. 칠곡-성주-합천(신원) 화강섬록암	33
4-2-3. 쥐라기 초기 지리산 반려암-섬록암-섬장암	33
5. 전암화학	34
5-1. 시료위치 및 분석방법	35
5-2. 주성분 원소와 미량원소	39
5-2-1. 트리아스기 중기-말기 심성암류	39
5-2-2. 쥐라기 초기 심성암류	50
5-3. 희토류원소(REE)의 지구화학적 특징	60
5-3-1. 트리아스기 중기-말기 심성암류	60
5-3-1. 쥐라기 초기 심성암류	60
6. Rb-Sr 및 Sm-Nd 동위원소연구	64
6-1. 시료 및 실험방법	64
6-2. Rb-Sr 결과	65
6-2-1. 트리아스기 중기-말기 심성암류	65
6-2-2. 쥐라기 초기 심성암류	68
6-3. Sm-Nd 결과	68
6-3-1. 트리아스기 중기-말기 심성암류	68
6-3-2. 쥐라기 초기 심성암류	72

7. 영남육괴 트라이아스기 중기-말기 및 쥐라기 초기 심성암류 암석성인 및 조구조 환경	73
7-1. 트라이아스기 중기-말기 심성암류의 암석성인 및 조구조 환경	73
7-2. 쥐라기 초기 심성암류의 암석성인 및 조구조 환경	77
8. 토 론	83
9. 결 론	92
참고문헌	95
Appendix I	107
Appendix II	116



List of Tables

Table 2-1. Geological system in and around the Bunam-Hamyang area, Yeongnam Massif	18
Table 5-1. Representative major and trace element analyses of Middle and Late Triassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif, South Korea	36
Table 5-2. Representative major and trace element analyses of the Early Jurassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif, South Korea	52
Table 6-1. Rb-Sr isotopic data for Middle-Late Triassic and Early Jurassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif, South Korea	66
Table 6-1. Sm-Nd isotopic data for Middle-Late Triassic and Early Jurassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif, South Korea	70

List of Figures

- Fig. 1-1. Generalized tectonic map of northeastern Asia (modified from Chang, 1996). A series of large-scale dextral strike-slip fault movements defines the Honam shear zone (HSZ) 2
- Fig. 1-2. The distribution of Triassic plutonic rocks in South Korea (modified from Williams et al., 2008) 4
- Fig. 1-3. (a) Tectonic map showing the distribution of Mesozoic granitoids in Northeast Asia. (b) Distribution of Mesozoic granitoids in South Korea(modified from Park et al., 2008) 8
- Fig. 2-1. Geological map of the Yeongnam Massif, South Korea 10
- Fig. 2-2. Distribution of Middle and Late Triassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif 12
- Fig. 2-3. Distribution of Early Jurassic plutonic rocks in the Yeongnam 13
- Fig. 3-1. Outcrop photographs showing banded gneiss (a), granitic gneiss (b), mylonitized granitic gneiss (c) and migmatitic gneiss (d) from Jirisan gneiss complex in the Bunam-Hamyang area 21
- Fig. 3-2. Outcrop photographs showing typical K-feldspar megacrystic granite (a), K-feldspar megacrystic granite near the shear zone (b), K-feldspar megacrystic granite in the shear zone (c) and mafic enclave in K-feldspar megacrystic granite (d) in the Bunam-Hamyang area. 24
- Fig. 3-3. Outcrop photographs showing Late Triassic foliated coarse-grained granitoid (a), Late Triassic foliated leuco-granitoid (b), core stones of Late Triassic foliated leuco-granitoid by weathering near the shear zone (c) and quartz-feldspar porphyry (d) in the Bunam-Hamyang area. 26
- Fig. 3-4. Outcrop photographs showing Gerchang Early Jurassic porphyritic granitoid (a) and Gimcheon Early Jurassic hornblende-biotite granitoid (b) 28

Fig. 4-1. Outcrop photographs showing Middle Triassic porphyric Sangju-Gimcheon granitoids (a) Middle Triassic K-feldspar megacrystic Sangju-Gimcheon granitoids (b) Middle Triassic porphyric Seonsan granitoids (c) and pyroxene-bearing mafic enclave in Middle Triassic porphyric Seonsan granitoids (d)	32
Fig. 5-1. Normative classification (Streckeisen and Le Maitre, 1979) of Middle and Late Triassic granitoids in the Yeongnam Massif (Bunam-Hamyang, Hamyang, Sangju-Gimcheon, and Seonsan) together with Late Triassic Daegang granitoids(Choi et al., 2008)	40
Fig. 5-2. Normative classification (Streckeisen and Le Maitre, 1979) of (a) Middle Triassic granitoids in the Imjingang Belt (Haeju, Peng et al., 2008) and the Gyeonggi Massif (Hongseong, Namyang and Yangpyeong, Williams et al., 2008) together with Middle Triassic Hongseong plutonic rocks in the Gyeonggi Massif (Choi et al., 2008) and (b) Cheongsan and Baeknok Middle Triassic granitoids in the Okcheon Belt (Cheong and Chang, 1996; Sagong and Jwa, 1997). Closed and open symbols represent mafic and felsic rocks, respectively	41
Fig. 5-3. Harker's variation diagram for Middle and Late Triassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif. Closed and open symbols represent mafic and felsic rocks in Seonsan granitoids, respectively	44
Fig. 5-4. $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$ versus SiO_2 diagrams (Frost et al., 2001 and references therein) in Triassic granitoids, South Korea	46
Fig. 5-5. $\text{FeO}_{\text{total}}/(\text{FeO}_{\text{total}} + \text{MgO})$ versus SiO_2 diagrams(Frost et al., 2001 and references therein) in Triassic granitoids, South Korea	47
Fig. 5-6. Primitive mantle-normalized (Sun and McDonough, 1989) trace element distribution diagrams for Middle and Late Triassic granitoids in the Yeongnam Massif together with Late Triassic Daegang granitoids(Choi et al., 2008)	49
Fig. 5-7. Normative classification (Streckeisen and Le Maitre, 1979) of Early Jurassic granitoids in the Yeongnam Massif (Gerchang, Gimcheon, Chilgok-Seongju-Hapcheon, and Chahwangsan) together with Gerchang and Gimcheon granitoids(Yun and Hong, 2003; Choi et al., 2006)	51

Fig. 5-8. Harker's variation diagram for Early Jurassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif	55
Fig. 5-9. Geochemical variations in Early Jurassic plutonic rocks of the Yeongnam Massif, South Korea. (a) $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$ versus SiO_2 and (b) $\text{FeO}_{\text{total}}/(\text{FeO}_{\text{total}} + \text{MgO})$ versus SiO_2 (Frost et al., 2001 and references therein)	57
Fig. 5-10. Primitive mantle-normalized (Sun and McDonough, 1989) trace element distribution diagrams for Early Jurassic granitoids in the Yeongnam Massif.	59
Fig. 5-11. Chondrite-normalized (Sun and McDonough, 1989) rare earth element (REE) patterns for Middle and Late Triassic granitoids in the Yeongnam Massif together with Late Triassic Daegang granitoids (Choi et al., 2008)	61
Fig. 5-12. Chondrite-normalized (Sun and McDonough, 1989) rare earth element (REE) patterns for Early Jurassic granitoids in the Yeongnam Massif	63
Fig. 6-1. Rb-Sr isotopic diagram of (a) Middle and Late Triassic granitoids and gabbro in the Yeongnam Massif (Bunam-Hamyang, Sangju-Gimcheon, and Macheon) together with Early Triassic Sangju-Gimcheon granitic gneiss (Lee et al., 2006) and (b) Early Jurassic granitoids in the Yeongnam Massif(Gimcheon-Chigok granodiorite, diorite and gabbro)	67
Fig. 6-2. Sm-Nd isotopic diagram of (a) Middle and Late Triassic granitoids and gabbro in the Yeongnam Massif (Bunam-Hamyang, Sangju-Gimcheon, and Macheon) together with Early Triassic Sangju-Gimcheon granitic gneiss (Lee et al., 2006) and (b) Early Jurassic granitoids in the Yeongnam Massif(Gimcheon-Chigok granodiorite, diorite and gabbro)	71
Fig. 7-1. Middle and Late Triassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif plotted on (a) $\text{Rb}/(\text{Y}+\text{Nb})$ (Pearce et al., 1984; Pearce, 1996), (b) Rb-Hf-Ta (Harris et al., 1986) and (c) Y-La-Nb (Canbis and Lecolle, 1989) tectonic diagrams	75

Fig. 7-2. Plot of the initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio versus $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ of Middle Triassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif together with Early Triassic Sangju-Gimcheon granitic gneiss(Lee et al., 2006)	76
Fig. 7-3. (a) Tectonic map showing the distribution of Mesozoic granitoids in Northeast Asia, (b) Distribution of Mesozoic granitoids in South Korea (modified from Park et al., 2008)	78
Fig. 7-4. Time-space plot of Early to Middle Jurassic magmatism in South Korea as projected on cross-section A-B in Fig. 7-3.	79
Fig. 7-5. Early Jurassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif plotted on (a) Rb/(Y + Nb) (Pearce et al., 1984; Pearce, 1996), (b) Rb-Hf-Ta (Harris et al., 1986) and (c) Y-La-Nb (Canbis and Lecolle, 1989) tectonic diagrams	80
Fig. 7-6. Plot of the initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio versus $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ of Early Jurassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif together with the Middle Jurassic granitoids in the Okcheon Belt (Namwon, Sunchang, Jeonju and Gimje; Park et al., 1996, 2008; Na et al., 1997)	82
Fig. 8-1. Tectonic model for Early to Middle Jurassic magmatism in South Korea reflecting change from a steeper (a) to a moderate (b-d) angle of subduction (modified from Park et al., 2008)	88

ABSTRACT

Geological characteritic, geochemical and Nd-Sr isotope studies Middle-Late Triassic and Early Jurassic plutonic rocks near the Bunam-Hamyang areas, Yeongnam Massif

Park, Dae Woo

Advisor : Prof. Park, Young Seog

Department of Resource Engineering

Graduate School of Chosun University

The Yeongnam Massif is located in the southern part of the Korean Peninsula, between the Phanerozoic Okcheon Belt to the north and Cretaceous volcano-sedimentary rocks to the south. The Massif consists predominantly of Paleoproterozoic gneiss, including orthogneiss, banded paragneiss, migmatite, and quartzofeldspathic gneiss with minor slate, schist, and quartzite, intruded by Mesozoic plutonic rocks. Middle-Late Triassic and Early Jurassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif are developed along the NE-trending massif (Daegang, Macheon, Sinwon, Sancheong, Bunam, Hamyang, Gerchang, Gimcheon, Seongju, Chilgok, Sangju, Seonsan) and have intruded Paleoproterozoic gneiss and schist sequences. Some Triassic and Jurassic granitoids are foliated resulted from Middle Jurassic dextral strike-slip fault motion along the Honam Shear Zone in the massif.

The Bunam-Hamyang area, as a main study area, consists of a composite of distinct Middle and Late Triassic plutonic units. The Middle Triassic granitoids are coarse- to medium-grained K-feldspar megacryst-bearing granodiorite. The

Late Triassic granitoids are mainly composed of coarse- to medium-grained leucocratic granite, biotite granite and K-feldspar megacryst-bearing alkali granite. On the other hand, the Middle Triassic Macheon gabbroic rocks, located south of the study area, occurs as a independent large stocks.

On the other hand, the Early Jurassic granitoids, located south and northeast of the study area (Hamcheon, Sinwon, Sancheon, Gerchang, Gimcheon, Seongju and Chilgok), consist of hornblende-biotite granitoids (granodiorite to quartz monzodiorite), pophyric biotite granodiorite and biotite granite with small stocks of diorite, syenite and gabbro compositions.

The Middle-Late Triassic and Early Jurassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif are all strongly LREE enriched relative to chondrites. On trace element spider diagrams normalized to the primitive mantle, these plutonic rocks are depleted in Ba, Ta, Nb, Sr, P, and Ti and relatively enriched in Th, U, and K and show the typical Ta-Nb trough. These Ta-Nb troughs and the depletion of P and Ti with large ion lithophile element enrichments are characteristics of subduction-related granitoids and have also been found in granitic rocks formed from a crustal source that was derived from arc-related crust. The Middle-Late Triassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif have moderate to high initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios (0.706590 - 0.713842) and negative $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-19.19 to -3.81), indicating derivation of the magmas from sources in the middle to upper crust. In contrast, the Early Jurassic plutonic rocks in the Massif have low to moderate initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios (0.704860 - 0.710133) and moderate negative to weakly positive $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-12.77 to 0.86), indicating derivation of the magmas from sources in the middle to upper crust.

Although the Yeongnam Massif has variously been considered part of the South China Block, North China Block, or an independent crustal block by the previous studies, the distribution and characteristics of the Middle-Late Triassic plutonic rocks suggest a subduction-related Triassic magmatic episodes, and offer important clues to the link between South China and South Korea, particularly given that recent studies of the Indosinian orogeny in South China

have indicated that collision belts in these terrains might extend into South Korea. In South China, the Indosinian orogeny is best recorded in and around the Qinling–Dabie–Sulu belt between the North China Block and the Yangtze Craton, and in the collision belt between the Yangtze Craton and the Cathaysian Block along the Chenzhou–Linwu fault. The orogeny was accompanied by voluminous Permian to Triassic magmatism. Therefore, the Triassic plutonic rocks in the Qinling–Dabie–Sulu belt and the broad intra–cratonic South China fold belt might be the products of continental collision and active continental margin magmatism, respectively. As a result, the Triassic plutonic rocks of the Yeongnam Massif, together with the Okcheon Belt are a possible eastern extension of the broad intra–cratonic South China fold belt along the active continental margin of South China (or the Cathaysian Block) into South Korea. In contrast, the Triassic plutonic rocks of the Imjingang Belt and the Gyeonggi Massif should be considered an extension of the Qinling–Dabie–Sulu belt between North China and the Yangtze Craton in central China. However, regional–scale geochronological and geochemical studies of Triassic plutonic rocks in South Korea are required to confirm these postulations.

Regarding the geographic distribution of Early and Middle Jurassic granitoids in South Korea, Early Jurassic granitoids (201 - 185 Ma) are mostly exposed in the Yeongnam Massif. This finding indicates that subduction along the Yeongnam Massif began around 201 Ma and continued until at least 185 Ma. In general, Early Jurassic granitoids can be related to steeper subduction–related primitive arc magmatism in the active continental margin, based on their geochemical characteristics and narrow distribution in the Yeongnam Massif. Steeper subduction would have resulted from combinations of slow or retrograde absolute upper plate motion; slow relative rates of plate convergence; and subduction of the old, dense oceanic lithosphere. This would have induced the development of a magmatic arc closer to the trench and extensional tectonics within and behind the arc. Steeper subduction ended at around 185 Ma and was followed by subduction, which caused the regional magmatism (>300–km wide)

and formed the Middle Jurassic granitoids (180 - 160 Ma) in the Okcheon Belt, the Gyeonggi Massif, and the Imjingang Belt, as well as parts of North Korea. The similar age distribution of the granitoids in these areas may be related to shallow or moderate dipping subduction (compared to steeper Early Jurassic subduction) with similar activation age of subduction. Low to moderate dipping subduction could have resulted from a combination of rapid absolute upper plate motion toward the trench, relatively rapid plate convergence, subduction of low-density oceanic lithosphere, and subduction of the young oceanic lithosphere. During collision due to early moderate dipping subduction, the major shear zone (Honam shear zone) of the orogenic front (the Yeongnam Massif and the Okcheon Belt) activated during 180 to 170 Ma and propagated to central South Korea. The foreland basin also opened and propagated to central South Korea. Regional emplacements of granitoids occurred between the Imjingang and Okcheon belts during the period 170 - 160 Ma, caused by extensive moderate-dipping subduction with increasing gravitational pull of the slab. During this period, dextral movement of the transform fault reactivated pre-existing zones of weakness such as the Honam shear zone, one of the area's important tectonic boundaries.

Key words: Yeongnam Massif, Middle-Late Triassic and Early Jurassic plutonic rocks, Indosinian Orogeny, Subduction, Primitive Arc magmatism, South Korea.

1. 서 론

한반도 남부에 위치하는 영남육괴는 선캠브리아기의 경기육괴 및 낭림육괴와 함께 한반도의 기저를 이루고 있으며 북부의 신원생대 옥천대와 남부의 백악기 경상누층군과 접하고 있다(e.g., 이병주 외, 1997; 김동학 외, 1998; Chough et al., 2000; Sagong et al., 2003; Oh, 2006; Fig. 1-1).

최근 한반도와 중국 간의 지질 및 지구조 진화 대비가 중요한 연구과제로 부각되면서 국내외 지질학자들에 의해 활발히 수행되고 있다. 가장 활발한 연구 중 하나는 한반도와 중국에 나타나는 선캠브리아기 암석 및 연대 비교 연구들이며, 최근 여러 편의 논문들이 제시되었다(박계현 외, 2000; 송용선 외, 2001; 오창환 외, 2006; Kim et al., 1999; Cheong et al., 2000; Lee et al., 2000, 2003b; Sagong et al., 2003; Lee et al., 2005; Zhai et al., 2005; Kim et al., 2006a). 이러한 결과의 일환으로, 동아시아의 지구조 연구에 큰 관심사인 남중국판(South China Block)과 북중국판(North China Block)의 대륙충돌대인 중국의 친링-다비-수루 봉합대(Qinling-Dabie-Sulu Belt) (Ames et al., 1993; Li et al., 1993a,b; Chavagnac and Jahn, 1996; Hacker et al., 1998; Zheng et al., 2002; Liu et al., 2004)의 동쪽 연장선일 가능성으로 남한의 경기육괴, 옥천대 및 임진강대가 주목을 받고 있지만(e.g., 조문섭, 2001, 2005a, 2005b; Lee et al., 2000; Lee and Cho, 2003; Oh et al., 2005, 2006; Oh, 2006; Kim et al., 2006b, 2008; Williams et al., 2008), 상대적으로 영남육괴는 지구조 연구가 충분히 정립되지 않은 상태로 한반도와 중국간의 비교가 논란의 한 대상이 되고 있다.

그동안 중생대 초기에 일어난 대륙충돌로 인한 한국, 중국 그리고 일본 간의 판구조적 연결성은 오랫동안 논란의 대상이었다. 중국에서 남중국판과 북중국판의 삼첩기 충돌대가 보고 된 이후 세 국가 간 판구조적 연결성에 대한 여러 판구조적 모델이 제시되었으나 모델간의 해석이 서로 일치하지 않아 논란이 더욱 가열되었다(e.g., Yin and Nie, 1993; Ernst and Liou, 1995; Chang, 1996; Ree et al., 1996; Zhai et al., 2007; Cho et al., 2007; Oh and Kusky, 2007).

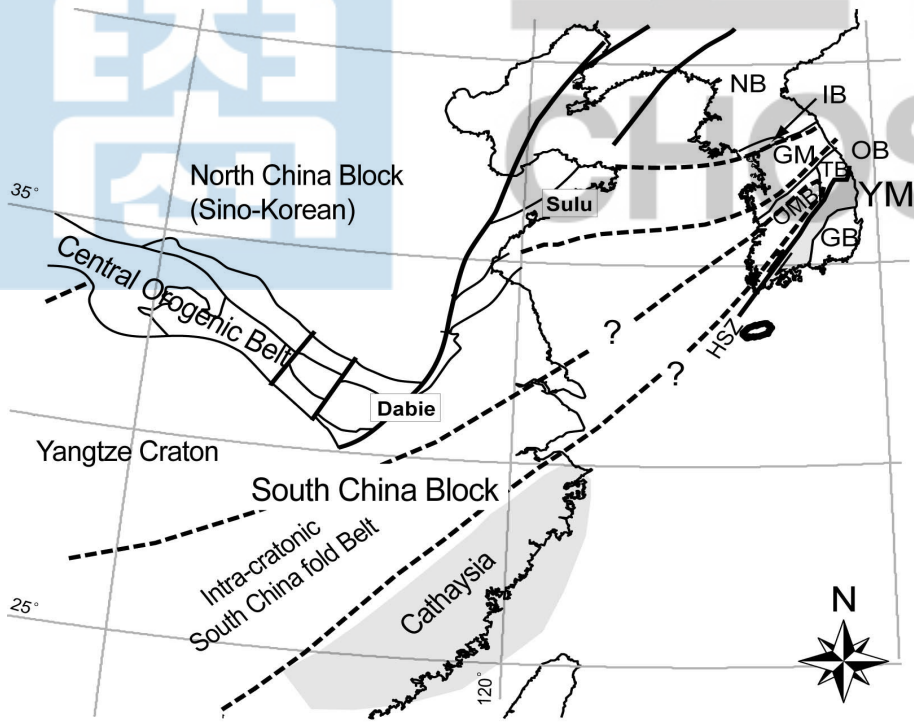


Fig. 1-1. Generalized tectonic map of northeastern Asia (modified from Chang, 1996). A series of large-scale dextral strike-slip fault movements defines the Honam shear zone (HSZ). IB, Imjingang belt; GM, Gyeonggi massif; OMB, Okcheon metamorphic belt; TB, Taebaeksan basin; YM, Yeongnam massif; GB, Gyeongsang basin; HSZ, Honam shear zone.

이러한 판구조적 연결성의 중요 핵심 가운데 하나는 중국의 트라이아스기 충돌대가 한반도로 연장되었는가? 이다(Fig. 1-1). 최근 한반도 내 경기육괴 서남부 홍성 지역에서 국내 최초로 트라이아스기 에클로자이트(ca. 231 Ma)가 보고되었으며(Oh et al., 2005; Zhai and Guo, 2005; Kim et al., 2006b), 임진강대 및 경기육괴 일부에서도 충돌을 경험한 고온-고압의 암류가 발견되고 있고(Oh et al., 2006; Kwon et al., 2008), 중국 동부와 일본 남서부 지역에 대한 많은 새로운 연구가 수행되어 세 국가 간 판구조적 연결성 해석이 가능해졌지만 아직 많이 부족한 실정이다.

최근의 연구결과를 보면, 비교대상이 어려운 한반도와 중국 간 선캠브리아기 암류 대신 현생대 암류 특히 중생대 화성암류에 대한 비교 연구가 한반도 내 대륙충돌대인 친링-다비-수루 봉합대의 동쪽 연장선 위치와 그 주변부를 대비하는데 활발히 논의되고 있다(박계현 외, 2005; Kim et al., 2003; Choi et al., 2008; Cho et al., 2008; Williams et al., 2008). 지난 10 여 년간 남한 내 현생 대륙충돌을 경험한 암석류의 지질연구에서 대륙충돌의 증거인 에클로자이트의 발견과 함께 남중국판과 북중국판의 대륙충돌 시기는 트라이아스기 초기에서 중기(248-229 Ma)의 시기를 보여준다(Cho, 2001; Lee et al., 2000; Lee and Cho, 2003; Oh et al., 2005, 2006; Oh, 2006; Kim et al., 2006b, 2008).

일반적으로 남한에서 남중국판과 북중국판의 대륙충돌과정에서 남중국판의 섭입과 변형이 일어나고, 이에 따라 북중국판의 경계부 혹은 경계부 안쪽 부분에서는 충돌 후 변성, 화성 및 변형활동이 일어나거나, 고기 해양판이 대륙연변부에 섭입되면서 일어난 변형 혹은 화성활동에 연관된 조산운동을 "송림변동" 혹은 "송림조산운동"으로 구분하고 있다(e.g., Kim, 1987; Kim, 1996; Chough et al., 2000; Sagong et al., 2005; Cho et al., 2008; Williams et al., 2008). 남한 내 송림조산운동과 관련된 트라이아스기 중기-말기(231-219 Ma) 심성암류는 임진강대, 경기육괴 및 옥천대는 물론 영남육괴에도 다수 보고되고 있다(조동룡 외, 2001, 2003; 정창식 외, 2004; 박계현 외, 2006; 이호선 외, 2007; Turek and Kim, 1995; Kim and Turek, 1996; Ree et al., 2001; Sagong et al., 2005; Choi et al., 2008; Cho et al., 2008; Williams et al., 2008; Fig. 1-2). 이러한 보고에도 불구하고 남한의 트라이아스기 중기-말기(231-219Ma) 심성암류(plutonic rocks)에 대한 체계화 된 지체구조 해석은 아직도 부족한 형편이다.

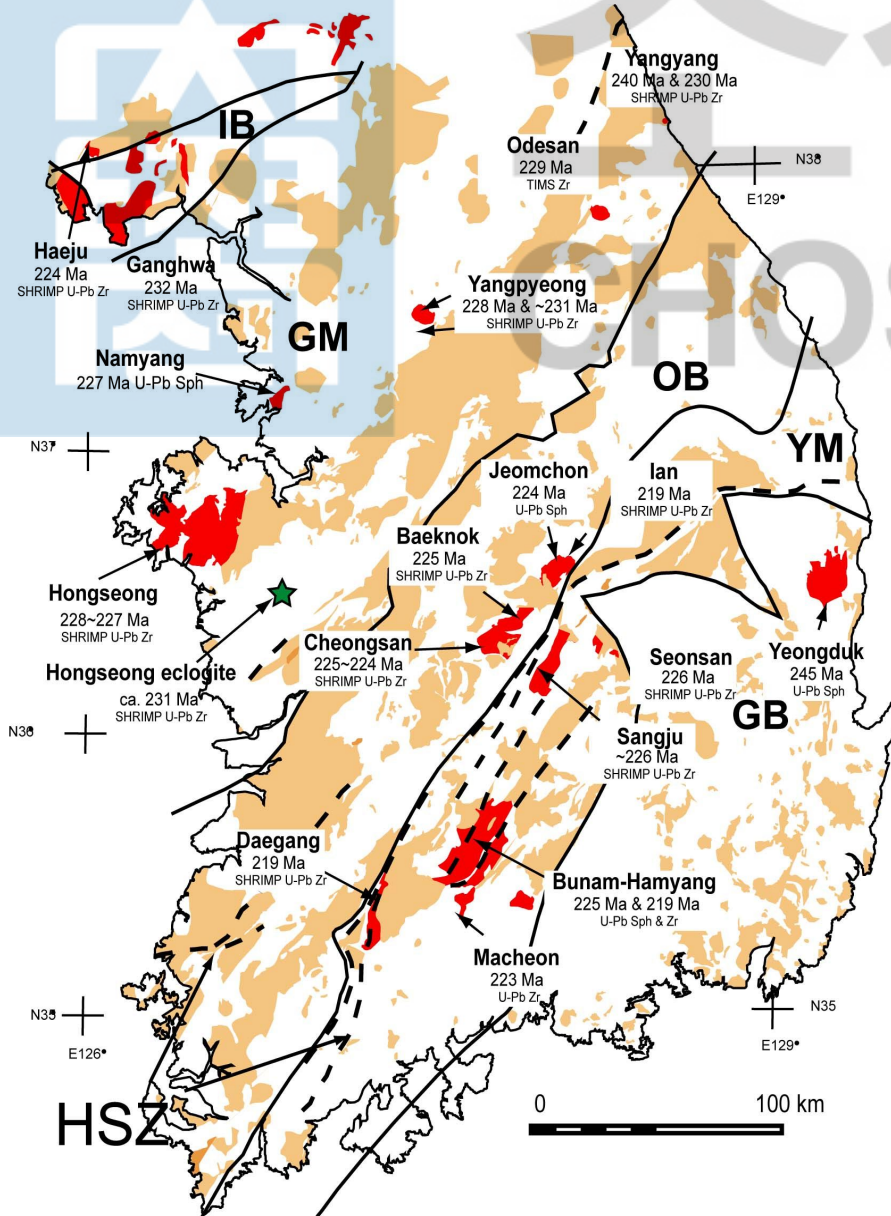


Fig. 1-2. The distribution of Triassic plutonic rocks in South Korea (modified from Williams et al., 2008). IB, Imjingang Belt; GM, Gyeonggi Massif; OB, Okcheon Belt; YM, Yeongnam Massif; GB, Gyeongsang Basin; HSZ, Honam shear zone. A series of large-scale dextral strike-slip fault movements defines the Honam shear zone. SHRIMP zircon U-Pb and IDTIMS zircon and titanite U-Pb ages for Triassic plutonic rocks were obtained from the following sources: Turek and Kim (1995); Kim and Turek (1996); Ree et al. (2001); Cho et al. (2001, 2008); Sagong et al. (2005); Park et al. (2006); Lee et al. (2007); Choi et al. (2008); Williams et al. (2008).

중생대 초기 대륙충돌 시, 동아시아의 고지리적인 연관성을 비교하기 위한 일환으로 송림조산운동은 고생대 후기부터 중생대 초기 광역적인 테티안 조산 지역(Tethyan orogenic domain)안에 연속적인 대륙 간의 충돌로 기인한 인도시안(Indosinian) 조산운동과 매우 밀접한 관련성을 가진다(Maruyama et al., 1997; Zhou et al., 2006; Metcalfe, 2006). 특히, 고지리적으로 가장 가까운 중국 내 인도시안 조산운동은 북중국판과 양쯔지괴(Yangtz Craton) 사이의 대륙충돌대인 친링-다비-수루 봉합대와 양쯔지괴는 물론 양쯔지괴와 케터시니안판(Cathaysia Block) 사이의 첸주-닌우(Chenzhou-Linwu) 단층대를 따라 발달된 봉합대부터 남중국의 활동성 대륙 연변부(active continental margin)까지 폭 넓게 인지되고 있다(Wang et al., 2005; Metcalfe, 2006; Yang et al., 2005; Li et al., 2006; Wang et al., 2007 and references therein). 최근 연구결과에 의하면 양쯔지괴와 케터시니안판의 봉합은 남중국판이 북중국판으로 부딪치는 속도를 지연시키는 작용을 하였으며 케터시니안판의 대륙연변부 즉, 남중국의 대륙연변부에 해양지각판의 섭입을 활성화 시킨 것으로 추정된다. 이러한 과정 중에 케터시니안판부터 남중국의 활동성 대륙연변부까지 페름기-트라이아스기 초기 변성작용 및 화성활동들은 대륙충돌에 영향보다는 남중국의 활동성 대륙 연변부의 고태평양판의 섭입과 관련된 조산운동과 관련성이 있는 것으로 보고되고 있다(Yang et al. 2005; Li et al., 2006; Wang et al., 2007 and references therein). 이러한 최근 남중국의 중생대 초기 지구조 연구보고들은 현재까지 보고된 남한의 트라이아스기 심성암질 화성활동시기와 유사하다. 중국의 북중국판과 양쯔지괴사이의 대륙충돌대인 친링-다비-수루 봉합대와 대비되는 경기육괴 및 임진강대는 페름기의 화성작용이 보고되지 않지만, 트라이아스기 중기(249-229 Ma)에 북중국판과 양쯔지괴사이의 대륙충돌 후 심성활동을 경험한 것으로 보고되고있다(Williams et al., 2008). 인도시안 조산운동으로 인한 양쯔지괴와 케터시니안판의 봉합대 및 남중국의 활동성 대륙연변부의 고태평양판의 섭입지역은 고지리적으로 송림조산운동을 경험한 남한의 옥천대와 영남육괴로 대비될 가능성이 있다. 최근 옥천대에서 보고되는 ca. 276-250 Ma의 변성연대(Kim et al., 2006; Suzuki et al., 2006; Kim et al., 2006a)는 최소한의 옥천대와 영남육괴의 봉합시기를 지시할 수 있다. 또한 옥천대와 영남육괴 경계부 및 영남육괴 내의 트라이아스기 중기-말기 심성암질 화성활동(ca. 225-219 Ma)과 영남육괴 내의 트라이아스기 초기 심성암질 화성 및 변성활동(ca. 245-238 Ma)연대는 옥천대와 영남육

괴의 봉합시기 이후에 활동적 판경계부에서 섭입작용동안 일어난 화성-변성 활동을 지시한다(김용준 외, 1998; 조등룡 외, 2001, 2003; 정창식 외, 2004; 박계현 외, 2006; 이호선 외, 2007; Turek and Kim, 1995; Kim and Turek, 1996; Ree et al., 2001; Sagong et al., 2005; Cho et al., 2008). 그리고 옥천대와 영남육괴 경계부를 따라 인지되는 판내부환경에서 발생하는 트라이아스기 말기 219 Ma의 A형 화성활동은 봉합 혹은 섭입활동 즉, 송림조산의 완료시점을 지시하는 것으로 해석되고 있다(Cho et al., 2008). 이러한 연구에도 불구하고 영남육괴 및 주변부에 대한 송림변동에 관련된 화성활동과 지구조 가설 가능성들이 맞는지 검증하기 위해서는 트라이아스기 화성암체에 대한 지질, 연대 및 암석화학의 체계적 연구가 매우 절실하다.

한편, 영남육괴 내 쥐라기 초기의 심성암질 암류(203-185 Ma)는 트라이아스기 심성암질 암류와 함께 큰 규모로 관입하고 있는 것이 특징이며, 순천전단대에서 예천전단대를 가로지르는 호남전단대 남부 지역에서만 주로 보고되고 있다(박계현 외, 2005, 2006; Turek and Kim, 1995; Kim and Turek, 1996; Ree et al., 2001; Kim et al., 2003; Sagong et al., 2005; Kim et al., 2008; Fig. 1-3). 반대로 순천전단대에서 예천전단대를 가로지르는 호남전단대 북부 지역 즉, 옥천대 남부에서 경기육괴 및 임진강대를 포함하는 넓은 지역에는 쥐라기 중기(180-158 Ma)의 심성암질 암류가 분포한다(이승렬 외, 2003; 이기욱 외, 2007; Turek and Kim, 1995; Kim and Turek, 1996; Ree et al., 2001; Kim et al., 2003; Sagong et al., 2005; Kim et al., 2005; Fig. 1-3). 과거에는 쥐라기 초기-중기 심성암류들을 단순히 대보화강암구분하였으나 남한 대륙연변부에서 대륙안쪽으로 갈수록 좁어지는 연대적인 분포경향(Fig. 1-3), 대륙연변부의 쥐라기 초기 심성암류의 좁은 분포범위(ca. 50 km)와 대륙 내 쥐라기 중기 심성암류의 상대적인 넓은 분포 범위(ca. 250 km)는 당시 남한을 포함한 한반도의 심성암질 화성활동을 야기 시켰던 고기 해양판 섭입작용의 지구조적 환경과 섭입구조를 제한할 수 있는 중요한 단서를 제공할 수 있다. 또한 우리나라 옥천대와 지구조적으로 연결성을 갖는 일본의 히다 대(Hida Belt)에서도 200-180 Ma의 쥐라기 초기 심성암류가 산출이 되며(Shibata and Nozawa, 1978, 1984; Shibata et al., 1988; Tanaka and Kagami, 1987; Arakawa, 1988; Ota and Itaya, 1989), 이들 시기에 동북아시아의 대륙연변부에서 유사한 해양판의 섭입작용이 일어났다는 가능성을 제시할 수 있다. 또한 히다대 내에서도 트라이아스기 심성

암류가 최근 보고되고 있으며 이들 심성암류에 대한 지구조 대비를 남한과 연결하고 있다. 따라서 영남육괴에 분포하고 있는 트라이아스기(ca. 245-219 Ma) 및 쥐라기 초기의 심성암질 암류(203-187 Ma)에 대한 생성시기 및 지구조 환경을 밝히는 연구가 더욱 필요하게 되었다.

본 연구에서는 영남육괴 변암-함양지역을 인근지역을 주 대상으로 이전 연구들에서 연대측정이 이루어진 트라이아스기 중기-말기 심성암류와 쥐라기 초기의 심성암류 암체들을 주 대상으로 지구화학 및 Sr-Nd 동위원소분석을 실시하여, 생성시의 지구조 환경을 유추하였다. 또한 연구결과들을 지금까지 보고된 남중국 내에 분포하는 페름기-트라이아스기 초기 및 쥐라기 초기의 심성암질 암류의 지구화학적 특징, 지구조 환경 및 화성활동시기(e.g. Yang et al. 2005; Li et al., 2006; Wang et al., 2007 and references therein; Li et al., 2007 and references therein)와 비교 분석하였다. 특히, 본 연구과정에서 영남육괴에 전반적으로 분포하는 트라이아스기 중기-말기 및 쥐라기 초기 심성암류의 전반적인 암석학적 기재와 지구화학 및 Sr-Nd 동위원소분석 연구를 수행하였으며, 이들 종합적 연구를 통해 영남육괴를 포함한 남한의 트라이아스기 중기-말기 및 쥐라기 초기 지구조-마그마틱 진화사(tectono- magmatic evolution)를 종합 해석하였다.

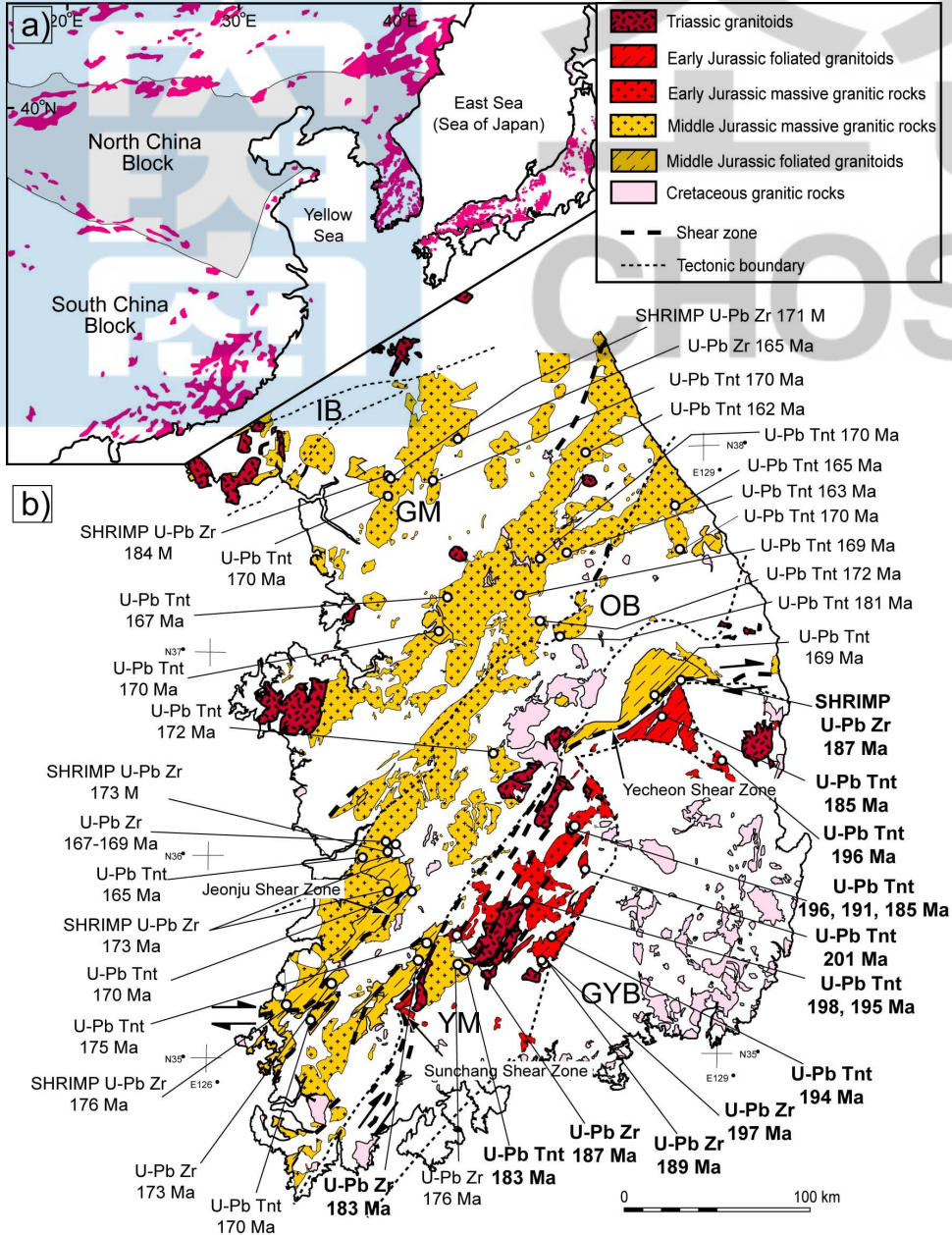


Fig. 1-3. (a) Tectonic map showing the distribution of Mesozoic granitoids in Northeast Asia. (b) Distribution of Mesozoic granitoids in South Korea(modified from Park et al., 2008). Zr, zircon; Tnt, titanite. The Honam shear zone consists of several parallel mylonite zones: the Jeonju, Soonchang, and Yecheon shear zones. The SHRIMP U-Pb zircon and IDTIMS U-Pb zircon and titanite ages for foliated and non-foliated Early and Middle Jurassic granitoids are from Turek and Kim (1995), Ree et al. (2001), Lee et al. (2003), Kim et al. (2003), Kim et al. (2005, 2008a), Sagong et al. (2005), and Park et al. (2005, 2006).

2. 일반지질

2-1. 영남육괴의 일반지질

한반도 남부에 위치하는 영남육괴는 북서부의 옥천대와 남동부 경상분지 사이의 남서에서 북동방향의 대상으로 발달되어 있는 선캄브리아대의 기저로서 Kobayash (1953)에 의해 명명되었다. 이상만(1973)은 이 육괴가 소백산맥에 연하여 발달하고 있기 때문에 중보산 지괴를 제외한 지역을 소백산 육괴라고 개명하였다. 하지만, 최근에는 많은 연구자들에 의해 영남육괴로 일반적으로 명명되고 있다.

고원생대 연령을 갖는 선캄브리아기 편마암복합체가 육괴 전반에 걸쳐 분포하고 있으며(Fig. 2-1), 지리산 부근의 지리산 편마암복합체를 제외하면 대부분이 소백산 편마암복합체이고 북동부 태백산대의 선캄브리아기의 변성암은 시생대와 고원생대의 변성암, 원남층군, 신원생대의 울리층군 및 태백산층군으로 되어 있는데 이들 상호간의 관계는 부정합이다. 영남육괴를 구성하고 변성암류는 경상누층군의 기반암을 이루는 것으로 추정된다(이병주 외, 1997; 김동학 외., 1998). 소백산 편마암복합체는 화강암질 편마암, 우백질 편마암, 반상변정질 편마암, 흑운모 편마암 및 약간의 편마암들로 이루어져 있으며 편마암 및 편암류의 경계부는 대부분 점이적인 관계를 보여준다. 지리산 편마암복합체는 화강암질 편마암, 미그마타이트질 편마암, 우백질 편마암, 흑운모 편마암, 호상 편마암, 편암류 및 반상변정질 편마암등으로 구성된다. 이 두 편마암복합체의 구성암류에서 큰 차이가 없으나 소백산 편마암복합체에는 흑운모 편마암과 화강암질 편마암들이 우세하고 지리산 편마암복합체는 상대적으로 변성도가 높은 암류로 구성되며 미그마타이트질 편마암, 반상변정질 편마암 및 차노카이트질 편마암이 특징적이다(이상만, 1980; 김동학 외, 1998; 김동연 외, 1998; 송용선, 1999).

영남육괴 선캄브리아기 기저암에 대한 Sm-Nd 및 Hf동위원소자료는 영남육괴의 근원암의 주요 형성 시기가 시생대 후기부터 고원생대임을 지시한다(Cheong et al., 2000; Lee et al., 2001, 2005; Lee et al., 2007). 또한 영남육괴의 기저암들의 저어콘에서 나타나는 다양한 상속핵에 대한 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대측정결과 이를 뒷받침한다(조등룡 외, 2002; 조등룡과 김유봉, 2003).

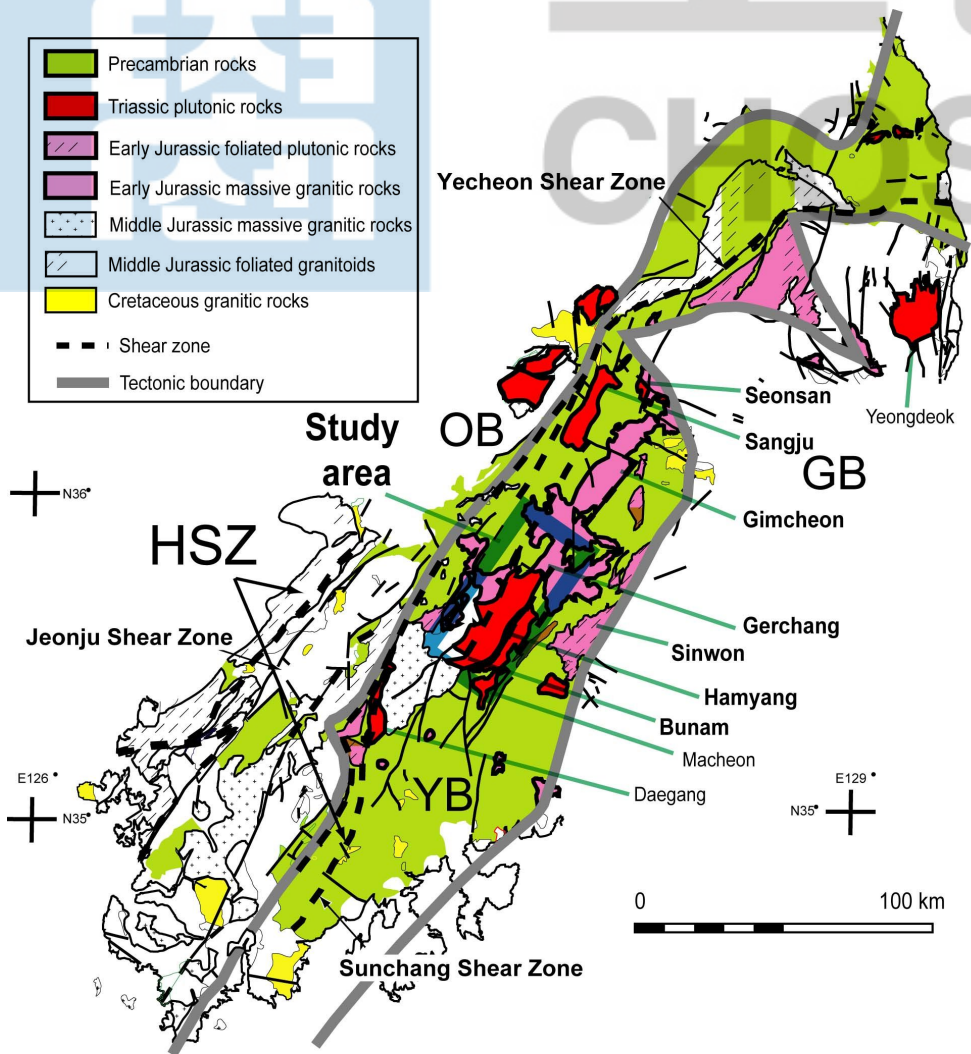


Fig. 2-1. Geological map of the Yeongnam Massif, South Korea. HSZ, Honam Shear Zone.

기저암들에 대한 Sm-Nd, Pb-Pb 및 U-Pb 연령측정 연구들에서는 25억년보다 더 오래된 시생대 연령이 보고되지 않고 주로 고원생대(약 17-20 억년)의 시기가 확인되고 있다(박계현 외, 2000; 김동연 외, 2001; 조등룡외, 2002; 조등룡과 김유봉, 2003; Cheong et al., 2000; Sagong et al., 2003; Kim and Cho, 2003; Lee et al., 2001, 2005). 영남육괴의 기저암들에서 분리된 저어콘들의 음극발광영상(CL; cathodoluminescence)은 이들 저어콘들이 다양한 상속핵(inherited core)과 상부 각섬암상 이상의 변성작용시 양추형으로 과성장한(overgrowth) 외연부로 이루어졌음을 보여준다. 대부분의 과성장한 외연부의 연령은 대부분이 약 18억년 후기에 집중되어 이 시기에 광역변성작용이 일어났음을 지시한다(조등룡 외, 2002; 조등룡과 김유봉, 2003; Sagong et al., 2003). 이와 같이 기존의 연구결과들은 영남육괴가 경기육괴와 함께 18억년 경에 화성 및 변성작용을 동반한 강한 지구조 운동을 받았음을 확인하는데 공헌하고 있다.

영남육괴 선캠브리아기 편마암복합체에 얻어진 변성조건을 살펴보면(이상만, 1973, 1980; 송용선과 이상만, 1989; 송용선, 1988, 1999; 권용완 외, 1999; 오창환 외, 2000; 김동연, 2002; Kim and Cho., 2003), 이들 암류가 경기육괴의 편마암복합체의 상부 각섬암상 내지 상부 백립암상의 변성 압력-온도 조건(안건상 외, 1998; Lee and Cho, 2003; Kim et al., 2006; Oh et al., 2006; Kwon et al., 2008)에 비해 낮은 하부 각섬암상 내지 각섬암상에서 하부 백립암상의 변성 압력-온도 조건을 경험했음을 지시한다. 이러한 두 육괴의 변성 압력-온도 조건은 서로 다른 지구조 운동을 경험한 것으로 추정된다.

관입암류로는 고원생대(약 18억년)의 회장암, 폐름기 후기에서 삼첩기 초기의 연대가 보고되는 화강암질 편마암, 트라이아스기, 쥐라기 초기, 쥐라기 중기 및 백악기 관입암류가 영남육괴에 널리 분포되어 있다. 특히, 영남육괴는 트라이아스기 중기-말기 및 쥐라기 초기 심성암류가 다른 시기의 관입암체에 비해 북동-남서 방향의 대상으로 큰 암체가 다수 산재되어 있다(Figs. 2-2 and 2-3). 최근, 중부 영남육괴 상주와 김천시 주변지역의 고원생대의 연령을 갖는 선캠브리아기 편마암체(이호선 외, 1992; Lee et al., 1992)내 넓은 지역에 분포하고 있는 화강편마암류에 LA-ICP-MS (Laser Ablation Inductive Coupled Plasma Mass Spectrometry)을 이용한 U-Pb 저어콘 연대(245-238 Ma)는 남한 및 영남육괴에서 드물게 트라이아스기 초기의 연대가 보고되고 있다.

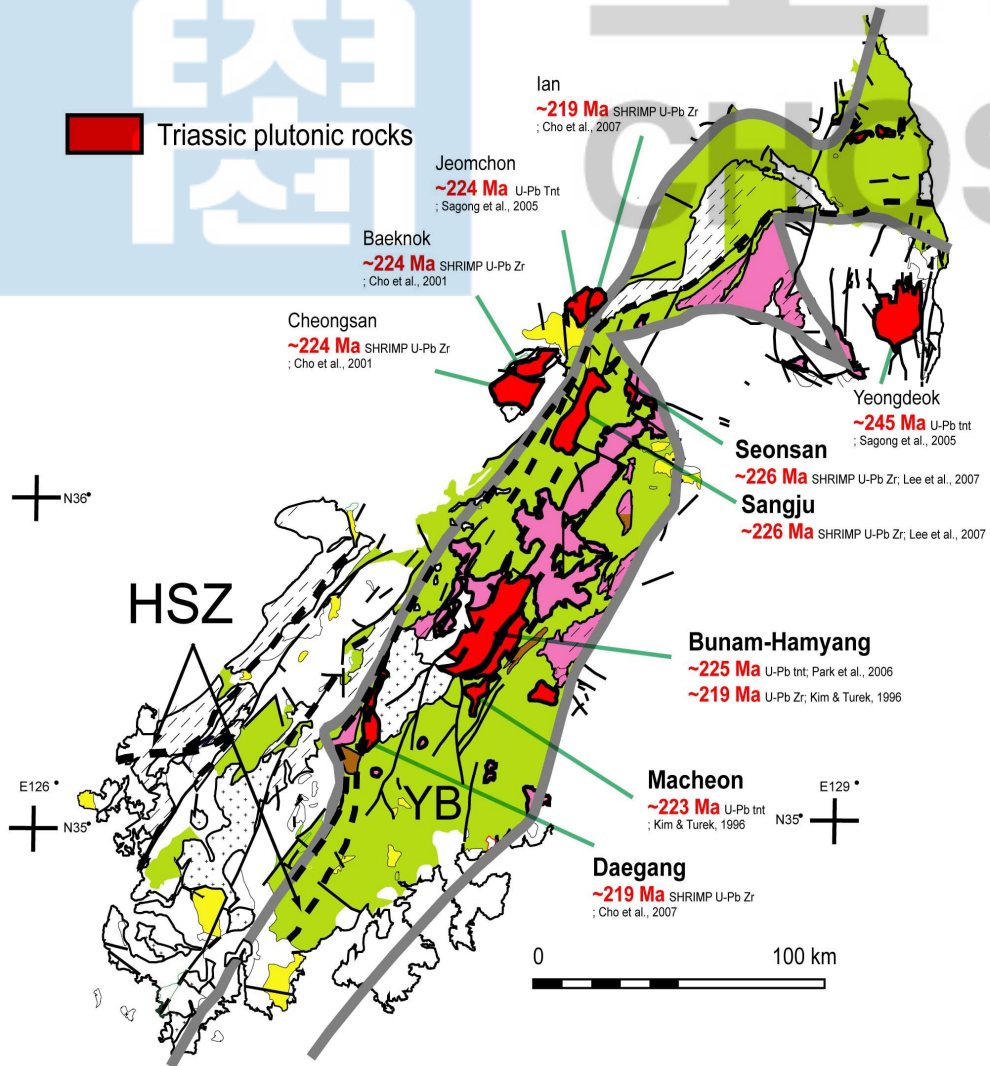


Fig. 2-2. Distribution of Middle and Late Triassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif. Zr, zircon; Tnt, titanite. HSZ, Honam Shear Zone.

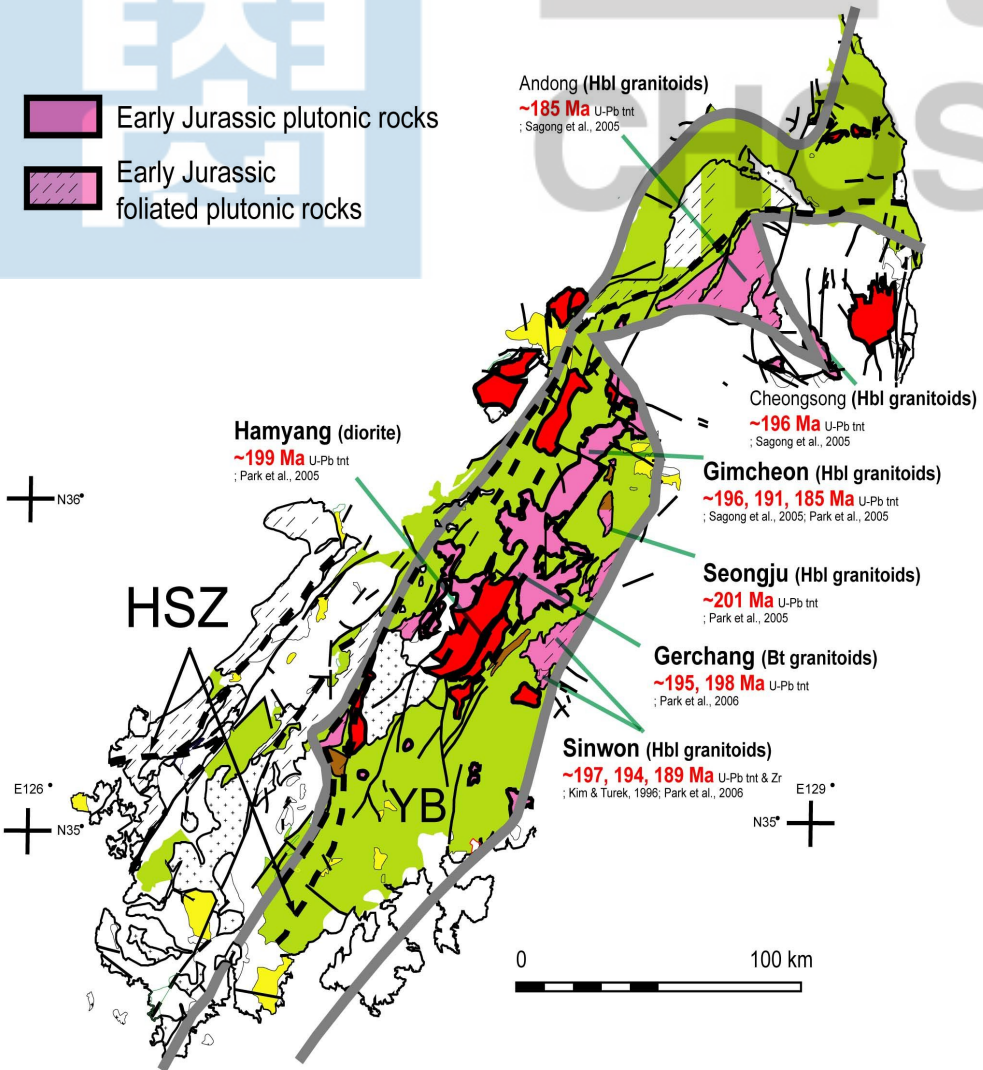


Fig. 2-3. Distribution of Early Jurassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif. Zr, zircon; Tnt, titanite. HSZ, Honam Shear Zone.

이 암류는 관입이후 바로 변성을 받은 것으로 추정이 되며 대부분 엽리가 발달되어 있는 조립질 암석으로 신장된 장석 반정이 함께 산출되며, 부분적으로 엽리가 미약하거나 일부는 세립질의 균질한 괴상암체로 산출되기도 한다. 일부 암체는 소량의 석류석 및 그 잔류조직이 보고되기도 한다(이호선 외, 2007).

대부분 사장석, 정장석, 석영, 흑운모, 백운모, 소량의 불투명 광물, 저어콘 및 인회석등의 화강암의 구성 광물을 나타내며, 암석의 지화학 성분은 화산호 기원을 지시한다(이호선 외, 2007). 이들 암류의 연구 자료들이 서론에서 논의 하였듯이 옥천대와 영남육괴의 봉합시기 이후에 활동적 판 경계부에서 섭입작용동안 일어난 화성 및 변성활동을 지시하는 것으로 추측되지만 추후 자세한 연구가 필요하다고 판단된다.

2-2. 영남육괴 연구지역 내 트라이아스기 중기-말기 및 쥐라기 초기 심성암류에 관한 분포현황 및 기존 연대연구

영남육괴 중심부 내 트라이아스기 중기-말기 및 쥐라기 초기 심성암류가 주로 남서부의 대강, 마천, 신원, 변암, 함양, 거창, 김천, 성주, 상주 및 선산을 따라 북동-남서 방향의 큰 대상 암체로 선캠브리아기 변성암류를 관입하고 있다(Figs. 2-2 and 2-3). 변암-함양일대는 주로 트라이아스기 중기 장방형의 알칼리 장석 반정을 가지는 엽리상 반상화강암과 트라이아스기 말기 함양 엽리상 화강암(우백질 화강암, 엽리상 조립화강암 및 엽리상 중립화강암)로 구성이 되어 있는 것이 특징이며 거정질 알칼리 장석을 포함하는 트라이아스기 말기 엽리상 화강암류(대강 엽리상 화강암)과 변성석영반암이 엽리상 반상화강암을 관입하는 암상으로 분포한다. 한편 트라이아스기 중기 반려암(마천)등이 독립된 큰 암주상으로 분포한다. 트라이아스기 중기-말기 심성암류의 관입시기에 대해 변암-함양 엽리상 반상화강암은 박계현 외(2006)의 스피인 U-Pb 연대에 의해 225.4 ± 4.1 Ma, 함양 엽리상 화강암 내 우백질 화강암은 Turek and Kim (1995)의 저어콘 U-Pb 연대에 의해 219.2 ± 2.9 Ma, 대강 엽리상 화강암은 Cho et al., (2008)의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대에 의해 219.6 ± 1.9 Ma, 마천 반려암은 Kim and Turek (1996)의 U-Pb 저어콘 연대에 의하면 223.3 ± 2.6 Ma, 변성석영반암은 Kim and Turek (1996)의 U-Pb 저어콘 연대에 의해 218.6 ± 2.5 Ma로 보고되어 있다. 경상북도 선산의 트라이아스기 중기 심성암류는 영남육괴와 백악기 경상누층군 사이에 분포한다. 이들 암체는 변암-함양일대의 트라이아스기 중기 심성암체와는 달리 세립의 흑운모 화강암으로 구성되며 소규모 알칼리 장석 반정을 가지는 화강암과 화강암질 편마암암체를 포함한다. 이호선 외 (2006)의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대에 의해 상주-김천 및 선산의 트라이아스기 중기 심성암류는 약 226 ± 4 Ma로 보고되어 있다. 이들 트라이아스기 암체들은 인근 옥천대 중부의 청산, 백록, 점촌 및 이안 트라이아스기 중기-말기 (225-217 Ma SHRIMP U-Pb 저어콘 및 U-Pb 스피인 연대; Sagong et al., 2005; Cho et al., 2001, 2008; Kim et al., 2008) 심성암체와 함께 이 지역에 산재되어 있는 것이 특징이다(Fig. 2-2).

쥐라기 초기 심성암류는 영남육괴의 중부지역인 거창, 김천 및 선산을 따라 주로 대상으로 분포하며, 조립질 괴상의 화강섬록암(거창과 칠곡), 각섬석-흑운모 화강섬록암(장수, 함양, 안의, 신원, 울현리, 김천 및 성주), 섬록암(산청), 반려암(산청) 및 섬장암(산청 차황산) 등의 다양한 암종을 보인다. 이들 암체들은 거창과 칠곡 화강암을 제외하고 전반적 혹은 부분적으로 엽리가 잘 발달되어 있다. 조립질의 괴상인 거창 화강섬록암은 U-Pb 스피ن 연대에 의해 198.4 ± 2.5 Ma 및 194.6 ± 2.6 Ma(박계현 외, 2006), 각섬석-흑운모 화강섬록암에 대해서는 장수지역에서 U-Pb 저어콘 연대에 의해 186.9 ± 2.6 Ma(Kim and Turek, 1996), 함양지역에서 U-Pb 스피ن 연대에 의해 188.0 ± 3.3 Ma(Sagong et al., 2005), 안의지역에서 U-Pb 스피น 연대에 의해 199.1 ± 2.4 Ma 및 195.6 ± 1.8 Ma(박계현 외, 2005, 2006), 신원지역에서 U-Pb 스피น 연대에 의해 194.2 ± 2.4 Ma(박계현 외, 2006)와 U-Pb 저어콘 연대에 의해 188.9 ± 3.1 Ma(Kim and Turek, 1996), 신원지역의 남부인 울현리 지역에서 U-Pb 저어콘 연대에 의해 194.6 ± 2.3 Ma(Kim and Turek, 1996), 김천지역에서 U-Pb 스피น 연대에 의해 198.5 ± 2.8 Ma, 195.7 ± 2.4 Ma, 190.6 ± 5.4 Ma(박계현 외, 2005)과 184.9 ± 2.0 Ma(Sagong et al., 2005), 성주지역에서 U-Pb 스피น 연대에 의해 200.8 ± 1.9 Ma(박계현 외, 2005)의 연대들이 각각 보고되고 있다(Fig. 2-3). 지리산 지역에 위치한 산청 차황산 섬장암은 Kim and Turek (1995)의 U-Pb 저어콘 연대에 의하면 196.9 ± 1.3 Ma에 관입한 것으로 보고되고 있다. 인근 중립 내지 조립질의 산청섬록암은 소규모 반려암(206.4 ± 2.3 Ma; Kim et al., 2003)과 암주상으로 분포하며 앞서의 쥐라기 초기연대들과는 달리 트라이아스기 말기의 209.7 ± 2.3 Ma의 연대를 보여준다(Kim and Turek, 1996).

지질연대학적 관점으로 볼 때 영남육괴의 현생대 관입암류는 243-238 Ma, 225-219 Ma, 210-206 Ma 및 201-185 Ma의 시기로 구분할 수 있으며(Figs. 2-1, 2-2 and 2-3), 섬록암-반려암의 심부 화성활동 시기를 지시하는 210-206 Ma와 A형 화성활동을 지시하는 219 Ma의 대강 화강암류들은 남한의 현생대 관입암류에 대한 지구조적 관점에서 중요한 단서를 제공한다.

2-3. 변암-함양 및 인근지역의 일반지질

주 연구지역인 변암-함양 지역과 인근지역은 영남육괴의 중서부에 해당하며 전라북도 장수군 변암면과 경상남도 함양군 백전면을 중심으로 남원, 장수, 마천 및 거창 지역을 포함한다(Fig. 2-1). 기존 자료(이병주 외, 1997)와 이번 조사 결과를 바탕으로 이 지역의 지질을 간략히 알아보면 크게 선캠브리아기의 지리산편마암복합체를 기반암으로 이를 관입한 트라이아스기 중기-말기 엽리상 심성암류 및 석영-장석 반암류와 쥐라기 초기 엽리상 및 비엽리상 및 쥐라기 중기 심성암체로 나눌 수 있다. 그리고 이들을 백악기 암맥류가 관입하였으며, 이 모든 지층을 부정합으로 제 4기 충적층이 피복한다. Table 2-1은 변암-함양 지역과 인근지역의 지질을 정리한 지질계통표이다.

지리산편마암복합체는 엽리상 심성암류에 비해 풍화에 강하여 높은 산세를 이루어 북으로 백운산-장안산-봉화산등으로 이어지며 남으로 지리산을 이루고 있다. 엽리상 심성암류는 빠른 풍화작용으로 인해 분지지형을 이루고 있다. 기존 보고된 지질연대자료를 볼 때, 주 연구지역인 변암-함양지역은 트라이아스기 중기-말기 및 쥐라기 초기 심성암체로 주로 구성되어 있으며 일부 쥐라기 중기의 심성암류가 소규모 관입상으로 분포한다, 트라이아스기 중기-말기에 관입한 심성암체는 변암-함양 엽리상 화강암체, 남부의 마천 반려암, 산청의 섬록암과 반려암의 혼합복합체등이 분포한다. 엽리상 화강암체 내에 석영-장석 반암과 섬록암이 암상으로 나타나기도 한다. 변암-함양 엽리상 심성암체는 입자의 크기에 따라 엽리상 반상화강암(225.4 ± 4.1 Ma 스피ن U-Pb; 박계현 외, 2006), 엽리상 조립화강암 그리고 엽리상 우백질 화강암(219.2 ± 2.9 Ma 저어콘 U-Pb; Turek and Kim, 1995)으로 분류할 수 있다. 마천 반려암은 U-Pb 저어콘 연대에 의하면 223.3 ± 2.6 Ma(Kim and Turek, 1996), 석영-장석반암은 이와 유사한 암종이 화순지역에서 U-Pb 저어콘 연대에 의해 218.6 ± 2.5 Ma(Kim and Turek, 1996)로 보고되어 있다. 신원지역의 산청섬록암과 산청반려암은 각각 209.7 ± 2.3 Ma와 206.4 ± 2.3 Ma의 연대를 보여 준다(Kim and Turek, 1996; Kim et al., 2003).

Table 1. Geological system in and around the Bunam-Hamyang area, Yeongnam Massif.

제 4기	—	층적층 ~ 부정합 ~	
백악기	—	염기성 암맥류 - 관입 -	
쥐라기 중기	—	비엽리상 화강섬록암 (남원) - 관입 -	
쥐라기 초기	—	비엽리상 화강섬록암 (거창), 엽리상 화강섬록암 (신원) - 관입 -	
트라이아스기 말기	—	엽리상 우백질화강암, 석영-장석 반암 (대강, 번암-함양) - 관입 -	
트라이아스기 중기	—	엽리상 반상화강암 (번암-함양), 마천 반려암 - 관입 -	
선캠브리아기	—	화강편마암 - 관입 - 흑운모 편마암	소백산 편마암복합체

쥐라기 초기에 관입한 심성암체는 거창의 비엽리상 중립질 화강섬록암(198-195 Ma 스피인 U-Pb; 박계현 외, 2006)이 대규모로 분포하며, 장수(187 Ma 저어콘 U-Pb; Kim and Turek, 1996), 함양(188 Ma 스피인 U-Pb; Sagong et al., 2005), 안의(199-196 Ma 스피인 U-Pb; 박계현 외, 2005, 2006), 신원(194 Ma 스피인 U-Pb; 박계현 외, 2006) 그리고 율현리(187 Ma 저어콘 U-Pb; Kim and Turek, 1996) 등의 지역들에서 산출되는 각섬석-흑운모 화강섬록암, 섬록암(산청), 반려암(산청) 및 섬장암(차황산; 196.9 ± 1.3 Ma 저어콘 U-Pb; Kim and Turek, 1995)등은 트라이아스기 말기 심성암류를 관입하여 엽리상 형태로 소규모로 분포하거나 독립된 소규모 암체로 분포한다.

연구지역의 암류는 호남전단대로 불리는 한반도의 주구조선의 영향을 받아 엽리상 구조가 발달된 심성암류가 특징적이다. 호남전단대는 한반도의 남부에 위치하는 북동-남서방향의 대상 분포를 보이는 우수향 연성 전단대로서 전남 목포(순천전단대)에서 경북 영주(예천전단대)에 이르는 대규모의 전단대로 옥천변성대를 중심으로 경기육괴와 영남육괴를 가르는 주요한 지구구조선이다(e.g., 권성택과 이진한, 1997; Yanai et al., 1985, 1993; Chang, 1990, 1991; Cluzel et al., 1991a,b; Kim and Kee, 1994; Turek and Kim, 1995; Kim and Turek, 1996; Otoh and Yanai, 1996; Fig. 2-1). 송림조산운동으로 불리는 중생대 트라이아스기 중기에서 쥐라기 초기에 관입한 심성암류들은 순차적으로 발생한 연성전단운동의 결과로 변형작용을 받아 엽리구조가 특징적으로 발달된 엽리상 심성암류로 변화된 것으로 추정되지만 좀 더 자세한 연구가 필요한 실정이다. 영남육괴 내 엽리상 심성암류는 김천-함양-광주-해남으로 이어지는 중앙부의 암체에 해당하는 지역으로 지역에 따라 함양화강암, 순창화강암 및 대강화강암 등으로 명명되어 있고 주 연구지역은 함양에 포함되는 지역이다(Fig. 2-1).

호남전단대의 전단방향은 크게 북동-남서방향의 압쇄대와 동서방향의 압쇄대로 구분되고 있다. 북동방향의 압쇄대는 $N40-50^{\circ}E$ 가 우세하며 부분적으로 $N10-40^{\circ}E$ 도 나타난다(Fig. 2-1). 동서방향의 압쇄대는 $N60-90^{\circ}E$ 가 주를 이룬다. 김용준 외(1987)의 연구결과에 따르면 $N70^{\circ}E$ 의 동서압쇄대가 $N40^{\circ}E$ 의 북동 압쇄대에 의해 절단되는 것을 기준으로 동서방향의 압쇄작용이 먼저 발생하였을 가능성을 제시하였다. 호남전단운동의 규모를 알려주는 변위크기는 Cluzel et al. (1991)에 의하면 전단대의 폭을 약 4-5 km로 추정하고 관계 경험식을 이용하여 변위량을 약 200 km로 추정하였다. 그러나 권성택과 사공희 (2003)는 산청지역에 존재하는 회장암과 가야지역에 존재하는 회장암이 북동방향으로 발달한 우수향 단층에 의해 변위의 결과로 해석하고 그 변위의 크기는 약 50 km 정도로 추정하였다. 하지만 본 연구결과 함양지역의 농월정에서는 좌수향의 변위가 관찰되기도 하여 좀 더 자세한 연구가 필요하다.

3. 주 연구지역의 선캠브리아기 편마암 및 중생대 관입암류의 암석기재

3-1. 지리산 편마암 복합체

연구지역 선캠브리아기의 지리산편마암복합체는 호상흑운모편마암이 주를 이루고 있으며 국지적으로 반상변정질편마암, 화강편마암 및 미그마타이트질편마암이 혼재되어 나타나고 있다. 호상흑운모편마암은 병곡면 일대에 소규모 루프펜던트 구조가 존재하며 남부지역인 마천면 일대에 대규모로 나타나고 있다. 호상흑운모편마암은 석영과 장석류가 주를 이루는 우백질대와 흑운모가 주를 이루는 우흑질대로 나뉘며 호상간격은 0.5-1 cm 내외를 이루고 있다. 이들은 변성도의 차이에 따라 미그마타이트질편마암으로 전이된다. 정편마암류에 해당하는 반상변정질편마암과 화강편마암은 고기의 변성화성암류로 엽리상화강암과 구분이 모호한 경우도 존재한다.

3-1-1. 호상흑운모편마암

흑운모 편마암은 조사지역의 가장 하위층으로 석영과 장석으로 이루어진 우백대와 흑운모, 각섬석 등의 유색광물로 구성된 우흑대가 교호하거나 우흑대가 더 우세하게 발달하는 형태로 나타나기도 한다(Fig. 3-1a). 이들 암류는 화강편마암의 광범위한 관입을 받아서 그 분포양상이 다소 불규칙하다. 주 분포지역은 편마구조가 뚜렷하게 관찰되며, 편마구조의 주향은 N30°E-N60°E, 경사는 60°SE-80°SE의 고각이 우세하며, 북동-남서방향으로 발달한 지체구조의 방향성과 잘 일치한다. 흑운모편마암은 석영, 사장석 및 흑운모등이 기본 구성광물이며, 이외에도 백운모, 알칼리 장석, 각섬석 그리고 석류석 등의 광물이 관찰된다. 트라이아스기 말기 심성암체 내에서 종종 루프펜던트프(roof pendant)와 포유암(xenolith)의 형태로 나타난다. 일부 루프펜던트는 하부에 혼성편마암의 특성을 보이며 우백질이 우세한 부분은 화강암질 내지 반상변정질의 특성을 보인다. 이들은 상부로 가면서 호상 흑운모편마암으로 점이적인 전이가 이루어진다.



Fig. 3-1. Outcrop photographs showing banded gneiss (a), granitic gneiss (b), mylonitized granitic gneiss (c) and migmatitic gneiss (d) from Jirisan gneiss complex in the Bunam-Hamyang area.

연구지역 내 편마암류와 엽리상화강암의 관입접촉부에 가까운 부분으로 서로 다른 물성을 가진 암석의 접촉과 연성전단에 의해 균질한 암석 내부에 비해 변형 및 변질 작용을 받을 가능성이 높다(Fig. 3-1a). 특히 백전 1터널의 시점부에서는 포획암과 접하는 부분에서 말기 암맥류의 관입이 수반되며 불균질한 암반특성을 보이고 있다.

호상 흑운모편마암의 주 엽리방향은 N30-55°E/65-75°SE으로 북동-남서방향으로 발달한 지체구조의 방향성과 잘 일치한다.

3-1-2. 화강편마암

화강편마암은 흑운모 편마암류를 관입한 중립질 내지 조립질의 화강암질 암이며 대부분 마그마성 엽리 내지 편마 구조를 가지고 있다(Fig. 3-1b). 하지만 흑운모 편마암에 비해 엽리의 발달이 미약하거나 화강암처럼 보이는 것이 특징이다. 호상 흑운모 편마암과 마찬가지로 N25°E-N60°E, 경사는 60°SE-80°SE의 경사를 보지만 일부는 일정하지 않다. 화강편마암은 석영, 사장석, 알칼리 장석 및 흑운모 등으로 구성되어 있고 장석입자는 미량의 석영, 흑운모 그리고 백운모에 의한 잔류반상(poikiloblastic) 조직을 보여준다. 일반적으로 엽리상 우백질 및 조립질 화강암류의 접경부로 갈수록 전단작용에 의해 압쇄암이 인지되기도 한다(Fig. 3-1b and c).

3-1-3. 미그마타이트질 편마암

미그마타이트질 편마암은 반상변정질 편마암 및 화강편마암과 서로 점이적으로 변하며, 이 편마암은 부분용융의 결과로 생긴 마그마와 혼성된 암석으로 기존의 잔류물인 팔레오솜(paleozome)과 용융에 의한 마그마인 화강암질부의 네오솜(neozome)이 불규칙하게 혼성되어 있으며 부분적으로 유색광물로만 이루어진 멜라노솜이나 부분적인 변성조직을 보여주는 메소솜이 발달되기도 한다(Fig. 3-1d). 구성광물은 팔레오솜(paleozome)에서 석영, 흑운모, 사장석, 석류석 및 각섬석으로 구성되며, 부성분 광물로는 녹니석, 녹립석 및 불투명 광물을 포함한다. 네오솜은 석영, 사장석, K-장석, 백운모 및 흑운모로 구성되며 석영은 조립질과 세립질이 나타나는데 세립질 석영은 파동소광을 보이고 봉합상 조직을 가진다. 흑운모 입자들은 작은 크기의 균집체를 이루기도 한다.

3-1-4. 반상변정질 편마암

반상편정질 편마암은 연구지역에서 드물게 분포한다. 대부분이 잔류 반상질의 특징적으로 보여준다. 화강편마암과 유사하나 알칼리장석 반상변정을 포함하는 것이 특징이다. 반상변정의 경우 장방형이 우세하고 엽리상 반상화강암과 구분이 애매할 때도 있다. 방향성이 없는 타형의 거정질 장석을 포함한 경우도 관찰된다. 정편마암의 주 구성광물은 석영, 알칼리 장석, 사장석, 흑운모 및 백운모 등을 가지며 일부는 녹니석으로 부분적으로 변질되어 있다. 부성분 광물은 자철석, 스피넬, 녹립석, 불투명 광물, 저어콘 및 인회석을 포함한다.

3-2. 트라이아스기 중기-말기 심성암류

3-2-1. 트라이아스기 중기 엽리상 반상화강암류

연구지역에 분포하는 엽리상 반상화강암은 비교적 넓게 동-서에서 북동방향으로 분포하며 엽리상 우백질 및 조립질 화강암의 경계부에 전단대가 발달되어 있다. 이 암체는 분홍빛을 띠는 장방형의 알칼리장석을 거반정으로 갖는 화강암류(megacrystic granite)이며 반정의 크기가 $1.5-3.0 \times 3.0-7.0$ cm 정도이다(Fig. 3-2a). 지역에 따라 약하게 방향성을 가지며 이 반정들이 엽리상 우백질 및 조립질 화강암의 경계부인 전단대와 가까워질수록 작아지며 경계부와 평행하게 발달된다(Fig. 3-2b). 특히 엽리에 평행한 균집형태의 각섬석과 흑운모를 많이 포함한 암회색을 띤 암상에서 파열쇄설성 엽리(cataclastic foliation)가 잘 발달되어 있다(Fig. 3-2c).

이 암석은 조립질로써 주 구성광물은 석영, 사장석, 알칼리장석 및 흑운모이고 부성분광물은 저어콘, 인회석, 스피넬 그리고 불투명 광물 등이다. 특징적인 것은 이 암체의 곳곳에서 많은 양의 염기성 포획체(mafic enclave, Fig. 3-2d)와 산성질 관입암체가 나타난다.

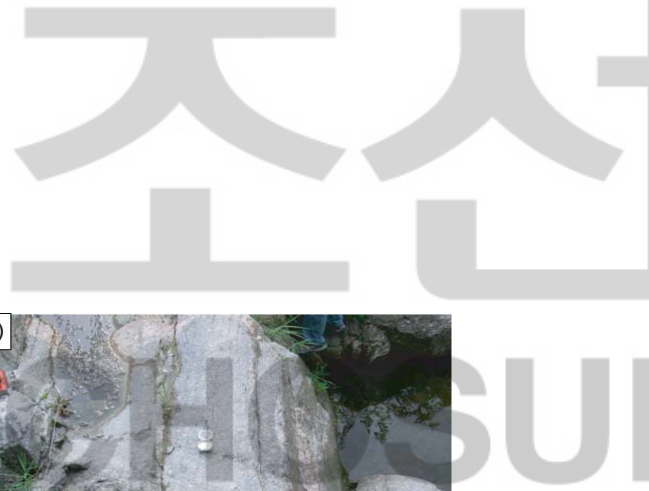


Fig. 3-2. Outcrop photographs showing typical K-feldspar megacrystic granite (a), K-feldspar megacrystic granite near the shear zone (b), K-feldspar megacrystic granite in the shear zone (c) and mafic enclave in K-feldspar megacrystic granite (d) in the Bunam-Hamyang area.

3-2-2. 트라이아스기 말기 엽리상 조립질 화강암

엽리상 조립화강암은 함양지역의 연구지역의 중앙부에 해당하는 청계리에서 의 지리에 걸쳐 분포하고 있다. 엽리상 조립화강암은 다른 화강암류에 비해 풍화의 진행이 급격히 이루어져 암석 노두의 발달이 극히 미약하며 현재 노출된 암석들도 비교적 심하게 풍화를 받은 상태이다. 조립화강암은 부분적으로 정장석이 반정으로 산출되는 경우가 있으나 0.5-1 cm 내외의 입도를 이루고 있다(Fig. 3-3a). 구성광물로는 석영, 정장석, 사장석 및 흑운모이고 부성분광물은 저어콘, 인회석, 스피넬 그리고 불투명 광물 등이다. 사장석이 풍부한 조립질 화강암은 반상화강암류에 비해 빠른 풍화작용을 받았을 가능성이 높고 이러한 결과 남원시 아영면 주변에 넓은 평야지대가 형성된 것으로 추정된다. 조립화강암의 엽리구조는 입자가 크고 풍화를 심하게 받은 상태여서 명확히 관찰되지 않으나 비교적 미약하나 전단대 내에서는 갈수록 파열쇄설성 엽리가 잘 발달되어 있다.

3-2-3. 트라이아스기 말기 엽리상 우백질 화강암

엽리상 우백질 화강암은 북동동방향의 길쭉한 타원형으로 선캠브리아기 변성암과 엽리상 반상화강암류 혹은 엽리상 조립질 화강암을 각각 관입하여 각각의 경계부에 선캠브리아기 암류와 엽리상 반상화강암류 혹은 엽리상 조립질 화강암의 암편을 포획하고 있다. 입도는 조립질이고 상대적으로 엽리상 조립질 화강암보다 흑운모의 함량이 적고 석영과 장석이 많아 회색 내지 우백질을 띠며 전체적으로 서쪽에서는 N75°W-N89°W, 동쪽에서는 N75°E-N89°E 방향의 주향과 경사는 60°-80°NE 혹은 60°-80°NW 내지 60°-80°SW의 고각의 경사를 가지는 마그마성 엽리를 보여주며 경계부로 갈수록 수직에 가깝다(Fig. 3-3b). 주 구성광물군은 주로 석영 + 사장석 + 알칼리장석 + 흑운모 광물조합을 보이며 간혹 각섬석을 포함하며, 저어콘, 인회석, 스피넬 및 불투명 광물 등이 부성분광물로 구성된다. 일부 암상에서는 전단작용의 영향에 의해 지역에 따라 주 구성 광물인 흑운모, 장석 그리고 석영 결정이 신장되어 방향성을 가진다(Fig. 3-3b). 일부분은 말기 변형 작용으로 인하여 흑운모 및 각섬석이 녹니석 및 녹립석 등의 2차 변질광물로 산출된다.

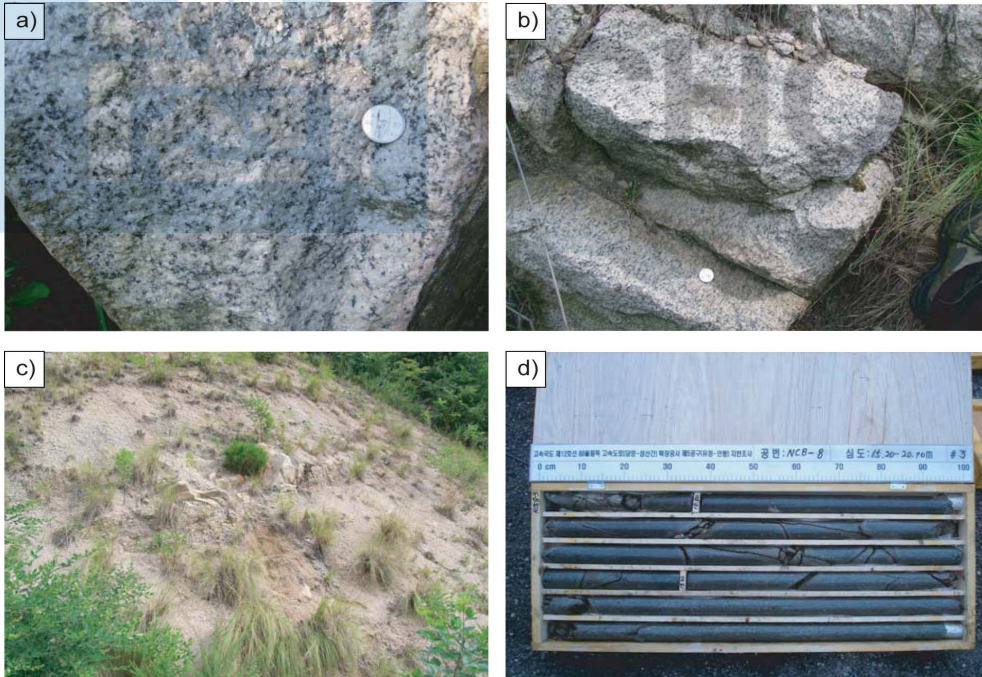


Fig. 3-3. Outcrop photographs showing Late Triassic foliated coarse-grained granitoid (a), Late Triassic foliated leuco-granitoid (b), core stones of Late Triassic foliated leuco-granitoid by weathering near the shear zone (c) and quartz-feldspar porphyry (d) in the Bunam-Hamyang area.

이들 화강암류도 선캠브리아기 변성암 및 엽리상 반상화강암류의 접경부에서 강한 전단에 의한 압쇄암화 작용을 보여주며, 특히, 강한 전단의 영향으로 기인하여 분쇄암화 상태의 풍화토 상태가 엽리상 반상화강암류의 접경부에서 더욱 뚜렷이 관찰되며 이들 내에 종종 핵석이 존재하기도 한다(Fig. 3-3c).

3-2-4. 트라이아스기 말기 석영-장석 반암

연구지역의 석영-장석 반암은 변암지역에서 산출되는 트라이아스기 중기 엽리상 반상화강암류 내에 소규모 암주상으로 관입 분포하고 있다.

주로 자형의 장석 및 소량의 석영 반정을 포함하고 있으며 암석의 색깔은 암녹색을 띠는 것이 특징이다(Fig. 3-3d). 이들 암석에 대해 석영-장석 반암은 이와 유사한 암종이 화순에서 U-Pb 저어콘 연대에 의해 218.6 ± 2.5 Ma(Kim and Turek, 1996)로 보고되어 있어 본 연구지역의 시기별 암종 구분에서는 트라이아스기 말기 암종으로 구분하였다.

3-3. 쥐라기 초기 심성암

3-3-1. 비엽리상 화강섬록암

연구지역에 동부, 거창에 분포하는 비엽리상 거창 화강섬록암은 회백색의 중립질 반상조직을 가지며 거창화강석으로 알려져 왔다(Fig. 3-4a). 이 암석의 반정은 석영, 알칼리장석 및 사장석이 우세하다. 부분적으로 알칼리장석 반정이 5-15 mm 정도의 크기를 가지며 지역에 따라 거정의 알칼리장석 반정과 흑운모 반정이 나타난다(이현범 외, 2006). 구성광물은 석영, 사장석, 알칼리장석 그리고 흑운모이며, 소량의 백운모, 녹니석 및 불투명광물이 관찰된다. 석영은 반자형 내지 타형으로 직소광과 파동소광을 보이며 사장석은 자형 내지 반자형으로 알바이트 쌍정과 칼스버드-알바이트 쌍정을 보인다. 알칼리장석은 퍼싸이트와 미사장석으로 구분되며 대부분의 반정은 퍼싸이트로 이들 내에는 사장석 광물들이 포함된 포이킬리틱 조직을 잘 나타낸다(이현범 외, 2006).

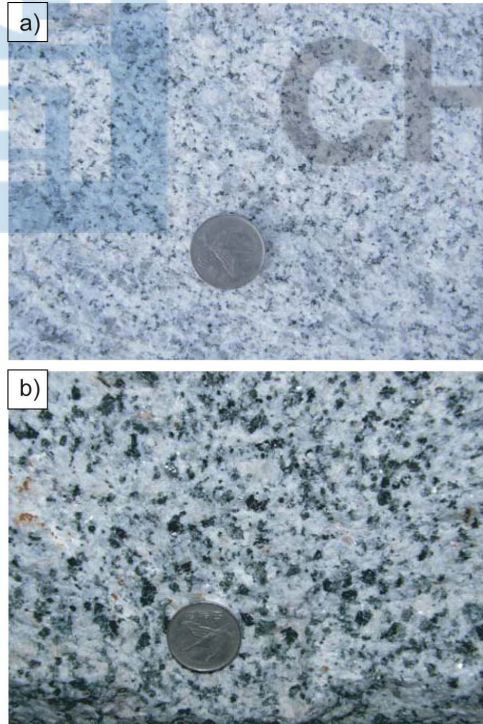


Fig. 3-4. Outcrop photographs showing Gerchang Early Jurassic porphyritic granitoid (a) and Gimcheon Early Jurassic hornblende-biotite granitoid (b).

3-3-2. 엽리상 각섬석-흑운모 화강섬록암-석영 문조섬록암

엽리상 각섬석-흑운모 화강섬록암-석영 문조섬록암은 연구지역에서 엽리상 중립질 화강암과 함께 작은 규모로 대상 분포하며 두 암체와의 관계는 점이적이다. 하지만 영남육괴의 중부(김천)와 북동부(안동)지역에서는 이들 암체가 비교적 큰 규모로 대상 분포한다. 각섬석-흑운모 화강섬록암-석영 문조섬록암은 거의 회색을 띠지만 부분적으로 각섬석의 함량이 많아 옅은 암회색을 띠기도 한다(Fig. 3-4b).

입도는 중립질에서 조립질을 보여주며 각섬석과 스펀이 비교적 큰 결정으로 산출되며 암체의 중심부는 약한 엽리를 보여주고, 암체의 연변부로 갈수록 엽리가 발달되어 있다. 엽리상 각섬석-흑운모화강암-화강섬록암의 구성광물은 석영, 사장석, 알칼리장석, 흑운모 및 각섬석이며 부성분광물은 스펀, 저어콘, 인회석 그리고 녹염석 등이다. 석영은 대체적으로 과동소광을 보이며, 사장석은 알바이트 쌍정을 보이며, 누대구조를 보여주는 경우도 있다. 알칼리 장석은 퍼싸이트와 미사장석으로 구분된다. 엽리가 발달된 부분에서 흑운모나 각섬석의 일부는 녹니석화 되어 있다.

3-3-3. 엽리상 중립질 화강암-화강섬록암

엽리상 중립화강암은 연구지역 북주의 백전면 오천리에서 병곡면 옥계리까지 대상으로 분포하고 있다. 중립화강암은 0.5 mm 이하의 입도로 다른 화강암들에 비해 가장 입자가 작은 특성을 보이고 있다. 구성광물은 석영, 사장석, 알칼리장석 그리고 흑운모이며 부 구성광물로는 백운모, 녹니석 및 소량의 불투명 광물이 관찰된다. 엽리상 중립화강암은 다른 화강암들에 비해 야외노두가 발달되었으나 엽리구조를 연속적으로 추적하기에는 부족하다. 엽리의 발달 방향은 N80°E-N85°W로 대체로 동-서 방향을 지시하고 있다.

4. 비교 연구지역의 중생대 심성암류의 암석기재

4-1. 트라이아스기 중기-말기 심성암류

4-1-1. 상주-김천 트라이아스기 중기 반상화강암류

상주-김천에 분포하는 트라이아스기 중기 엽리상 반상화강암류는 북동방향으로 분포하며 상대적으로 변암-함양 엽리상 반상화강암류보다 적은 거반정의 알칼리장석을 가진다. 대부분은 암체는 중립질 반상조직을 가지며(Fig. 4a), 부분적으로 분홍빛을 띠는 장방형의 알칼리장석을 포함한다(Fig. 4b). 지역에 따라 약하게 방향성을 가지며 주 구성광물은 석영, 사장석, 알칼리장석 그리고 흑운모이고 부성분광물은 저어콘, 인회석, 스피넬 및 불투명 광물 등이다.

4-1-2. 선산 트라이아스기 중기 반상화강암류

선산에 분포하는 반상화강암류는 회백색을 띠며, 조립질 내지 세립질의 반상조직을 가진다(Fig. 4c). 이 암체의 곳곳에서 휘석을 포함한 엽기성 포유암(mafic enclave, Fig. 4d)가 나타난다. 구성광물로는 석영, 정장석, 사장석 및 흑운모이고 부성분광물은 저어콘, 인회석, 스피넬 그리고 불투명 광물 등이다.

4-1-3. 트라이아스기 중기 마천 반려암

마천 반려암은 변암지역에서 산출되는 트라이아스기 중기 엽리상 반상화강암류 내에 큰 암주상으로 관입 분포하고 있다. 주로 자형의 장석 및 소량의 석영 반정을 포함하고 있으며 암석의 색깔은 암녹색을 띠는 것이 특징이다. 이들 암석에 대해 석영-장석 반암은 이와 유사한 암종이 화순에서 U-Pb 저어콘 연대에 의해 218.6 ± 2.5 Ma(Kim and Turek, 1996)로 보고되어 있어 본 연구지역의 시기별 암종 구분에서는 트라이아스기 말기 암종으로 구분하였다. 마천 반려암체는 부분적으로 미약한 선상구조를 보이며 암체 연변부에서는 동화작용으로 혼화대가 형성되어 있다.

마천암체를 구성하는 주성분광물은 각섬석, 사장석, 자소회석, 보통회석 및 흑운모이고 부성분광물은 불투명 광물, 인회석, 녹렴석 그리고 저어콘 등이다. 마천암체 내에서 유색광물의 함량변화는 상당히 커서 암체 연변부로 갈수록 회석은 감소하고 각섬석과 흑운모가 증가하는 경향을 보이며 이는 동화작용에 의한 결과로 추정된다(김용준 외, 2006).

4-1-4. 트라이아스기 말기 대강 엽리상 화강암

대강 엽리상 화강암류는 대부분 우수향 운동 감각의 연성전단작용을 지시하는 압쇄엽리를 보이며 영남육괴 지리산 지역 남서쪽의 옥천대와 접하는 곳에 북북동-남남서로 신장된 분포를 보이며 분포한다. 엽리의 경사각은 대부분 70° 이상의 고각이며 동쪽 또는 서쪽으로 경사한다. 신선한 노두에서는 담회색 내지 담홍회색을 띠며, 화강암의 모드분석 결과 알칼리 장석 화강암 영역에 속한다(김용준 외, 1998; Cho et al., 2008). 주 구성광물로는 알칼리 장석, 사장석, 석영, 흑운모 및 각섬석이며, 부성분광물은 저어콘, 인회석, 형석 그리고 불투명 광물 등이 있다. 이차 광물로는 녹니석, 방해석 및 견운모 등이 있다. 선캠브리아기 변성암류를 관입한 부근에서는 대부분 각섬석을 포함하며, 알칼리 장석이 많고 석영의 함량이 적은 것이 특징이다. 남원 화강암체와 경계부분에서는 남원화강암에 의한 대강 화강암류의 변질대가 관찰되며, 대강화강암의 포유암이 관찰된다.

4-2. 쥐라기 초기 심성암

4-2-1. 김천 흑운모 화강섬록암

김천 일대에 주로 분포하는 흑운모 화강암류는 각섬석의 비산출유무로 알 수 있으며, 야외산상에서 각섬석-흑운모 화강암류와 점이적 관계를 보인다. 담회색과 회색을 띠며 곳에 따라 반정질, 세립질 및 조립질을 이루기도 하나 중립질이 우세하며, 흑운모와 티타나이트를 수반함이 전반적인 특징이다(윤현수와 홍세선, 2003). 이들 암체 역시 부분적으로 엽리구조를 이룬다.

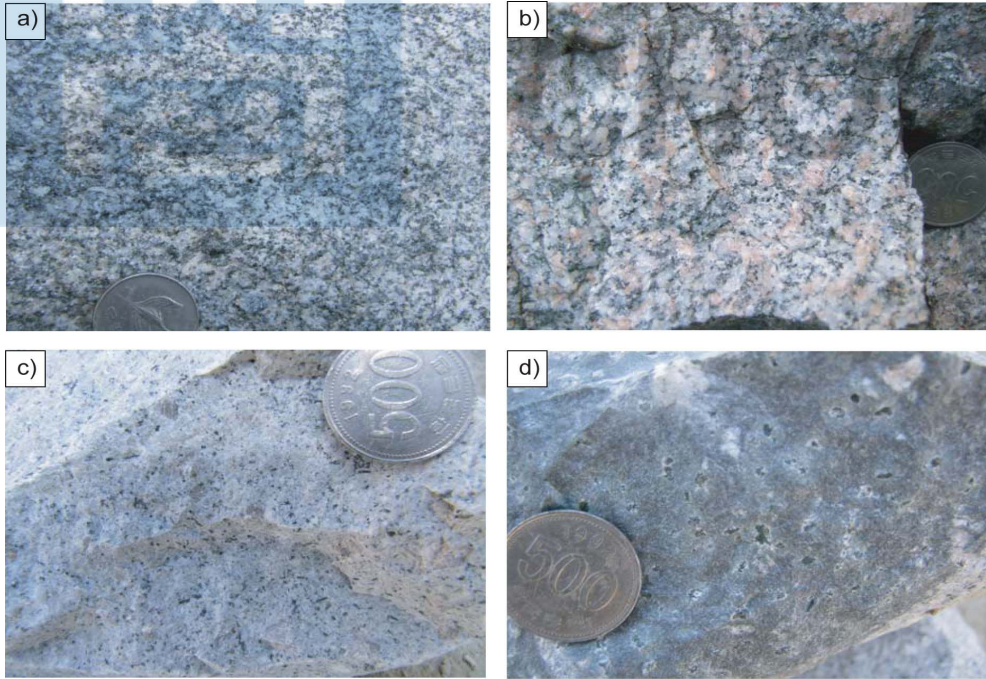


Fig. 4-1. Outcrop photographs showing Middle Triassic porphyritic Sangju-Gimcheon granitoids (a), Middle Triassic K-feldspar megacrystic Sangju-Gimcheon granitoids (b), Middle Triassic porphyritic Seonsan granitoids (c) and pyroxene-bearing mafic enclave in Middle Triassic porphyritic Seonsan granitoids (d).

4-2-2. 칠곡-성주-합천(신원) 화강섬록암

칠곡-성주-합천(신원) 화강섬록암은 세립질에서 조립질의 다양한 암상을 보이며, 영남육괴의 남쪽 경계부분을 따라 산재되어 소규모 암주상 관입체로 구성된다. 지리산 부근에서는 반려암-섬록암-섬장암으로 구성된 저반성 심성암 복합체와 함께 산출된다. 많은 암체에서 엽리상이 관찰되며 주 구성광물은 김천화강섬록암과 유사하게 각섬석의 유무에 의해 결정된다.

4-2-3. 쥐라기 초기 지리산 반려암-섬록암-섬장암

쥐라기 초기 지리산 반려암-섬록암-섬장암으로 구성된 저반성 심성암 복합체는 지리산 하동-산청 지역에 주로 분포하며 영남육괴의 남쪽 경계부분을 따라 산재되어 소규모 암주상 관입체로 구성되기도 한다. 반려암체는 암체 연변상으로만 출현하며 암체 중심부는 섬록암상으로 이루어져 있고, 화강섬록암상은 화강편마암과의 관입 접촉부에서 혼화작용으로 만들어진 혼화암상으로 추정된다. 반려암체의 구성광물은 사장석, 휘석, 각섬석, 흑운모, 약간의 석영, 미사장석 및 퍼다이트 등으로 구성되며, 섬록암상에서는 유색광물로 각섬석과 흑운모가 주를 이룬다(김용준 외, 2006). 섬장암체는 암회색 내지 암갈색을 띠는 등립상 암상을 가지나 암체연변에서는 중립질 중심부보다 입도가 낮은 세립질 암상으로 변한다. 섬장암체들의 구성광물은 퍼다이트, 각섬석, 사장석 및 석영으로 이루어지며, 각섬석은 반정과 석기 모두에 함유되어 있으며 석영이 함유되어 있는 부분은 석영섬장암에 해당한다(김용준 외, 2006).

5. 전남 화학

영남육괴에 지질연대학적으로 보고된 트라이아스기 중기-말기 및 쥐라기 초기 심성암류 중 화강암류를 중심으로 암석 지화학 연구를 수행하였으며, 일부 트라이아스기 중기 반려암(마천)에 대해서도 암석 지화학 연구를 수행하였다.

최근 남한 내 송림조산운동과 관련된 임진강대, 경기육괴, 옥천대 및 영남육괴 내 트라이아스기 중기부터 말기의(231-219Ma) 심성암류는 다수 보고되고 있다(조 등룡 외, 2001, 2003; 정창식 외, 2004; 박계현 외, 2006; 이호선 외, 2007; Turek and Kim, 1995; Kim and Turek, 1996; Ree et al., 2001; Sagong et al., 2005; Choi et al., 2008; Cho et al., 2008; Williams et al., 2008; Fig. 2-1). 하지만, 남한에서 가장 많은 트라이아스기 심성암체가 분포하는 영남육괴에서는 많은 암체들의 지질 연대(조등룡 외, 2001, 2003; 정창식 외, 2004; 박계현 외, 2006; 이호선 외, 2007; Turek and Kim, 1995; Kim and Turek, 1996; Ree et al., 2001; Sagong et al., 2005; Choi et al., 2008; Cho et al., 2008)의 연구가 수행되어 졌지만 일부 연대가 보고된 암체들(트라이아스기 말기)에 대해서만 체계화된 지화학 연구(김용준 외, 1998; Cho et al., 2008)가 실시되어 검토되어졌기 때문에 지체구조 해석에 필요한 체계화 된 지화학 연구가 아직도 부족한 형편이다. 또한 이전에 수행되었던 일부 영남육괴의 심성암체에 대한 지화학적 고찰이 이루어졌지만 각 암체에 대한 정확한 구분없이 해석이 되어왔다. 그러므로 앞서의 트라이아스기부터 쥐라기까지의 많은 연대가 보고되기 이전의 지화학적 자료들에 대해서는 인용하지 않았다(김용준 외, 1987, 1989; 박재봉 외, 1990; Lee et al., 1992).

한편, 서론에서 소개하였지만 남한의 쥐라기 초기의 심성암류(203-187 Ma)는 현재까지의 발표된 연구보고들을 기준으로 거의 대부분이 영남육괴 내의 좁은 지역에만 존재하고 있고 있으며, 순천전단대에서 예천전단대를 가로지르는 호남전단대 남부 지역에서만 주로 발견이 된다(박계현 외, 2005, 2006; Turek and Kim, 1995; Kim and Turek, 1996; Ree et al., 2001; Kim et al., 2003; Sagong et al., 2005; Fig. 1-3). 반대로 순천전단대에서 예천전단대를 가로지르는 호남전단대 북부 지역인 옥천대 남부에서 경기육괴 및 임진강대를 포함하는 넓은 지역은 쥐라기 중기(180-158 Ma) 심성암질 암류가 분포되어 있다(이기욱 외, 2007; Turek and Kim, 1995; Kim and Turek, 1996; Ree et al., 2001; Kim et al., 2003; Sagong et al.,

2005; Fig. 1-3), 하지만 이들 암체들에 대한 광역적인 지구조 해석 또한 일부 연구자들을 제외하고 거의 부족한 형편이다(Chough et al., 2000; Sagong et al., 2005).

따라서 트라이아스기 중기-말기 및 쥐라기 초기 심성암류에 대해 마그마 근원물질, 마그마의 특성과 분화 및 지구조적 환경 등의 지구화학적 특징 그리고 생성 시 지구조 환경을 밝히기 위해 주성분과 미량성분 및 희토류 원소간의 상호변화 관계에 대하여 이장에서 논의하고자 한다. 또한, 과거 이들 암류에 대한 지화학 자료와 본 연구에서 분석된 구체적인 지화학 자료를 비교 검토한다면, 당시 남한을 포함한 한반도 및 중국을 포함한 동아시아의 심성암질 화성활동을 야기 시켰던 섭입작용의 지구조적 환경을 제한할 수 있는 중요한 단서를 제공할 수 있다.

5-1. 시료위치 및 분석방법

영남육괴 내에 분포하는 트라이아스기 중기-말기 및 쥐라기 초기 심성암류에 대해 약 36 개의 암석표본을 신선도와 위치 대표성을 고려하여 선정, 주성분원소 및 미량성분조성과 희토류원소를 분석하였다(Table 5-1, 2 and Appendix I, II).

분석에 선정된 시료는 현미경관찰을 통해 신선도를 재확인하고 텅스텐 카바이드 재질 분쇄기를 이용 분말시료로 만들었으며, 캐나다의 Activation Laboratories Ltd. 에서 ICP-AES(Termo Jarrel-Ash ENVIRO II)과 ICP-MS(Perkin Elmer Optima)로 주성분 및 미량성분조성과 희토류원소를 분석하였다(Table 5-1, 2).

한편 전라북도 장수군 번암면, 남원시 아영면, 경상남도 산청군, 함양군, 거창군, 함천군, 상주군 및 김천시에 해당하는 지역 내에서 트라이아스기 중기-말기(번암-함양 반상화강암류, 함양 우백질 화강암, 선산 화강암 및 마천 반려암) 및 쥐라기 초기(거창, 김천 및 칠곡-성주-함천 화강암류) 심성암류에 대해 약 360 여개의 암석표본을 선정하여, 조선대학교 공동실험실습관에서 RIGAKU사의 X-선 형광분석기(XRF, X-ray Fluorescenen Spectrometry/RIX 2000)을 이용하여 주성분원소를 분석하였다(Appendix I, II). 또한 기준에 발표된 남한의 트라이아스기 중기 심성암류에 대해서는 옥천대의 백록 및 청산 화강암류(정창식과 장호완, 1996; 사공희와 좌용주, 1997), 경기육괴의 홍성, 남양 및 양평 화강암류(Williams et al., 2008), 임진강대 부근에서 산출되는 해주 화강암류(Pen et al., 2008)의 암석 지화학적 자료들을 본 연구 자료와 비교되었다.

Table 5-1. Representative Major and trace element analyses of Middle and Late Triassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif, South Korea

Rock type	Granodiorite						
Area	B-HMTP						
Sample No.	NTB-5	NBB3-1	NCB9-1	NBB-16	NBB-21	080305-7	080305-8
SiO ₂ (wt %)	63.87	65.88	62.41	63.71	63.85	68.87	70.58
TiO ₂	0.51	0.63	0.68	0.57	0.63	0.52	0.48
Al ₂ O ₃	16.81	15.79	17.17	15.98	16.07	15.64	14.18
Fe ₂ O ₃ [#]	4.58	5.64	5.99	5.81	5.63	3.87	4.03
MnO	0.08	0.09	0.10	0.12	0.09	0.05	0.05
MgO	1.86	1.72	1.92	1.64	1.82	0.98	0.98
CaO	4.85	4.53	4.89	4.39	4.66	3.05	2.87
Na ₂ O	3.50	3.30	3.71	3.71	3.43	4.16	3.57
K ₂ O	2.42	1.94	2.58	2.20	2.37	2.79	2.82
P ₂ O ₅	0.11	0.18	0.19	0.17	0.18	0.16	0.15
L.O.I	0.69	0.84	0.70	0.66	1.16	0.49	0.43
TOTAL	99.28	100.5	100.3	98.94	99.88	100.6	100.1
Ba (ppm)	1363	788	955	652	870	974	717
Sr	207	409	466	380	443	207	193
Zr	526	205	204	202	208	261	168
Ga	24	18	19	19	19	19	21
V	28	81	83	70	79	21	13
Hf	12.3	4.8	4.8	4.7	4.8	7.3	5.4
Nb	16.9	7.6	7.8	8.9	6.9	19.6	17.1
Ta	1.5	0.6	0.5	0.6	0.5	2.2	2.2
Rb	228	128	80	113	94	264	262
Y	39	16	15	20	15	23	21
Cs	6.7	7.3	2.3	2.9	4.3	6.1	11.3
U	4.3	2.7	1.3	2.1	1.9	3.8	9.0
Th	32.8	7.4	17.6	15	13.5	36.7	36.8
Pb	27	12	11	13	10	37	42
La	239	30	81	61	60	54	59
Ce	424	53	135	103	103	150	106
Pr	40.6	5.6	12.9	9.8	9.9	11.9	10.7
Nd	106.0	18.9	33.6	28.3	27.0	36.8	34.3
Sm	16.60	3.89	5.54	4.99	4.71	6.20	5.94
Eu	2.41	1.22	1.33	1.13	1.21	0.91	0.77
Gd	10.80	3.69	3.94	4.29	3.68	4.82	4.28
Tb	1.46	0.56	0.52	0.68	0.48	0.83	0.73
Dy	7.83	3.20	3.01	3.97	2.89	4.44	3.75
Ho	1.49	0.63	0.58	0.81	0.56	0.81	0.73
Er	4.23	1.88	1.71	2.39	1.62	2.40	2.23
Tm	0.61	0.28	0.24	0.35	0.24	0.38	0.33
Yb	3.89	1.82	1.56	2.21	1.53	2.40	2.01
Lu	0.61	0.27	0.24	0.35	0.24	0.35	0.30
Eu/Eu*	0.55	0.98	0.87	0.75	0.89	0.51	0.46
MALI	1.07	0.71	1.40	1.52	1.14	3.9	3.52
Fe [#]	0.71	0.77	0.76	0.78	0.76	0.80	0.80
ASI	0.99	1.02	0.98	0.98	0.98	1.05	1.02

Total iron as Fe₂O₃. GEJP, Gerchang Early Jurassic plutonic sample; GHEJP, Gimcheon hornblende Early Jurassic plutonic.

sample; S-GMTP, Sangju-Gimcheon Middle Triassic plutonic sample; MMTG, Macheon Middle Triassic gabbroic sample; S-GETR, Sangju-Gimcheon Early Triassic rock. B-HLTP, Bunam-Hamyang Late Triassic plutonic sample.

MALI=(Na₂O + K₂O - CaO); Fe[#] = FeO_{total}/(FeO_{total} + MgO); ASI = Al / (Ca - 1.67P + Na + K).

Table 5-1. Continued.

Rock type	Monzodiorite		Granodiorite		Gabbro		
Area	EB-HMTP		S-GMTP		MMTP		
Sample No.	NTB5-22	NBB5-12	080304-1	080304-2	080305-6A	080305-6B	080305-6C
SiO ₂ (wt %)	57.73	59.39	69.69	68.32	53.61	53.06	53.96
TiO ₂	0.85	0.86	0.35	0.32	0.75	0.68	0.79
Al ₂ O ₃	18.09	16.66	15.17	15.86	21.16	21.28	18.86
Fe ₂ O ₃ *	7.70	7.61	2.71	3.26	5.27	5.49	7.28
MnO	0.09	0.17	0.03	0.03	0.06	0.07	0.11
MgO	1.80	2.65	0.66	0.53	3.38	3.45	4.66
CaO	6.22	4.56	2.34	2.25	6.63	8.28	7.67
Na ₂ O	3.88	4.02	3.27	3.88	3.87	3.79	3.62
K ₂ O	2.25	2.29	4.90	3.77	3.81	2.84	2.78
P ₂ O ₅	0.47	0.19	0.10	0.09	0.17	0.26	0.43
L.O.I.	0.60	0.69	0.57	1.44	1.07	0.57	0.66
TOTAL	99.68	99.09	99.79	99.75	99.78	99.79	100.8
Ba (ppm)	628	326	1297	1963	1113	845	977
Sr	463	276	437	695	1521	1359	1149
Zr	485	139	133	230	55	176	118
Ga	18	19	17	19	20	22	20
V	120	139	21	10	84	93	121
Hf	10.3	3.2	3.5	5.6	1.5	3.9	2.8
Nb	4.8	9	5	7.5	7.7	8.5	6.4
Ta	0.3	0.6	0.4	0.3	0.4	0.5	0.4
Rb	77	129	105	74	114	95	81
Y	25	23	5	5	6	13	16
Cs	1.7	2.9	1.3	1.3	2.6	2.6	2.6
U	1.8	0.5	0.8	1.0	0.7	1.9	1.8
Th	14.5	4.99	9.52	12.1	1.67	6.68	6.07
Pb	8	9	27	22	18	17	19
La	63	16	33	45	28	39	40
Ce	108	32	61	79	43	66	73
Pr	10.6	3.9	5.3	6.7	4.2	6.9	7.9
Nd	31.8	15.8	17.9	20.3	13.80	23.80	27.90
Sm	5.84	3.96	3.39	3.4	2.66	4.70	5.64
Eu	1.35	0.83	0.94	0.9	1.50	1.60	1.72
Gd	5.15	4.20	2.31	2.3	1.85	3.24	4.16
Tb	0.76	0.70	0.29	0.3	0.26	0.48	0.59
Dy	4.47	4.28	1.31	1.4	1.41	2.59	3.10
Ho	0.95	0.87	0.24	0.3	0.27	0.48	0.57
Er	3.00	2.67	0.70	0.8	0.78	1.34	1.59
Tm	0.46	0.40	0.11	0.1	0.11	0.19	0.22
Yb	3.11	2.52	0.71	0.9	0.69	1.25	1.36
Lu	0.51	0.37	0.11	0.1	0.09	0.18	0.21
Eu/Eu*	0.75	0.62	1.02	0.95	2.07	1.25	1.09
MALI	-0.09	1.75	5.83	5.40	1.05	-1.65	-1.27
Fe [#]	0.81	0.74	0.80	0.86	0.61	0.61	0.61
ASI	0.92	0.97	1.02	1.10	0.95	0.88	0.84

Total iron as Fe₂O₃. GEJP, Gerchang Early Jurassic plutonic sample; GHEJP, Gimcheon hornblende Early Jurassic plutonic.

sample; S-GMTP, Sangju-Gimcheon Middle Triassic plutonic sample; MMTG, Macheon Middle Triassic gabbroic sample; S-GETR, Sangju-Gimcheon Early Triassic rock. B-HLTP, Bunam-Hamyang Late Triassic plutonic sample.

MALI=(Na₂O + K₂O - CaO); Fe[#] = FeO_{total}/(FeO_{total} + MgO); ASI = Al/(Ca - 1.67P + Na + K).

Table 5-1. Continued.

Rock type	Gabbro	Granite						Granitic gneiss
Area	B-HLTP	B-HLTP						S-GETR
Sample No.	NBB-1	NTB6	HTB-1	NTB-3	NBB5-10	ATB4	ATB11	080304-3
SiO ₂ (wt %)	68.62	68.69	70.68	73.22	74.06	73.64	73.21	63.17
TiO ₂	0.33	0.34	0.25	0.26	0.37	0.21	0.24	0.63
Al ₂ O ₃	15.09	15.56	13.38	12.96	13.35	13.56	13.52	18.92
Fe ₂ O ₃ *	3.36	4.49	3.92	3.41	2.28	2.25	2.66	3.47
MnO	0.07	0.07	0.05	0.06	0.03	0.03	0.04	0.03
MgO	0.36	0.57	0.25	0.25	0.36	0.25	0.30	1.08
CaO	2.39	2.85	1.79	1.66	1.35	1.29	1.15	4.63
Na ₂ O	3.52	3.92	3.11	3.20	2.52	2.85	2.69	4.95
K ₂ O	4.50	3.32	4.62	4.42	5.28	5.27	5.41	1.74
P ₂ O ₅	0.07	0.13	0.07	0.07	0.08	0.06	0.08	0.25
L.O.I.	0.51	0.31	0.26	0.16	0.55	0.35	0.52	0.58
TOTAL	98.82	100.2	98.38	99.66	86.884	99.73	99.82	99.44
Ba (ppm)	1056	727	837	531	335	600	736	543
Sr	176	193	132	83	253	130	224	1025
Zr	379	245	225	236	164	192	228	165
Ga	19	20	16	16	15	21	20	22
V	15	31	7	10	36	8	14	31
Hf	8.8	5.8	5.2	5.6	3.9	5.5	6.1	4.1
Nb	8.3	10.1	5.2	4.5	7.9	15.8	11.9	7.8
Ta	0.5	0.6	0.2	0.2	0.6	1.4	1.2	0.4
Rb	96	117	65	72	75	275	226	53
Y	32	16	10	14	13	22	24	10
Cs	0.9	2.2	0.5	0.7	1.5	3.2	3.2	0.8
U	2.3	1.0	0.7	0.7	1.8	3.3	2.3	0.7
Th	37.7	7.76	18.9	10.6	18.7	42.8	26.7	1.6
Pb	19	21	9	14	9	45	36	12
La	195	20	103	55	61	77	28	20
Ce	342	39	185	108	106	164	135	40
Pr	33.8	4.3	18.5	11.2	10.2	19.3	7.4	3.9
Nd	92.90	16.10	48.40	34.00	28.60	59.30	23.70	14.90
Sm	14.80	3.72	7.44	6.36	4.66	11.20	4.74	3.38
Eu	1.66	1.22	1.42	0.95	0.85	0.57	0.64	1.48
Gd	10.00	3.89	4.56	4.74	3.43	7.51	3.22	2.84
Tb	1.32	0.60	0.43	0.63	0.46	0.99	0.59	0.40
Dy	6.94	3.30	2.39	3.26	2.77	4.88	3.89	1.97
Ho	1.30	0.62	0.44	0.60	0.54	0.83	0.83	0.38
Er	3.63	1.75	1.21	1.70	1.60	2.17	2.51	1.11
Tm	0.51	0.25	0.17	0.25	0.24	0.29	0.39	0.17
Yb	3.09	1.46	1.10	1.58	1.52	1.68	2.58	1.02
Lu	0.47	0.21	0.17	0.22	0.23	0.23	0.40	0.14
Eu/Eu*	0.42	0.98	0.75	0.53	0.65	0.19	0.50	1.46
MALI	5.63	4.39	5.94	5.96	6.45	6.83	6.95	2.06
Fe ^f	0.90	0.89	0.94	0.93	0.86	0.90	0.90	0.76
ASI	1.01	1.03	1.01	1.00	1.09	1.07	1.10	1.04

Total iron as Fe₂O₃. GEJP, Gerchang Early Jurassic plutonic sample; GHEJP, Gimcheon hornblende Early Jurassic plutonic.

sample; S-GMTP, Sangju-Gimcheon Middle Triassic plutonic sample; MMTG, Macheon Middle Triassic gabbroic sample; S-GETR, Sangju-Gimcheon Early Triassic rock. B-HLTP, Bunam-Hamyang Late Triassic plutonic sample.

MALI=(Na₂O + K₂O - CaO); Fe^f = Fe_{total}/(Fe_{total} + MgO); ASI = Al/(Ca - 1.67P + Na + K).

또한 영남육괴 내 트라이아스기 말기 대강 화강암류(Cho et al., 2008), 쥐라기 초기 거창 화강암류(최진범 외, 2006) 및 김천 화강암류(윤현수와 홍세선, 2003)의 암석 지화학적 자료들도 본 연구 자료와 비교되었다.

5-2. 주성분 원소와 미량원소

5-2-1. 트라이아스기 중기-말기 심성암류

심성암류 중 주성분을 이용한 화강암류의 분류법은 기존의 많은 연구자들에 의해 적용되어왔다(Frost et al., 2001 and references therein). 우리나라 화강암류 및 화산암류의 분류법에서는 일반적으로 SiO_2 대 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 을 이용한 분별도 등이 많이 사용되어 왔지만, 화강암류 내의 암석분류를 자세히 구분해주지 못하는 단점 등이 나타난다. 이러한 단점을 보완하기 위하여, 영남육괴 트라이아스기 중기-말기 화강암류에 대해서는 주성분원소 전암화학의 Norm을 적용, 석영, 정장석, 조장석 및 회장석의 비율을 화강암류 분류에 이용하였다(Streckeisen and Le Maitre, 1979). 영남육괴 변암-함양, 상주-김천 및 선산에 분포하는 트라이아스기 중기 화강암류는 주로 화강섬록암에서 화강암의 영역에 점시되며(Fig. 5-1, Table 5-1 and Appendix I), 변암-함양 트라이아스기 말기 화강암류는 일부 알칼리 화강암을 제외하고 대부분 화강암의 영역에 점시되며, 대강지역의 트라이아스기 말기 화강암류는 알칼리 화강암 영역에 점시된다. 한편, 주 연구지역인 변암-함양 지역 및 비교연구 지역인 선산의 트라이아스기 중기 화강암류에 포획되어 있는 염기성 포획암체는 석영 문조 섬록암 및 석영 섬록암 혹은 문조 섬록암 및 섬록암에 분류된다(Fig. 5-1).

이러한 화강암 분류법을 비슷한 시기로 추정되는 우리나라 트라이아스기 화강암류에 적용하면, 옥천대의 트라이아스기 중기 화강암류(정창식과 장호완, 1996; 사공희와 좌용주, 1997)는 석영 문조섬록암에서 화강암 혹은 화강섬록암의 영역에 점시되며 대륙충돌대로 주목받고 있는 경기육괴(Williams et al., 2008) 및 임진강대(Peng et al., 2008)에서는 석영 섬장암과 석영 문조나이트 및 화강암의 영역에서 점시되어, 영남육괴, 옥천대, 경기육괴 및 임진강대의 트라이아스기 화강암류의 성분 조성들이 서로 다른 환경을 지시하는 것으로 판단된다(Fig. 5-2).

Yeongnam Massif

$100 \text{ An}/(\text{Or} + \text{An})$

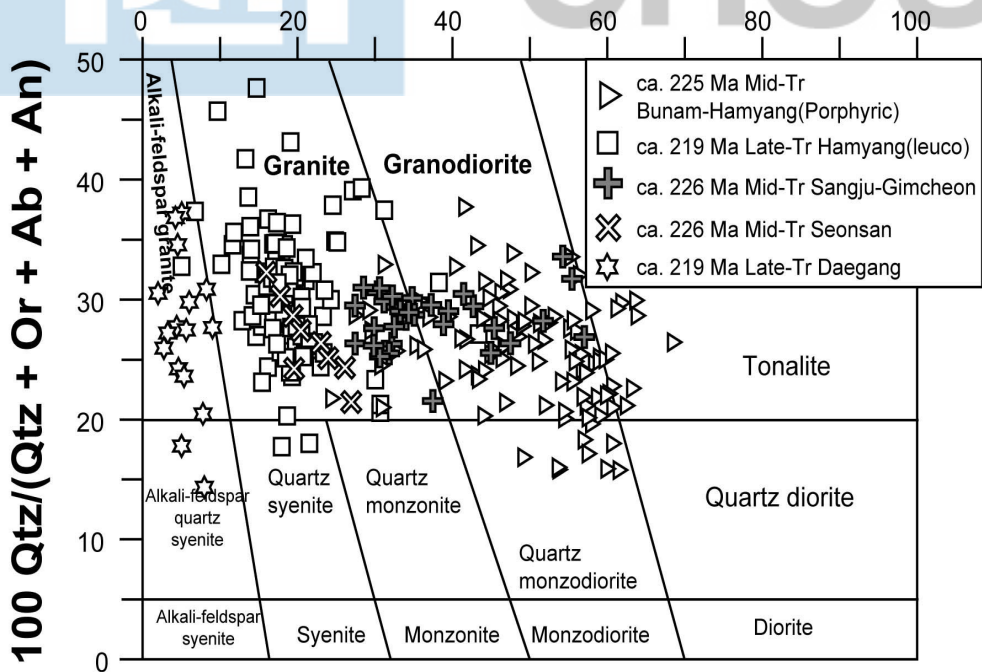
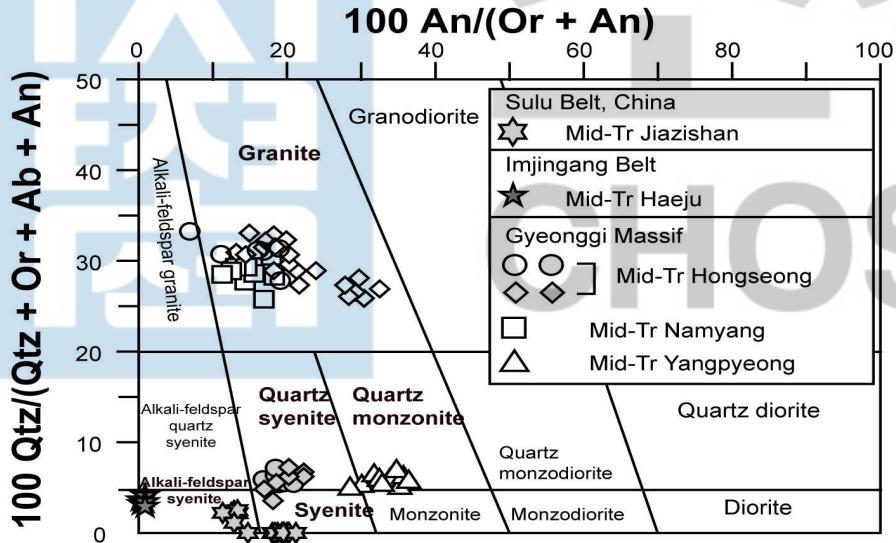


Fig. 5-1. Normative classification (Streckeisen and Le Maitre, 1979) of Middle and Late Triassic granitoids in the Yeongnam Massif (Bunam-Hamyang, Hamyang, Sangju-Gimcheon, and Seonsan) together with Late Triassic Daegang granitoids (Choi et al., 2008).

a) Imjingan Belt & Gyeonggi Massif



b) Okcheon Belt

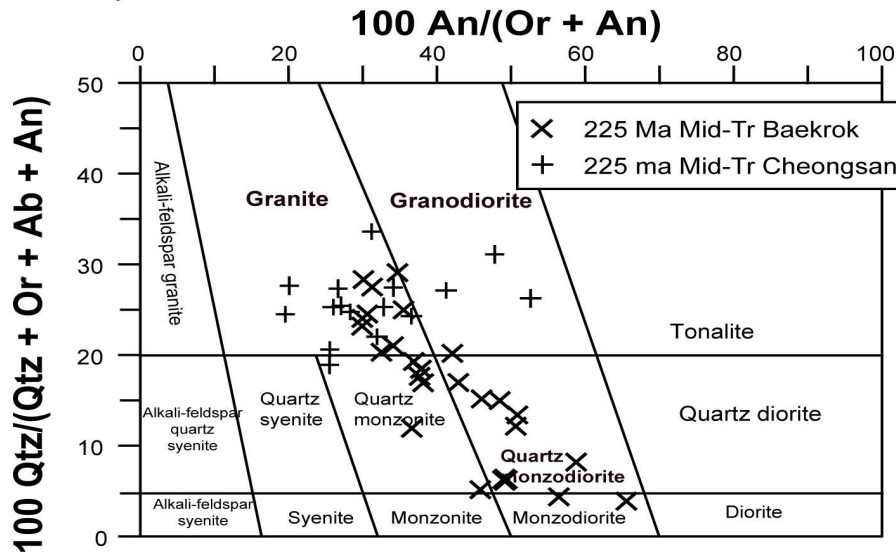


Fig. 5-2. Normative classification (Streckeisen and Le Maitre, 1979) of (a) Middle Triassic granitoids in the Imjingang Belt (Haeju, Peng et al., 2008) and the Gyeonggi Massif (Hongseong, Namyang and Yangpyeong, Williams et al., 2008) together with Middle Triassic Hongseong plutonic rocks in the Gyeonggi Massif (Choi et al., 2008) and (b) Cheongsan and Baeknok Middle Triassic granitoids in the Okcheon Belt (Cheong and Chang, 1996; Sagong and Jwa, 1997). Closed and open symbols represent mafic and felsic rocks, respectively.

화강섬록암에서 화강암의 영역을 보여주는 영남육괴 트라이아스기 중기 화강암류의 주성분 함량의 성분범위를 알아보면, 주 연구지역인 변암-함양 지역은 60.43-71.36 Wt.% SiO_2 , 0.04-0.94 Wt.% TiO_2 , 13.36-19.61 Wt.% Al_2O_3 , 2.33-5.99 Wt.% FeO^* , 0.16-2.03 Wt.% MgO , 1.51-4.89 Wt.% CaO , 3.27-4.62 Wt.% Na_2O , 1.35-5.08 Wt.% K_2O 및 0.06-0.19 Wt.% P_2O_5 의 주성분 함량성분 범위를 보이며, 비교 연구지역인 상주-김천 트라이아스기 중기 화강암류는 65.51-70.88 Wt.% SiO_2 , 0.32-0.70 Wt.% TiO_2 , 14.78-17.06 Wt.% Al_2O_3 , 1.79-3.27 Wt.% FeO^* , 0.53-1.11 Wt.% MgO , 1.97-3.19 Wt.% CaO , 3.27-4.41 Wt.% Na_2O , 1.83-4.90 Wt.% K_2O 및 0.07-0.12 Wt.% P_2O_5 와 선산 화강암류는 68.27-72.37 Wt.% SiO_2 , 0.25-0.39 Wt.% TiO_2 , 13.06-15.54 Wt.% Al_2O_3 , 2.08-3.00 Wt.% FeO^* , 0.51-0.70 Wt.% MgO , 1.18-1.96 Wt.% CaO , 3.38-4.44 Wt.% Na_2O , 4.02-4.84 Wt.% K_2O 및 0.08-0.12 Wt.% P_2O_5 의 성분범위를 보여준다. 한편, 주 연구지역인 변암-함양 지역 및 비교연구 지역인 선산의 트라이아스기 중기 화강암류에 포획되어 있는 염기성 포획암체의 주성분원소는 51.04-59.39 Wt.% SiO_2 , 0.85-2.06 Wt.% TiO_2 , 16.66-21.58 Wt.% Al_2O_3 , 7.61-9.78 Wt.% FeO^* , 1.80-3.49 Wt.% MgO , 4.56-6.39 Wt.% CaO , 3.27-4.62 Wt.% Na_2O , 2.25-5.35 Wt.% K_2O 및 0.19-0.75 Wt.% P_2O_5 의 범위를 보여준다(Table 5-1 and Appendix I).

마천지역에 타원형의 독립된 암주상으로 분포하는 트라이아스기 중기 반력암의 주성분원소는 53.06-53.96 Wt.% SiO_2 , 0.68-0.79 Wt.% TiO_2 , 18.86-21.28 Wt.% Al_2O_3 , 5.27-7.28 Wt.% FeO^* , 3.38-4.66 Wt.% MgO , 6.68-8.28 Wt.% CaO , 3.62-3.87 Wt.% Na_2O , 2.78-3.81 Wt.% K_2O 및 0.17-0.43 Wt.% P_2O_5 의 범위를 보여준다(Table 5-1 and Appendix I).

화강암의 영역을 보여주는 트라이아스기 말기 화강암류의 주성분 함량의 성분범위를 알아보면, 주 연구지역인 변암-함양 지역은 67.06-77.43 Wt.% SiO_2 , 0.00-0.41 Wt.% TiO_2 , 10.58-18.30 Wt.% Al_2O_3 , 0.19-3.92 Wt.% FeO^* , 0.19-0.73 Wt.% MgO , 0.44-2.88 Wt.% CaO , 1.61-3.88 Wt.% Na_2O , 3.03-6.49 Wt.% K_2O 및 0.02-0.09 Wt.% P_2O_5 의 주성분 함량성분범위를 보이며, 트라이아스기 중기 엽리상 반상화강암류 내에 소규모 암주상으로 관입 분포하고 있는 석영-장석 반암은 61.39-62.97 Wt.% SiO_2 , 0.24-0.48 Wt.% TiO_2 , 15.64-17.13 Wt.% Al_2O_3 , 3.23-3.86 Wt.% FeO^* , 1.31-1.97 Wt.% MgO , 3.69-3.94 Wt.% CaO , 2.97-3.25 Wt.% Na_2O ,

2.98-3.41 Wt.% K_2O 및 0.11-0.13 Wt.% P_2O_5 의 성분범위를 보여준다. 대표적인 트라이아스기 말기 알칼리 화강암으로 알려진 대강 화강암(김용준 외, 1998; Cho et al., 2008)은 67.60-78.01 Wt.% SiO_2 , 0.09-0.38 Wt.% TiO_2 , 11.68-13.88 Wt.% Al_2O_3 , 1.25-3.92 Wt.% FeO^* , 0.02-0.19 Wt.% MgO , 0.20-0.97 Wt.% CaO , 3.73-4.70 Wt.% Na_2O , 4.63-7.19 Wt.% K_2O 및 0.02-0.05 Wt.% P_2O_5 의 성분범위를 보여준다(Table 5-1 and Appendix I).

기존의 자료들과 현재 분석된 주성분함량을 SiO_2 에 대한 각 산화물들의 변화를 나타내는 하커도(Harker diagram)상에 도시해보면 트라이아스기 중기 및 말기 심성암류는 SiO_2 함량이 증가하면서 Al_2O_3 , MgO , FeO^* , CaO 및 P_2O_5 함량들에 대해 선형적인 감소 경향이 두드러지게 보여주고, TiO_2 에서는 미세한 감소경향을 보여준다(Fig. 5-3). 하지만 K_2O 함량에서는 상대적으로 트라이아스기 중기 화강암류에서 미세한 증가 경향을 보여주고 트라이아스기 말기 화강암류에서는 변화 경향을 잘 보여주지 않는다. 반대로 트라이아스기 말기 변암-함양 및 대강 화강암류는 Na_2O 가 미세한 증가 경향을 보여주나 트라이아스기 중기 화강암류에서는 경향을 잘 보여주지 않는다(Fig. 5-3).

전반적인 주성분원소 성분 경향을 종합해 보면, 영남육괴 트라이아스기 중기 화강암류는 트라이아스기 말기 화강암류에 비해 SiO_2 함량이 적고 Al_2O_3 , FeO^* , MgO , CaO , P_2O_5 및 TiO_2 의 성분함량이 상대적으로 높은 반면, 트라이아스기 말기 화강암류는 트라이아스기 중기 화강암류에 비해 SiO_2 와 K_2O 함량이 상대적으로 높은 것이 특징이다(Fig. 5-3). 이러한 경향은 화강암류의 암석분류와 잘 대비된다. 트라이아스기 중기 화강암류 내 염기성 포획암체 및 마천 반려암은 산성질 화강암류에 비해 높은 Al_2O_3 , FeO^* , MgO , CaO , P_2O_5 및 TiO_2 의 성분함량을 보여준다.

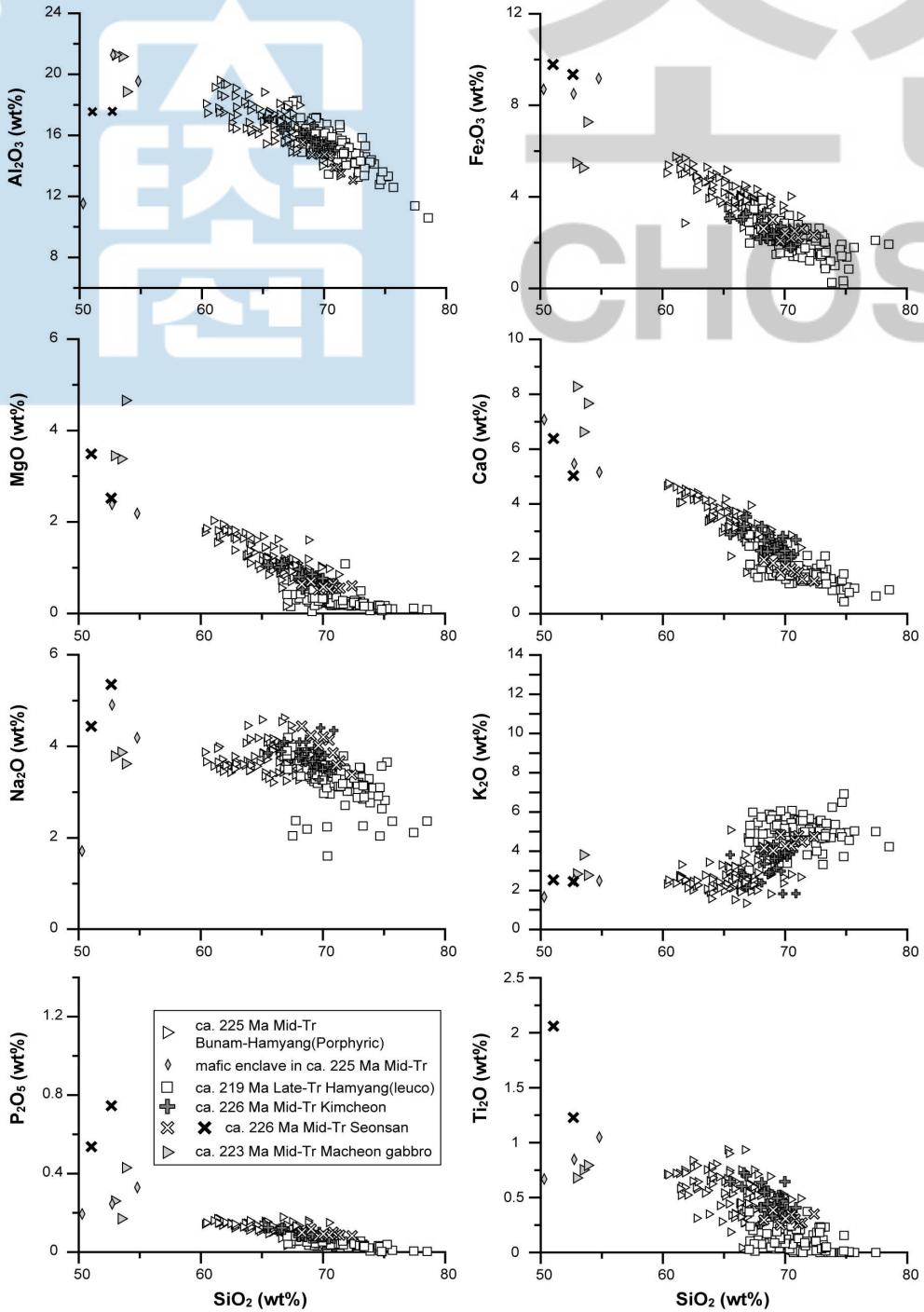


Fig. 5-3. Harker's variation diagram for Middle and Late Triassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif. Closed and open symbols represent mafic and felsic rocks in Seonsan granitoids, respectively.

SiO₂에 대한 Peacock(1931)이 제안한 알칼리-라임 분류를 수정한 알칼리-라임 지수($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$)(MALI, modified alkali-lime index; Frost et al., 2001) 비교도는 영남육괴 트라이아스기 중기-말기 화강암류의 생성환경을 대변할 수 있는 비교도 중 하나이다. 트라이아스기 중기 화강암류 중 변암-함양 및 상주-김천 화강섬록암들은 60.43-71.36 Wt.%의 SiO₂와 1.20-6.28의 MALI 범위를 보여주며, 전형적인 섭입환경을 지시하는 calc-alkalic 영역에 대부분 점시된다(Fig. 5-4). 실리카 함량이 다소 높은 트라이아스기 중기 선산 화강암류는 68.27-72.37 Wt.%의 SiO₂와 6.41-7.45의 MALI 범위를 가지며 변암-함양 및 상주-김천 화강암류와 다른 alkalic-calsic 영역에 점시된다. 트라이아스기 말기 화강암류(변암-함양 화강암류: 67.06-77.43 Wt.%의 SiO₂와 3.95-7.35의 MALI; 변암-함양 화강암류: 67.60-78.01 Wt.%의 SiO₂와 6.31-10.05의 MALI)는 실리카 함량과 알칼리-라임 지수가 상대적으로 트라이아스기 중기 화강암류 보다 높고 calc-alkalic에서 alkalic의 넓은 영역에 점시된다. 실리카와 알칼리-라임지수를 이용한 그림에서도 옥천대의 트라이아스기 중기 화강암류(정창식과 장호완, 1996; 사공희와 좌용주, 1997)는 calc-alkalic에서 alkalic-calsic의 영역에 점시되며 대륙충돌대로 주목받고 있는 경기육괴(Williams et al., 2008) 및 임진강대(Peng et al., 2008)에서는 alkalic-calsic에서 alkalic의 역역에 점시되어 서로 다른 화강암류 생성 환경을 잘 대변한다(Fig. 5-4).

화강암류의 산화-환원 환경 즉, 생성 환경 깊이를 지시하는 $\text{Fe}^\#(\text{FeO}_{\text{total}}/(\text{FeO}_{\text{total}} + \text{Mg}))$ 에 의한 관계도(Fig. 5-5; Frost et al., 2001 and references therein)에서 변암-함양($\text{Fe}^\# = 0.62-0.80$), 상주-김천($\text{Fe}^\# = 0.73-0.80$) 및 선산($\text{Fe}^\# = 0.79-0.83$) 지역의 트라이아스기 중기 화강암류는 마그네시안(Mg 함량) 환경이 우세한 반면, 변암-함양($\text{Fe}^\# = 0.80-0.99$) 및 대강($\text{Fe}^\# = 0.98-0.99$) 지역의 트라이아스기 말기 화강암류는 일부 성분을 제외하고 페로안 즉, 철이 풍부한 서로 다른 환경을 지시한다. 옥천대의 트라이아스기 중기 화강암류는 영남육괴의 트라이아스기 중기 화강암류와 비슷한 마그네시안 환경 안에서 점시되며 대륙충돌대로 주목받고 있는 경기육괴 및 임진강대에서는 점장암 및 몬조나이트 계열에서는 마그네시안 환경, 화강암에서는 페로안성 환경을 가진다(Fig. 5-5).

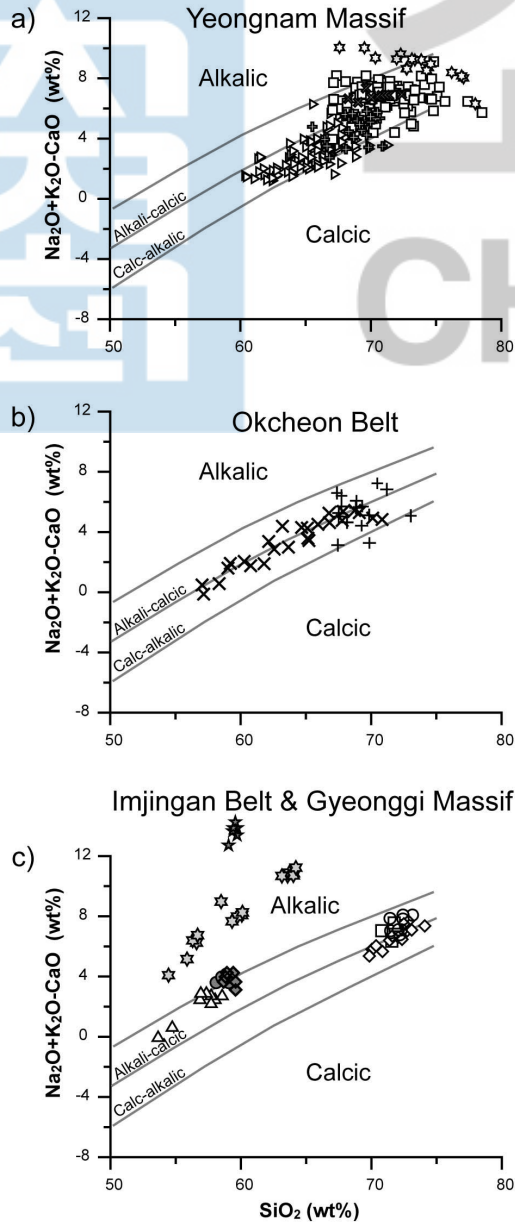


Fig. 5-4. $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$ versus SiO_2 diagrams (Frost et al., 2001 and references therein) in Triassic granitoids, South Korea. (a) Middle and Late Triassic granitoids in the Yeongnam Massif (Bunam-Hamyang, Hamyang, Sangju-Gimcheon and Seonsan) together with Late Triassic Daegang granitoids (Choi et al., 2008), (b) Cheongsan and Baeknok Middle Triassic granitoids in the Okcheon Belt (Cheong and Chang, 1996; Sagong and Jwa, 1997) and (c) Middle Triassic granitoids in the Imjingan Belt (Haeju, Peng et al., 2008) and the Gyeonggi Massif (Hongseong, Namyang, and Yangpyeong, Williams et al., 2008) with Middle Triassic Hongseong plutonic rocks in the Gyeonggi Massif (Choi et al., 2008). Symbols are the same as Figs. 5-1 and 5-2.

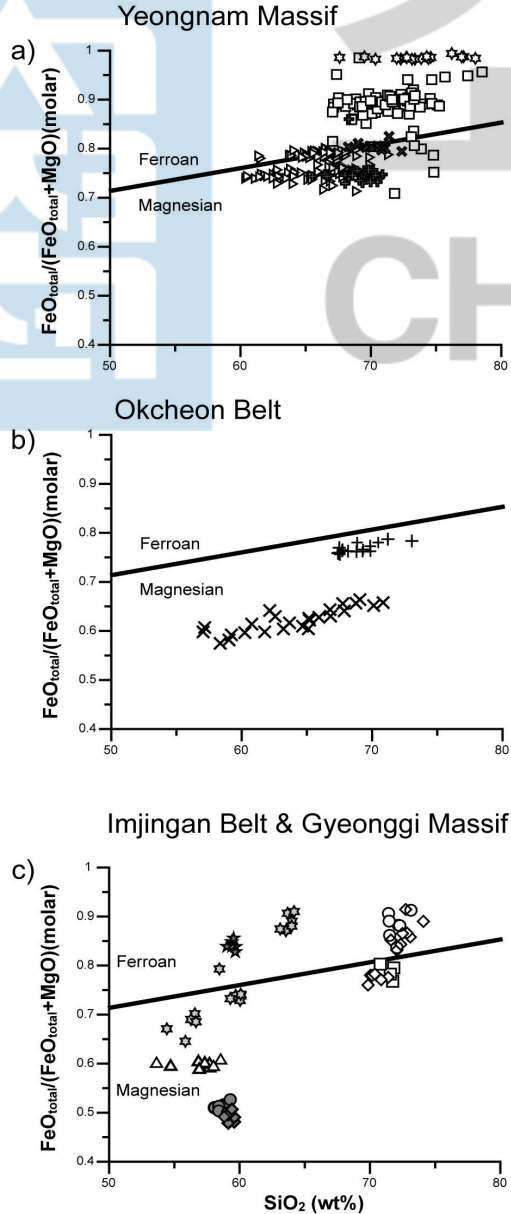


Fig. 5-5. $\text{FeO}_{\text{total}}/(\text{FeO}_{\text{total}} + \text{MgO})$ versus SiO_2 diagrams (Frost et al., 2001 and references therein) in Triassic granitoids, South Korea. (a) Middle and Late Triassic granitoids in the Yeongnam Massif (Bunam-Hamyang, Hamyang, Sangju-Gimcheon and Seonsan) together with Late Triassic Daegang granitoids (Choi et al., 2008), (b) Cheongsan and Baeknok Middle Triassic granitoids in the Okcheon Belt (Cheong and Chang, 1996; Sagong and Jwa, 1997) and (c) Middle Triassic granitoids in the Imjingan Belt (Haeju, Peng et al., 2008) and the Gyeonggi Massif (Hongseong, Namyang, and Yangpyeong, Williams et al., 2008) with Middle Triassic Hongseong plutonic rocks in the Gyeonggi Massif (Choi et al., 2008). Symbols are the same as Figs. 5-1 and 5-2.

영남육괴 내 트라이아스기 중기 및 말기 심성암류에 대한 알루미늄 포화지수 (aluminum saturation index: $ASI = Al / [Ca - 1.67P + Na + K]$)를 검토해보면 트라이아스기 중기 화강암류에서 변암-함야, 상주-김천 및 선산은 각각 1.01-1.38, 1.06-1.16 및 1.00-1.03 의 범위를 보여주며, 트라이아스기 말기 화강암류에서는 변암-함양에서 0.95-1.30과 대강에서 0.95-1.01의 범위를 보여준다(Table 5-1). 영남육괴의 트라이아스기 중기 및 말기 화강암류는 준알루미나질(metaluminous)에서 약한 과알루미나질(peraluminous)을 보여준다. 트라이아스기 중기 화강암류 내 섬록암 계열의 염기성 포획암체는 0.92-1.05로 비슷한 알루미늄 포화지수를 보여주지만 마천 반려암은 0.84-0.95로 준알루미나질을 보여준다(Table 5-1).

전반적으로 영남육괴의 트라이아스기 중기 및 말기 화강암류의 주성분에서 실리카에 대한 알칼리-라임지수 및 철의 총 함량과 심성암류에 대한 알칼리 포화지수의 관계를 알아보면, 전형적인 대륙연변부의 해양지각 섭입과 관련된 코딜러리안형 중생대 화강암류(Cordilleran type Mesozoic granitoids)의 성분과 잘 부합된다(Figs. 5-3, 5-4 and 5-5; Frost et al., 2001 and references therein).

초생맨틀(primitive mantle) 값으로 영남육괴 트라이아스기 중기 및 말기 화강암류와 이들 암류 내의 포유암의 미량원소 성분을 규격화(Pearce, 1984)한 거미 성분도(spider diagram)상에서는 전체적으로 Ta, Nb, P 및 Ti가 상대적으로 다른 원소들보다 결핍되어 있으며 저장력 원소들(large ion lithophile elements)에 해당하는 불호정성 원소인 Rb, Ba, Th 및 U이 부화되어 있고 고장력 원소들(high field strength elements)이 결핍되어 있는 특징을 보여준다(Fig. 5-6). 일반적으로 이러한 지화학적 특징과 Ta-Nb 골(trough)은 전형적인 활동성 대륙연변부의 호상형(Arc-type) 화강암류에서 잘 보여준다. 한편, 상대적으로 마천 반려암류는 Sr와 Eu 부화되어 있고 일부 시료에 대해 Th, U, Hf 및 Zr이 결핍되어 있다(Fig. 5-6). 하지만 트라이아스기 말기 대강 A 형 화강암은 전반적으로 저장력 원소에서 고장력 원소가 상대적으로 부화되어 있고, Ba, Sr, P, Eu 및 Ti 에 대해 강한 부(-) 이상을 보여준다. 이들 지화학적 특징은 A 형 화강암의 기원을 지시하는 충주지역 산성질 변성화산암의 미량원소 경향과 유사하다(박종길 외, 2003; Kim et al., 2006).

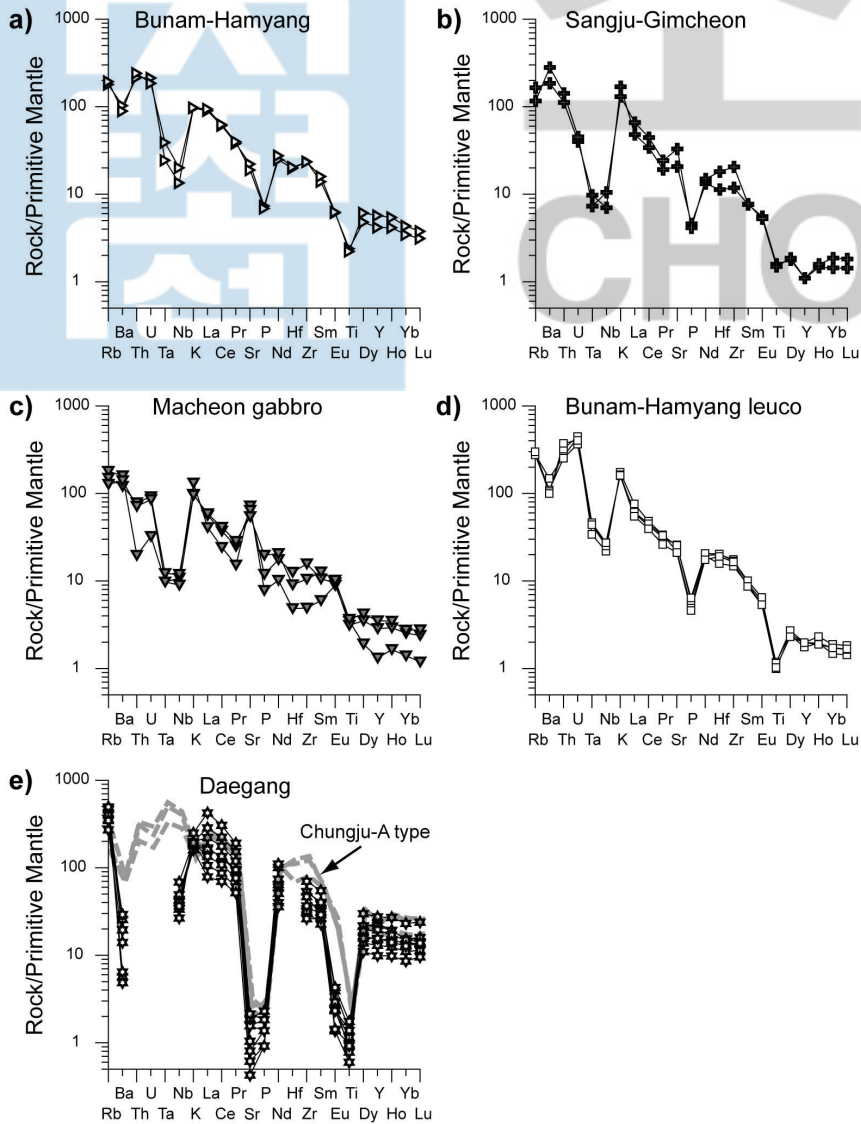


Fig. 5-6. Primitive mantle-normalized (Sun and McDonough, 1989) trace element distribution diagrams for Middle and Late Triassic granitoids in the Yeongnam Massif together with Late Triassic Daegang granitoids (Choi et al., 2008). The Chungju felsic metavolcanic rocks (Kim et al., 2006) used for reference A type granitoids. Symbols are the same as Fig. 5-3.

5-2-2. 쥐라기 초기 심성암류

영남육괴에 주로 분포하는 쥐라기 초기 흑운모 및 각섬석-흑운모 화강암류와 소규모로 분포하는 섬록암 및 섬장암에 대해 주성분원소 전암화학의 Norm을 적용, 석영, 정장석, 조장석 및 회장석의 비율을 화강암류 분류에 이용하였다. 거창, 김천 및 칠곡-성주-합천(신원)등의 넓은 지역에 분포하는 흑운모 화강암류는 화강섬록암에 주로 점시되며 화강암의 영역에도 일부 점시된다(Fig. 5-7, Table 5-2 and Appendix I). 김천 등에 주로 분포하는 거정질의 각섬석-흑운모 화강암류는 화강섬록암, 석영 몬조섬록암 및 석영 섬록암의 영역에 점시되는 것이 특징이다. 그밖에 칠곡-성주-합천에 소규모로 분포하는 섬록암은 석영 몬조섬록암에 점시되며, 합천(신원) 및 산청부근의 지리산, 산청 차황산에 분포하는 섬장암은 알칼리 장석 섬장암에 점시된다.

영남육괴의 쥐라기 초기 화강암류의 주성분 원소 비교 중에 최진범 외(2006)에 의해 보고된 거창 흑운모 화강암류의 주원소 전암화학은 본 연구의 거창 흑운모 화강암류를 포함한 다른 지역의 흑운모 화강암류 및 윤현수와 홍세선(2003)에 의해 보고된 흑운모 화강암류의 주성분원소 전암화학들과 다소 다른 성분 경향을 가진다. 이러한 요인이 분석에러에 의한 차이인지, 분석기관에 의한 차이인지는 알 수가 없으나 이들 값들이 조선대학교 공동실험실습관(본 연구), 캐나다의 Activation Laboratories Ltd.(본 연구) 및 한국지질자원연구원에서 분석된 주성분 원소 경향들과 다른 차이를 보여준다. 본 연구에서는 최진범 외(2006)의 거창 흑운모 화강암류와 윤현수와 홍세선(2003)에 의해 보고된 각섬석-흑운모 화강암류의 주원소 자료에 대해 본 분석 자료와 비교 검토를 제외한다.

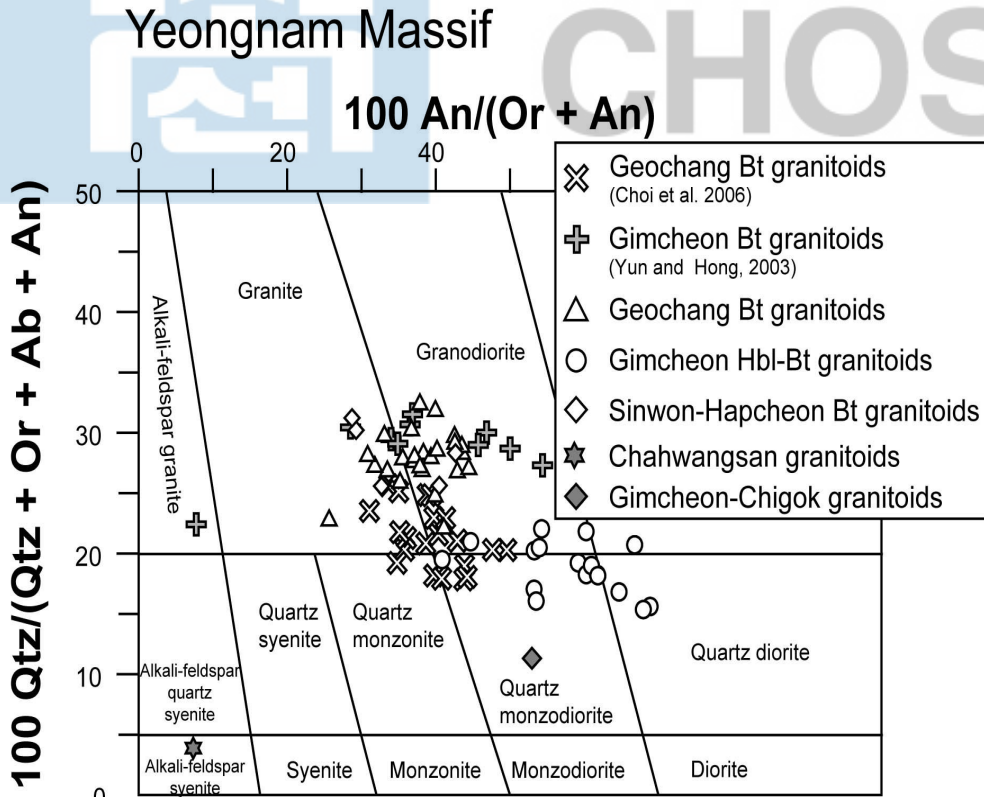


Fig. 5-7. Normative classification (Streckeisen and Le Maitre, 1979) of Early Jurassic granitoids in the Yeongnam Massif (Bunam-Hamyang, Hamyang, Sangju-Gimcheon and Seonsan) together with Gerchang and Gimcheon granitoids (Yun and Hong, 2003; Choi et al., 2006).

Table 5-2. Representative Major and trace element analyses of the Early Jurassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif, South Korea

Rock type	Granodiorite						
	GEJP		GHEJP			CSEJP	
Area							
Sample No.	080306-1	080306-2	080306-3	080306-4	080306-5	080304-4A	080304-4B
SiO ₂ (wt %)	70.84	69.76	69.70	64.88	65.20	69.68	71.32
TiO ₂	0.20	0.22	0.29	0.57	0.64	0.41	0.27
Al ₂ O ₃	15.56	15.81	15.32	16.35	15.93	14.95	13.99
Fe ₂ O ₃ *	3.04	2.95	3.14	3.87	5.68	3.57	2.91
MnO	0.04	0.04	0.04	0.06	0.08	0.06	0.05
MgO	0.39	0.36	0.67	1.50	0.77	0.78	0.59
CaO	2.55	2.43	2.75	4.04	3.05	2.78	2.03
Na ₂ O	4.09	4.76	3.36	3.79	4.16	4.05	3.74
K ₂ O	3.78	2.94	4.57	2.73	3.37	2.93	3.85
P ₂ O ₅	0.08	0.08	0.08	0.14	0.21	0.14	0.10
L.O.I.	0.37	0.43	0.42	1.83	0.52	0.53	0.35
TOTAL	100.9	99.79	100.3	99.76	99.6	99.88	99.2
Ba (ppm)	1085	587	1595	938	974	730	831
Sr	516	567	563	601	333	439	391
Zr	140	128	85	141	564	215	160
Ga	20	22	16	20	22	18	15
V	17	13	27	61	24	24	20
Hf	3.6	3.1	2.2	3.6	12.6	5.3	4.2
Nb	4.7	6.5	4.9	7.6	15.4	10.1	5.8
Ta	0.4	0.5	0.5	0.7	1.3	0.9	0.5
Rb	84	86	87	70	82	94	85
Y	5	5	4	9	25	23	12
Cs	0.80	1.60	0.80	2.20	1.80	1.40	1.00
U	1.39	1.16	0.99	2.16	3.50	2.22	2.19
Th	5.14	6.25	2.90	5.43	7.57	16.1	12.3
Pb	23	17	21	15	16	15	18
La	19	32	9	14	42	43	28
Ce	33	54	20	36	74	85	54
Pr	3.3	5.3	2.5	4.3	7.9	8.0	4.8
Nd	11.20	16.60	9.73	16.30	28.80	28.90	16.30
Sm	2.16	2.92	2.21	3.56	6.05	5.91	3.13
Eu	0.74	0.86	0.79	1.21	1.76	0.98	0.66
Gd	1.57	1.93	1.56	2.68	4.94	5.09	2.47
Tb	0.22	0.27	0.23	0.38	0.77	0.76	0.37
Dy	1.09	1.30	1.24	1.97	4.59	4.16	2.02
Ho	0.21	0.23	0.23	0.36	0.94	0.78	0.40
Er	0.61	0.62	0.67	1.04	2.79	2.24	1.26
Tm	0.09	0.09	0.10	0.15	0.42	0.33	0.20
Yb	0.60	0.51	0.63	1.00	2.76	2.06	1.32
Lu	0.09	0.07	0.09	0.16	0.44	0.32	0.20
Eu/Eu*	1.24	1.10	1.29	1.20	0.98	0.55	0.73
MALI	5.32	5.27	5.18	2.48	4.48	4.2	5.56
Fe ^f	0.89	0.89	0.82	0.72	0.88	0.82	0.83
ASI	1.01	1.03	1.00	1.00	1.01	1.02	1.01

Total iron as Fe₂O₃; GEJP, Gerchang Early Jurassic plutonic sample; GHEJP, Gimcheon hornblende Early Jurassic plutonic sample; CSEJP, Chilgok-Seongju Early Jurassic plutonic sample; HEJP, Hapcheon Early Jurassic plutonic sample; CEJP, Chahwangsang Early Jurassic plutonic sample. MALI=(Na₂O + K₂O - CaO); Fe^f = FeO_{total}/(FeO_{total} + MgO); ASI = Al/(Ca - 1.67P + Na + K).

Table 5-2. Continued.

Rock type	Granodiorite	Diorite	Gabbro	Granodiorite	Granodiorite	Diorite	Syenite
Area	CSEJP	CSEJP	CSEJP	HEJP	HEJP	HEJP	CEJP
Sample No.	080305-2B	080305-3	080305-2A	080305-4	080306-6	080306-7	080305-5
SiO ₂ (wt %)	69.67	59.89	48.70	73.17	71.71	52.39	62.77
TiO ₂	0.33	0.74	1.99	0.18	0.16	1.11	0.51
Al ₂ O ₃	15.51	15.80	15.98	13.81	15.64	17.45	15.89
Fe ₂ O ₃ *	3.55	6.28	9.89	2.80	2.45	10.03	5.82
MnO	0.06	0.11	0.15	0.06	0.05	0.15	0.17
MgO	0.69	3.76	4.92	0.36	0.26	4.88	0.16
CaO	2.79	5.65	8.49	1.71	1.91	8.31	1.52
Na ₂ O	4.20	3.55	3.73	4.28	4.24	2.92	5.00
K ₂ O	3.25	2.83	1.25	3.37	4.05	1.57	6.11
P ₂ O ₅	0.12	0.33	0.54	0.07	0.08	0.38	0.07
L.O.I.	0.72	1.45	3.32	0.22	0.45	0.09	0.37
TOTAL	100.9	100.4	98.97	100	101	99.09	98.4
Ba (ppm)	880	865	487	700	897	546	166
Sr	473	737	568	236	426	568	15
Zr	157	238	271	146	115	134	1180
Ga	17	19	20	15	21	20	20
V	30	71	169	18	7	230	< 5
Hf	3.9	5.4	5.8	3.7	3	3.4	19
Nb	4.8	8.4	9.9	4.9	7.7	6.1	16.8
Ta	0.5	0.4	0.7	0.4	1.3	0.4	1
Rb	113	64	36	76	156	53	106
Y	9	19	35	12	5	27	26
Cs	1.40	1.30	1.30	1.1	3.1	2.8	1.2
U	3.38	1.97	1.14	2.5	1.7	1.0	3.7
Th	8.48	6.59	3.38	15.5	7.04	5.58	9.58
Pb	18	11	9	13	25	11	15
La	23	39	34	44	25	29	21
Ce	41	73	69	71	43	58	44
Pr	4.0	8.0	8.1	6.1	4.0	6.7	5.3
Nd	14.30	28.80	32.7	18.8	13.5	27.0	21.0
Sm	2.85	6.10	7.82	3.26	2.56	6.56	5.11
Eu	0.69	1.46	2.48	0.66	0.61	1.74	1.18
Gd	2.14	4.88	7.35	2.18	1.75	5.28	4.53
Tb	0.31	0.70	1.16	0.34	0.25	0.87	0.73
Dy	1.71	3.90	6.61	2.06	1.28	5.13	4.36
Ho	0.34	0.73	1.31	0.43	0.23	1.01	0.92
Er	0.99	2.07	3.81	1.32	0.64	2.84	2.97
Tm	0.15	0.30	0.54	0.21	0.10	0.41	0.50
Yb	0.99	1.89	3.34	1.42	0.65	2.53	3.63
Lu	0.15	0.26	0.46	0.21	0.09	0.35	0.65
Eu/Eu*	0.85	0.82	1.00	0.76	0.88	0.90	0.75
MALI	4.66	0.73	-3.51	5.94	6.38	-3.82	9.59
Fe [#]	0.84	0.63	0.67	0.89	0.90	0.67	0.97
ASI	1.01	0.84	0.72	1.01	1.06	0.82	0.91

Total iron as Fe₂O₃. GEJP, Gerchang Early Jurassic plutonic sample; GHEJP, Gimcheon hornblende Early Jurassic plutonic sample; CSEJP, Chilgok-Seongju Early Jurassic plutonic sample; HEJP, Hapcheon Early Jurassic plutonic sample; CEJP, Chahwangsang Early Jurassic plutonic sample. MALI=(Na₂O + K₂O - CaO); Fe[#] = FeO_{total}/(FeO_{total} + MgO); ASI = Al / (Ca - 1.67P + Na + K).

주로 화강섬록암의 영역을 보여주는 쥐라기 초기 거창 흑운모 화강암류의 주성분 함량의 성분범위를 알아보면, 67.17-72.13 Wt.% SiO_2 , 0.17-0.44 Wt.% TiO_2 , 14.92-17.42 Wt.% Al_2O_3 , 0.73-3.04 Wt.% FeO^* , 0.24-0.66 Wt.% MgO , 2.10-2.80 Wt.% CaO , 3.78-4.55 Wt.% Na_2O , 2.76-3.92 Wt.% K_2O 및 0.04-0.11 Wt.% P_2O_5 의 주성분원소 함량성분범위를 보이며, 윤현수와 홍세선(2003)에 의해 보고된 인근 김천 흑운모 화강암류의 주성분원소 함량의 성분범위는 67.14-71.34 Wt.% SiO_2 , 0.19-0.50 Wt.% TiO_2 , 14.22-17.62 Wt.% Al_2O_3 , 1.79-3.02 Wt.% FeO^* , 0.22-0.74 Wt.% MgO , 1.63-3.68 Wt.% CaO , 3.72-4.74 Wt.% Na_2O , 2.55-3.85 Wt.% K_2O 및 0.06-0.12 Wt.% P_2O_5 와 칠곡-성주-합천의 흑운모 화강암류는 69.67-73.17 Wt.% SiO_2 , 0.18-0.33 Wt.% TiO_2 , 13.81-15.51 Wt.% Al_2O_3 , 2.80-3.57 Wt.% FeO^* , 0.36-0.78 Wt.% MgO , 1.71-2.79 Wt.% CaO , 3.36-4.28 Wt.% Na_2O , 2.93-4.57 Wt.% K_2O 및 0.07-0.14 Wt.% P_2O_5 으로 비슷한 성분범위를 보여준다. 한편, 김천 지역의 각섬석-흑운모 화강암류의 주성분원소는 59.74-65.20 Wt.% SiO_2 , 0.47-0.85 Wt.% TiO_2 , 15.93-17.84 Wt.% Al_2O_3 , 3.87-5.68 Wt.% FeO^* , 0.77-2.85 Wt.% MgO , 3.05-5.56 Wt.% CaO , 3.05-4.16 Wt.% Na_2O , 1.98-3.88 Wt.% K_2O 및 0.11-0.21 Wt.% P_2O_5 의 범위를 보여준다(Table 5-2 and Appendix I).

칠곡-성주-합천 지역에 소규모로 분포하는 쥐라기 초기 섬록암의 주성분원소는 59.89 Wt.% SiO_2 , 0.74 Wt.% TiO_2 , 15.80 Wt.% Al_2O_3 , 6.28 Wt.% FeO^* , 3.76 Wt.% MgO , 5.65 Wt.% CaO , 3.55 Wt.% Na_2O , 2.83 Wt.% K_2O 및 0.33 Wt.% P_2O_5 를 보여주며, 신원 및 산청부근의 지리산 차황산 지역에 타원형의 독립된 소규모 암주상으로 분포하는 쥐라기 초기 섬장암의 주성분원소는 62.77 Wt.% SiO_2 , 0.51 Wt.% TiO_2 , 15.89 Wt.% Al_2O_3 , 5.82 Wt.% FeO^* , 0.16 Wt.% MgO , 1.52 Wt.% CaO , 5.00 Wt.% Na_2O , 6.11 Wt.% K_2O 및 0.07 Wt.% P_2O_5 를 보여준다(Table 5-2 and Appendix I).

영남육괴 쥐라기 초기 화강암류들에 대해 기존의 자료들과 현재 분석된 주성분 함량을 SiO_2 에 대한 각 산화물들의 변화를 나타내는 하커도(Harker diagram)상에 도시해보면, 쥐라기 초기 화강암류는 SiO_2 함량이 증가하면서 Al_2O_3 , FeO^* , MgO , CaO , P_2O_5 및 TiO_2 함량들에 대해 선형적인 감소 경향을 보여주지만(Fig. 5-8), K_2O 함량에서는 상대적으로 증가 경향을 보여준다. Na_2O 에서는 변화 경향을 잘 보여주지 않는다(Fig. 5-8).

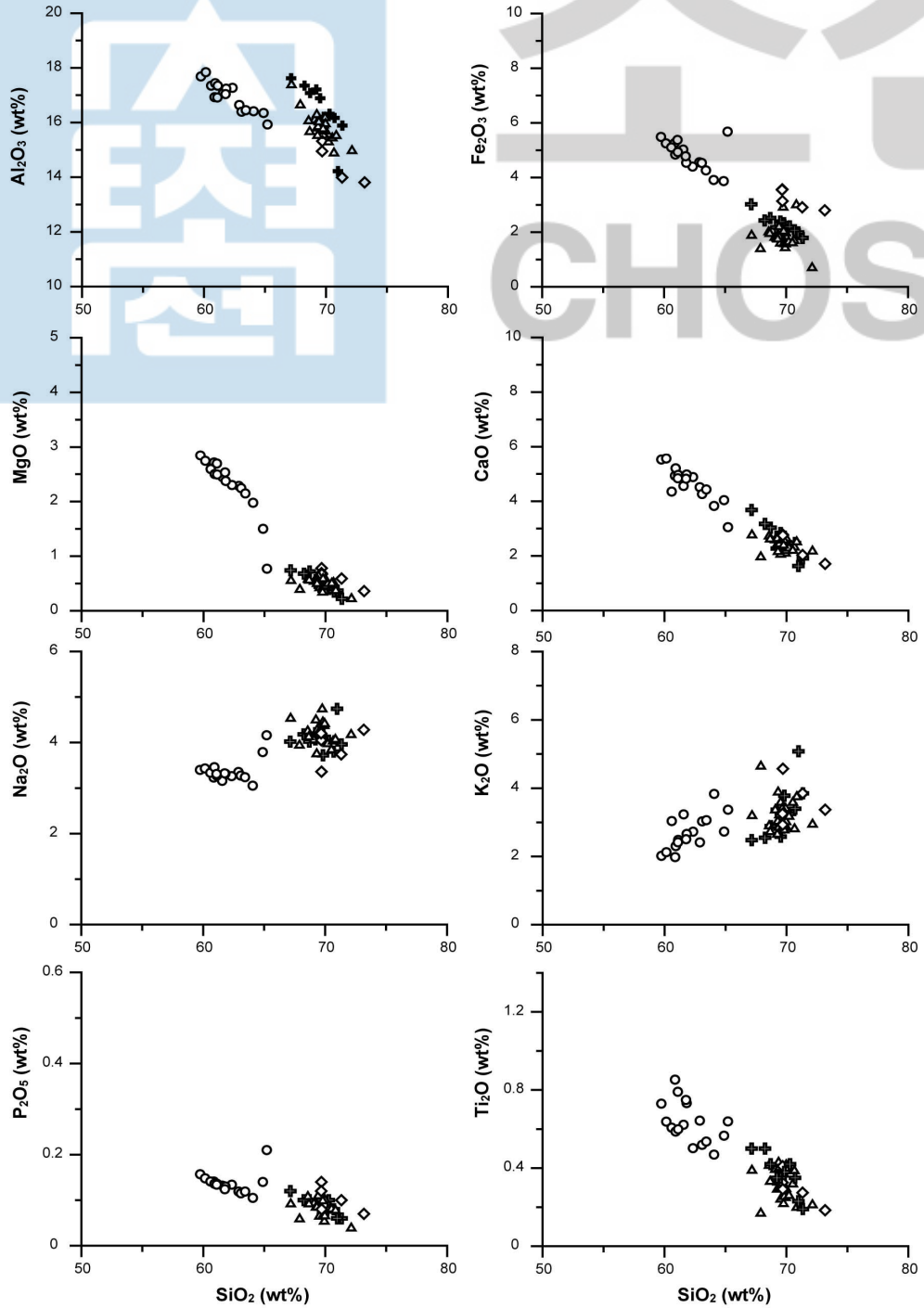


Fig. 5-8. Harker's variation diagram for Early Jurassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif. Symbols are the same as Fig. 5-7.

전반적인 주원소 성분 경향을 종합해 보면, 영남육괴 쥐라기 초기 흑운모화강암류는 각섬석-흑운모 화강암류에 비해 SiO_2 , Na_2O 및 K_2O 함량이 높고 Al_2O_3 , FeO^* , MgO , CaO , P_2O_5 그리고 TiO_2 의 성분함량이 상대적으로 낮은 것이 특징이다(Fig. 5-8). 이러한 경향은 화강암류의 암석분류와 잘 대비된다. 섬록암과 섬장암은 좀더 자세한 분석수행을 해야지만 각각의 고유성분을 잘 지시한다.

SiO_2 에 대한 Peacock(1931)이 제안한 알칼리-라임 분류를 수정한 알칼리-라임 지수($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$)(MALI, modified alkali-lime index; Frost et al., 2001) 비교도에서 거창 흑운모 화강섬록암들은 67.17-72.13 Wt.%의 SiO_2 와 4.25-6.64의 MALI, 김천 흑운모 화강암류는 67.14-71.34 Wt.%의 SiO_2 와 2.82-5.90의 MALI, 칠곡-성주-합천의 흑운모 화강섬록암은 69.67-73.17 Wt.%의 SiO_2 와 4.20-5.94의 MALI 및 김천 각섬석-흑운모 화강암류는 59.74-65.20 Wt.%의 SiO_2 와 -0.11-4.48의 MALI의 범위를 보여주며, 일부 alkalic-calcic에 점시되는 자료들을 제외하고 대부분 전형적인 섭입환경을 지시하는 calc-alkalic 영역에 점시된다(Fig. 5-9a). 칠곡-성주-합천 지역에 소규모로 분포하는 쥐라기 초기 섬록암도 59.89 Wt.% SiO_2 와 0.73의 MALI로 calc-alkalic 영역에 점시된다. 하지만 차황산 지역의 섬장암은 9.59의 MALI로 섬장암 고유의 alkalic 영역에 점시된다(Fig. 5-9a).

$\text{Fe}^\#(\text{FeO}_{\text{total}}/(\text{FeO}_{\text{total}} + \text{Mg}))$ 에 의한 관계도 (Fig. 5-9b; Frost et al., 2001 and references therein) 에서 거창($\text{Fe}^\# = 0.75-0.89$), 김천($\text{Fe}^\# = 0.78-0.89$) 및 칠곡-성주-합천($\text{Fe}^\# = 0.82-0.89$) 흑운모 화강암류는 페로안(Fe 함량) 환경이 우세한 반면, 김천 각섬석-흑운모 화강암류는 마그네시안 환경이 우세하다(Fig. 5-9b). 칠곡-성주-합천의 섬록암도 김천 각섬석-흑운모 화강암류와 비슷한 마그네시안 영역($\text{Fe}^\# = 0.63$)에 점시된다. 차황산 지역의 섬장암은 강한 페로안 환경($\text{Fe}^\# = 0.97$)을 지시한다.

알루미늄 포화지수(aluminum saturation index: $\text{ASI} = \text{Al} / [\text{Ca} - 1.67\text{P} + \text{Na} + \text{K}]$)를 검토해보면 영남육괴 쥐라기 초기 흑운모 화강암류에서 거창, 김천 및 칠곡-성주-합천은 각각 1.06-1.11, 1.11-1.20, 1.01-1.03의 범위를 보여주며, 김천 각섬석-흑운모 화강암류에서는 0.99-1.05의 범위를 보여주어(Table 5-2). 영남육괴의 쥐라기 초기 화강암류는 일반적으로 약한 과알루미나질을 보여준다. 하지만 칠곡-성주-합천의 섬록암 및 차황산 지역의 섬장암은 0.84 및 0.91의 준알루미나질을 보여준다.

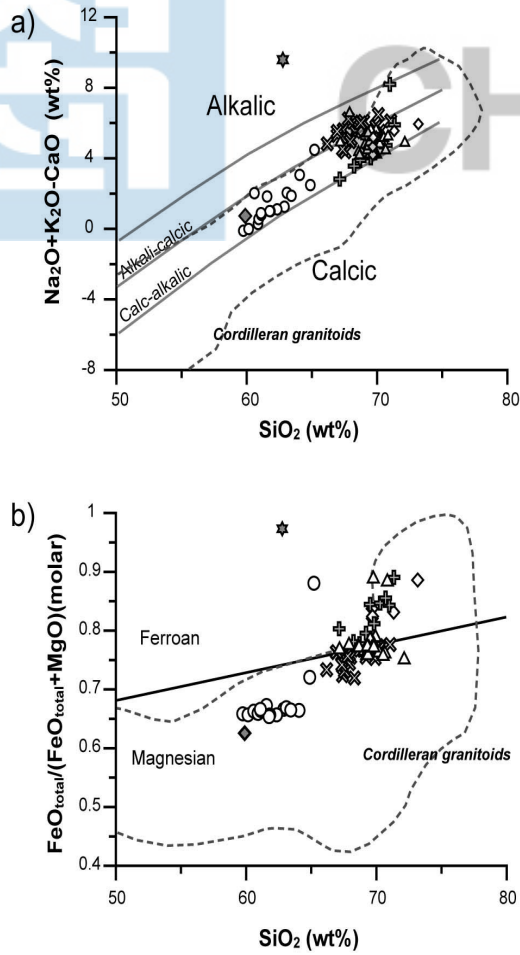


Fig. 5-9. Geochemical variations in Early Jurassic plutonic rocks of the Yeongnam Massif, South Korea. (a) $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$ versus SiO_2 and (b) $\text{FeO}_{\text{total}}/(\text{FeO}_{\text{total}} + \text{MgO})$ versus SiO_2 (Frost et al., 2001 and references therein). The symbols are as in Fig. 5-7.

전반적으로 트라이아스기 중기-말기 화강암류와 마찬가지로 영남육괴의 쥐라기 초기 화강암류의 주성분에서 실리카에 대한 알칼리-라임지수, 철의 총 함량 및 알칼리 포화지수의 관계들을 종합해 볼 때 전형적인 대륙연변부의 해양지각 섭입과 관련된 코딜러리안형 중생대 화강암류(Cordilleran type Mesozoic granitoids)의 성분과 잘 부합된다(Fig. 5; Frost et al., 2001 and references therein).

초생맨틀값으로 영남육괴 쥐라기 초기 화강암류의 미량원소 성분을 규격화(Pearce, 1984)한 거미 성분도상에서는 영남육괴 남쪽 경계부에 산출되는 칠곡-성주-합천 흑운모 화강암류 및 칠곡-성주-합천 섬록암은 전체적으로 좁은 영역에서 Ta, Nb, P 및 Ti가 상대적으로 다른 원소들보다 결핍되어 있으며, 저장력 원소들에 해당하는 불호정성 원소인 Rb, Ba, Th 및 U이 부화되어 있고 고장력 원소들이 결핍되어 있는 특징을 보여준다(Fig. 5-10). 거창 흑운모 화강암류는 신원(칠고-합천) 흑운모 화강암류 및 칠곡-성주-합천 섬록암에 비해 저장력 원소들에서 Th 와 U, 고장력 원소들에서 Dy, Y, Ho, Yb 그리고 Lu이 상대적으로 결핍되어 있는 것이 특징이다. 김천의 각섬석-흑운모 화강암류는 다른 화강암류의 미량원소 성분에 비해 상대적으로 넓은 성분범위를 보여주며 일부 시료에서 Hf 와 Zr의 부화가 관찰된다. 차황산 지역의 섬장암은 영남육괴 쥐라기 초기 화강암류의 미량원소 특징과 비교해 볼 때 Ba, Sr 및 P의 결핍이 두드러지고 K, Hf, Zr, Yb 그리고 Lu등이 부화되어 있다.

전반적으로 영남육괴에 산출되는 쥐라기 초기 화강암류는 Ta-Nb 골(trough)을 가지며 전형적인 활동성 대륙연변부의 호상형(Arc-type) 화강암류에서 미량원소 특징을 잘 보여준다(Fig. 5-10).

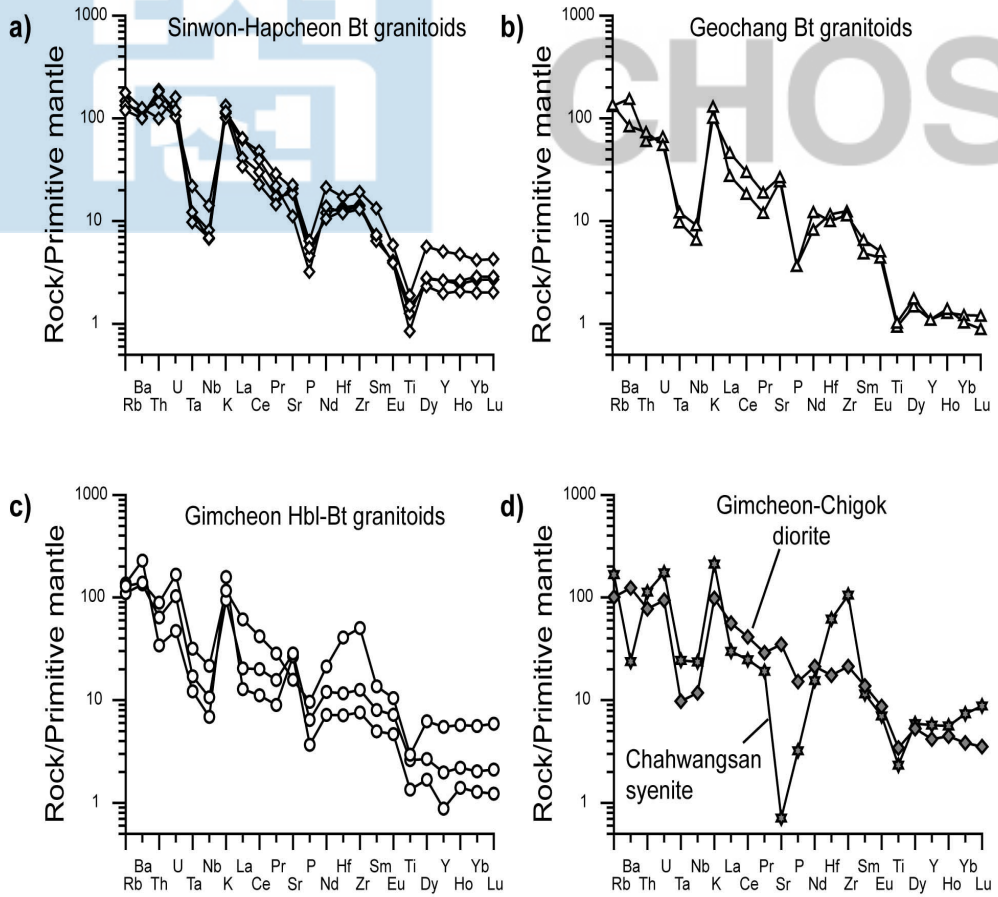


Fig. 5-10. Primitive mantle-normalized (Sun and McDonough, 1989) trace element distribution diagrams for Early Jurassic granitoids in the Yeongnam Massif. Symbols are the same as Fig. 5-7.

5-3. 희토류원소(REE)의 지구화학적 특징

5-3-1. 트라이아스기 중기-말기 심성암류

트라이아스기 중기 및 말기 화강암류의 희토류 원소 농도를 운석으로 규격화(Sun and McDonough, 1989)한 성분변화 양상은 Table 5-1 와 Figure 5-11 같다.

번암-함양 엽리상 반상 화강암류에 대한 경희토류(light rare earth element)에서 중희토류(heavy rare earth element)까지의 경사 기울기는 21.7-26.1 (La/Yb_N)이며 강한 부(-)의 Eu 이상치($0.53 < Eu/Eu^* < 0.61$)를 가진다. 상주-김천 반상 화강암류는 경희토류에서 중희토류까지의 경사 기울기가 33.4-35.3 (La/Yb_N)이지만 Ho부터 Lu까지의 중희토류 부근에서는 거의 기울기가 편평하다. 이들 화강암류는 거의 Eu 이상치($0.95 < Eu/Eu^* < 1.02$)를 보여주지 않는다(Fig. 5-11).

마천 반려암은 경희토류에서 중희토류까지의 경사 기울기가 213-29.2 (La/Yb_N)으로 중간정도의 급격함을 보여주지만 약한 정도에서 강한 정(+)의 Eu 이상치($1.09 < Eu/Eu^* < 2.07$)를 보여준다(Fig. 5-11).

트라이아스기 말기 대강 A형의 화강암류는 경희토류에서 중희토류까지의 경사 기울기가 완만함에서 중간정도의 급격함($La/Yb_N = 5.2-49.3$)을 보여주지만 La_N 값(227.8-1227.8)이 다른 화강암류($La_N = 118.6-273.0$)보다 매우 부화되어 있다. 또한 아주 강한 부(-)의 Eu 이상치($0.04 < Eu/Eu^* < 0.13$)를 가진다(Fig. 5-11).

5-3-2. 쥐라기 초기 심성암류

쥐라기 초기 화강암류의 희토류 원소 농도를 운석으로 규격화(Sun and McDonough, 1989)한 성분변화 양상은 Table 5-2 와 Figure 5-12 같다. 영남육괴 남쪽 경계부에 산출되는 칠곡-성주-합천 흑운모 화강암류에 대한 경희토류에서 중희토류까지의 경사 기울기는 완만함에서 중간정도의 14.9-22.3 (La/Yb_N)이며, 중간정도의 부(-)의 Eu 이상치($0.55 < Eu/Eu^* < 0.85$)를 가진다. 칠곡-성주-합천 섬록암은 경희토류에서 중희토류까지의 경사 기울기가 14.6 (La/Yb_N)이며 중간정도의 부(-)의 Eu 이상치(0.82)를 가진다.

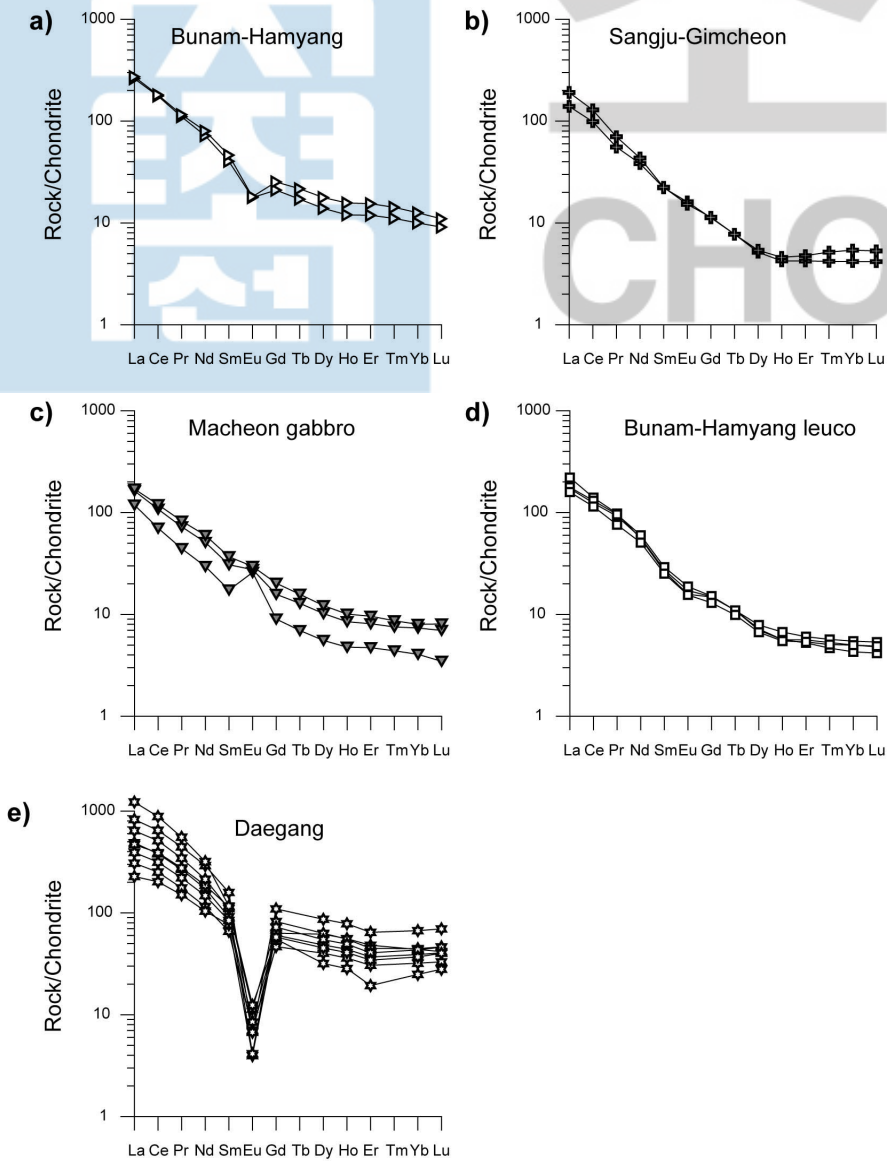


Fig. 5-11. Chondrite-normalized (Sun and McDonough, 1989) rare earth element (REE) patterns for Middle and Late Triassic granitoids in the Yeongnam Massif together with Late Triassic Daegang granitoids (Choi et al., 2008). The Chungju felsic metavolcanic rocks (Kim et al., 2006) used for reference A type granitoids. Symbols are the same as Fig. 5-3.

차황산 섬장암은 4.2 의 경희토류에서 중희토류까지의 완만한 경사기울기를 가지며 앞서의 화강암류와 마찬가지로 중간정도의 부(-)의 Eu 이상치(0.75)를 가진다(Fig. 5-12).

거창 흑운모 화강암류는 경희토류에서 중희토류까지의 경사 기울기가 22.7-44.7로 다른 쥐라기 초기 화강암류보다 급격함을 보여주며, 약함에서 중간 정도 정(+)의 Eu 이상치($1.10 < \text{Eu}/\text{Eu}^* < 1.24$)를 보여준다(Fig. 5-12).

김천 각섬석-흑운모 화강암류는 경희토류에서 중희토류까지의 경사기울기가 완만함($\text{La}/\text{Yb}_N = 10.0-10.9$)을 보여주며, 약한 부(-)에서 중간 정도 정(+)의 Eu 이상치($0.98 < \text{Eu}/\text{Eu}^* < 1.29$)를 가진다(Fig. 5-12).

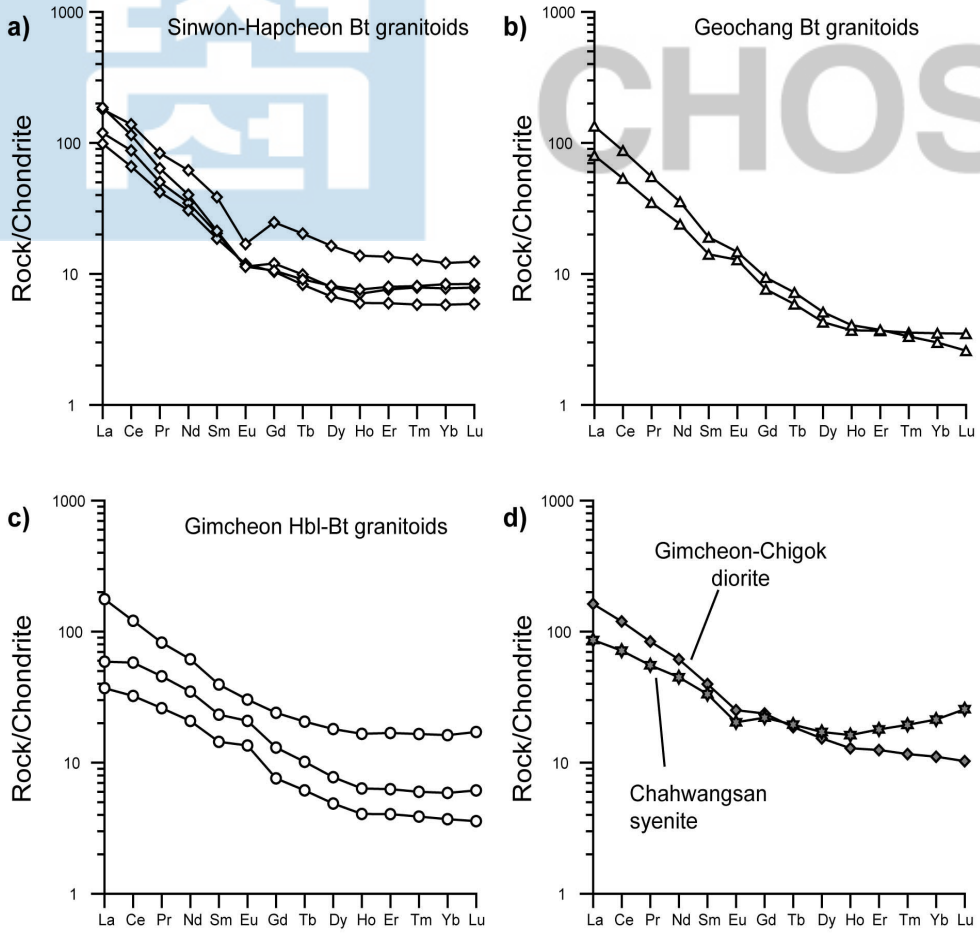


Fig. 5-12. Chondrite-normalized (Sun and McDonough, 1989) rare earth element (REE) patterns for Early Jurassic granitoids in the Yeongnam Massif. Symbols are the same as Fig. 5-7.

6. Rb-Sr 및 Sm-Nd 동위원소연구

본 연구는 영남육괴에 산출되는 트라이아스기 중기-말기 및 쥐라기 초기 심성암류의 Sm-Nd 및 Rb-Sr 동위원소 자료를 이용하여 이들 암석의 성인 및 지구조적 환경을 밝히는데 그 목적이 있다. 또한 본 연구의 결과와 지금까지 보고된 경기육괴, 옥천대의 트라이아스기 중기 및 쥐라기 중기 심성암류의 지구조-화성진화에 대한 기존연구를 종합 비교함으로써 전반적인 토론을 하고자 한다.

6-1. 시료 및 실험 방법

영남육괴에 분포하는 트라이아스기 중기-말기 및 쥐라기 초기 심성암류의 대표적인 암석표품을 신선도와 위치 대표성을 고려하여 선정한 다음 Sr 및 Nd 동위원소비에 대해 주성분 및 미량원소 분석을 실시한 시료 중에서 30 개의 암석표품을 선정하여 분석하였다. 분석에 선정된 시료는 암석절단기로 자른 후 박편관찰을 통해 신선도를 재확인하고 텅스텐 카바이드 재질의 분쇄기를 사용, 분말시료로 만들었다.

Sr 과 Nd 동위원소비는 대전 한국기초과학 지원연구원의 열이온화질량분석기(TIMS; thermal ionization mass spectrometer, VG54-30, Isoprobe-T)를 이용하여 Cheong and Chang(1997)가 사용한 동위원소 회석법으로 분석하였다. Rb는 정적인 모드로, Sm은 $^{152}\text{Sm}/^{147}\text{Sm} = 1.7831$ 로 질량분별효과를 보정하면서 정적인 모드로 분석하였다. Sr과 Nd은 각각 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 과 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 로 질량분별효과를 보정하면서 동적인 모드(dynamic mode)로 분석하였다. Sr 동위원소의 표준물질인 NBS987의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비는 0.710172 ± 0.000009 (N=16, 2σ SE)이며, Nd동위원소의 표준물질인 La Jolla의 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비는 0.511826 ± 0.000006 (N=30, 2σ SE)이고, JNdi-1의 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비는 0.512098 ± 0.000006 (N=27, 2σ SE)이었다. ϵSr 과 ϵNd 계산을 위한 CHUR(Chondritic Uniform Reservoir)의 현재 값은 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7045$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 0.0816$ 을 사용하였고(Faure, 1986), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 과 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 은 각각 0.512638과 0.1966를 이용하였다(Wasserburg et al., 1981). Rb-Sr과 Sm-Nd 동위원소 자료는 Tables 6-1과 6-2에 나타났다.

6-2. Rb-Sr 결과

6-2-1. 트라이아스기 중기-말기 심성암류

영남육괴 연구지역 내에 분포하는 트라이아스기 중기 및 말기 심성암류에 대한 Rb와 Sr의 함량과 Sr 동위원소비는 Table 6-1에 나타내었고 Fig. 6-1a에 도시하였다.

연구지역인 트라이아스기 중기 변암-함양 화강암류, 트라이아스기 중기 상주-김천 화강암류와 트라이아스기 중기 마천반려암의 암석표본들의 Rb의 함량은 각각 76.0-166.0 ppm, 59.3-101.5 ppm 및 71.6-102.9 ppm이다. Sr의 함량은 81.9-437.8 ppm, 396.8-623.6 ppm 및 1053.2-1424.5 ppm의 각각의 범위를 보여준다. 또한 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 값은 각각 0.710288-0.720270, 0.710504-0.711696 및 0.707101-0.707279의 범위를 보여주며 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 값은 0.5737-2.7021, 0.2751-0.7402 및 0.1488-0.2173이다 (Fig. 6-1a and Table 6-1). 트라이아스기 중기 변암-함양 화강암류 내 염기성 포획암의 Rb 및 Sr 함량은 81.3-95.1 ppm과 252.2-410.2 ppm 이며, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 값과 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 값은 0.710288-0.715415와 0.5737-1.4314로 비슷한 범위를 보여준다.

연구지역인 트라이아스기 말기 변암-함양 엽리상 우백 화강암의 Rb 및 Sr 함량은 65.5-88.0 ppm과 119.3-284.3 ppm 이며, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 값과 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 값은 0.714475-0.717498과 0.8958-1.5907이다 (Fig. 6-1). 하지만 트라이아스기 말기 변암-함양 엽리상 조립 화강암의 Rb 및 Sr 함량은 212.4-267.6 ppm과 116.2-201.7 ppm 이며, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 값과 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 값은 0.718571-0.734657과 3.0505-6.6831 로 엽리상 우백화강암보다 높은 Rb의 함량, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 값 및 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 값을 보여준다 (Fig. 6-1a and Table 6-1). 한편, 상주-김천 트라이아스기 중기 심성암류 인근의 트라이아스기 초기 화강편마암류의 Rb 및 Sr 함량은 46.2 ppm과 1004.7 ppm 이며, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 값과 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 값은 0.710973과 0.1330이다 (Fig. 6-1a and Table 6-1).

Table 6-1. Rb-Sr isotopic data for Middle-Late Triassic and Early Jurassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif, South Korea

Area (Intrusion age)	Rock type	Sample No.	Rb	Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2(σ)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\epsilon\text{Sr}(T)$
Sangju-Gimcheon Middle Triassic (226 Ma)	granodiorite	080304-1	101.5	396.8	0.7402	0.711696	0.000013	0.709316	72.2
		080304-2	59.3	623.6	0.2751	0.710504	0.000011	0.709620	76.5
Sangju-Gimcheon Early Triassic (240 Ma)	granitic gneiss	080304-3	46.2	1004.7	0.1330	0.710973	0.000014	0.710519	89.5
Hamyang Middle Triassic (225 Ma)	granodiorite	080305-7	127.0	377.8	0.9734	0.711675	0.000013	0.708560	61.4
		080305-8	165.1	437.8	1.0918	0.711618	0.000027	0.708124	55.2
Macheon Middle Triassic (223 Ma)	gabbro	080305-6A	73.3	1424.5	0.1488	0.707101	0.000014	0.706629	34.0
		080305-6B	102.9	1369.9	0.2173	0.707279	0.000012	0.706590	33.4
		080305-6C	71.6	1053.2	0.1966	0.707222	0.000011	0.706599	33.5
Bunam Late Triassic (219 Ma)	leuco granite	ATB-4 44	267.6	116.2	6.6831	0.734657	0.000016	0.713842	136.3
		ATB-11 17	212.4	201.7	3.0505	0.718571	0.000023	0.709070	68.5
		NBB-1 12	82.3	152.1	1.5671	0.717511	0.000011	0.712630	119.1
		NBB-5 10	88.0	284.3	0.8958	0.714475	0.000011	0.711685	105.7
		HTB-1 12	65.5	119.3	1.5907	0.717498	0.000011	0.712544	117.9
Bunam Middle Triassic (225 Ma)	grano- diorite	NBB-16 14	112.9	317.8	1.0283	0.714521	0.000011	0.711230	99.3
		NBB-21 4	91.3	396.9	0.6658	0.713779	0.000010	0.711648	105.3
		NTB-5 46	166.2	218.2	2.2064	0.718960	0.000010	0.711899	108.8
		NBB-3 19	76.4	81.9	2.7021	0.720270	0.000010	0.711623	104.9
		NBB3-1 8	135.5	364.6	1.0762	0.714763	0.000011	0.711319	100.6
	mafic enclave	NBB-5 12	124.7	252.2	1.4314	0.715415	0.000010	0.710835	93.7
		NTB-5 22	81.3	410.2	0.5737	0.710288	0.000011	0.708452	59.9
Chilgok Early Jurassic (199 Ma)	granodiorite	080304-4A	95.1	413.3	0.6660	0.708462	0.000017	0.706615	33.3
		080304-4B	86.2	367.9	0.6780	0.707695	0.000010	0.705815	21.9
Gimcheon Early Jurassic (199 Ma)	Hbl grano- diorite	080306-3	85.4	444.1	0.5567	0.710859	0.000013	0.709283	71.24
		080306-4	51.8	564.0	0.2659	0.710114	0.000014	0.709361	72.35
Seongju Early Jurassic (199 Ma)	gabbro	080305-2A	31.4	467.0	0.1946	0.706933	0.000014	0.706393	30.1
	granodiorite	080305-2B	108.1	399.9	0.7822	0.707029	0.000012	0.704860	8.4
	diorite	080305-3	63.5	707.7	0.2597	0.707709	0.000024	0.706989	38.6
Sancheong Early Jurassic (199 Ma)	syenite	080305-5	93.4	12.2	22.3565	0.767789	0.000012	0.705798	21.7
Geochang Early Jurassic (199 Ma)	granodiorite	080306-1	80.0	440.9	0.5248	0.711611	0.000028	0.710133	83.3
Jangsu Early Jurassic (187 Ma)	diorite	080306-7	45.2	517.1	0.2527	0.709223	0.000025	0.708551	60.6

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios were corrected for mass fractionation relative to $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$
 Calculated from CHUR value: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7045$

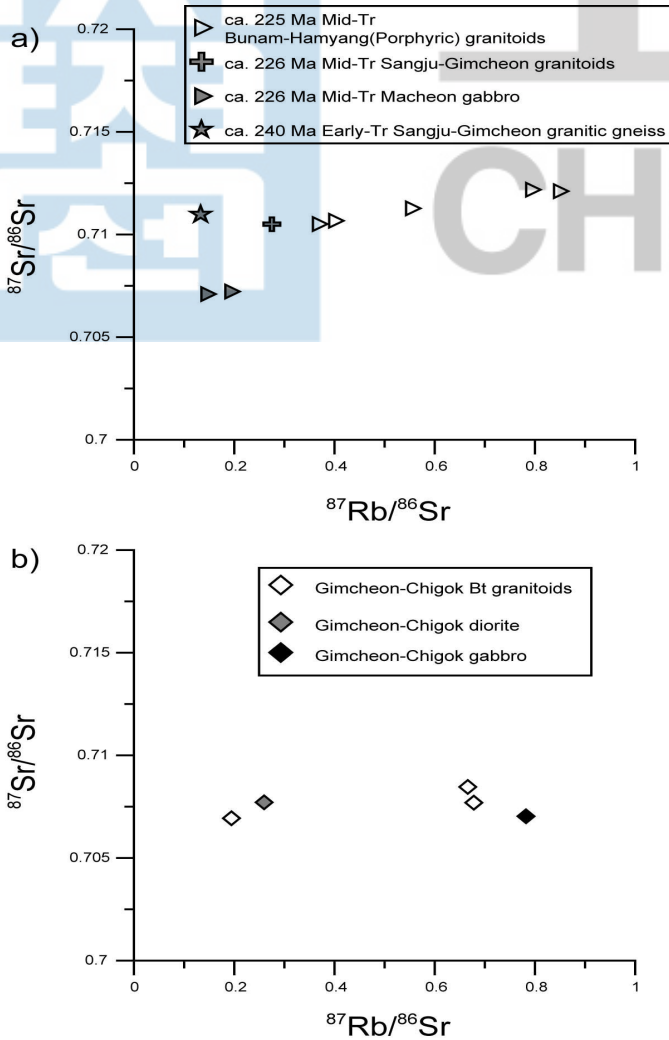


Fig. 6-1. Rb-Sr isotopic diagram of (a) Middle and Late Triassic granitoids and gabbro in the Yeongnam Massif (Bunam-Hamyang, Sangju-Gimcheon and Macheon) together with Early Triassic Sangju-Gimcheon granitic gneiss (Lee et al., 2006) and (b) Early Jurassic granitoids in the Yeongnam Massif (Gimcheon-Chigok granodiorite, diorite and gabbro).

6-2-2. 쥐라기 초기 심성암류

영남육괴 연구지역 내에 분포하는 쥐라기 초기 심성암류에 대한 Rb와 Sr의 함량과 Sr 동위원소비는 Table 6-1에 나타내었고 Fig. 6-1b에 도시하였다. 연구지역인 쥐라기 초기 칠곡-성주 흑운모 화강암류, 김천 각섬석-흑운모 화강암류, 성주의 섬록암, 성주의 반려암, 산청(차황산) 섬장암, 거창 흑운모 화강암 및 장수의 섬록암의 암석표본들의 Rb의 함량은 각각 86.2-108.1 ppm, 51.8-85.4 ppm, 63.5 ppm, 31.4 ppm, 93.4 ppm, 80.0 ppm 및 45.2 ppm이다. Sr의 함량은 367.9-413.3 ppm, 444.1-564.0 ppm, 707.7 ppm, 467.0 ppm, 12.2 ppm, 440.9 ppm 및 517.1 ppm의 각각의 범위를 보여준다.

또한 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 값은 각각 0.707029-0.708462, 0.710114-0.710859, 0.707709, 0.706933, 0.767789, 0.711611 및 0.709223의 범위를 보여주며 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 값은 0.6660-0.7822, 0.2659-0.5567, 0.2597, 0.1946, 22.3565, 0.5248 및 0.2527이다(Fig. 6-1b and Table 6-1).

6-3. Sm-Nd 결과

6-3-1. 트라이아스기 중기-말기 심성암류

연구지역인 트라이아스기 중기 변암-함양 화강암류, 트라이아스기 중기 상주-김천 화강암류와 트라이아스기 중기 마천반려암의 암석표본에 대한 Sm과 Nd의 농도, 각 표본에 대한 Nd의 초기치 및 결핍맨틀 모델연령 등을 Table 6-1에 나타내었다.

트라이아스기 중기 변암-함양 화강암류, 트라이아스기 중기 상주-김천 화강암류와 트라이아스기 중기 마천반려암의 Sm의 함량은 각각 4.17-17.5 ppm, 2.73-3.46 ppm 및 3.34-5.72 ppm이다. Nd의 함량은 24.8-120.1 ppm, 16.6-24.9 ppm 및 17.9-32.5 ppm, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 의 비는 0.0883-0.1016, 0.0840-0.0994 및 0.0911-0.1125과 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 값은 각각 0.511751-0.511807, 0.511615-0.511910 및 0.512288-0.512297의 범위를 보여준다(Fig. 6-2a and Table 6-2).

트라이아스기 중기 변암-함양 화강암류 내 염기성 포획암의 Sm 및 Nd 함량은 4.25-5.68 ppm과 16.6-32.4 ppm 이며, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 값과 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 값은 0.1062-0.1551와 0.511887-0.512017로 비슷한 범위를 보여준다. 연구지역인 트라이아스기 말기 변암-함양 엽리상 우백화강암의 Sm 및 Nd 함량은 13.1 ppm과 83.7 ppm 이며, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 값 과 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 값은 0.0945 과 0.511858이다(Fig. 6-1). 하지만 트라이아스기 말기 변암-함양 엽리상 조립 화강암의 Sm 및 Nd의 함량은 10.5-11.3 ppm과 61.5 ppm이며, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 값과 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 값은 0.1017-0.1033과 0.511521-0.511724로 엽리상 우백화강암과 다소 다른 범위를 보여준다(Fig. 6-2a and Table 6-2).

트라이아스기 중기 변암-함양 화강암류, 트라이아스기 중기 상주-김천 화강암류와 트라이아스기 중기 마천반려암에서 지금까지 보고 된 관입시기를(박계현 외, 2006; 이호선 외, 2006; Turek and Kim, 1995; Kim and Turek, 1996) 적용했을 시 $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ 과 결핍맨틀 Nd 모델연대($\text{T}_{\text{DM}}^{\text{Nd}}$)의 값은 각각 -14.58~-13.10, -17.15~-10.95 및 -4.43~-3.81과 1.63~1.90 Ga, 1.45-2.24 Ga 및 1.07-1.30 Ga의 범위를 보여준다(Table 6-2). 트라이아스기 중기 변암-함양 화강암류 내 염기성 포획암은 변암-함양 트라이아스기 중기 화강암류의 관입시기를 적용하여 $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ 과 결핍맨틀 Nd 모델연대($\text{T}_{\text{DM}}^{\text{Nd}}$)의 값을 구하였으며 이들 값은 -13.46~-9.51과 1.60-3.26 Ga의 범위를 보여준다(Table 6-2). 트라이아스기 말기 변암-함양 엽리상 우백화강암과 엽리상 조립 화강암의 $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ 과 결핍맨틀 Nd 모델연대($\text{T}_{\text{DM}}^{\text{Nd}}$)의 값은 기존 연대측정 결과를 적용 -12.36 및 -19.19~-15.17과 1.65 Ga 및 1.93-2.24 Ga의 범위를 보여준다. 한편, 상주-김천 트라이아스기 중기 심성암류인근의 트라이아스기 초기 화강편마암류의 Sm 및 Nd 함량은 2.47 ppm과 14.4 ppm 이며, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 값과 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 값은 0.1033과 0.511836이다(Fig. 6-2a and Table 6-2). 트라이아스기 초기 화강편마암류의 관입시기(이호선 외, 2006)를 적용했을 시, $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ 과 결핍맨틀 Nd 모델연대($\text{T}_{\text{DM}}^{\text{Nd}}$)의 값은 -12.79 와 1.81 Ga이다(Table 6-2).

Table 6-2. Rb-Sr isotopic data for Middle-Late Triassic and Early Jurassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif, South Korea

Area (Intrusion age)	Rock type	Sample No.	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$2(\sigma)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(T)$	$T_{\text{DM}}(\text{Ga})$	
Sangju-Gimcheon Middle Triassic (226 Ma)	granodiorite	080304-1	2.73	16.6	0.0994	0.511615	0.000020	-17.15	2.04	
		080304-2	3.46	24.9	0.0840	0.511910	0.000010	-10.95	1.45	
Sangju-Gimcheon Early Triassic (240 Ma)	granitic gneiss	080304-3	2.47	14.4	0.1033	0.511836	0.000012	-12.79	1.81	
Hamyang Middle Triassic (225 Ma)	granodiorite	080305-7								
		080305-8								
Macheon Middle Triassic (223 Ma)	gabbro	080305-6A	3.34	17.9	0.1125	0.512288	0.000011	-4.43	1.30	
		080305-6B	3.40	22.6	0.0911	0.512289	0.000019	-3.81	1.07	
		080305-6C	5.72	32.5	0.1065	0.512297	0.000010	-4.09	1.21	
Bunam Late Triassic (219 Ma)	leuco granite	ATB-4 44	10.5	61.5	0.1033	0.511521	0.000013	-19.19	2.24	
		ATB-11 17	11.3	67.5	0.1017	0.511724	0.000009	-15.17	1.93	
		NBB-1 12	13.1	83.7	0.0945	0.511858	0.000009	-12.36	1.65	
		NBB-5 10								
		HTB-1 12								
Bunam Middle Triassic (225 Ma)	grano -diorite	NBB-16 14	6.75	46.3	0.0883	0.511772	0.000011	-13.79	1.67	
		NBB-21 4	4.17	24.8	0.1016	0.511751	0.000025	-14.58	1.90	
		NTB-5 46	17.5	120.1	0.0883	0.511807	0.000012	-13.10	1.63	
		NBB-3 19								
	NBB3-1 8									
	mafic enclave	NBB-5 12	4.25	16.6	0.1551	0.511887	0.000010	-13.46	3.26	
NTB-5 22		5.68	32.4	0.1062	0.512017	0.000010	-9.51	1.60		
Chilgok Early Jurassic (199 Ma)	granodiorite	080304-4A	9.37	63.0	0.0899	0.512176	0.000014	-6.30	1.20	
		080304-4B	2.57	16.7	0.0932	0.512332	0.000017	-3.35	1.03	
Gimcheon Early Jurassic (199 Ma)	Hbl grano -diorite	080306-3								
		080306-4								
Seongju Early Jurassic (199 Ma)	gabbro	080305-2A	3.86	23.1	0.1011	0.512029	0.000010	-9.45	1.51	
	granodiorite	080305-2B	7.81	35.9	0.1317	0.512478	0.000016	-1.46	1.25	
	diorite	080305-3	2.43	13.9	0.1060	0.512563	0.000025	0.86	0.83	
Sancheong Early Jurassic (199 Ma)	syenite	080305-5	6.29	34.9	0.1089	0.512248	0.000014	-5.36	1.31	
Geochang Early Jurassic (199 Ma)	granodiorite	080306-1	6.96	31.5	0.1338	0.512528	0.000011	-0.56	1.19	
Jangsu Early Jurassic (187 Ma)	diorite	080306-7	3.19	22.3	0.0864	0.511841	0.000011	-12.77	1.57	

$$\epsilon_{\text{Nd}}(0) = [({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{sample}}/0.512638 - 1] * 10^4$$

$$T_{\text{DM}} = 1/\lambda * \ln\{1 + [({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{sample}} - 0.51315]/[({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{sample}} - 0.2137]\}. \lambda = 6.54 * 10^{-12} \text{ year}^{-1}$$

$$\epsilon_{\text{Nd}}(T) = [({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{sample}, t} / ({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}, t} - 1] * 10^4$$

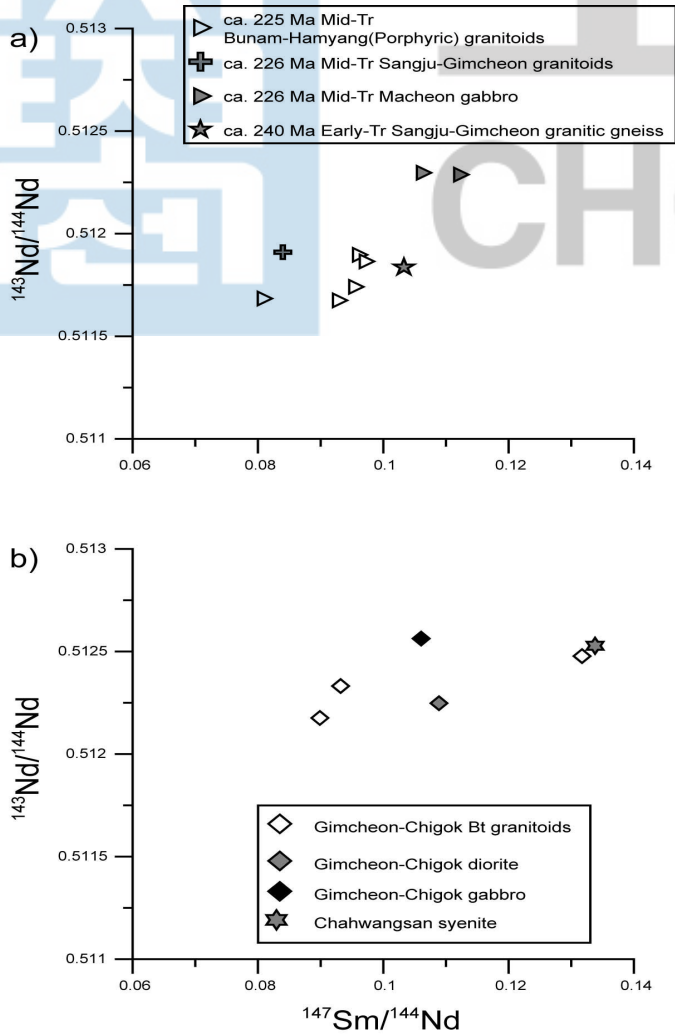


Fig. 6-2. Sm-Nd isotopic diagram of (a) Middle and Late Triassic granitoids and gabbro in the Yeongnam Massif (Bunam-Hamyang, Sangju-Gimcheon and Macheon) together with Early Triassic Sangju-Gimcheon granitic gneiss (Lee et al., 2006) and (b) Early Jurassic granitoids in the Yeongnam Massif (Gimcheon-Chigok granodiorite, diorite and gabbro).

6-3-2. 쥐라기 초기 심성암류

연구지역인 쥐라기 초기 심성암류의 암석표본에 대한 Sm 과 Nd 의 농도, 각 표본에 대한 Nd 초기치 및 결핍맨틀 모델연령등을 Table 6-2에 나타내었다.

연구지역인 쥐라기 초기 칠곡-성주 흑운모 화강암류, 김천 각섬석-흑운모 화강암류, 성주의 섬록암, 성주의 반려암, 산청(차황산) 섬장암, 거창 흑운모 화강암 및 장수의 섬록암의 암석표본들의 Sm 의 함량은 각각 2.43-9.37 ppm, 3.86 ppm, 6.29 ppm, 7.81 ppm, 6.96 ppm, 3.19 ppm 및 6.14 ppm이다. Nd 의 함량은 13.9-63.0 ppm, 23.1 ppm, 34.9 ppm, 35.9 ppm, 31.5 ppm, 22.3 ppm 및 29.1 ppm의 각각의 범위를 보여준다. 또한 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 값은 각각 0.0899-0.1060, 0.1011, 0.1089, 0.1317, 0.1338, 0.0864 및 0.1278의 범위를 보여주며, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 값은 0.512176-0.512563, 0.0512029, 0.512248, 0.512478, 0.512528, 0.511841 및 0.511979이다(Fig. 6-2a and Table 6-2). 쥐라기 초기 심성암류에 대해 지금까지 보고 된 관입시기를(박계현 외, 2005, 2006; Sagong et al., 2006) 적용했을 시 $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ 과 결핍맨틀 Nd 모델연대 ($\text{T}_{\text{DM}}^{\text{Nd}}$)의 값은 주로 영남육괴의 남부에 위치한 칠곡-상주-산청(차황산)은 각각 -6.30~+0.86 및 0.83-1.31 Ga의 범위를 보여주며(Table 6-2), 칠곡-상주-산청(차황산) 쥐라기 초기 심성암류보다 상대적으로 영남육괴의 대륙안쪽에 위치하는 김천, 거창 및 장수의 쥐라기 초기 심성암류는 각각 -12.77~-9.45 및 1.51-2.07 Ga의 범위로 낮은 $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ 와 높은 결핍맨틀 Nd 모델연대($\text{T}_{\text{DM}}^{\text{Nd}}$)의 값을 보여준다(Table 6-2).

7. 영남육괴 트라이아스기 중기-말기 및 쥐라기 초기 심성암류의 암석성인 및 조구조 환경

7-1. 트라이아스기 중기-말기 심성암류의 암석성인 및 조구조 환경

영남육괴에 분포하는 트라이아스기 중기-말기 심성암류의 암석성인(petrogenesis) 및 조구조 환경을 유추하기 위하여, 연구지역을 포함하여 옥천대 및 대륙충돌대로 주목받고 있는 임진강대와 경기육괴 트라이아스기 화강암류의 지화학 성분, Sr-Nd 동위원소 및 지질연대 자료를 비교하였다(박계현 외, 2006; Turek and Kim, 1995; Cheong and Chang, 1997; Kim et al., 2003; Peng et al., 2008; Cho et al., 2001, 2008; Williams et al., 2008; this study). 또한, 고지리적으로 가장 가까운 중국 양쯔지괴(Yangtz Craton)와 대륙연변부의 케터시니안판(Cathaysia Block) 사이에 폭 넓게 인지되고 있는 트라이아스기 심성암류의 지화학 성분, Sr-Nd 동위원소 및 지질연대 자료를 비교하였다(Wang et al., 2005; Yang et al. 2005; Li et al., 2006; Wang et al., 2007 and references therein). 비록, 영남육괴 트라이아스기 화강암류에 대한 전반적인 관입시기 자료가 아직 부족하지만, 영남육괴의 트라이아스기 중기 및 말기 심성암류들의 관입 시기는 226~224 Ma 와 219 Ma 의 두 시기로 나누어 질 수 있다(박계현 외, 2006; Turek and Kim, 1995; Lee et al., 2007; Cho et al., 2008). 기존의 연구결과를 볼 때 영남육괴와 북쪽에 인접한 옥천대는 고지리적으로 인도시안 조산운동으로 인한 양쯔지괴와 케터시니안판의 봉합대(또는 난후와 열곡대)와 케터시니안판과 대비될 가능성이 높다(Fig. 1-1; Williams et al., 2008). 또한 영남육괴는 물론 옥천대에 분포하는 트라이아스기 중기 및 말기의 심성암류는 전형적인 활동성 대륙연변부의 호상형(Arc-type) 화강암류의 미량원소 특징을 보여주어 영남육괴 및 옥천대의 트라이아스기 중기 및 말기 화강암류는 226 Ma부터 219 Ma까지 활동성 대륙연변부에서 섭입과 관련된 초생적 Arc 마그마티즘에 의해 생성되었을 것으로 추정된다.

Pearce et al.(1984)과 Pearce(1996)의 Y+Nb 대 Rb의 조구조 판별도에 기존에 보고된 옥천대 트라이아스기 중기 화강암류 자료(Cheong and Chang, 1997)와 본 연구에서 분석된 영남육괴 트라이아스기 중기 및 말기 화강암류의 자료를 도시하

면 일반적으로 호상열도(volcanic arc) 환경의 영역에 점시된다(Fig. 7-1a). 또한 이들 자료에 대해 Harris et al. (1986)의 Rb/30-Hf-Ta \times 30 의 조구조 판별도에 도시하면 호상열도 환경에 점시된다(Fig. 7-1b). 한편, 트라이아스기 중기 마천 반려암에 대해 Cabanis and Lecolle (1989)의 Y-La-Nb 조구조 판별도를 적용하였다. Y-La-Nb 조구조 판별도는 화산열도 현무암과 대륙 현무암, 해양성 현무암간의 분별에 효율적으로 이용되고 있으며 마천 반려암은 칼크-알칼리 현무암 환경에 도시되어 앞서의 호상열도 환경을 잘 뒷받침 한다(Fig. 7-1c).

영남육괴는 물론 옥천대에 분포하는 트라이아스기 중기 및 말기의 심성암류에 대해 226 Ma, 225 Ma, 223 Ma 및 219 Ma의 관입연대를 적용하여 계산된 $\epsilon_{Nd}(T)$ 값과 Sr 초생값의 결과를 보면, 변암-함양 트라이아스기 중기 화강암류가 1.63-1.90 Ga, 상주-김천 트라이아스기 중기 화강암류가 1.45-2.04 Ga에 형성된 중부 혹은 상부 지각 기원물질로 유래했음을 지시한다(Table 6-1, 6-2 and Fig. 7-2). 트라이아스기 중기 변암-함양 화강암류 내 염기성 포유암 역시 1.60 Ga 및 다소 오래된 3.26 Ga의 오래된 중부 혹은 상부 지각 기원물질로 유래하였지만 트라이아스기 중기 마천 반려암류는 1.07-1.30 Ga의 다소 젊은 상부지각 물질로 유래했음을 지시한다. 이들 영남육괴의 트라이아스기 중기 심성암류는 옥천대의 백록 및 청산의 트라이아스기 중기 화강암류와 비슷한 중부 혹은 상부 지각 기원물질로 유래된 $\epsilon_{Nd}(T)$ 값과 Sr 초생값을 보여준다(Fig. 7-2). 트라이아스기 말기 변암-함양 엽리상 조립 화강암은 엽리상 우백화강암(1.63 Ga)보다 다소 오래된 1.67-1.90 Ga의 중부 지각 물질로 유래하였다. 한편, 상주-김천 트라이아스기 초기 화강편마암류는 1.81 Ga에 형성된 상부 지각 기원물질로 유래했음을 지시한다(Table 6-1, 6-2 and Fig. 7-2).

전반적으로 Sr-Nd 동위원소 자료와 지화학 성분의 특성은 영남육괴 트라이아스기 중기 및 말기 화강암류가 225 Ma-219 Ma에 대륙연변부의 호상부분에서 해양지각의 섭입동안 중부지각 혹은 상부지각의 기원물질로부터 형성된 마그마로부터 생성되었음을 지시해 주고 있다(Fig. 7-2)

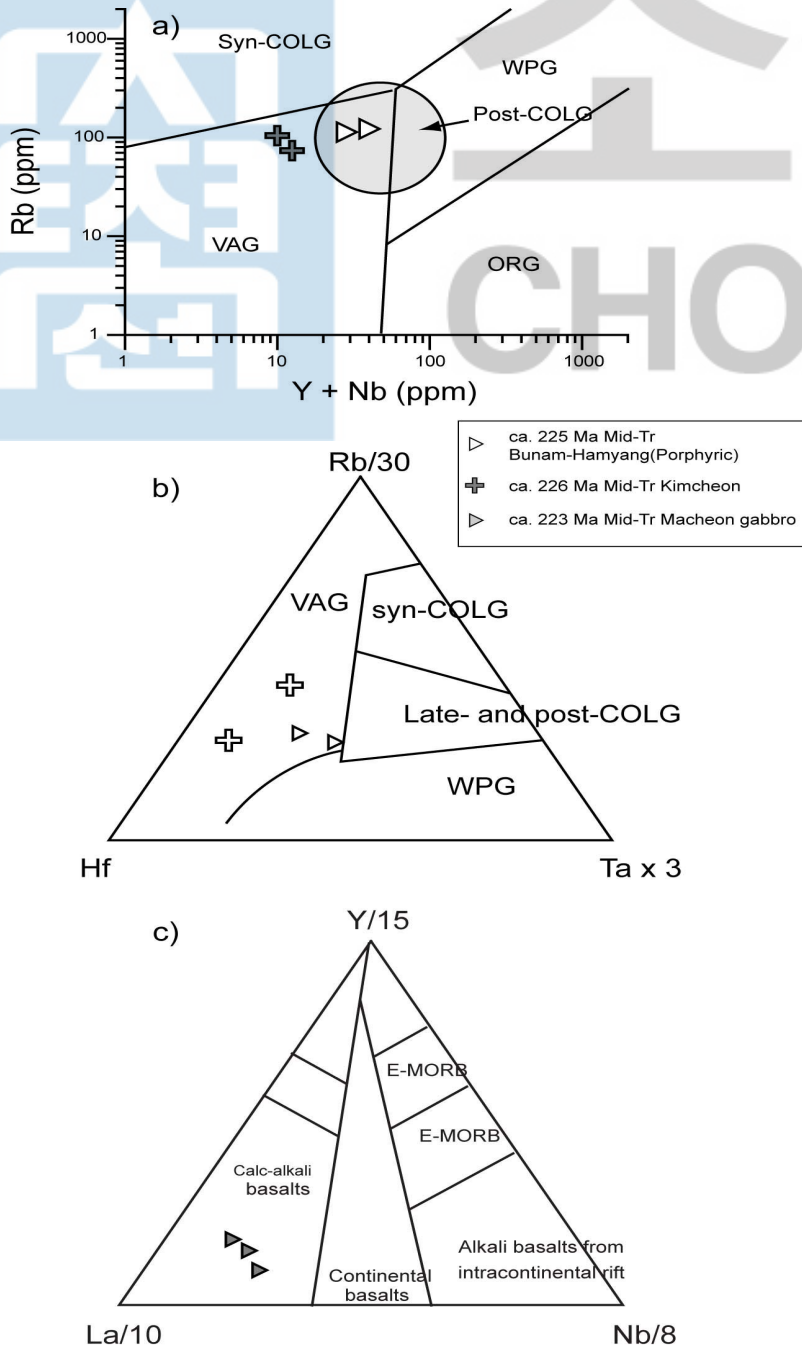


Fig. 7-1. Middle and Late Triassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif plotted on (a) Rb/(Y + Nb) (Pearce et al., 1984; Pearce, 1996), (b) Rb-Hf-Ta (Harris et al., 1986) and (c) Y-La-Nb (Canbis and Lecolle, 1989) tectonic diagrams. The symbols are as in Fig. 5-1.

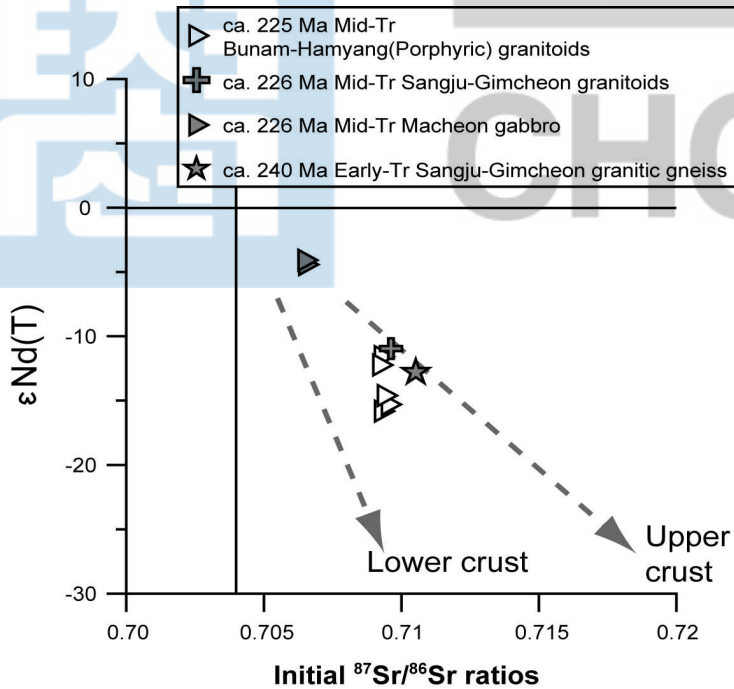


Fig. 7-2. Plot of the initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio versus $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ of Middle Triassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif together with Early Triassic Sangju-Gimcheon granitic gneiss (Lee et al., 2006). The compositional trend from available data is for components of the lower and upper crust; the data are from Jahn et al. (1999).

7-2. 쥐라기 초기 심성암류의 암석성인 및 조구조 환경

영남육괴에 분포하는 쥐라기 초기 심성암류의 암석성인을 유추하기 위하여 연구 지역을 포함하여 영남육괴, 옥천대 및 경기육괴에 분포하는 쥐라기 중기 심성암류의 지화학 성분, Sr-Nd 동위원소 및 지질연대 자료를 비교하였다(박영석 외, 1996, 2001; 나춘기 외, 1997; Park et al., 2008; this study).

남한에서 쥐라기 초기 화강암류는 영남육괴에서만 인지되고 있으며 (박계현 외, 2005, 2006; Kim and Turek, 1996; Sagong et al., 2006), 영남육괴 내에서도 대륙연변부에서 대륙안쪽으로 갈수록 젊어지는 연대적인 분포경향을 가진다(Figs. 7-3 and 7-4). 쥐라기 초기 심성암류들의 관입 시기는 201 Ma에서 185 Ma의 시기로 구분 될 수 있다(박계현 외, 2005, 2006; Kim and Turek, 1996; Sagong et al., 2006). 전반적으로 영남육괴에 분포하는 쥐라기 초기의 심성암류는 트라이아스기 중기 및 말기의 심성암류와 마찬가지로 전형적인 활동성 대륙연변부의 호상형 (Arc-type) 화강암류의 미량원소 특징을 보여주어 영남육괴의 쥐라기 초기 화강암류는 201 Ma부터 185 Ma까지 활동성 대륙연변부에서 섭입과 관련된 초생적 Arc 마그마티즘에 의해 생성되었을 것으로 추정된다.

Pearce et al. (1984)과 Pearce (1996)의 Y+Nb 대 Rb 의 조구조 판별도에 본 연구에서 분석된 영남육괴 쥐라기 초기 화강암류의 자료를 도시하면 일반적으로 호상열도(volcanic arc) 환경의 영역에 점시된다(Fig. 7-5a). 또한 이들 자료에 대해 Harris et al.(1986)의 Rb/30-Hf-Ta \times 30의 조구조 판별도에 도시하면 호상열도 환경에 점시된다(Fig. 7-5b). 한편, 김천(칠곡)부분에서 산출되는 반려암은 Cabanis and Lecolle (1989)의 Y-La-Nb 조구조 판별도에서 칼크-알칼리 현무암 환경에 도시되어 앞서의 호상열도 환경을 잘 뒷받침 한다(Fig. 7-5c).

영남육괴에 분포하는 쥐라기 초기의 심성암류에 대해서 각각의 기존 발표된 관입 연대를 적용하여 계산된 $\epsilon_{Nd}(T)$ 값과 Sr 초생값은 영남육괴의 남부에 위치한 칠곡-상주-산청(차황산)에서 각각 -6.30~+0.86 및 0.83-1.31 Ga의 범위를 보여주며, 상대적으로 영남육괴의 대륙안쪽에 위치하는 김천, 거창 및 장수의 쥐라기 초기 심성암류는 각각 -12.77~-9.45 및 1.51-2.07 Ga의 범위로 낮은 $\epsilon_{Nd}(T)$ 와 높은 결핍맨틀 Nd 모델연대(T_{DM}^{Nd})의 값을 보여준다.(Fig. 7-6 and Table 6-1, 6-2).

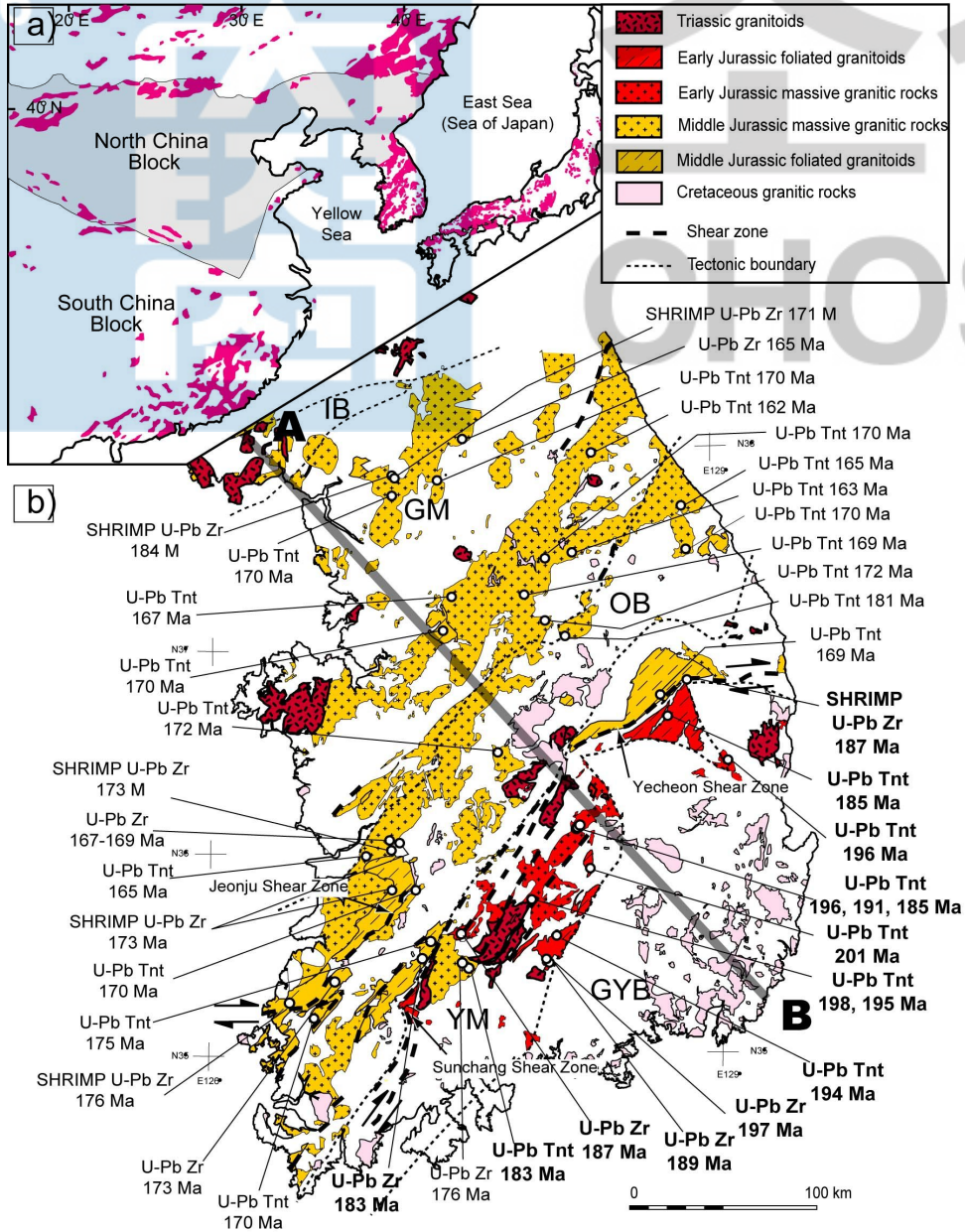


Fig. 7-3. (a) Tectonic map showing the distribution of Mesozoic granitoids in Northeast Asia. (b) Distribution of Mesozoic granitoids in South Korea(modified from Park et al., 2008). Zr, zircon; Tnt, titanite. The Honam shear zone consists of several parallel mylonite zones: the Jeonju, Soonchang, and Yecheon shear zones. The SHRIMP U-Pb zircon and IDTIMS U-Pb zircon and titanite ages for foliated and non-foliated Early and Middle Jurassic granitoids are from Turek and Kim (1995), Ree et al. (2001), Lee et al. (2003), Kim et al. (2003), Kim et al. (2005, 2008a), Sagong et al. (2005), and Park et al. (2005, 2006).

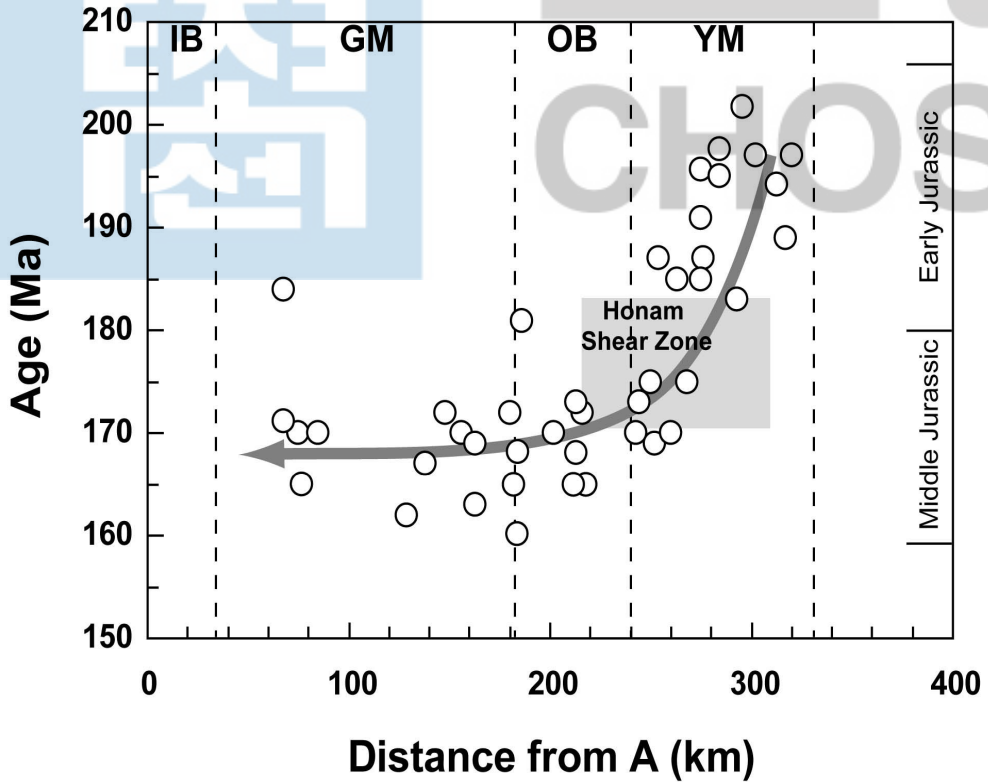


Fig. 7-4. Time-space plot of Early to Middle Jurassic magmatism in South Korea as projected on cross-section A-B in Fig. 7-3.

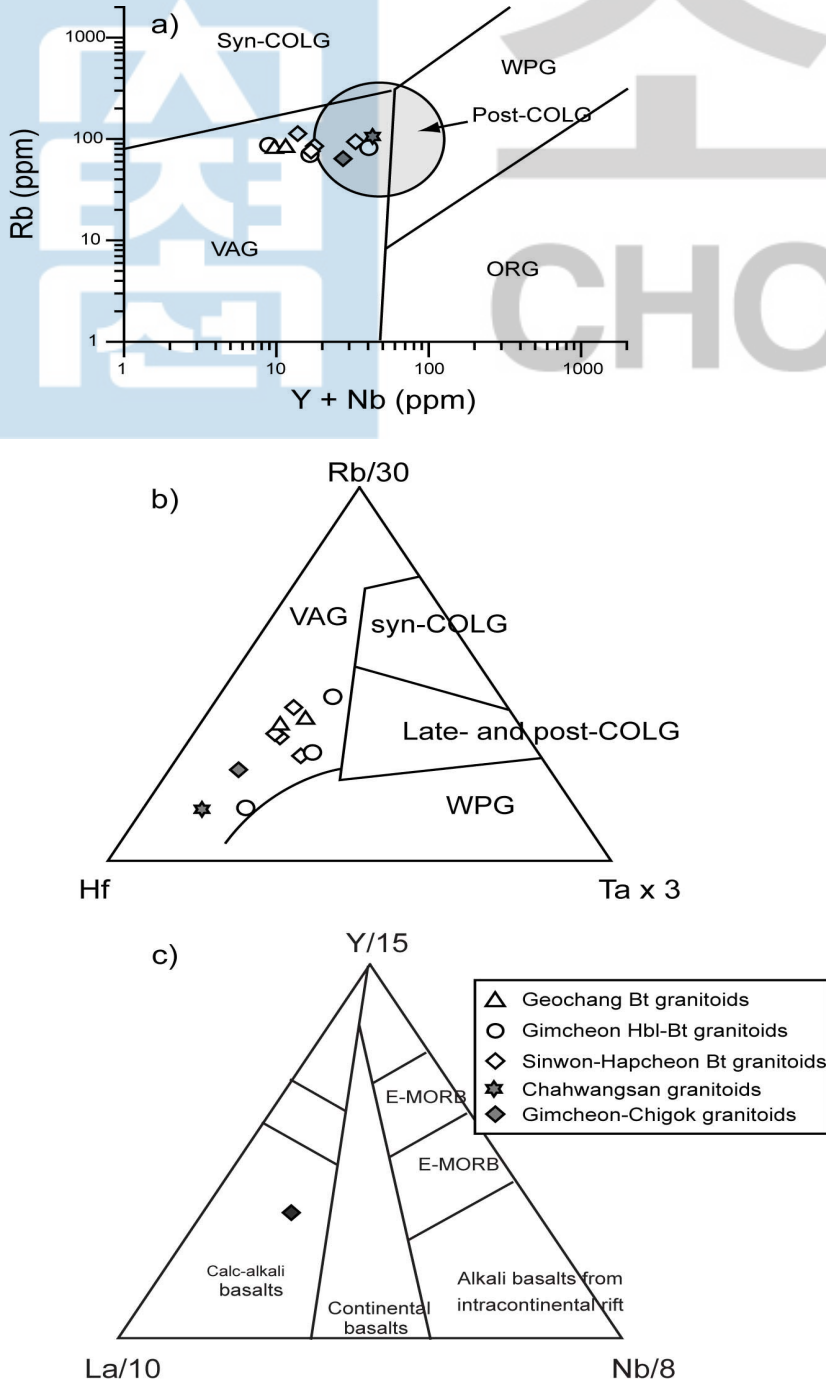


Fig. 7-5. Early Jurassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif plotted on (a) Rb/(Y + Nb) (Pearce et al., 1984; Pearce, 1996), (b) Rb-Hf-Ta (Harris et al., 1986) and (c) Y-La-Nb (Canbis and Lecolle, 1989) tectonic diagrams.

한편, 옥천대와 일부 영남육괴의 북부에 분포하는 쥐라기 중기 심성암류는 상대적으로 쥐라기 초기 심성암류와 비교할 때 다소 오래된 1.78-2.30 Ga에 형성된 중부 혹은 상부 지각 기원물질로 유래했음을 지시한다(Fig. 7-6).

전반적으로 Sr-Nd 동위원소 자료와 지화학 성분의 특성은 영남육괴 쥐라기 초기 심성암류가 205 Ma부터 185 Ma까지 대륙연변부의 호상부분에서 해양지각의 섭입동안 중부지각 혹은 상부지각의 기원물질로부터 형성된 마그마로부터 생성되었음을 지시해 주고 있다.

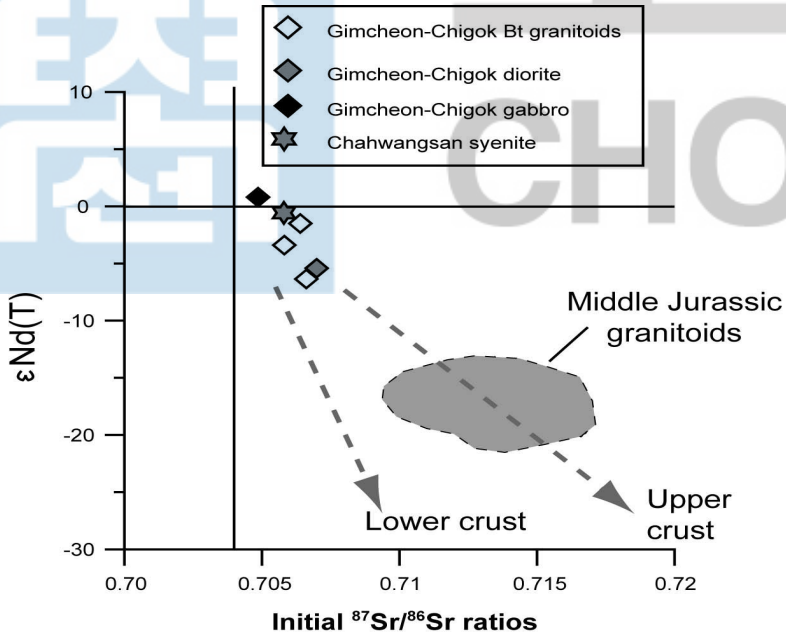


Fig. 7-6. Plot of the initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratio versus $\epsilon_{Nd}(T)$ of Early Jurassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif together with the Middle Jurassic granitoids in the Okcheon Belt (Namwon, Sunchang, Jeonju and Gimje; Park et al., 1996, 2008; Na et al., 1997). The compositional trend from available data is for components of the lower and upper crust; the data are from Jahn et al. (1999).

8. 토 론

동북아시아 대륙 가장자리에서 북동방향의 중생대 저반형 심성암류대(belt)는 남 중국의 광시(Guangxi) 남부지역에서 러시아의 동쪽지역까지 광역적으로 넓게 확장되어있는 하나의 지구조-마그마 대(tectono-magmatic belt)로 대변될 수 있다(Fig. 1-3a; e.g., Isozaki and Maruyama, 1991; Kiminami et al., 1993; Kinoshita, 1995, 2002; Maruyama et al., 1997; Chough et al., 2000; Chen et al., 2003; Kim et al., 2005, 2008a; Sagong et al., 2005). 또한, 동북아시아 대륙 가장자리에서 중생대 유라시아판에 고대양판의 섭입과 관련된 조산형 혹은 비조산형 마그마작용의 증거들은 중생대 대륙판과 해양판의 집진적인 충돌-완화 (collision-relaxation)의 과정과 관련된 지구조 환경 및 진화과정의 중요한 단서를 제공한다(e.g., Li and Li, 2007; Williams et al., 2008). 일반적으로 연구지역인 영남육괴는 옥천대와 같은 대륙 가장자리에서는 해양판의 섭입과 관련된 중생대의 다양한 시기의 심성암류의 생성과 변형(deformation) 에피소드(episode)들이 보고되고 있다(e.g., Hide et al., 1977; Northrup et al., 1995; Chen et al., 2003; Li and Li, 2007). 그러므로 이러한 지역에서 지구조-마그마 환경 및 진화과정 해석은 동북아시아의 중생대 지구조 해석에 매우 중요하다.

1980년대 후반부터 남한에 분포하는 중생대 심성암류에 대해 기원, 판구조적 환경 및 지질연대가 여러 학자들에 의해 활발히 수행되어 왔으며, 중생대 지구조-마그마(tectono-magmatic) 에피소드와 관련된 3 개의 주요 조산작용이 보고되고 있다. 첫 번째 남중국판과 북중국판의 대륙충돌과 관련된 지구조-마그마티즘(e.g., Kim, 1987; Kim, 1996; Sagong et al., 2005; Kim et al., 2006, 2008a, b; Cho et al., 2008; Williams et al., 2008) 혹은 활동성 대륙연변부의 해양판 섭입과 관련된 초생적 호상 마그마티즘(Cheong and Chang, 1997; Williams et al., 2008)과 관련된 페르모-트라이아스기(Permo-Triassic) 송림조산운동 (혹은 인도시안 조산작용)이 있다. 두 번째는 쥐라기 초기부터 백악기 초기까지 아시아판 아래 아지나기판(Izanagi Plate)이라 불리는 해양판의 북서방향의 섭입작용(Maruyama et al., 1997)으로 인한 대보조산작용(혹은 Yanshanian 조산작용)이 있으며, 세 번째 조산작용은 백악기 후기부터 팔레오진까지 아지나기판이 북서방향에서 북쪽방향으로 섭입방향이 바뀌어 야기된 불국사 조산작용으로 중국의 후기 Yanshanian 조산작용과 관련된다(Choi

et al., 2005). 이들 3 개의 주요 조산작용은 각 조산작용동안 다양한 시기의 심성암류의 생성과 변형 에피소드들을 일으켰다.

본 연구와 비교연구들에서 얻어진 영남육괴에 분포하는 트라이아스기 중기-말기 심성암류와 쥐라기 초기의 심성암류 암체들에 대한 지구화학 및 Sr-Nd 동위원소 분석 결과는 대륙연변부의 호상부분에서 해양지각의 섭입동안 중부지각 혹은 상부지각의 기원물질로부터 형성된 마그마로부터 생성되었음을 지시해 주고 있다. 이러한 결과들은 기존에 보고된 연대측정결과로 얻어진 화성활동시기와 더불어 지구조-마그마 환경 및 진화과정해석을 중생대 조산작용에 적용 해석할 수 있다.

남한 내 송림조산운동과 관련된 트라이아스기 중기(231-223 Ma) 심성암류는 연구지역인 영남육괴는 물론 임진강대, 경기육괴 및 북한 내 임진강대에도 다수 보고되고 있으며(조동룡 외, 2001, 2003; 정창식 외, 2004; 박계현 외, 2006; 이호선 외, 2007; Turek and Kim, 1995; Kim and Turek, 1996; Ree et al., 2001; Sagong et al., 2003; Choi et al., 2008; Cho et al., 2008; Williams et al., 2008; Fig. 1-2), 트라이아스기 말기(219 Ma)의 심성암류들은 영남육괴와 옥천대의 경계부 이안 및 대강에서 인지되고 있다(김용준 외, 1998; 조동룡 외, 2003; Turek and Kim, 1995; Cho et al., 2008; this study). 하지만 같은 송림조산운동과 관련된 트라이아스기 중기 심성암화(plutonism)와 관련된 마그마티즘 일지라도, 영남육괴 트라이아스기 중기-말기(231-219 Ma) 심성암류에 대한 지화학적 특징에 대한 본 연구와 가장 최근의 Williams et al. (Lithos, 2008)의 연구결과, 임진강대와 경기육괴의 트라이아스기 중기 심성암류는 트라이아스기 초기-중기 대륙 충돌 후 조산작용에 의한 마그마티즘의 산물로 옥천대와 영남육괴의 트라이아스기 화강암류는 활동성 대륙연변부의 섭입관련 초생적 호상 마그마티즘의 산물로 해석되고 있다. 또한 남중국의 케터시니안관부터 활동성 대륙연변부인 타이완까지는 남한의 옥천대와 영남육괴에서 보고되는 비슷한 시기의 페름기 마그마티즘의 연대와 함께 고태평양판의 섭입과 관련된 트라이아스기 마그마티즘과 변형작용들이 다수 보고되고 있다(Yang et al., 2005; Li et al., 2006; Wang et al., 2007 and references therein). 이러한 연구 결과들은 이들 지역들이 고지리적으로 Indosinian 조산운동시기에 활동성 대륙연변부의 고태평양판의 섭입활동과 대비될 가증성이 높다. 한편, 페름기의 화성작용이 보고되지 않는 경기육괴 및 임진강대는 트라이아스기 중기(249-229 Ma) 북중국판과 양쯔지괴사이의 대륙충돌 후 240-226 Ma의 섭장암을 다수 포함한 마그마티즘

을 경험한 것으로 보고 되고있으며(Williams et al., 2008), 고지리적으로 중국의 북중국판과 양쯔지괴(Yangtz Craton)사이의 대륙충돌대인 친링-다비-수루 봉합대와 대비된다. 최근 경기육괴 서남부 지역에는 세계적인 관심사인 에클로자이트가 나타나며(Fig. 1-2; Guo et al., 2005; Oh et al., 2005; Kim et al., 2006, 2008), 이러한 에클로자이트는 대륙지각과 대륙지각의 섭입 및 충돌에 의해서만 형성될 수 있는 것으로 보고되고 있다(Ames et al., 1993; Li et al., 1993a,b; Chavagnac and Jahn, 1996; Hacker et al., 1998; Zheng et al., 2002; Liu et al., 2004). 또한 임진강대 및 경기육괴 일부에서도 충돌을 경험한 고온-고압의 암류가 발견되고 있어(Oh et al., 2006; Kwon et al., 2008), 경기육괴 및 임진강대가 중국의 대륙충돌대인 친링-다비-수루 봉합대의 연장일 가능성을 강하게 지지한다.

남한에서 가장 두드러지고 광역적인 심성암류의 생성(ca. 40 Ma interval and -400 km wide)과 변형 에피소드들을 야기 시킨 조산작용은 대보조산작용으로, 쥐라기 초기에서 중기까지 해양판인 이자나기판의 섭입작용 동안 동아시아 대륙연변부의 리소스피어의 반응을 반영한다(Maruyama et al., 1997). 하지만 이 시기에 일어난 광역적인 심성암류의 생성과 변형 에피소드들이 이자나기판의 섭입구조 및 대륙연변부의 구조가 어떤 관계를 갖으면서 생성 되었는지는 아직 체계적인 연구가 적은 실정이다. Sagong et al. (2005)는 안데스에서 Jarrad (1986)가 주장한 해양판의 저각의 섭입각도(0-10°)에서 마그마티즘의 휴지기(quiescence)를 갖는 점을 적용하여, 쥐라기의 대보조산운동과 백악기 후기부터 일어난 불국사 조산작용사이에 우리나라와 일본에서 약 50 Ma 동안 마그마티즘이 일어나지 않은 원인으로 이들 이자나기판의 저각의 섭입을 예로 들었다. 또한 저각의 섭입에서 제시되는 빠른 수렴속도(fast convergence rate; Cross and Pilgar, 1982; Jarrard, 1984, 1986)도, 이러한 마그마티즘의 휴지기를 발생시킨 것으로 제시하였다. 일반적으로 해양판의 저각의 섭입에서는 맨틀 웨지(mantle wedge)의 낮아진 지열구조(thermal structure) 때문에 마그마가 생기기 어렵지만(Dumitru et al., 1991), 저각(0-10°) 혹은 편평한 섭입(fault-slab subduction)에서도 해양판의 중력에 의한 커짐(foundering)과 아크(Arc)의 후퇴로 인한 조산 후 마그마티즘이 가까운 남중국에서도 보고되고 있어(Li and Li, 2007), 좀 더 자세한 연구가 필요하다.

남한에 분포하고 있는 쥐라기 심성암류에 대해 자세한 암상분포와 저어콘의 U-Pb, TIMS 및 SHRIMP 연대자료를 바탕으로 대보조산운동동안 형성된 쥐라기

심성암류는 주로 영남육괴에만 분포하는(약 50 km) 쥐라기 초기 심성암류와 옥천대, 경기육괴 및 북한의 일부지역에 광역적으로 분포하는 쥐라기 중기의 두 시기로, 지역 및 시기적으로 두 지구조-마그마틱 대(tectono-magmatic belt)가 확실히 구별된다(Figs. 7-2 and 7-3; e.g., Turek and Kim, 1995; Kim et al., 2003; Oh et al., 2004; Sagong et al., 2005; Kim et al., 2005; Park et al., 2005, 2006). 또한 쥐라기 초기 및 중기 심성암류는 Nd 및 Sr 동위원소 자료들을 바탕으로 아크환경에서 서로 다른 근원물질 의해 기원한 것으로 추정된다(박영석 외, 1996, 2001; 나춘기 외, 1997; this study). 우리나라 옥천대와 지구조적으로 연결성을 갖는 일본의 히다 대에서도 영남육괴의 쥐라기 초기 심성암류와 유사한 Sr-Nd 동위원소 자료(initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7044\text{-}0.7105$, $\epsilon\text{Nd}(T) = -10.3\sim+5.5$)와 지화학 성분의 특성을 보여준다(Arakawa, 1988, 1990; Arakawa and Shinnuma, 1995; Arakawa et al., 2000). 비록 유사한 쥐라기 초기 심성암류의 산출이 일본의 히다대와 영남육괴와 직접적으로 대비될 수는 없지만 이들 시기에 동북아시아의 대륙연변부에서 고각의 유사한 해양판의 섭입작용이 일어났다는 가능성을 제시할 수 있다.

본 연구에서는 남한의 쥐라기 초기에서 쥐라기 중기의 두 지구조-마그마틱 대가 해양판인 이자나기판의 섭입작용 동안, 이자나기판의 섭입구조 및 대륙연변부의 구조가 어떤 관계를 갖으면서 생성 되었는가를 지구조 모델을 통해 제시하고자 한다. 쥐라기 초기 201 Ma에서 185 Ma까지의 심성암류는 영남육괴의 좁은 범위안에 분포하며 영남육괴 내에서도 해양쪽에서 대륙안쪽으로 연대가 점진적으로 감소한다(Figs. 7-2 and 7-3). 이는 영남육괴에서 최소 201 Ma에 섭입이 시작되어 185 Ma에 섭입이 완료됐음을 지시하며, 좁은 지역에서의 약 15 Ma 동안 관입 연대의 급격한 감소경향(Figs. 7-2 and 7-3) 및 지화학적 결과와 함께 이 시기에 고각의 섭입과 관련된 초생적 Arc 마그마티즘이 발생했음을 지시한다(Fig. 8-1a). 이러한 고각의 섭입작용은 오래된 고밀도의 해양 리소스피어와 상부판의 느린 속도 및 판들의 느린 수렴 속도들에 기인하며 trench에 가까운 부분에서 마그마틱 아크를 생성한다(Cross and Pilgar, 1982; Jarrard, 1984, 1986). 고각의 섭입이 약 185 Ma 정도에서 끝난 후 옥천대부터 임진강대까지의 약 180 Ma에서 165 Ma까지의 약 15 Ma 동안 약 300 km 이상의 광역적인 지역에 쥐라기 중기의 마그마티즘이 발생한 사실과 이들 넓은 지역에 비해 쥐라기 중기 심성암들의 대륙안쪽에서의 관입 연대의 완만한 감소는 쥐라기 초기의 해양판의 고각의 섭입이 쥐라기 중기에 완만한 섭입

으로 전환된 초생적 Arc 마그마티즘이 발생했음을 지시한다(Fig. 8). 앞서 토론했듯이, 대륙연변부에서 해양판의 저각의 섭입각도($0-10^\circ$)에서 마그마티즘의 휴지기를 갖는 점(Cross and Pilger, 1982; Jarrad, 1985, 1986; Sagong et al., 2005)을 고려하면, 쥐라기 중기의 Arc 마그마티즘은 섭입각도가 최소 10° 이상의 대략 30° 정도의 중간 각도(moderate angle)를 가진 해양판의 섭입과 관련되었을 것으로 추정된다.

초기 중간 각도를 가진 해양판의 섭입에 의한 충돌에 의해 조산대의 앞쪽(orogenic front)인 옥천대 및 영남육괴 일부 지역에서 180 Ma에서 170 Ma동안 Arc 마그마티즘과 함께 transpressional(compression and strike-slip motion)의 기작력에 의해 주요 전단대(호남전단대)를 활성화 시킨 후 한국 중앙부에 전단작용을 전도 시킨 것으로 추정된다(Fig. 8b-c). 이러한 과정동안 이들 지역에 남포층군 외 반송층군 같은 foreland basin들이 형성되어 활성화 된 것 같다. 최근 남포 및 반송층군 내에 분포하는 동시 퇴적형의 응회암 내 퇴적 저어콘들에 대한 SHRIMP U-Pb 연대자료는 182-172 Ma(Han et al., 2006; Jeon et al., 2007)로 앞서의 가정을 잘 뒷받침한다. 또한 중간 각도를 가진 해양판의 섭입이 중력작용에 의해 더욱 활성화 되면서(Fig. 8d), 옥천대부터 임진강대까지의 170-165 Ma의 광역 마그마티즘을 일으켰으며, 동시에 주요 구조선인 호남전단대나 그 밖의 약한 구조선을 따라 전단운동이 계속적으로 활성화된 것으로 추정된다.

쥐라기 대보조산작용으로 인한 멀티 마그마티즘과 함께 변형 작용들은 쥐라기의 지구조-마그마티즘의 역사를 인지하는데 또 다른 정보를 제공한다. 일반적으로 쥐라기 동안 일어난 변형작용들은 지나 방향인 북동 방향의 구조선을 가지며, 조산대의 앞쪽(orogenic front)인 영남육괴와 옥천대 경계부분에서는 호남전단대와 같은 연성전단대를 보여주며, 좀 더 대륙 안쪽인 옥천대와 경기육괴의 남부는 북동방향의 해양판의 섭입과 충돌에 기인한 북동 방향의 주향과 남동 방향의 vergence를 가지는 습곡과 작은 규모의 단층들이 발달한 양상을 보여준다(Kim, 1996; Ree et al., 2001).

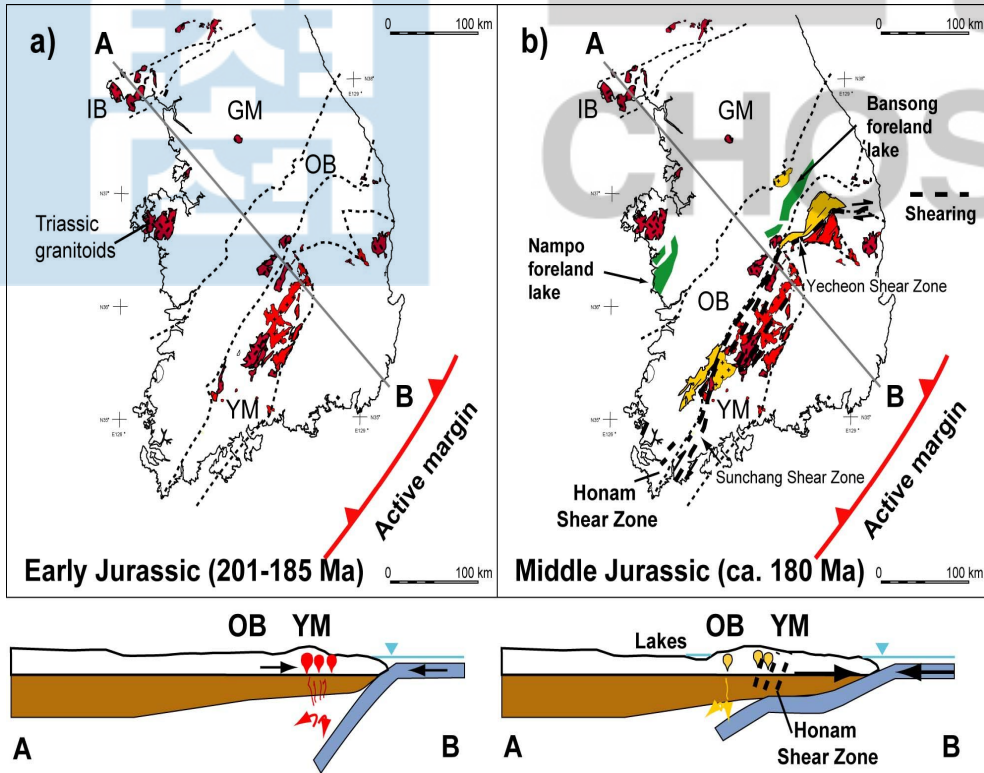


Fig. 8-1. Tectonic model for Early to Middle Jurassic magmatism in South Korea reflecting change from a steeper (a) to a moderate (b-d) angle of subduction (modified from Park et al., 2008). Small and large arrow sizes represent slow and rapid convergence rates of plates.

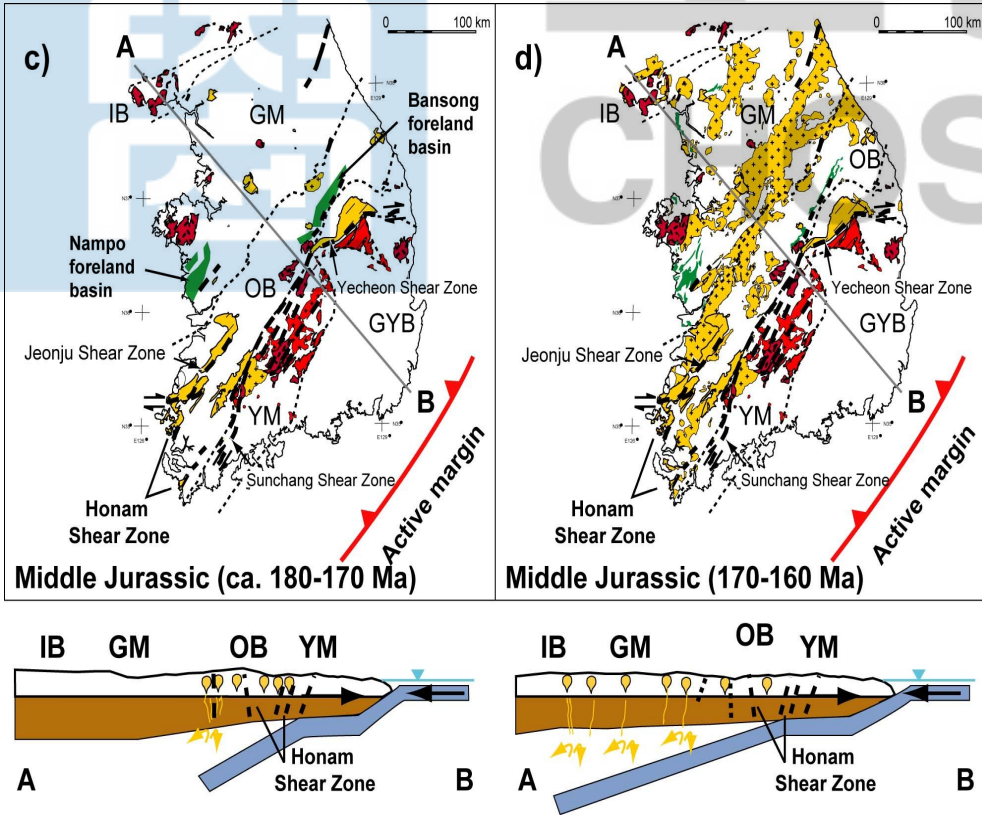


Fig. 8-1. continued

북동-남서 방향에서 동-서 방향으로 가로지르는 수매의 우수향 연성 호남전단대는 공간적으로 크게 순창전단대, 전주전단대 및 예천전단대로 구분되며(Fig. 8b-c), 최근 많은 연구자들에 의한 호남전단대에 대한 구조 및 지질연대 연구는 1990년대 중반이후부터 활발하게 진행되어 왔다(e.g., 주승환과 김성재, 1986; 장태우, 1991, 1996; 권성택과 이진한, 1997; 김성원 외, 2008; Yanai et al., 1985, 1993; Chang, 1990; Cluzel et al., 1991a, b; Kim and Kee, 1994; Turek and Kim, 1995; Kim and Turek, 1996; Otoh and Yanai, 1996; Cho et al., 1999; Otoh et al., 1999; Ree et al., 2001; Lee et al., 2003; Kim et al., 2005a, b; Sagong et al., 2005; Cheong et al., 2006; Kim et al., 2008). Cluzel et al. (1991)은 호남전단대의 전단운동이 북중국대륙에 속하는 영남육괴와 남중국 대륙에 속하는 옥천습곡대가 병치되었음을 주장하였고, 전구조(pre-tectonic) 혹은 동구조(syn-tectonic) 심성암체로 생각되는 순창 및 대강 엽리상 화강암과 이를 관입한 후구조(post-tectonic) 심성암체로 생각되는 비엽리상 남원 화강암체에서 주승환과 김성재 (1986)가 보고한 Rb-Sr 전암연대를 이용하여 이전단운동이 트라이아스기에 있었음을 추정하였다. 또한 Yin and Nie(1993)는 Cluzel et al. (1991)의 해석을 이용하여, 북중국과 남중국 대륙의 트라이아스기 충돌대의 분포를 설명하는 요철모형(indentation tectonic model)에서 호남전단대가 중국대륙의 좌수향 전단감각을 가지는 탄루(Tan-Lu) 단층과 더불어 요철 모양의 대륙이 충돌하는 과정에서 생긴 우수향의 변환단층으로 해석하였지만, 최근의 호남전단대에서의 지질연대들은 이들 부정하고 있으며(Turek and Kim, 1995; Kim and Turek, 1996; Otoh and Yanai, 1996; Cho et al., 1999; Otoh et al., 1999; Ree et al., 2001; Lee et al., 2003; Kim et al., 2005a, b; Sagong et al., 2005; Cheong et al., 2006; Kim et al., 2008), 호남전단대의 우수향 연성 전단운동은 대보조산운동동안 활성화 된 것으로 보고되고 있다. 특히 남한의 옥천대와 영남육괴의 서남부 지역은 쥐라기 중기 화강암류가 남원부터 대륙안쪽의 김제까지 비엽리상의 남원화강암류와 엽리상의 순창화강암류에서 엽리상의 전주화강암류와 비엽리상의 김제화강암류가 순차적으로 감소하는 경향을 보여준다. 순창 엽리상 화강암류와 주변부 남원 비엽리상의 화강암류사이에 호남전단대의 주 지류인 순창전단대에 분포하며 이들 화강암류의 IDTIMS U-Pb 저어콘 및 스피넬연대들은 호남전단대의 주 전단 운동시기가 183 Ma에서 175 Ma사이에 일어난 것을 지시한다(Kim and Turek, 1996; Cho et al., 1999). 좀더 대륙 안쪽인 전주전단대 엽리상 화강암류와

주변부 김제 비엽리상의 화강암류에 대한 SHRIMP U-Pb 저어콘과 IDTIMS U-Pb 저어콘 및 스피넬 연대의 비교 결과는 전주 전단대의 주 전단 운동시기가 173 Ma에서 170 Ma사이로(Lee et al., 1999) 순창전단대의 전단시기보다 후기임을 지시한다. 이러한 연성전단운동들은 쥐라기 중기동안 아크 안이나 아크 뒤쪽의 수렴 지구조 지역에서 성장 발달한 것으로 판단된다.

9. 결 론

(1) 영남육괴에서 트라이아스기 중기-말기 심성암류는 주 연구지역인 변암-함양 지역 및 대강, 마천, 상주, 선산지역들에서 보고되며 기존 SHRIMP U-Pb 저어콘 및 U-Pb 저어콘-티타나이트 연대결과는 226-223 Ma의 트라이아스기 중기와 219 Ma의 트라이아스기 말기 등의 두 시기를 보여준다. 변암-함양, 상주 및 선산지역의 223-226 Ma 트라이아스기 중기 화강암류로 거반정의 K-장석을 포함하는 조립질 화강섬록암 및 화강암으로 대부분 방향성을 가진다. 특히, 주 연구지역인 변암-함양 트라이아스기 중기 화강섬록암은 장방형의 거정질 K-장석을 포함하며 일부 전단대에서 강한 방향성을 보여준다.

(2) 영남육괴 트라이아스기 중기 화강암류는 거정질의 K-장석을 함유하며 활동성 대륙연변부에서 섭입과 관련된 초생적 Arc 마그마티즘에 의해 생성되었고 남중국과 남한의 지구조적 연결 가능성을 제공한다. 트라이아스기 말기 우백질 화강암과 A-type 알칼리 화강암류는 트라이아스기 섭입 조산작용의 종점시기를 지시한다. 쥐라기 초기 화강암은 활동성 대륙연변부에서 해수에 가까운 고각의 섭입과 관련된 초생적 Arc 마그마티즘에 의해 생성되었다.

(3) 영남육괴 트라이아스기 중기-말기 심성암류에 대해서는 주성분원소 전암화학의 Norm을 적용, 석영, 정장석, 조장석 및 회장석의 비율을 화강암류 분류에 이용하였다. 영남육괴 변암-함양, 상주-김천 및 선산에 분포하는 트라이아스기 중기 화강암류는 주로 화강섬록암에서 화강암의 영역에 점시되며(Fig. 5-1 and Table 5-1, 2), 트라이아스기 말기 화강암류는 화강암에서 알칼리 화강암의 영역에 점시된다. 한편, 주 연구지역인 변암-함양 지역 및 비교연구 지역인 선산의 트라이아스기 중기 화강암류에 포획되어 있는 염기성 포획암체는 문조 섬록암 및 섬록암에 분류된다. 전반적으로 영남육괴의 트라이아스기 중기 및 말기 화강암류의 주성분에서 실리카에 대한 알칼리-라임지수, 철의 총 함량 및 알칼리 포화지수의 관계를 알아보면, 전형적인 대륙연변부의 해양지각 섭입과 관련된 코딜러리안형 중생대 화강암류의 성분과 잘 부합된다.

(4) 초생맨틀 값으로 영남육괴 트라이아스기 중기 및 말기 심성암류의 미량원소 성분을 규격화한 거미 성분도상에서는 전체적으로 Ta, Nb, P 및 Ti가 상대적으로 다른 원소들보다 결핍되어 있으며, 저장력 원소들에 해당하는 불호정성 원소인 Rb, Ba, Th 및 U이 부화되어 있고 고장력 원소들이 결핍되어 있는 특징을 보여주며 활동성 대륙연변부의 호상형(Arc-type) 화강암류의 전형적인 Ta-Nb 골(trough)을 잘 보여준다. 한편, 상대적으로 마친 반려암류는 Sr와 Eu 부화되어 있고 일부 시료에 대해 Th, U, Hf 및 Zr이 결핍되어 있지만 트라이아스기 말기 대강 A형 화강암은 전반적으로 저장력 원소에서 고장력 원소가 상대적으로 부화되어 있고, Ba, Sr, P, Eu 그리고 Ti에 대해 강한 부(-) 이상을 보여준다. 이들 지화학적 특징은 A형 화강암의 기원을 지시하는 충주지역 산성질 변성화산암의 미량원소 경향과 유사하다.

(5) 영남육괴는 남중국의 케테시아 블록과 대비되며 이들 지역의 트라이아스기 중기 및 말기 심성암류는 영남육괴 및 옥천대의 트라이아스기 중기 및 말기 심성암류와 잘 대비된다.

(6) 쥐라기 초기 심성암류는 대부분이 영남육괴에서 분포하며, 거창, 함천(신원), 성주, 김천 및 칠곡 지역들에서 엽리상 혹은 괴상으로 산출되며 기존 SHRIMP U-Pb 저어콘 및 U-Pb 저어콘-티타나이트 연대결과는 201-185 Ma의 연대범위를 보여줍니다. 영남육괴 거창, 김천, 성주, 칠곡 및 함천지역의 쥐라기 초기 화강암류는 화강암 분류법에서 대부분은 화강섬록암의 영역에 점시되지만, 김천 감섬석 화강암류는 석영 몬조섬록암 혹은 석영 섬록암의 영역에 점시되기도 한다. 또한 쥐라기 초기 화강암류의 실리카와 알칼리-라임지수 및 실리카와 총 철 함량은 쥐라기의 전형적인 섭입환경인 북아메리카의 Cordilleran 화강암류와 유사한 영역에 점시된다.

(7) 초생맨틀 값으로 영남육괴의 쥐라기 초기 심성암류에 대한 미량원소 성분을 규격화한 거미 성분도상에서도 트라이아스기 중기-말기 심성암류와 마찬가지로 전체적으로 Ta, Nb, P 및 Ti가 상대적으로 다른 원소들보다 결핍되어 있으며 저장력 원소들에 해당하는 불호정성 원소인 Rb, Ba, Th 및 U이 부화되어 있고 고장력 원

소들이 결핍되어 있는 특징을 보여주며 전형적인 Ta-Nb 골을 가지는 활동성 대륙 연변부의 호상형 환경을 지시한다.

(8) 남한의 전체 쥐라기 심성암류 분포와 기존 연대자료를 횡단면으로 알아보면 좁은 지역의 영남육괴에 쥐라기 초기 심성암류가 분포하며 대륙 안쪽으로 갈수록 연대가 감소함을 알 수 있다. 하지만 옥천대부터 경기육괴의 쥐라기 심성암류는 쥐라기 중기의 완만하고 일정한 연대를 지시하는 것으로 보아 쥐라기 초기의 해양판의 고각의 섭입에서 쥐라기 중기에 완만한 섭입으로 전환된 초생적 Arc 마그마티즘이 발생했음을 지시한다. 결과적으로, 영남육괴 내 201-185 Ma의 쥐라기 초기 화강암류는 활동성 대륙연변부에서 고각의 섭입과 관련된 초생적 Arc 마그마티즘에 의해 생성되었으며, 이러한 고각의 섭입작용은 고밀도의 해양판과 상대판의 느린 속도에 기인하며 trench에 가까운 부분에서 생성된 것으로 추정된다.

(9) 영남육괴 내 트라이아스기 중기-말기 및 쥐라기 초기 심성암류에 대한 $\epsilon_{Nd}(T)$ 와 Sr 초생값 또한 상부지각 혹은 일부 중부지각의 기원물질로부터 형성된 마그마로부터 생성되었음을 지시해 주고 있다.

(10) 쥐라기 대보조산작용으로 인한 멀티 마그마티즘과 함께 변형 작용들은 쥐라기의 지구조-마그마티즘의 역사를 인지하는데 또 다른 정보를 제공한다. 일반적으로 쥐라기 동안 일어난 변형작용들은 지나 방향인 북동 방향의 구조선을 가지며, 조산대의 앞쪽(orogenic front)인 영남육괴와 옥천대 경계부분에서는 호남전단대와 같은 연성전단대를 보여주며, 좀 더 대륙 안쪽인 옥천대와 경기육괴의 남부는 북동 방향의 해양판의 섭입과 충돌에 기인한 북동 방향의 주향과 남동 방향의 vergence를 가지는 습곡과 작은 규모의 단층들이 발달한 양상을 보여준다.

참고 문헌

- 김동학, 황재하, 박기화, 송교영, 1998, 한국 25만지질도(부산지질도폭설명서).
- 김성원, 이창윤, 유인창, 2008, 예천전단대 북동부 명호지역 엽리상 화강암류와 압쇄 편마암류에 대한 지구화학 및 Nd-Sr 동위원소 연구. 자원환경지질, 41, 299-314.
- 김용준, 박재봉, 박병규, 2006, 한반도 서남부에 분포하는 중성-염기성 심성암류에 대한 암석학적 연구. 한국지구과학회지, 27, 528-538.
- 김용준, 조동룡, 박영석, 1989, 거창지역에 분포하는 중생대 화성암류에 대한 연령과 조성분 광물의 화학조성. 광산지질, 22, 117-127.
- 김용준, 조동룡, 이창신, 1998, 한반도 남서부 남원 일대에 분포하는 A형 대강 화강암의 암석학, 지화학 및 지구조적 의미. 자원환경지질, 31, 399-413.
- 권성택, 사공희, 2003, 호남전단대의 잠재적 변위 지시자: 가야 지역 회장암체. 암석학회지, 12, 207-209.
- 권성택, 이진한, 1997, 호남전단대의 운동시기에 관한 소고. 지질학회지, 33, 183-188.
- 권용완, 신의철, 오창환, 김형식, 강지훈, 1999, 풍기지역 소백산편마암복합체의 백립암상 변성작용-북부 소백산 육괴의 지각진화와 환경지질. 암석학회지, 8, 183-202.
- 나춘기, 이인성, 정재일, 1997, 전주 및 순창지역에 분포하는 엽리상 화강암류의 성인에 대한 연구 (II) -Sr 및 Nd 동위원소적 특성을 중심으로-. 자원환경지질, 30, 249-262.
- 박계현, 송용선, 박맹언, 이승구, 유호정, 2000, 동북아시아지역 선캠브리아 지괴에 대한 암석학, 지구화학 및 지구연대학적 연구: 1. 지리산 지역 변성암의 변성연대. 암석학회지, 9, 29-39.
- 박계현, 이호선, 정창식, 2005, 영남육괴 중부 김천, 성주 및 안의 지역 화강섬록암의 스피 U-Pb 연대. 암석학회지, 14, 1-11.
- 박계현, 이호선, 송용선, 정창식, 2006, 영남육괴 함양, 거창 및 영주 화강암-화강섬록암의 스피 U-Pb 연대. 암석학회지, 15, 39-48.
- 박영석, 김종균, 김진, 2001, 영광-김제 지역 화강암류의 암석화학적 연구. 자원환경지질, 34, 55-76.
- 박영석, 노영배, 이창신, 1995, 광주-나주지역에 분포하는 화강암류에 대한 Rb-Sr 동위원소 연구. 한국지구과학회지, 16, 247-261.
- 박영석, 박천영, 김진, 류준상, 김용준, 1996, 남원지역에 분포하는 화강암류의 Rb-Sr 동위원소 연구. 한국자원공학회지, 33, 40-60.
- 박종길, 김성원, 오창환, 김형식, 2003, 옥천변성대 북서부 계명산층 내 변성화성암류의 지구화학 및 지구연대학적 연구와 그 지구조적 의의. 암석학회지, 12, 155-169.
- 박재봉, 김용준, 김정민, 1990, 경남 함양지역에 분포하는 화성암류에 관한 암석지화학

- 적 연구. 대한광산지질학회, 23, 105-123.
- 사공희, 좌용주, 1997, 청산 일대에 분포하는 화강암류의 광물조성과 주성분원소 지구화학. 암석학회지, 6, 185-209.
- 송용선, 1999, 소백산육괴 서남부 지리산지역의 반상변정질 편마암에서 산출되는 백립 암질 포획암. 한국암석학회지, 8, 34-45.
- 송용선, 김동연, 박계현, 정창식, 김남훈, 2004, 마천 반려암질 층상관입암. 한국암석학회·한국광물학회 공동학술발표회 논문집, 36-38.
- 송용선, 김동연, 박계현, 2007, 고철질-초고철질 마천관입암의 층상구조 개관. 암석학회지 16, 162-179.
- 송용선, 박계현, 박명언, Cho Lin, Jin Wei, Zhang Xingzhou, 2001, 동북아시아지역 선캠브리아 지괴에 대한 암석학, 지구화학 및 지구연대학적 연구: 2. 경기육괴 일부 변성암의 저어콘 연대. 암석학회지, 10, 95-105.
- 이병주, 김동학, 최현일, 기원서, 박기화, 1996, 한국 25만지질도(대전지질도폭설명서).
- 이병주, 김정찬, 김유봉, 조등룡, 최현일, 전희영, 김복철, 1997, 한국 25만지질도(광주지질도폭설명서).
- 이상만, 1973, 우리나라의 지체구조와 변성상 및 변성상계와의 관계성연구. 지질학회지, 9, 11-23.
- 이상만, 1980, 지리산(하동-산청)지역의 변성니질암의 변성작용에 관한 연구. 지질학회지, 16, 1-15.
- 이상만, 송용선, 1989, 소백산육괴 중앙부 선캠브리아 변성암류의 암석학적 연구. 지질학회지, 25, 451-468.
- 이승렬, 이병주, 조등룡, 기원서, 고희재, 김복철, 송교영, 황재하, 최범영, 2003, 전주전단대 화강암류의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연령측정: 호남전단대의 운동시기에 대한 고찰, 한국암석학회·한국광물학회 공동학술발표회 논문집, 55.
- 이호선, 송용선, 박계현, 2003, 중부 영남육괴 김천일대 선캠브리아기 편마암의 저어콘 화학연대. 암석학회지, 11, 157-168.
- 이호선, 송용선, 정창식, 박계현, 2006, 상주화강암과 김천화강암의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대 보고. 대한지질학회 정기총회 및 추계학술발표회, 초록집, 108.
- 오창환, 김정빈, 박영석, 김성원, 2006, 경기육괴의 고원생대 암류들에 대한 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대와 그 의의. 지질학회지, 42, 587-606.
- 오창환, 전은영, 박배영, 안건상, 이정후, 2000, 소백산 육괴 서남부인 승주-순천 일대의 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암의 변성진화과정. 암석학회지, 9, 121-141.
- 윤현수, 홍세선, 2003, 김천남부에 분포하는 화강암류의 지구화학. 암석학회지, 12, 16-31.
- 장태우, 1996, 순창전단대내 화강분쇄암의 열구조 발달: 1. 입자크기 감소. 지질학회지, 32, 421-430.

- 정연중, 이기욱, Kamo, S.L., 정창식, 2008, 경기육괴 동부 맨거라이트에 대한 저어콘 단일입자 열이온화질량분석법 연대측정. 지질학회지, 44, 425-434.
- 정창식, 길영우, 김정빈, 정연중, 임창복, 2004, 영남육괴 북동부 죽변 지역 선캠브리아기 기반암류의 지수화학적 특징. 지질학회지, 40, 481-499.
- 정창식, 정연중, 길영우, 2004, 중부 옥천대의 중생대 화성활동 시기: 청주-대전 지역 화강암질암의 U-Pb 스핀연대. 한국암석학회·한국광물학회 공동학술발표회 논문집, 21.
- 주승환, 김성재, 1986, 영남육괴 Rb-Sr 연대측정연구(II): 지리산 남서부 일대 화강암질편마암 및 편마상 화강암류. KIER, KR-86-7, 7-34.
- 조동룡, 김유봉, 2003, 장계-장수 지역의 영남육괴 선캠브리아기 기반암류에 대한 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대 측정: 고원생대의 지질사건. 대한지질학회추계학술발표회 초록집, 77.
- 조동룡, 최범영, 김용준, 2003, 대강 화강암과 함창 화강암의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대 측정: 220Ma의 A형 화성활동. 대한지질학회 추계학술발표회 초록집, 101.
- 조문섭, 2001, 이온현미분석기를 사용한 경기육괴 변성암류의 U-Pb 저어콘 연대: 남중국지괴와의 대비 가능성. 한국광물학회-한국암석학회 공동학술발표회 요약문집, 141-142.
- 조문섭, 2005a, 임진강대 연구 10년의 발자취: 트라이아스기 대륙충돌대. 2005년도 한국지질학회 공동학술발표회 논문집, 8.
- 조문섭, 2005b, 제 7 차 국제 에클로자이트 회의(International Eclogite Conference) 참가 오스트리아 알프스(Hohe Tauern) 야외답사. 암석학회지, 14, 191-194.
- 좌용주, 우리나라 중생대 화강암의 계층적 구분-삼척기 화강암의 예. 한국암석학회·한국광물학회 공동학술발표회 논문집, 22-25.
- 최진범, 좌용주, 김건기, 황길찬, 2006, 거창화강석 품질기준 설정을 위한 광물조성 분석. 한국광물학회지, 19, 363-381.
- Ames, L., Zhou, G., Xiong, B., 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implication for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China. *Tectonics* 15, 472-489.
- Arakawa, Y., 1988. Two contrasting types of Rb-Sr isotope systems for the Funatsu granitic rocks in the northeastern part of the Hida belt, central Japan. *Jour. Min. Econ. Geol.* 83, 374-387.
- Arakawa, Y., 1990. Two types of granitic intrusions in the Hida belt, Japan: Sr isotopic and chemical characteristics of the Mesozoic Funatsu granitic rocks. *Chemical Geology* 85, 101-117.
- Arakawa and Shinmura, T., 1995. Nd-Sr isotopic and geochronological characteristics of two contrasting types of calc-alkaline plutons in the Hida belt, Japan.

- Chemical Geology 124, 217-232.
- Arakawa, Y., Saito, Y. and Amakawa, H., 2000. Crustal development of the Hida belt, Japan: Evidence from Nd-Sr isotopic and chemical characteristics of igneous and metamorphic rocks. *Tectonophysics* 328, 183-204.
- Briqueu, L., Bougault, H., and Joron, J. L. 1984. Quantification of Na, Ta, Ti, and V anomalies in magmas associated with subduction zones-petrogenetic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.* 68, 297-308.
- Cabanis, B., and Lecolle, M. 1989. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des procesus de melange et/ou de contamination crustale. *C. R. Acad. Sci. Ser. II* 309, 2023-2029.
- Chang, E.Z., 1996, Collisional orogene between north and south China and its eastern extension in the Korean Peninsula. *J. South Asian Earth Sci.*, 13, 267-277.
- Chang, T.W. 1990. Relative timing of shear zone formation and granite emplacement in the Yechon Shear Zone, Korea. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v.23, p.453-463.
- Chavagnac, V., Jahn, B.-M., 1996. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonics implications. *Chemical Geology* 133, 29-51.
- Chen, G. N., Grapes, R., and Zhang, K. 2003. A model for Mesozoic crustal melting and tectonic deformation in Southeast China. *Int. Geol. Rev.* 45, 948 - 955.
- Cheong, C. S., and Chang, H. W. 1997. Sr, Nd, and Pb isotope systematics of granitic rocks in the central Ogcheon Belt, Korea. *Geochem. J.* 31, 17-36.
- Cheong, C. S., Kee, W.-S., Jeong, Y.-J., and Jeong, G. Y. 2006. Multiple deformations along the Honam shear zone in southwestern Korea constrained by Rb-Sr dating of synkinematic fabrics: implications for the Mesozoic tectonic evolution of northeastern Asia. *Lithos* 87, 289-299.
- Cheong, C.S., Kwon, S.-T., Park, K.-H., 2000. Pb and Nd isotopic constraints on Paleoproterozoic crustal evolution of the northern Yeongnam Block, South Korea. *Precamb. Res.* 19, 207-220.
- Cho, D.-L., Kwon, S. T., Sagong, H., Cheong, C. S., Armstrong, R., 2001. Precise cooling histories of three neighboring pluton in the central Okcheon belt: Implication for magma movement rate and tectonics. Abstract volume for the conference of the Geological Society of Korea, 90.
- 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* 105, 191-200.
- Cho, K. H., Takagi, H., and Suzuki, K. 1999. CHIME monazite age of granitic rocks in the Sunchang shear zone, Korea: timing of dextral ductile shear. *Geosci. J.* 3, 1-16.
- Choi, S.-G., Kwon, S.-T., Ree, J.-H., So, C. S., and Pak, S. J. 2005. Origin of Mesozoic gold mineralization in South Korea. *Isl. Arc* 14, 102-114.
- Choi, S.G., Rajesh, V.J., Seo, J., Park, J.W., Oh, C.W., Park, S.J., 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* doi: 10.1111/j.1440-1738.2008.00622.x
- Chough, S. K., Kwon, S. T., Ree, J. H., and Choi, D. K. 2000. Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: a review and new view: *Earth-Sci. Rev.* 52, 175-235.
- Cluzel, D., Jolivet, L. and Cadet, J.-P. 1991a, Early Middle Paleozoic intraplate orogeny in the Ogcheon Belt (South Korea): A new insight on the Paleozoic buildup of East Asia. *Tectonics*, 10, 1130-1151.
- Cluzel, D., Lee, B.J. and Cadet, J.-P. 1991b, Indosinian dextral ductile system and synkinematic plutonism in the southwest of the Ogcheon belt (South Korea). *Tectonophysics*, 194, 131-151.
- Cross, T. A., and Pilger Jr, R. H. 1982. Controls of subduction geometry, location of magmatic arcs, and tectonics of arc and back-arc regions. *Bull. Geol. Soc. Am.* 93, 545-562.
- Dumitru, T. A., Gans, P. B., Foster, D. A., and Miller, E. L. 1991. Refrigeration of the western Cordilleran lithosphere during Laramide shallow-angle subduction, *Geology* 19, 1145-1148.
- Ernst, W. G., and Liou, J. G., 1995, Constrasting plate-tectonic styles of the Qinling-Dabie-Sulu and Franciscan metamorphic belts. *Geology* 23, 353-356.
- Frost, B. R., Barnes, C. G., Collins, W. J., Arculus, R. J., Ellis, D. J., and Frost, C. D. 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *J. Petrol.* 42, 2033-2048.
- Guo, J., Zhai, M., Oh, C.W., Kim, S.W., 2005. 230 Ma eclogite from Bibong, Hongseong area, Gyeonggi Block, South Korea: HP metamorphism, zircon SHRIMP U-Pb ages and tectonic implication. 7th International Eclogite Conference, *Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft*

- (Abstracts) volume 150, 3-9 July, Seggau, Austria, 47.
- Hacker, B., Ratschbacher, L., Webb, L., Ireland, T., Walker, D., Dong, S., 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen, China. *Earth and Planetary Science Letters* 161, 215-230.
- Han, R., Ree, J.-H., Cho, D.-L., Kwon, S.-T., and Armstrong, R. 2006. SHRIMP U-Pb zircon ages of pyroclastic rocks in the Bansong Group, Taebaeksan Basin, South Korea and their implication for the Mesozoic tectonics. *Gondwana Res.* 9, 106-117.
- Harris, N.B.W., Pearce, J.A., Tindle, A.G., 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward, M.P., Ries, A.C. Eds., *Collision Tectonics*. Geological Society of London Special Publication 19, pp. 67-68.
- Hide, T. W. C., Uyeda, S., and Kroenke, L. 1977. Evolution of the western Pacific and its margin. *Tectonophysics* 38, 145-152.
- Isozaki, Y., and Maruyama, S. 1991. Studies on orogeny based on plate tectonics in Japan and new geotectonic subdivision of the Japanese islands. *J. Geography* 100, 697 - 761 (in Japanese with English abstract).
- 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.
- Jarrard, R. D. 1984. Prediction of continental structural style from plate tectonic parameters (abstract), *Eos Trans. AGU*, 65, 1095.
- Jarrard, R. D. 1986. Relations among subduction parameters. *Rev. Geophys.* 24, 217-284.
- Jeon, H., 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. *J. Geol.* 115, 525-539.
- Kee, W.-S., and Kim, J. H. 1992. Shear criteria in mylonites from the Soonchang Shear Zone, the Hwasun Coalfield, Korea. *J. Geol. Soc. Korea* 28, 426-436.
- Kim, B.C., Choi, S.J., Suzuki, K., Adachi, M., Obayashi, T., and Yu, K.M., 1997. Provenance of Cretaceous sandstones in the southeastern Yongdong Basin, Korea: CHIME geochronology of detrital monazites. *Geoscience Journal* 1: 37-49.
- Kim, C.-B., Chang, H.-W., and Andrew, T. 2003. U-Pb zircon ages and Sr-Nd-Pb isotopic compositions for Permian-Jurassic plutons in the Ogcheon belt and

- Ryeongnam massif, Korea: tectonic implications and correlation with the China Qinling-Dabie belt and the Japan Hida belt. *Isl. Arc* 12, 366-382.
- Kim, H, Cheong, C.-S., Cho, M. 2006. The effect of allanite inclusions on U-Pb step-leaching ages and Sm-Nd isotope systematics of garnet the Ogcheon metamorphic belt, South Korea. *Chemical Geology* 236, 27-41.
- Kim, J., Cho, M., 2003. Low pressure metamorphism and leucogranite magmatism, northeastern Yeongnam Block, Korea: implication for Paleoproterozoic crustal evolution. *Precamb. Res.* 122, 235-251.
- Kim, J. H. 1996. Mesozoic tectonics in Korea. *J. Southeast Asian Earth Sci.* 13, 251-265.
- Kim, J.H. and Kee, W.S. 1994. Structure characteristics of the Soon-chang Shear Zone, Korea. *Jour. Southeast Asian Earth Sci.*, 9, 417-428.
- Kim, O. J. 1987. Tectonic evolution. In: Lee, D. S. (ed), *Geology of Korea*, Seoul, Kyohaksa pp. 235-262.
- Kim, S. W., Kwon, S., and Ryu, I.-C. 2008a. Geochronological constraints on multiple deformations of the Honam Shear Zone, South Korea. *Gondwana Res.* in press.
- Kim, S. W., Oh, C. W., Choi, S. G., Ryu, I.-C., and Itaya, T. 2005. Ridge subduction-related Jurassic plutonism in and around the Okcheon Metamorphic Belt, South Korea, and implications for Northeast Asian tectonics. *Int. Geol. Rev.* 47, 248-269.
- Kim, S.W., Oh, C.W., Ryu, I.-C., Williams, I.S., Sajeev, K., Santosh, M., Rajesh, V.J., 2006a. Geochemical and geochronological characteristics of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks of the Okcheon Belt, South Korea and their implications for rifting in Rodinia. *J. Geol.* 114, 717-733.
- 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. 2006b. 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., and Oh, C. W. 2008b. 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 Res.* 162, 475-497.
- Kiminami, K.; Miyashita, S., and Kawabata, K. 1993. Active ridge-forearc collision

- and its geological consequence: an example from Late Cretaceous southwest Japan. *Mem. Geol. Soc. Japan* 42, 167-182 (in Japanese with English abstract).
- Kinoshita, O. 1995. Migration of igneous activity related to ridge subduction in southwest Japan and the East Asian continental margin from the Mesozoic to the Paleogene. *Tectonophysics* 245, 25-35.
- Kinoshita, O. 2002. Possible manifestations of slab window magmatism in Cretaceous southwest Japan. *Tectonophysics* 344, 1-13.
- Kobayashi, T. 1953. *Geology of South Korea*. Tokyo University press.
- Kwon, S., Sajeev, K., Mitra, G., Park, Y., Kim, S.W., Ryu, I.-C., Evidence of Permo-Triassic collision in Far East Asia: the Korean collisional orogen, *Earth and Planetary Science Letters*, submitted.
- Lee, C.-R., Lee, Y.-J., Hayashi, M., 1992. Petrology of Jurassic granitoids in the Hamyang-Geochang area, Korea. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, 25, 447-461.
- Lee, S.G., Masuda, A., Shimizu, H., Song, Y.S., 2001. Crustal evolution history of Korean Peninsula in East Asia: the significance of Nd, Ce isotopic and REE data from the Koran Precambrian gneiss. *Geochem. J.* 35, 175-187.
- Lee, S.-G., Shin, S.-C., Jin, M.-S., Ogasawara, M., Yang M.K., 2005. Two Paleoproterozoic strongly peraluminous granitic plutons (Nonggeori and Naedeokri granites) at the northeastern part of Yeongnam Block Korea: Geochemical and isotopic constraints in East Asian crustal formation history. *Precamb. Res.* 139, 101-120.
- Lee, S.R., Cho, D.-L., Cho, M., Wu, F.-Y., Kim, H., Jeon, H., 2007. Heejin Jeon Hf isotopic evidence for Paleoproterozoic (> 3.5 Ga) crustal components in the Korean Peninsula. *Geosci. J.* 11, 271-277.
- Lee, S.R., 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.
- Lee, S.R., Cho, M., Hwang, J.H., Lee, B., Kim, Y., Kim, J., 2003. Crustal evolution of the Gyeonggi Block, South Korea: Nd isotopic evidence and implications for continental growths of East Asia. *Precamb. Res.* 121, 25-34.
- Lee, S.R., Cho, M., Yi, K.-W., Stern, R., 2000. Early Proterozoic granulites in central Korea: tectonic correlation with Chinese cratons. *Journal of Geology* 108, 729-738.
- Li, S., Xiao, Y., Liu, D., Chen, Y., Ge, N., Zhang, Z., Sun, S., Cong, B., Zhang, R., Hart, S.R., Wang, S., 1993a. Collision of the North China and Yangtze blocks

- and formation of coesite-bearing eclogites: timing and processes. *Chemical Geology* 109, 89-111.
- Li, S. Chen, Y. Z., Ge, N. J., Liu, D. L., Zhang, Z. M., Zhang, Q. D., Zhao, D. M., 1993b. U-Pb zircon ages of eclogite and gneiss from Jiaonan group in Qingdao area. *Chin. Sci. Bull.* 38, 1773 - 1777. in Chinese.
- Li, X.H., Li, Z.X., Li, W.X., Wang, Y., 2006, Initiation of the Indosinian orogeny in South China: Evidence for a Permian magmatic arc on Hainan Island. *Journal of Geology* 114, 341-353.
- Li, Z.-X., and Li, X.-H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: a flat-slab subduction model. *Geology* 35, 179-182.
- Liu, J., Xu, Z., Liou, J.G., Song, B., 2004. SHRIMP U-Pb ages of ultrahigh-pressure and retrograde metamorphism of gneisses, south-western Sulu terrane, eastern China. *Journal of Metamorphic Geology* 22, 315-326.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G., and Terabayashi, M. 1997. Paleogeographic maps of the Japanese islands: plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island Arc* 6, 121-142.
- Metcalf, I., 2006. Palaeozoic and Mesozoic tectonic evolution and palaeogeography of East Asian crustal fragments: The Korean Peninsula in context. *Gondwana Research* 9, 24-46.
- Northrup, C. J., Royden, L. H., and Burchfield, B. C. 1995. Motion of the Pacific plate to Eurasian and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia. *Geology* 23, 719-722.
- Oh, C. W., 2006. A new concept on tectonic correlation between Korea, China, and Japan: Histories from the Late Proterozoic to Cretaceous. *Gondwana Res.* 9, 47-61.
- Oh, C.W. Kim, S.W., 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., Sajeev, K., 2005. First Finding of Eclogite Facies Metamorphic Event in South Korea and Its Correlation with the Dabie-Sulu Collision Belt in China. *J. Geol.* 113, 226-232.
- Oh, C. W., Kim, S. W., Ryu, I.-C., Okada, T., Hyodo, H., and Itaya, T. 2004. Tectono-metamorphic evolution of the Okcheon Metamorphic Belt, South Korea: Tectonic implications in East Asia. *Isl. Arc.* 13, 387-402.
- 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. *Int. Geol. Rev.* 49, 636–657.
- Ohta, K. and Itaya, T., 1989. Radiometric ages of granitic and metamorphic rocks in the Hida metamorphic belt, central Japan. *Bull. Hiruzen Res. Inst. Okayama Univ. of Sci.*15, 1–25. (in Japanese with English abstract).
- Otoh, S., and Yanai, S. 1996. Mesozoic inverse wrench tectonics in far east Asia: examples from Korea and Japan. In: Yin, A., Harrison, M. (Eds.), *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge University Press, Stanford, 401–419.
- Otoh, S., Jwa, Y.J., Nomura, R., and Sakai, H. 1999. A preliminary AMS (anisotropy of magnetic susceptibility) study of the Namwon granite, southwest Korea. *Geosci. J.* 3, 31–41.
- Park, Y. S., Kee, W.-S., Jeong, Y.-J., Park, Y. and Kim, S. W., 2008. Multiple Jurassic Intrusions in South Korea: The signature of Paleo-Pacific (Izanagi) plate subduction. *J. Geol.*, submitted.
- Peacock, M.A., 1931. Classification of igneous rock series. *J. Geol.* 39, 54–67.
- Pearce, J.A., 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes* 19, 120–125.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* 25, 956–983.
- 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, 637–647.
- Ree, J. H., Cho, M., Kwon, S. T., Nakamura, E., 1996. Possible eastward extension of Chinese collision belt in South-Korea: the Imjingang belt. *Geology* 24, 1071–1074.
- Ree, J.-H., Kwon, S.-H., Park, Y., Kwon, S.-T., and Park, S.-H. 2001. Pre- and post-tectonic emplacements of the granitoids in the central-southern Okchon belt, South Korea: implications for the timing of the strike-slip shearing and thrusting. *Tectonics* 20, 850–867.
- Sagong, H., Cheong, C.-S., Kwon, S.-T., 2003. Paleoproterozoic orogeny in South Korea: evidence from Sm-Nd and Pb step-leaching garnet ages of Precambrian basement rocks. *Precambrian Research* 122, 1–21.
- Sagong, H., Kwon, S.-T., and Ree, J.-H. 2005. Mesozoic episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics* 24, doi:10.1029/2004TC001720.
- Shibata, K. and Nozawa, T., 1978. K-Ar ages of hornblende from the Hida

- Metamorphic Belt. *Jour. Japan Assoc. Min. Petrol. Econ. Geol.* 73, 137-141. (in Japanese with English abstract).
- Shibata, K. and Nozawa, T., 1984. Isotopic ages of the Funatsu Granitic Rocks. *Jour. Japan Assoc. Min. Petrol. Econ. Geol.* 79, 289-298. (in Japanese with English abstract).
- Shibata, K., Otsubo, T. and Maruyama, T., 1988. A Rb-Sr whole rock age of the Utsubo granitic complex, Hida Mountains. *Bull. Geol. Surv. Japan* 39, 135-138.
- Streckeisen, A. L., and Le Maitre, R. W. 1979. A chemical approximation to the modal QAPF classification of the Igneous rocks. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen* 136, 169-206.
- Sun, S. S., and McDonough, W. F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implications for mantle composition and process. In: Saunders, A. D., Norry, M. J. (Eds), *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 42, 528-548.
- Suzuki, K., Dunkley, D., Adachi, M., Chwae, U., 2006. Discovery of a c.370 Ma granitic gneiss clast from the Hwanggangri pebble-bearing phyllite in the Okcheon metamorphic belt, Korea. *Gondwana Res.*, 9, 85-94.
- Tanaka, S. and Kagami, H., 1987. Rb-Sr isotopic ages of the granitic rocks in the Tsurugidake-Kekachiyama area, northern Japan Alps. *Jour. Geol. Soc. Japan* 12, 929-932. (in Japanese).
- Turek, A., and Kim, C.-B. 1995. U-Pb zircon ages of Mesozoic plutons in the Damyang-Geochang area, Ryeongnam massif, Korea. *Geochem. J.* 29, 243-258.
- Wang, Y.J., Fan, W.M., Sun, M., Liang, X.Q., Zhang, Y.H., Peng, T.P., 2007. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: A case study in the Hunan Province. *Lithos* 96, 475-502.
- Wang, Y.J., Zhang, Y.H., Fan, W.M., Peng, T.P., 2005. Structural signatures and $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ geochronology of the Indosinian Xuefengshan transpressive belt, South China Interior. *Journal of Structure Geology* 27, 985-998.
- Wasserburg, G.J., Jacobson, S.B., DePaolo, D.J., McCulloch, M.T. and Wen, T. 1981. Precise determination of Sm/Nd ratios, Sm and Nd isotopic abundances in standard solutions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45, 2311-2323.
- Whalen, J. B., Jenner, G. A., Longstaffe, F. J., Robert, F., and Garipey, C. 1996. Geochemical and isotopic O, Nd, Pb and Sr. constraints on A-type granite

- petrogenesis based on the Topsails igneous suite, Newfoundland Appalachians. *J. Petrol.* 37, 1463-1489.
- Williams, I. S., Cho, D.-L., and Kim, S. W. 2008. 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* doi:10.1016/j.lithos.2008.10.017.
- Wilson, M. 1989. *Igneous petrogenesis: a global tectonic approach*. Springer, London.
- Yanai, A., Jwa, Y. J., Otoh, S., Yamakita, S., and Park, B. S. 1993. Honam intra-arc transcurrent fault and Jurassic geodynamics in East Asia. In: Xu, J. (Ed.), *The Tancheng-Lujiang wrench fault system*. John Wiley and Sons, New York pp. 213-224.
- Yanai, S., Park, B. S., and Otoh, S. 1985. The Honam shear zone (South Korea); deformation and tectonic implication in the Far East. *Scient. Pap. College Arts Sci., Univ. Tokyo* 35, 181-210.
- Yang, J.-H., Chung, S.-L., Wilde, S.A., Wu, F.-Y., Chu, M.-F., Lo, C.-H., 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.
- Yin, A., 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, 810-813.
- Zhao, X., Coe, R.S., 1987. Paleomagnetic constraints on the collision and rotation of North and South China. *Nature* 327, 141-144.
- Zheng, Y.-F., Wang, Z.-R., Li, S.-G., Zhao, Z.-F., 2002. Oxygen isotope equilibrium between eclogite minerals and its constraints on mineral Sm-Nd chronometer. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66, 625-634.
- Zhou, X., Sun, T., Shen, W., Shu, L., Niu, Y., 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes* 29, 26-33.

Appendix I. Representative Major element analyses of Middle-Late Triassic and Early Jurassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif, South Korea

Sample No.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	MALI	Fe [#]	ASI
080804-1	72.31	0.16	14.49	1.66	0.05	0.16	1.50	3.02	5.46	0.03	0.25	99.08	6.98	0.91	1.07
080804-2	62.89	0.58	17.85	4.86	0.07	1.75	4.40	3.68	2.28	0.14	0.67	99.17	1.55	0.73	1.09
080804-3	66.39	0.45	16.86	4.10	0.08	1.62	3.66	4.11	2.03	0.11	0.41	99.83	2.49	0.72	1.09
080804-3D	74.22	0.12	13.74	1.39	0.12	0.26	0.94	2.41	6.20	0.02	0.34	99.75	7.66	0.84	1.11
080804-3E	54.80	1.05	19.54	9.18	0.26	2.19	5.16	4.19	2.49	0.33	0.60	99.78	1.52	0.81	1.05
080805-1	68.07	0.52	15.60	4.05	0.08	1.10	2.76	3.79	2.42	0.11	0.84	99.34	3.45	0.79	1.14
080805-2	69.10	0.39	15.58	3.06	0.04	0.05	1.77	3.28	5.83	0.08	0.42	99.60	7.35	0.99	1.05
080805-3A	68.63	0.45	15.98	3.39	0.08	0.85	2.46	3.50	3.46	0.09	0.57	99.47	4.51	0.80	1.15
080805-3B	61.06	0.37	17.94	4.35	0.10	0.65	4.63	3.27	2.25	0.24	4.97	99.83	0.89	0.87	1.13
080805-4	78.56	0.18	14.59	0.38	0.11	0.20	0.31	0.01	3.32	0.01	2.22	99.89	3.02	0.65	3.51
080806-1	71.88	0.19	16.15	0.48	0.09	0.12	1.73	4.45	3.73	0.01	0.25	99.07	6.45	0.79	1.12
080806-2	56.15	1.11	14.98	8.13	0.08	3.16	6.80	2.08	6.44	0.31	0.47	99.71	1.72	0.72	0.67
080806-3	68.93	0.44	15.57	3.61	0.07	0.91	3.07	3.55	2.84	0.10	0.50	99.57	3.32	0.80	1.08
080806-4	67.37	0.20	16.55	3.02	0.08	0.15	1.62	3.81	5.99	0.04	0.27	99.12	8.18	0.95	1.06
080810-1	68.04	0.20	16.72	3.05	0.08	0.16	1.64	3.85	6.05	0.04	0.27	100.1	8.27	0.95	1.06
080810-2	71.81	0.37	14.05	2.64	0.12	1.09	2.12	2.71	3.82	0.04	0.72	99.50	4.41	0.71	1.13
080810-3A	73.26	0.23	13.95	2.21	0.05	0.19	1.35	2.85	5.13	0.04	0.51	99.77	6.63	0.92	1.10
080810-3B	71.99	0.02	14.83	1.95	0.05	0.26	1.19	3.02	5.66	0.04	0.41	99.43	7.49	0.88	1.12
080811-1	72.36	0.02	14.91	1.96	0.05	0.26	1.20	3.04	5.69	0.04	0.41	99.95	7.53	0.88	1.12
080811-2	69.45	0.36	15.46	2.79	0.04	0.45	1.69	2.18	6.10	0.14	0.44	99.10	6.59	0.86	1.18
080811-3	74.65	0.13	13.04	1.95	0.04	0.06	0.61	2.41	6.20	0.01	0.29	99.40	8.01	0.97	1.11
080811-4	67.28	0.43	16.69	4.00	0.07	1.07	3.96	3.63	1.96	0.11	0.76	99.96	1.63	0.79	1.10
080811-5	66.96	0.32	17.03	3.25	0.07	0.85	2.64	3.61	4.69	0.09	0.39	99.90	5.66	0.79	1.08
080812-1A	65.77	0.54	17.26	4.48	0.10	1.21	3.75	4.05	2.13	0.13	0.48	99.88	2.44	0.79	1.10
080812-1B	52.74	0.85	21.28	8.51	0.12	2.39	5.46	4.91	2.53	0.25	0.68	99.71	1.98	0.78	1.04
080812-2	67.40	0.53	16.23	3.97	0.11	1.17	2.81	4.01	2.21	0.11	0.64	99.18	3.41	0.77	1.16
080812-2E	50.28	0.67	11.54	8.71	0.15	11.99	7.08	1.71	1.67	0.19	5.67	99.66	(3.70)	0.42	0.67
080812-4	80.61	0.05	10.06	0.68	0.02	0.05	0.29	1.57	5.63	0.00	0.32	99.29	6.91	0.93	1.09
ABS-02 07m	77.03	0.10	12.21	0.72	0.12	0.05	0.63	3.30	4.57	0.00	0.35	99.08	7.25	0.94	1.06
ATB-11 16m	72.00	0.30	14.65	1.81	0.12	0.32	1.22	2.84	5.61	0.05	0.45	99.38	7.23	0.85	1.14
ABS-03 12m	70.82	0.28	14.86	2.26	0.12	0.44	2.10	3.01	4.62	0.07	0.58	99.17	5.53	0.84	1.08
ATB-04 46m	72.34	0.26	14.83	1.67	0.04	0.25	1.32	2.90	5.67	0.04	0.63	99.95	7.24	0.87	1.12
HTB01-02m	74.82	0.16	13.33	0.19	0.06	0.06	0.44	2.64	6.92	0.00	0.26	98.87	9.12	0.75	1.06
HTB01-04m	68.97	0.11	16.35	2.05	0.17	0.26	1.40	3.33	5.82	0.05	0.36	98.87	7.75	0.89	1.15
HTB01-06m	70.92	0.21	14.66	2.30	0.16	0.27	1.49	3.19	5.36	0.05	0.33	98.93	7.07	0.90	1.07
HTB01-07m	69.27	0.03	16.11	2.38	0.17	0.29	1.52	3.23	5.61	0.05	0.36	99.04	7.33	0.89	1.14
HTB01-09m	69.56	0.06	15.63	1.89	0.16	0.23	1.37	3.19	5.41	0.04	0.26	97.78	7.23	0.89	1.15
HTB01-10m	70.50	0.24	14.61	1.95	0.15	0.26	1.37	3.33	5.45	0.05	0.49	98.40	7.41	0.88	1.06
HTB01-15m	70.70	0.00	16.07	1.40	0.15	0.17	1.20	3.45	5.62	0.03	0.32	99.11	7.87	0.89	1.16
HTB01-16m	71.07	0.06	15.81	1.39	0.15	0.18	1.25	3.37	5.59	0.03	0.23	99.11	7.71	0.89	1.14
HTB01-18m	71.75	0.06	15.53	1.56	0.06	0.18	1.28	3.53	5.22	0.04	0.33	99.54	7.47	0.90	1.13
HTB01-19m	75.08	0.00	13.29	1.37	0.16	0.17	0.97	2.82	4.95	0.03	0.27	99.10	6.80	0.89	1.13

Appendix I. Continued.

Sample No.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	MALI	Fe [#]	ASI
HTB01-20m	74.11	0.00	14.13	1.00	0.05	0.12	0.86	3.09	5.36	0.02	0.33	99.07	7.59	0.89	1.14
HTB01-21m	73.76	0.00	14.25	1.19	0.15	0.16	1.28	3.29	4.69	0.02	0.22	99.01	6.71	0.88	1.11
HTB01-23m	69.83	0.18	15.01	2.93	0.18	0.28	1.40	3.40	5.34	0.05	0.34	98.94	7.33	0.91	1.08
HTB01-25m	72.25	0.03	14.86	1.49	0.16	0.19	1.23	3.28	5.20	0.03	0.26	98.99	7.25	0.89	1.12
HTB01-27m	72.78	0.23	13.25	2.13	0.18	0.24	1.24	3.26	4.81	0.03	0.26	98.40	6.83	0.90	1.04
HTB01-29m	71.24	0.05	14.91	2.09	0.18	0.24	1.29	3.30	5.40	0.03	0.38	99.11	7.40	0.90	1.10
HTB01-31m	72.91	0.08	14.10	1.58	0.08	0.20	1.18	3.21	4.71	0.03	0.30	98.37	6.74	0.89	1.13
HTB01-33m	73.12	0.07	15.85	2.01	0.02	0.19	1.23	3.32	4.90	0.03	0.22	100.9	6.99	0.91	1.22
HTB01-35m	72.93	0.23	13.78	1.41	0.16	0.21	1.80	3.21	5.57	0.03	0.16	99.48	6.98	0.87	0.95
HTB01-37m	71.93	0.02	14.68	1.73	0.17	0.19	1.26	3.18	5.11	0.03	0.21	98.51	7.02	0.90	1.13
HTB01-39m	74.54	0.00	12.78	1.70	0.16	0.18	1.18	2.91	4.93	0.03	0.29	98.71	6.66	0.90	1.04
HTB01-41m	74.67	0.00	13.08	1.42	0.15	0.17	1.22	3.10	4.73	0.03	0.26	98.82	6.62	0.89	1.05
HTB01-46m	70.57	0.02	15.42	1.64	0.07	0.20	1.11	2.96	6.08	0.03	0.51	98.61	7.93	0.89	1.15
HTB01-47m	73.28	0.00	13.72	1.08	0.06	0.21	2.10	2.26	4.67	0.02	2.56	99.97	4.83	0.84	1.09
HTB01-48m	20.89	0.00	2.13	11.76	0.46	8.33	26.30	0.09	0.96	0.03	29.20	100.1	-25.2	0.59	0.04
HTB01-49m	48.78	0.77	17.97	9.32	0.30	5.70	9.37	3.14	1.15	0.15	1.62	98.26	-5.08	0.62	0.77
HTB01-50m	61.80	0.38	18.29	5.40	0.18	1.66	2.95	0.04	3.51	0.14	6.17	100.0	0.60	0.77	2.02
NBB01-08m	70.18	0.31	15.21	2.02	0.03	0.49	2.58	3.59	3.39	0.06	0.51	98.36	4.40	0.80	1.07
NBB01-12m	68.69	0.32	15.65	2.44	0.04	0.30	2.80	3.50	4.92	0.05	0.31	99.02	5.61	0.89	0.97
NBB02-04m	60.43	0.72	18.08	5.04	0.22	1.78	4.66	3.88	2.33	0.14	0.97	98.24	1.55	0.74	1.05
NBB02-08m	65.34	0.67	15.44	5.18	0.08	1.45	3.77	3.43	2.33	0.16	0.51	98.36	1.99	0.78	1.04
NBB02-09m	65.32	0.63	17.04	5.17	0.07	1.45	3.69	3.35	2.32	0.16	0.62	99.82	1.98	0.78	1.17
NBB3-1 09m	61.56	0.52	19.61	5.59	0.07	1.57	4.05	3.99	2.74	0.17	0.43	100.3	2.69	0.78	1.17
NBB3-1 12m	65.13	0.65	16.51	4.64	0.06	1.26	3.92	3.85	2.17	0.14	0.42	98.72	2.10	0.79	1.06
NBB03-09m	61.43	0.72	17.79	5.69	0.09	1.55	4.05	3.96	2.75	0.17	0.56	98.75	2.66	0.79	1.07
NBB03-19m	64.46	0.81	16.38	4.99	0.06	1.34	3.47	3.78	2.21	0.15	0.70	98.33	2.51	0.79	1.11
NBB4-1 20m	63.92	0.65	16.85	4.76	0.10	1.29	3.42	4.46	1.91	0.13	0.71	98.20	2.94	0.79	1.09
NBB4-1 22m	65.10	0.54	16.92	4.20	0.10	1.16	3.12	4.58	1.97	0.12	0.69	98.49	3.44	0.78	1.11
NBB04-23m	67.47	0.42	16.54	2.43	0.20	0.70	2.99	4.46	2.25	0.06	0.63	98.16	3.72	0.78	1.09
NBB04-24m	66.66	0.36	16.68	2.66	0.19	0.73	2.77	4.07	3.49	0.07	0.55	98.22	4.79	0.78	1.08
NBB5-1 13m	69.94	0.53	14.40	3.41	0.24	1.03	2.73	3.67	2.37	0.09	0.42	98.83	3.31	0.77	1.07
NBB05-10m	67.41	0.50	14.91	3.99	0.08	1.10	2.89	3.67	2.69	0.11	0.41	97.76	3.46	0.78	1.06
NBB06-08m	66.99	0.36	15.67	4.10	0.10	1.09	3.12	3.79	2.69	0.12	0.38	98.39	3.36	0.79	1.07
NBB07-14m	64.11	0.63	16.24	4.31	0.06	1.10	3.75	3.48	1.89	0.12	2.82	98.52	1.62	0.80	1.13
NBB07-15m	67.06	0.45	17.84	3.29	0.04	0.16	3.23	3.25	2.90	0.11	1.29	99.62	2.92	0.95	1.25
NBB08-14m	57.45	0.98	17.24	6.73	0.08	2.99	5.61	3.13	2.31	0.18	1.91	98.63	-0.17	0.69	0.98
NBB09-19m	65.06	0.61	14.86	3.65	0.22	1.55	3.48	0.08	3.17	0.12	7.39	100.1	-0.24	0.70	1.52
NBB14-13m	67.32	0.62	15.55	3.92	0.23	1.05	2.70	4.14	2.32	0.11	0.63	98.57	3.76	0.79	1.10
NBB14-15m	67.46	0.51	16.81	3.91	0.08	1.04	2.97	4.33	2.30	0.11	0.55	100.1	3.66	0.79	1.13
NBB15-12m	67.79	0.61	14.90	4.34	0.08	1.11	3.28	3.63	2.01	0.12	0.53	98.41	2.37	0.80	1.07
NBB17-04m	64.68	0.69	16.10	4.84	0.10	1.61	3.86	3.57	2.43	0.14	0.43	98.42	2.13	0.75	1.05
NBB18-14m	63.70	0.75	16.45	5.30	0.10	1.76	3.90	3.59	2.08	0.15	1.13	98.91	1.77	0.75	1.09

Appendix I. Continued.

Sample No.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	MALI	Fe [#]	ASI
NBB19-10m	61.61	0.60	18.67	5.01	0.06	1.68	4.06	3.52	3.32	0.15	0.69	99.36	2.78	0.75	1.13
NBB20-08m	62.53	0.84	16.84	5.44	0.23	1.84	4.38	3.55	2.02	0.15	0.59	98.40	1.20	0.75	1.06
NBB20-09m	73.65	0.09	14.44	0.79	0.40	0.07	0.44	5.17	3.22	0.04	0.30	98.60	7.95	0.92	1.13
NBB22-06m	62.55	0.77	17.19	5.12	0.07	1.78	4.16	3.58	2.47	0.15	0.58	98.42	1.89	0.74	1.08
NCB01-07m	70.34	0.02	15.47	1.56	0.16	0.23	1.09	2.24	5.52	0.02	1.99	98.66	6.67	0.87	1.33
NCB01-08m	71.78	0.10	15.27	1.67	0.17	0.22	1.58	3.24	4.83	0.04	0.36	99.26	6.49	0.88	1.14
NCB01-10m	73.39	0.01	14.60	1.79	0.06	0.22	1.61	3.09	5.29	0.03	0.97	101.0	6.77	0.89	1.06
NCB01-12m	75.25	0.01	13.33	0.85	0.23	0.11	0.78	3.66	4.55	0.04	0.27	99.06	7.43	0.89	1.08
NCB01-13m	72.83	0.18	13.56	1.92	0.04	0.21	1.39	3.17	5.02	0.04	0.29	98.63	6.80	0.90	1.03
NCB01-15m	70.37	0.03	13.46	3.19	0.18	0.34	1.40	1.61	4.75	0.05	3.75	99.12	4.96	0.90	1.31
NCB01-26m	70.21	0.08	16.72	1.84	0.07	0.24	1.60	3.53	5.30	0.03	0.18	99.77	7.22	0.89	1.16
NCB02-15m	65.98	0.36	16.01	3.73	0.17	1.25	3.40	3.39	3.23	0.11	0.86	98.48	3.22	0.75	1.06
NCB03-15m	66.44	0.45	18.09	4.03	0.07	1.11	3.34	3.91	1.92	0.12	1.09	100.57	2.50	0.78	1.25
NCB03-16m	68.94	0.35	16.97	3.11	0.05	0.85	2.51	3.48	2.95	0.09	0.55	99.84	3.91	0.78	1.27
NCB03-17m	75.89	0.05	12.93	1.21	0.01	0.31	1.91	2.09	5.17	0.04	0.28	99.87	5.36	0.80	1.04
NCB03-19m	66.91	0.53	16.12	4.45	0.23	1.19	1.51	3.89	2.48	0.12	1.89	99.32	4.86	0.79	1.38
NCB03-21m	66.82	0.39	17.55	3.81	0.08	1.14	2.62	3.52	2.61	0.11	1.36	99.99	3.51	0.77	1.33
NCB03-23m	68.09	0.25	17.98	2.87	0.04	0.75	2.05	3.27	4.28	0.08	0.67	100.3	5.49	0.79	1.32
NCB03-24m	64.05	0.76	17.64	4.19	0.23	1.56	3.47	3.65	1.58	0.11	2.55	99.80	1.75	0.73	1.27
NCB03-25m	66.47	0.32	17.40	3.98	0.22	1.04	2.82	3.66	3.11	0.11	1.88	101.0	3.94	0.79	1.21
NCB03-26m	65.97	0.35	17.41	3.82	0.24	1.06	3.38	4.17	1.53	0.11	1.24	99.28	2.32	0.78	1.20
NCB03-27m	64.76	0.43	17.74	3.84	0.24	1.07	3.55	4.18	2.12	0.11	1.02	99.06	2.76	0.78	1.15
NCB04-15m	61.15	0.72	19.15	5.76	0.08	2.03	4.61	3.57	2.38	0.16	0.67	100.2	1.34	0.74	1.15
NCB04-23m	61.90	0.59	19.34	2.86	0.10	1.77	4.53	3.66	2.50	0.15	0.51	97.90	1.62	0.62	1.15
NCB05-20m	61.84	0.75	17.50	5.03	0.23	1.72	4.31	3.72	2.60	0.14	0.69	98.51	2.01	0.74	1.05
NCB06-18m	63.86	0.35	18.67	3.93	0.23	1.25	3.45	3.68	3.44	0.15	0.39	99.38	3.67	0.76	1.18
NCB06-20m	75.46	0.00	14.46	0.38	0.16	0.08	1.17	3.98	3.87	0.01	0.18	99.74	6.68	0.83	1.13
NCB06-21m	66.00	0.65	15.62	4.46	0.07	1.47	3.73	3.21	2.62	0.12	0.60	98.54	2.11	0.75	1.06
NCB06-25m	62.79	0.59	18.59	4.94	0.13	1.66	4.28	3.53	2.21	0.14	0.49	99.36	1.46	0.75	1.17
NCB06-25m	61.86	0.68	18.79	5.63	0.08	1.93	4.41	3.33	2.54	0.16	0.58	99.98	1.45	0.74	1.17
NCB06-27m	61.91	0.73	18.56	5.70	0.08	1.95	4.41	3.46	2.54	0.16	0.37	99.84	1.59	0.75	1.14
NCB06-31m	65.19	0.52	16.83	4.72	0.10	1.68	4.19	3.86	2.79	0.14	0.36	100.3	2.46	0.74	1.00
NCB06-35m	63.54	0.54	18.21	4.65	0.06	1.64	4.16	3.61	2.78	0.13	0.31	99.62	2.23	0.74	1.11
NCB07-10m	61.50	0.58	17.51	5.23	0.10	1.81	4.51	3.66	2.66	0.15	1.27	98.98	1.80	0.74	1.03
NCB07-12m	66.92	0.57	15.51	3.84	0.24	1.01	3.10	3.83	2.57	0.11	1.35	99.04	3.29	0.79	1.06
NCB07-25m	62.11	0.52	19.34	5.27	0.07	1.82	4.46	3.58	2.13	0.15	0.48	99.93	1.26	0.74	1.20
NCB08-11m	62.97	0.29	16.63	3.36	0.07	1.31	3.69	3.15	3.30	0.11	4.66	99.53	2.76	0.72	1.08
NCB08-22m	62.50	0.32	17.13	3.40	0.08	1.54	3.69	3.25	3.04	0.11	4.85	99.90	2.59	0.69	1.13
NCB08-33m	61.39	0.35	16.57	3.86	0.07	1.97	3.78	2.97	2.98	0.13	5.02	99.08	2.18	0.66	1.12
NCB09-07m	75.63	0.08	13.66	0.42	0.11	0.09	0.82	4.47	3.06	0.01	0.42	98.75	6.70	0.82	1.13
NCB09-34m	62.67	0.24	16.19	3.23	0.19	1.31	3.94	3.17	3.36	0.12	4.82	99.24	2.59	0.71	1.02
NCB09-35m	61.63	0.48	15.64	3.51	0.23	1.49	3.93	3.03	3.41	0.12	5.50	98.95	2.50	0.70	1.00

Appendix I. Continued.

Sample No.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	MALI	Fe [#]	ASI
NCB11-12m	67.53	0.38	17.43	3.80	0.07	1.00	3.12	3.85	2.56	0.11	0.41	100.2	3.29	0.79	1.19
NSB03-07m	64.17	0.68	16.27	4.52	0.22	1.50	3.91	3.59	2.65	0.13	1.20	98.82	2.32	0.75	1.03
NSB04-06m	69.93	0.48	13.99	3.63	0.23	1.01	2.57	3.44	2.68	0.10	0.55	98.61	3.55	0.78	1.07
NSB14-07m	71.36	0.49	13.36	3.16	0.21	0.85	2.41	3.29	2.68	0.09	0.46	98.37	3.57	0.79	1.06
NTB01-03m	70.10	0.12	15.28	2.63	0.16	0.31	1.70	3.36	4.98	0.06	0.40	99.09	6.64	0.90	1.10
NTB01-04m	70.00	0.08	15.26	2.62	0.15	0.31	1.70	3.34	4.97	0.06	0.42	98.92	6.61	0.89	1.10
NTB01-06m	69.87	0.21	15.13	2.96	0.08	0.32	1.69	3.61	4.40	0.07	0.46	98.79	6.32	0.90	1.11
NTB01-12m	71.47	0.02	14.56	2.24	0.15	0.25	1.59	3.28	4.94	0.05	0.30	98.84	6.64	0.90	1.07
NTB01-14m	71.87	0.10	14.16	2.28	0.15	0.26	1.40	3.22	5.31	0.04	0.25	99.06	7.13	0.90	1.04
NTB01-25m	71.87	0.04	14.58	2.28	0.19	0.25	1.40	3.49	4.75	0.05	0.28	99.16	6.84	0.90	1.09
NTB01-33m	72.14	0.05	14.59	1.89	0.17	0.21	1.25	3.23	4.86	0.03	0.24	98.65	6.83	0.90	1.14
NTB02-03m	75.87	0.00	13.89	0.74	0.20	0.07	1.61	4.99	1.62	0.00	0.28	99.26	5.00	0.91	1.08
NTB02-07m	72.52	0.10	14.17	2.07	0.16	0.23	1.47	3.37	4.42	0.05	0.37	98.92	6.31	0.90	1.10
NTB02-10m	67.14	0.11	17.36	1.98	0.14	0.26	1.80	4.19	5.32	0.04	0.37	98.70	7.72	0.88	1.09
NTB02-13m	69.63	0.12	15.27	1.55	0.15	0.27	1.37	3.50	6.05	0.04	0.34	98.29	8.18	0.85	1.04
NTB02-15m	70.39	0.05	16.29	2.26	0.08	0.28	1.69	3.59	5.04	0.05	0.37	100.0	6.93	0.89	1.13
NTB02-17m	68.06	0.08	17.15	2.58	0.07	0.33	1.65	3.69	5.75	0.06	0.33	99.75	7.79	0.89	1.13
NTB02-18m	71.11	0.13	14.24	2.79	0.17	0.35	1.75	3.29	4.56	0.07	0.27	98.71	6.10	0.89	1.06
NTB02-19m	71.35	0.08	14.98	2.40	0.07	0.29	1.58	3.24	4.97	0.05	0.26	99.27	6.63	0.89	1.11
NTB02-26m	73.12	0.00	13.93	1.58	0.06	0.17	1.08	2.93	5.42	0.03	0.70	99.01	7.27	0.90	1.10
NTB03-07m	71.28	0.01	16.70	1.98	0.02	0.20	1.25	3.13	5.55	0.04	0.21	100.37	7.43	0.91	1.25
NTB03-08m	73.33	0.02	13.83	0.87	0.04	0.21	1.24	3.15	4.89	0.03	0.27	97.87	6.80	0.81	1.09
NTB03-10m	72.55	0.02	14.19	2.20	0.16	0.24	1.42	3.31	4.74	0.04	0.25	99.10	6.62	0.90	1.08
NTB03-11m	72.06	0.05	14.76	1.54	0.06	0.17	1.34	3.38	4.85	0.03	0.37	98.62	6.90	0.90	1.12
NTB03-14m	72.99	0.03	14.32	1.49	0.16	0.19	1.34	3.54	4.66	0.03	0.37	99.13	6.86	0.89	1.08
NTB03-16m	73.30	0.04	13.36	2.03	0.16	0.22	1.34	3.14	4.77	0.03	0.32	98.71	6.56	0.90	1.05
NTB03-17m	71.45	0.00	14.75	1.96	0.16	0.20	1.25	3.13	5.56	0.04	0.55	99.05	7.44	0.91	1.10
NTB03-19m	71.67	0.06	14.90	1.76	0.16	0.21	1.45	3.79	4.54	0.04	0.25	98.83	6.88	0.90	1.08
NTB03-20m	71.37	0.00	14.75	1.97	0.16	0.21	1.25	3.14	5.55	0.04	0.23	98.66	7.44	0.91	1.10
NTB03-21m	71.62	0.09	14.82	2.55	0.10	0.28	1.33	3.19	5.00	0.06	0.23	99.26	6.85	0.90	1.14
NTB03-22m	73.07	0.11	14.26	2.37	0.11	0.27	1.59	3.52	3.85	0.06	0.49	99.69	5.78	0.90	1.11
NTB03-26m	73.38	0.05	15.30	1.58	0.02	0.16	1.09	2.89	5.42	0.03	0.22	100.1	7.22	0.91	1.22
NTB03-39m	69.16	0.34	15.00	2.94	0.05	0.34	1.76	3.40	5.11	0.07	0.60	98.77	6.76	0.90	1.05
NTB04-08m	70.97	0.27	15.58	2.93	0.10	0.79	2.51	3.57	2.71	0.08	0.45	99.97	3.78	0.79	1.17
NTB04-15m	51.60	1.30	19.65	9.69	0.32	3.82	6.76	3.55	1.96	0.24	0.92	99.80	-1.26	0.72	0.98
NTB04-20m	57.34	1.41	15.78	11.53	0.32	2.86	3.40	1.84	3.48	0.08	0.75	98.78	1.92	0.80	1.22
NTB04-25m	60.23	1.02	17.43	8.64	0.12	2.11	3.44	2.89	2.60	0.06	0.60	99.12	2.05	0.80	1.27
NTB04-26m	61.04	1.33	16.12	9.36	0.30	2.17	2.98	2.61	2.95	0.21	0.96	100.0	2.58	0.81	1.27
NTB04-27m	75.14	0.00	13.31	0.39	0.11	0.15	1.00	2.52	5.59	0.01	0.68	98.89	7.11	0.72	1.11
NTB04-29m	69.56	0.46	14.70	4.21	0.19	1.01	2.60	3.26	2.31	0.07	0.52	98.89	2.98	0.81	1.18
NTB04-31m	72.57	0.00	14.56	0.89	0.05	0.25	1.45	3.06	4.79	0.02	0.91	98.54	6.39	0.78	1.14
NTB04-35m	73.60	0.00	14.54	0.65	0.05	0.17	0.88	2.61	6.11	0.03	0.94	99.56	7.84	0.79	1.17

Appendix I. Continued.

Sample No.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	MALI	Fe [#]	ASI
NTB04-43m	73.10	0.13	15.76	1.27	0.07	0.44	2.41	4.19	1.99	0.02	0.45	99.84	3.77	0.74	1.17
NTB04-47m	73.55	0.00	14.00	0.98	0.13	0.15	0.88	2.51	5.97	0.00	0.44	98.62	7.60	0.87	1.15
NTB04-51m	73.03	0.00	15.07	0.94	0.12	0.32	1.49	2.95	4.87	0.03	0.49	99.30	6.33	0.75	1.18
NTB04-53m	73.29	0.00	14.33	0.79	0.05	0.24	1.44	2.61	5.58	0.03	0.78	99.12	6.74	0.77	1.11
NTB04-57m	63.66	0.95	15.87	6.66	0.24	1.70	2.68	3.48	2.28	0.09	0.49	98.10	3.08	0.80	1.23
NTB04-59m	72.90	0.01	14.28	0.86	0.12	0.21	1.22	3.07	5.48	0.03	1.07	99.25	7.32	0.81	1.09
NTB04-62m	74.57	0.10	13.18	1.92	0.16	0.37	1.21	2.52	4.66	0.00	0.44	99.14	5.97	0.84	1.16
NTB04-66m	72.37	0.28	16.31	1.41	0.14	0.52	3.18	4.00	1.49	0.03	0.43	100.1	2.32	0.73	1.17
NTB04-69m	71.79	0.09	15.40	1.04	0.14	0.32	1.53	2.80	5.44	0.02	0.66	99.22	6.71	0.76	1.16
NTB04-70m	52.64	1.26	17.16	11.78	0.30	3.83	3.63	1.97	4.42	0.36	0.85	98.18	2.75	0.75	1.21
NTB04-71m	61.78	0.93	19.65	5.65	0.22	1.79	4.09	4.10	2.11	0.17	0.64	101.14	2.12	0.76	1.21
NTB04-72m	67.43	0.83	14.64	5.62	0.21	1.38	2.96	3.17	1.90	0.08	0.58	98.78	2.10	0.80	1.17
NTB04-75m	61.95	0.37	18.06	5.62	0.09	2.56	3.54	3.55	2.39	0.06	0.74	98.94	2.40	0.69	1.22
NTB05-10m	74.66	0.00	13.24	1.92	0.14	0.12	0.57	2.04	6.49	0.01	0.25	99.45	7.96	0.94	1.16
NTB05-18m	50.48	1.41	19.03	12.04	0.50	3.47	2.86	3.59	4.18	0.22	0.56	98.33	4.91	0.78	1.24
NTB05-23m	70.07	0.09	16.16	2.13	0.15	0.31	1.25	2.97	5.76	0.04	0.40	99.33	7.48	0.87	1.21
NTB05-27m	70.31	0.16	15.13	2.34	0.17	0.26	1.44	3.09	4.92	0.04	0.28	98.14	6.57	0.90	1.17
NTB05-28m	57.86	0.69	19.09	7.21	0.24	2.30	5.30	3.84	1.94	0.24	0.53	99.22	0.48	0.76	1.07
NTB05-29m	58.42	0.73	19.35	7.28	0.24	2.34	5.33	3.88	1.95	0.24	0.32	100.07	0.49	0.76	1.08
NTB05-32m	70.62	0.08	15.22	1.98	0.15	0.23	1.52	3.41	5.22	0.04	0.25	98.70	7.10	0.90	1.09
NTB05-39m	67.14	0.24	16.49	2.52	0.19	0.31	1.80	3.50	4.91	0.04	0.30	97.44	6.61	0.89	1.15
NTB05-45m	71.31	0.03	16.50	1.69	0.01	0.24	1.48	3.11	5.15	0.04	0.33	99.88	6.79	0.88	1.24
NTB05-51m	72.86	0.00	14.65	1.55	0.07	0.17	1.09	3.00	5.54	0.03	0.28	99.23	7.44	0.90	1.14
NTB05-60m	69.52	0.04	16.64	1.74	0.16	0.20	1.70	3.61	4.91	0.03	0.28	98.83	6.82	0.90	1.16
NTB05-61m	74.80	0.01	13.60	0.33	0.12	0.09	1.45	3.57	3.73	0.00	1.07	98.76	5.84	0.79	1.09
NTB05-68m	68.84	0.05	16.72	2.36	0.10	0.26	1.62	3.37	5.63	0.04	0.11	99.08	7.37	0.90	1.15
NTB05-73m	70.63	0.02	15.91	1.93	0.18	0.25	1.75	3.49	4.45	0.04	0.38	99.02	6.19	0.88	1.16
NTB06-11m	75.68	0.00	14.67	0.18	0.09	0.12	1.08	2.62	5.14	0.01	0.30	99.89	6.69	0.60	1.24
NTB06-14m	73.10	0.12	13.53	2.31	0.10	0.49	1.59	3.25	3.32	0.03	0.33	98.16	4.97	0.82	1.15
NTB06-16m	58.82	0.26	19.26	5.46	0.09	3.35	4.84	3.82	2.17	0.10	0.37	98.53	1.16	0.62	1.11
NTB06-20m	66.91	0.45	17.10	3.12	0.18	1.13	3.66	4.62	1.35	0.10	0.39	99.00	2.31	0.73	1.10
NTB06-24m	66.71	0.27	16.84	4.29	0.20	0.56	2.77	4.54	2.36	0.09	0.30	98.92	4.14	0.89	1.13
NTB06-28m	77.43	0.00	11.38	2.11	0.06	0.11	0.65	2.12	5.00	0.01	0.19	99.05	6.48	0.95	1.13
NTB06-33m	73.86	0.00	14.40	0.26	0.13	0.06	0.85	2.77	6.24	0.01	0.18	98.75	8.16	0.80	1.12
NTB06-40m	60.46	0.36	20.57	4.45	0.12	0.75	3.13	4.58	3.56	0.15	0.58	98.69	5.01	0.86	1.22
NTB06-46m	75.68	0.00	12.59	1.79	0.20	0.10	0.93	2.36	5.03	0.01	0.19	98.89	6.47	0.95	1.14
NTB06-50m	78.52	0.00	10.60	1.93	0.06	0.09	0.87	2.37	4.23	0.00	0.16	98.83	5.73	0.96	1.05
NTB06-53m	72.83	0.24	14.08	2.63	0.07	0.17	1.35	2.88	4.63	0.02	0.34	99.24	6.16	0.94	1.16
NTB07-02m	68.52	0.17	16.44	3.31	0.27	0.54	2.25	3.88	3.11	0.09	0.55	99.14	4.74	0.86	1.20
NTB07-04m	67.07	0.37	16.54	3.22	0.20	0.73	2.88	3.80	3.03	0.09	0.35	98.28	3.95	0.81	1.13
NTB07-08m	71.47	0.00	15.67	1.35	0.16	0.18	1.19	3.13	5.87	0.02	0.27	99.30	6.85	0.87	1.22
NTB07-11m	72.59	0.18	14.81	2.27	0.18	0.29	1.65	3.35	4.00	0.04	0.35	99.73	7.81	0.88	1.15

Appendix I. Continued.

Sample No.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	MALI	Fe [#]	ASI
NTB08-05m	73.81	0.00	13.42	1.95	0.14	0.09	0.59	2.37	6.48	0.01	0.20	99.06	5.70	0.89	1.16
NTB08-12m	63.77	0.56	18.06	4.67	0.25	1.27	3.37	4.08	2.03	0.13	0.93	99.11	8.26	0.95	1.12
NTB08-14m	66.43	0.41	16.78	4.04	0.22	1.12	2.92	3.43	2.30	0.11	1.96	99.72	2.74	0.79	1.21
NTB09-04m	66.51	0.38	17.01	3.55	0.11	0.88	3.17	3.94	2.29	0.10	0.69	98.65	2.80	0.78	1.26
NTB09-05m	66.55	0.04	17.01	3.76	0.22	0.94	3.11	3.84	2.63	0.10	0.56	98.76	3.07	0.80	1.16
NTB09-06m	65.49	0.44	17.23	4.12	0.12	1.06	3.46	4.09	2.11	0.12	0.52	98.77	3.36	0.80	1.16
NTB09-07m	65.88	0.22	16.98	3.59	0.19	0.95	2.82	3.74	3.96	0.10	0.35	98.78	2.74	0.79	1.14
NTB09-08m	66.80	0.27	16.64	3.54	0.09	0.90	2.63	3.43	3.82	0.10	0.47	98.69	4.89	0.79	1.10
NTB10-03m	65.92	0.32	17.38	3.66	0.12	0.95	2.93	3.93	2.85	0.10	0.65	98.80	4.62	0.80	1.15
NTB10-04m	65.70	0.34	17.53	4.01	0.23	1.03	3.19	4.10	2.43	0.11	0.49	99.15	3.85	0.79	1.18
NTB10-05m	67.67	0.42	15.67	4.11	0.22	1.03	2.90	3.89	2.49	0.11	0.53	99.03	3.48	0.80	1.10
NTB10-06m	66.35	0.44	17.03	3.92	0.12	1.02	3.16	4.12	2.04	0.11	0.56	98.86	3.00	0.79	1.17
NTB10-07m	65.62	0.19	17.56	3.20	0.10	0.85	2.10	3.30	5.08	0.09	0.54	98.64	6.28	0.79	1.20
NTB10-14m	71.78	0.00	15.86	0.15	0.49	0.07	0.42	4.59	5.58	0.03	0.27	99.23	9.76	0.69	1.11
NTB10-23m	62.85	0.31	19.10	4.31	0.21	1.39	4.24	3.78	2.51	0.12	0.76	99.58	2.05	0.76	1.16
NTB11-07m	69.31	0.08	17.09	1.49	0.16	0.17	1.49	3.60	5.34	0.03	0.44	99.20	7.45	0.90	1.19
NTB11-08m	71.47	0.03	15.51	1.87	0.17	0.21	1.38	3.42	4.60	0.04	0.44	99.14	6.64	0.90	1.19
NTB11-11m	71.24	0.21	15.06	2.19	0.18	0.25	1.63	3.13	4.70	0.04	0.42	99.05	6.20	0.90	1.15
NTB11-14m	72.05	0.02	15.20	1.21	0.15	0.18	1.49	3.19	5.00	0.02	0.27	98.77	6.70	0.87	1.14
NTB11-15m	66.19	0.63	15.51	4.02	0.23	1.16	3.34	3.98	1.93	0.12	1.30	98.41	2.57	0.78	1.06
NTB11-16m	69.09	0.48	14.50	3.02	0.10	0.86	2.52	3.47	2.95	0.08	1.37	98.43	3.91	0.78	1.08
NTB11-18m	65.99	0.43	16.87	4.06	0.22	1.09	3.34	4.10	2.17	0.12	1.09	99.49	2.93	0.79	1.12
NTB11-19m	65.75	0.36	18.21	4.14	0.07	1.09	3.22	4.08	2.15	0.12	0.24	99.42	3.01	0.79	1.23
NTB11-21m	66.71	0.57	14.98	3.82	0.24	1.20	2.62	3.59	2.62	0.11	1.89	98.35	3.59	0.76	1.12
NTB11-23m	67.12	0.48	15.22	2.90	0.20	0.81	2.04	3.30	4.26	0.08	2.00	98.41	5.52	0.78	1.11
NTB11-25m	64.91	0.28	17.30	3.73	0.12	0.98	2.97	3.64	3.30	0.11	1.96	99.31	3.98	0.79	1.17
NTB11-27m	66.54	0.36	16.01	3.93	0.21	1.06	3.46	3.81	2.46	0.11	1.17	99.12	2.81	0.79	1.06
NTB12-11m	88.92	0.12	5.40	0.35	0.08	0.24	0.16	0.00	1.55	0.02	1.20	98.03	1.39	0.59	2.76
NTB12-13m	68.70	0.16	16.68	2.16	0.15	0.30	1.38	2.19	5.89	0.06	2.20	99.86	6.71	0.88	1.34
NTB12-14m	67.53	0.01	16.94	3.41	0.07	0.36	1.47	2.05	5.33	0.06	3.25	100.5	5.91	0.90	1.44
NTB12-17m	67.77	0.11	18.30	2.43	0.05	0.30	0.33	2.38	6.46	0.06	2.11	100.3	8.51	0.89	1.60
NTB12-18m	71.61	0.05	15.59	1.51	0.11	0.20	1.21	3.07	5.50	0.04	0.61	99.49	7.35	0.88	1.19
NTB12-22m	51.49	1.58	19.26	10.05	0.10	4.09	6.98	2.86	2.08	0.20	1.22	99.89	-2.04	0.71	0.99
NTB12-23m	48.40	1.14	22.34	8.41	0.16	4.29	7.95	3.21	1.82	0.16	1.59	99.46	-2.92	0.66	1.04
NTB13-14m	68.92	0.55	14.74	4.00	0.09	1.61	2.86	3.82	1.82	0.11	0.94	99.45	2.78	0.71	1.11
NTB13-38m	69.57	0.22	16.81	2.94	0.04	0.34	1.76	3.37	5.11	0.07	0.35	100.6	6.71	0.90	1.19
NTB13-39m	69.58	0.13	16.79	2.96	0.04	0.34	1.77	3.36	5.12	0.07	0.32	100.5	6.71	0.90	1.18
NTB13-40m	68.18	0.41	14.90	3.86	0.06	0.43	1.88	3.35	4.88	0.08	0.41	98.43	6.35	0.90	1.06
NTB14-16m	67.48	0.08	18.22	3.46	0.05	0.41	2.46	3.98	4.47	0.08	0.26	100.9	5.99	0.89	1.15
NTB14-19m	67.06	0.03	17.97	2.90	0.07	0.42	2.46	3.90	4.46	0.08	0.37	99.70	5.90	0.87	1.15
NTB14-21m	69.15	0.09	17.13	2.59	0.04	0.34	1.74	3.41	5.24	0.07	0.27	100.1	6.91	0.88	1.19
NTB14-24m	69.33	0.19	17.13	2.63	0.04	0.34	1.75	3.39	5.33	0.07	0.24	100.5	6.96	0.89	1.19

Appendix I. Continued.

Sample No.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	MALI	Fe [#]	ASI
NTB14-26m	69.97	0.35	14.29	2.85	0.19	0.33	1.59	3.26	5.16	0.05	0.26	98.30	6.83	0.90	1.04
NTB15-16m	64.05	0.71	16.39	4.96	0.07	1.71	4.11	3.47	2.13	0.14	0.53	98.28	1.49	0.74	1.07
NTB15-23m	62.95	0.64	17.34	4.71	0.07	1.63	4.32	3.62	2.28	0.14	0.56	98.24	1.58	0.74	1.08
NTB15-34m	72.36	0.17	14.45	0.99	0.93	0.10	0.37	5.00	3.78	0.04	0.26	98.45	8.41	0.91	1.12
NTB17-28m	62.53	0.65	16.52	5.10	0.08	1.80	4.40	3.43	2.35	0.14	0.91	97.90	1.38	0.74	1.03
NTB17-29m	60.54	0.71	17.46	5.39	0.08	1.86	4.75	3.67	2.53	0.15	1.47	98.61	1.45	0.74	1.01
NTB17-40m	62.86	0.79	16.43	4.90	0.24	1.82	4.14	3.51	2.50	0.14	0.88	98.21	1.87	0.73	1.04
1027-01-01	65.38	0.94	17.14	3.52	0.14	1.22	3.16	3.78	3.25	0.15	0.57	99.24	3.86	0.74	1.12
1027-01-02	65.53	0.75	17.47	3.61	0.13	1.23	3.34	4.18	2.97	0.15	0.60	99.97	3.81	0.75	1.09
1027-01-03	65.50	0.90	17.18	3.53	0.13	1.21	3.29	3.72	2.99	0.14	0.70	99.29	3.42	0.74	1.13
1027-01-04	67.11	0.54	16.97	2.94	0.13	1.12	2.84	3.76	2.86	0.03	0.68	98.97	3.78	0.72	1.18
1027-02-01	65.51	0.73	17.41	3.09	0.36	1.10	3.17	3.80	3.16	0.13	0.83	99.29	3.80	0.74	1.14
1027-02-02	64.10	0.78	18.05	3.98	0.16	1.37	3.55	4.16	2.57	0.16	0.58	99.46	3.18	0.74	1.14
1027-02-03	66.52	0.75	16.92	3.04	0.14	1.10	3.19	3.85	2.89	0.12	0.72	99.21	3.55	0.73	1.12
1027-02-04	67.62	0.39	16.71	2.33	0.12	0.78	2.47	3.57	4.41	0.09	0.81	99.30	5.51	0.75	1.11
1027-02-05	67.87	0.58	16.49	2.79	0.17	0.97	2.72	3.68	3.77	0.11	0.62	99.77	4.73	0.74	1.10
1027-03-01	69.07	0.52	15.42	2.87	0.15	0.68	2.24	3.82	3.54	0.10	0.84	99.24	5.12	0.81	1.10
1027-03-02	70.01	0.51	15.20	2.48	0.14	0.60	2.09	3.68	3.98	0.08	0.68	99.45	5.57	0.80	1.08
1027-03-03	71.71	0.31	14.22	1.59	0.12	0.37	1.35	2.88	5.62	0.05	0.55	98.76	7.14	0.81	1.08
1027-04-01	69.60	0.40	14.80	2.70	0.13	0.57	1.49	2.86	5.71	0.09	0.45	98.82	7.08	0.82	1.10
1027-05-01	67.56	0.75	15.47	3.73	0.16	1.20	3.04	3.76	2.77	0.16	0.87	99.47	3.49	0.76	1.06
1027-05-02	65.95	0.58	16.66	3.48	0.16	1.06	3.13	3.91	3.22	0.13	0.60	98.88	4.00	0.77	1.08
1027-05-03	68.57	0.38	15.59	2.41	0.14	0.78	2.33	3.35	4.38	0.10	0.60	98.63	5.40	0.76	1.08
1027-05-04	66.80	0.94	15.57	4.51	0.17	1.41	3.28	3.76	2.42	0.18	0.57	99.60	2.90	0.76	1.07
1027-05-05	67.51	0.60	15.80	2.83	0.14	0.92	2.59	3.46	4.16	0.12	0.73	98.87	5.03	0.75	1.07
1027-05-06	68.13	0.61	15.35	3.26	0.14	1.03	2.81	3.54	3.36	0.13	0.53	98.88	4.09	0.76	1.07
1027-05-07	67.81	0.52	15.10	3.68	0.16	1.16	2.67	3.37	3.55	0.13	0.68	98.84	4.25	0.76	1.07
1027-05-08	67.85	0.71	15.47	3.35	0.16	1.05	2.91	3.78	2.91	0.13	0.61	98.94	3.78	0.76	1.07
1027-05-09	67.11	0.62	15.72	3.53	0.15	1.11	2.94	3.62	3.29	0.14	0.66	98.88	3.97	0.76	1.07
1027-05-10	68.87	0.69	15.31	3.76	0.17	1.19	2.96	3.63	2.85	0.15	0.35	99.91	3.51	0.76	1.07
1027-06-01	69.07	0.40	16.14	1.85	0.14	0.56	2.62	4.08	3.40	0.10	0.68	99.03	4.85	0.77	1.07
1027-06-02	68.57	0.42	16.10	2.05	0.15	0.60	2.76	4.28	2.93	0.11	1.22	99.19	4.44	0.77	1.07
1027-06-03	69.43	0.41	16.15	2.24	0.15	0.66	2.72	4.23	2.80	0.11	0.56	99.45	4.31	0.77	1.09
1027-06-04	69.98	0.42	15.73	2.01	0.14	0.60	2.68	4.09	2.89	0.10	0.52	99.15	4.29	0.77	1.08
1027-07-01	69.92	0.25	16.21	1.47	0.14	0.39	2.14	4.40	3.44	0.06	0.67	99.07	5.70	0.79	1.10
1027-07-02	69.79	0.27	15.83	1.67	0.13	0.47	2.42	4.25	3.12	0.08	0.53	98.56	4.95	0.78	1.08
1027-07-03	72.13	0.22	15.01	0.74	0.12	0.24	2.21	4.20	2.98	0.04	0.55	98.43	4.96	0.75	1.06
1027-07-04	69.52	0.25	16.10	1.64	0.14	0.44	2.10	4.18	3.62	0.07	0.69	98.73	5.70	0.79	1.11
1027-07-05	69.64	0.40	15.84	1.87	0.14	0.55	2.37	4.09	3.43	0.09	0.60	99.01	5.15	0.77	1.08
1027-07-06	67.89	0.17	16.69	1.44	0.14	0.41	2.00	3.96	4.67	0.06	0.65	98.08	6.64	0.78	1.10
1027-07-07	69.81	0.26	15.95	1.62	0.14	0.46	2.23	4.47	3.05	0.07	0.68	98.75	5.29	0.78	1.09
1027-07-08	69.96	0.30	15.99	1.61	0.14	0.48	2.23	4.44	3.05	0.07	0.70	98.96	5.25	0.77	1.10

Appendix I. Continued.

Sample No.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	MALI	Fe [#]	ASI
1027-08-01	70.21	0.27	15.33	1.69	0.14	0.52	2.32	4.00	3.21	0.08	0.85	98.60	4.88	0.77	1.08
1027-08-02	69.28	0.33	15.84	1.86	0.15	0.57	2.48	4.23	3.06	0.09	0.62	98.50	4.81	0.77	1.08
1027-08-03	69.25	0.30	16.33	1.82	0.14	0.57	2.67	4.52	2.68	0.09	0.92	99.29	4.53	0.76	1.08
1027-08-04	70.65	0.39	14.92	1.73	0.14	0.54	2.36	4.05	2.84	0.08	0.72	98.43	4.54	0.76	1.07
1027-08-05	69.35	0.44	15.89	1.86	0.14	0.59	2.42	4.30	2.88	0.09	1.23	99.19	4.76	0.76	1.10
1027-08-06	69.42	0.30	16.06	1.89	0.14	0.55	2.47	4.22	3.25	0.09	0.61	99.01	5.00	0.77	1.08
1027-09-01	68.66	0.34	15.71	1.99	0.14	0.58	2.65	4.15	2.76	0.09	0.88	97.95	4.25	0.77	1.08
1027-09-02	70.51	0.32	15.47	1.65	0.13	0.52	2.24	3.87	3.61	0.08	0.66	99.08	5.24	0.76	1.09
1027-09-03	69.31	0.35	15.57	1.79	0.13	0.52	2.19	3.78	3.92	0.09	0.57	98.20	5.50	0.78	1.09
1027-09-04	67.17	0.39	17.42	1.92	0.14	0.57	2.80	4.55	3.23	0.09	0.69	98.99	4.98	0.77	1.09
1027-09-05	69.80	0.37	15.77	2.08	0.15	0.61	2.61	4.21	2.81	0.10	0.75	99.25	4.41	0.77	1.08
1027-10-01	62.89	0.64	16.64	4.56	0.19	2.29	4.51	3.35	2.41	0.12	2.01	99.62	1.25	0.67	1.03
1027-10-02	64.06	0.47	16.41	3.91	0.17	1.98	3.83	3.05	3.83	0.11	1.04	98.86	3.06	0.66	1.03
1027-10-03	63.08	0.52	16.40	4.53	0.19	2.24	4.26	3.27	3.03	0.12	2.04	99.68	2.04	0.67	1.01
1027-10-04	63.43	0.54	16.45	4.26	0.18	2.15	4.43	3.24	3.06	0.12	1.22	99.08	1.87	0.67	0.99
1027-11-01	62.33	0.50	17.27	4.40	0.17	2.30	4.88	3.26	2.73	0.13	1.21	99.19	1.11	0.66	1.01
1027-11-02	61.56	0.62	17.08	5.02	0.18	2.45	4.56	3.16	3.23	0.13	1.13	99.13	1.83	0.67	1.01
1027-12-01	61.81	0.73	17.24	4.54	0.17	2.38	4.98	3.32	2.66	0.13	1.96	99.93	1.00	0.66	1.00
1027-12-02	60.86	0.85	16.93	5.26	0.18	2.71	4.93	3.23	1.98	0.14	2.83	99.92	0.28	0.66	1.04
1027-13-01	59.74	0.73	17.69	5.49	0.18	2.85	5.53	3.40	2.02	0.16	0.99	98.76	-0.11	0.66	1.00
1027-13-02	60.15	0.64	17.84	5.25	0.19	2.75	5.56	3.43	2.13	0.15	0.80	98.88	-0.01	0.66	1.00
1027-14-01	60.59	0.61	17.35	5.10	0.19	2.59	4.35	3.34	3.04	0.14	2.57	99.86	2.02	0.66	1.05
1027-14-02	60.92	0.59	17.44	4.84	0.19	2.50	5.21	3.46	2.31	0.14	1.28	98.86	0.56	0.66	1.00
1027-14-03	61.12	0.60	17.35	4.93	0.18	2.49	4.96	3.27	2.49	0.14	1.22	98.76	0.80	0.66	1.02
1027-15-01	61.76	0.75	17.04	4.78	0.17	2.53	4.82	3.32	2.51	0.12	1.32	99.13	1.01	0.65	1.01
1027-15-02	61.09	0.79	16.92	5.38	0.18	2.70	4.84	3.31	2.42	0.13	1.74	99.49	0.89	0.67	1.01
1028-01-01	69.06	0.34	15.68	2.15	0.12	0.73	2.32	3.41	4.36	0.08	0.79	99.05	5.45	0.75	1.08
1028-01-02	68.09	0.64	16.30	2.83	0.14	0.96	3.19	4.10	2.39	0.10	0.85	99.59	3.30	0.75	1.09
1028-01-03	68.61	0.56	16.23	2.53	0.13	0.84	2.93	4.10	2.83	0.10	0.81	99.65	4.00	0.75	1.08
1028-01-04	66.83	0.70	16.65	3.27	0.15	1.11	3.53	4.11	2.13	0.12	0.82	99.40	2.72	0.75	1.09
1028-01-05	69.73	0.36	15.46	2.10	0.12	0.73	2.46	3.53	3.70	0.08	0.69	98.96	4.77	0.74	1.09
1028-01-06	69.19	0.40	16.64	2.30	0.13	0.78	2.55	3.66	3.45	0.09	0.76	99.95	4.55	0.75	1.16
1028-01-07	68.69	0.42	15.90	2.35	0.13	0.77	2.73	3.89	2.94	0.09	0.92	98.82	4.10	0.75	1.10
1028-01-08	70.70	0.33	15.37	1.86	0.13	0.64	2.17	3.52	4.00	0.07	0.74	99.53	5.35	0.74	1.10
1028-01-09	70.16	0.39	15.54	2.04	0.12	0.66	2.22	3.81	3.70	0.08	0.99	99.70	5.28	0.76	1.09
1028-01-10	69.59	0.38	15.64	2.14	0.13	0.70	2.37	3.80	3.69	0.08	0.76	99.27	5.12	0.75	1.08
1028-01-11	69.48	0.52	15.26	2.37	0.13	0.77	2.33	3.67	3.74	0.09	0.57	98.93	5.08	0.76	1.07
1028-02-01	69.68	0.48	15.42	2.26	0.14	0.76	2.62	3.88	2.98	0.08	0.87	99.15	4.24	0.75	1.08
1028-03-01	69.30	0.45	15.76	2.23	0.14	0.77	2.55	3.95	3.14	0.08	0.91	99.28	4.55	0.74	1.09
1028-03-02	70.88	0.41	14.99	1.93	0.14	0.65	2.69	4.35	1.84	0.07	1.21	99.15	3.50	0.75	1.07
1028-03-03	69.82	0.47	15.45	2.28	0.16	0.73	2.82	4.41	1.83	0.08	1.86	99.89	3.42	0.76	1.08
1028-03-04	70.37	0.37	15.04	1.86	0.13	0.64	2.11	3.58	3.83	0.07	0.98	98.98	5.31	0.74	1.09

Appendix I. Continued.

Sample No.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	MAI	Fe [#]	ASI
1028-03-05	68.01	0.41	16.30	2.25	0.14	0.77	2.30	3.88	3.92	0.09	1.10	99.17	5.51	0.75	1.11
1028-04-01	68.30	0.55	16.22	2.41	0.15	0.85	2.66	3.78	3.36	0.09	0.91	99.26	4.48	0.74	1.11
1028-04-02	65.51	0.65	17.06	3.06	0.14	1.06	2.89	3.86	3.82	0.12	0.84	99.00	4.78	0.74	1.10
1028-04-03	68.95	0.33	15.68	2.42	0.13	0.79	2.37	3.61	3.94	0.08	0.64	98.94	5.18	0.75	1.09
1028-04-04	66.47	0.60	16.33	3.00	0.14	1.01	2.96	4.02	2.89	0.12	1.44	98.98	3.95	0.75	1.09
1028-04-05	66.63	0.73	16.33	3.13	0.13	1.08	3.18	3.89	2.80	0.12	0.77	98.78	3.51	0.74	1.08
1028-05-01	68.03	0.26	15.91	2.15	0.14	0.80	2.30	3.74	4.17	0.08	1.18	98.75	5.61	0.73	1.08
1028-05-02	69.50	0.42	15.18	2.31	0.14	0.82	2.18	3.55	3.84	0.08	1.20	99.21	5.20	0.74	1.10
1028-05-03	69.36	0.49	15.57	2.16	0.14	0.80	2.44	3.74	3.62	0.08	0.90	99.29	4.92	0.73	1.08
1028-05-04	70.49	0.33	14.88	1.79	0.12	0.66	2.08	3.41	4.42	0.07	0.76	99.01	5.75	0.73	1.06
1028-05-05	69.98	0.65	15.05	2.07	0.14	0.74	2.29	3.53	3.85	0.08	0.66	99.04	5.09	0.74	1.07
1028-05-06	68.57	0.44	15.74	2.18	0.14	0.74	2.27	3.65	4.27	0.08	1.11	99.19	5.65	0.75	1.07
1028-05-07	69.98	0.33	14.78	2.09	0.13	0.77	1.97	3.50	3.92	0.08	1.40	98.95	5.46	0.73	1.10
1028-05-08	69.13	0.42	15.22	2.37	0.15	0.86	2.39	3.67	3.63	0.09	0.90	98.83	4.92	0.74	1.07
1028-06-01	72.37	0.35	13.06	2.33	0.19	0.60	1.18	3.38	4.74	0.08	0.55	98.84	6.94	0.79	1.02
1028-06-02	71.39	0.27	13.52	2.61	0.18	0.55	1.26	3.68	4.46	0.09	0.70	98.72	6.88	0.83	1.03
1028-06-03	52.67	1.23	17.57	9.35	0.57	2.52	5.03	5.35	2.45	0.75	1.56	99.05	2.78	0.79	0.89
1028-06-04	71.10	0.26	13.92	2.23	0.20	0.56	1.49	3.59	4.79	0.09	0.49	98.71	6.89	0.80	1.02
1028-06-05	69.63	0.25	14.69	2.08	0.20	0.51	1.51	4.02	4.84	0.08	0.34	98.14	7.35	0.80	1.01
1028-06-06	68.27	0.30	15.54	2.61	0.21	0.64	1.96	4.44	4.17	0.10	0.44	98.68	6.65	0.80	1.02
1028-06-07	70.82	0.30	13.88	2.51	0.21	0.64	1.52	3.86	4.54	0.10	0.60	98.98	6.87	0.80	1.00
1028-06-08	51.04	2.06	17.55	9.78	0.43	3.49	6.39	4.44	2.54	0.54	0.67	98.92	0.58	0.74	0.84
1028-06-09	70.50	0.34	14.66	2.20	0.20	0.53	1.63	4.14	4.27	0.09	0.46	99.02	6.77	0.81	1.03
1028-06-10	70.03	0.31	14.76	2.39	0.22	0.58	1.72	4.21	4.26	0.09	0.46	99.01	6.74	0.80	1.01
1028-06-11	69.02	0.39	14.73	3.00	0.25	0.70	1.85	4.24	4.02	0.12	0.78	99.09	6.41	0.81	1.01

Appendix II. Sample locations (TM coordinates system) of Middle-Late Triassic and Early Jurassic plutonic rocks in the Yeongnam Massif, South Korea

sample No.	X	Y	sample No.	X	Y
080804-1	221324	251483	HTB-01	220629	248167
080804-2	218863	251146	NBB-01	220395	248385
080804-3	219792	249777	NBB-02	220386	248369
080805-1	220090	250108	NBB-03	220333	248440
080805-2	220831	250903	NBB3-1	220314	248442
080805-3	219833	248201	NBB-04	220224	248543
080805-4	220223	248628	NBB4-1	220200	248542
080810-1	220214	250342	NBB-05	220094	248651
080810-2	220496	251097	NBB5-1	220080	248651
080806-1	222806	248621	NBB-06	219988	248737
080806-2	222606	248743	NBB-07	219913	248828
080806-3	220582	248828	NBB-08	219916	248857
080806-4	222916	254319	NBB-09	219870	248870
080810-3	220627	248631	NBB-14	219744	249065
080811-1	220723	251940	NBB-15	219731	249094
080811-5	220091	248664	NBB-17	219690	249187
080811-2	222499	251594	NBB-18	219665	249234
080811-3	222499	251017	NBB-19	219636	249272
080811-4	220831	251957	NBB-20	219622	249316
080812-1	219916	249348	NBB-22	219556	249860
080812-2	219872	249235	NCB-01	220609	248145
080812-4	219769	248855	NCB-02	219634	249358
			NCB-03	219626	249440
			NCB-04	219606	249521
			NCB-05	219600	249639
			NCB-06	219583	249775
			NCB-07	219509	249788
			NCB-08	219450	249957
			NCB-09	219564	249944
			NCB-11	220018	250919
			NSB-03	219763	250513
			NSB-04	219878	250602
			NSB-14	220510	252566
			NTB-01	220652	248179
			NTB-02	220631	248166
			NTB-03	220614	248168
			NTB-04	220522	248211
			NTB-05	220456	248298
			NTB-06	220463	248331
			NTB-07	220407	248349
			NTB-08	220423	248370
			NTB-09	219976	250742
			NTB-10	220013	250791
			NTB-11	220524	251809
			NTB-12	220524	251809
			NTB-13	220479	251489
			NTB-14	220539	251671
			NTB-15	219540	249794
			NTB-17	219504	249941

sample No.	X	Y
1027-01	240163	262196
1027-02	238750	263668
1027-03	237715	264727
1027-04	239531	266904
1027-05	235944	269875
1027-06	250454	281472
1027-07	252373	279580
1027-08	253535	280218
1027-09	254421	278544
1027-10	272899	290806
1027-11	273900	291474
1027-12	274439	291453
1027-13	276500	290487
1027-14	277216	290334
1027-15	277453	290030
1028-01	300979	289919
1028-02	300150	290492
1028-03	299911	290517
1028-04	296456	291567
1028-05	299765	290566
1028-06	308121	325919

감사의 글

박사학위 동안 언제나 크고 바른 가르침을 주신 박영석 지도교수님께 깊은 감사를 드립니다.

부족한 저의 논문을 보다 알차게 써 갈 수 있도록 세심한 지도편달을 해 주신 존경하는 조선대학교 박천영 교수님, 경북대학교 유인창 교수님, (주)희송지오택의 박영도 이사님, 김성원 연구교수님께도 깊은 감사드립니다. 또한 학부 때부터 늘 한결 같이 사랑으로 가르쳐주신 강추원 교수님, 한오형 교수님, 고진석 교수님께 감사드리며, 학위논문 과정을 관심 있게 지켜봐 주신 강성승 교수님께도 감사드립니다.

학위논문에서 시료분석에 신경써주신 한국기초과학지원연구원의 정연중 박사님과 조선대학교 공동실험실습관의 김종균 박사님께도 깊은 감사를 드립니다.

그리고 늦게까지 공부만 하면서, 부모님에게 걱정만 드린 아들을 끝임 없이 관심과 격려를 보내주신 아버지, 어머니, 누나들, 어린 조카에게 깊은 감사와 사랑한다고 전해 주고 싶습니다.

지구화학실험실의 우석이형, 민수형, 용화형, 영상이형, 장준에게도 고마움을 전하며, 같이 실험실생활을 하면서 부딪친 성태, 인희, 태진이, 우경이, 미소에게도 감사하며, 더욱 열심히 모습으로 알차게 나아가는 후배들이 되길 기원해봅니다. 그리고 대학원 생활을 같이 한, 호민이형, 현호형, 고등학교 때부터 같은 길을 가고 있는 복현이, 그리고 동조에게도 마지막으로 단석희 후배들에게도 고마움을 전합니다.

초등학교부터 19년 오랜 우정을 나눈 친구들, 같은 고등학교를 졸업하지 않았지만, 친해진 송원고 친구들, 문성고 동문들, 그리고 유미, 민희, 동호, 준현, 세로, 소연 동선, 유진, 수정씨, 세연이형님 에게도 고마운 맘을 전합니다. 그리고 어제가 결혼식이었던 지용이 한테는 바쁜 나머지 못 참석한 친구가 미안한 맘을 논문으로나마 전해 줍니다.

학위과정을 받으면서, 이제부터가 진정한 시작점이라는 이제 알게 되었습니다. 이런 초심을 잃어버리지 않고, 더욱 정진하는 제가 되기를 다짐해 봅니다.

마지막으로 논문을 쓰기 위해서 많은 도움을 주신 교수님, 박사님들과의 공동연구로 써, 논문의 데이터를 공유할 것을 말씀드립니다.

저작물 이용 허락서

학 과	자원공학과	학 번	20067320	과 정	박 사
성 명	한글: 박 대 우 한문: 朴 大 禹 영문: Park, Dae Woo				
주 소	광주광역시 남구 방림1동 425-2번지				
연락처	E-MAIL : ramese@nate.com				
논문제목	<p>한글 : 영남육괴 변암-함양일대 트라이아스기 중기-말기 및 쥐라기 초기 심성암류에 대한 지질특성, 지구화학 및 Nd-Sr 동위원소 연구</p> <p>영문 : Geological characteritic, geochemical and Nd-Sr isotope studies Middle-Late Triassic and Early Jurassic plutonic rocks near the Bunam-Hamyang areas, Yeongnam Massif</p>				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

2009 년 1 월 일

저작자: 박 대 우



조선대학교 총장 귀하