

영남(소백산)육괴 북동부 평해지역 화강편마암류의 SHRIMP U-Pb 저콘 연대

김남훈 · 송용선* · 박계헌 · 이호선

부경대학교 환경지질학과

SHRIMP U-Pb Zircon Ages of the Granite Gneisses from the Pyeonghae Area of the northeastern Yeongnam Massif (Sobaeksan Massif)

Nam-Hoon Kim, Yong-Sun Song*, Kye-Hun Park and Ho-Sun Lee

Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University

요약: 영남(소백산)육괴 북동부의 고원생대 변성퇴적암류(평해층과 원남층)를 관입한 평해 화강편마암과 하대 우백질화강편마암에 대해 암석기재적, 지구화학적 및 지구연대학적 연구를 수행하였다. 평해 화강편마암은 하대 우백질화강편마암에 비해 대체로 흑운모 등 유색광물의 함량이 약간 높으며, 화학조성에서 SiO_2 와 K_2O 함량은 낮고 Fe_2O_3 , MgO , CaO , TiO_2 , P_2O_5 등의 함량은 높다. 하대 우백질화강편마암이 음(-)의 Eu 이상치가 다소 크지만 전체적인 희토류원소의 함량과 패턴은 평해 화강편마암과 매우 유사하다. 성분분화도에서 두 암체는 대체로 흑운모와 사장석, 인회석 또는 스펀의 정출에 의한 분화경향을 보인다. 두 화강편마암 모두 과알루미나질의 칼크-알칼리계열로 섭입대와 관련된 대륙화산호 조구조환경을 지시한다. 저어콘 U-Pb SHRIMP 연대측정의 결과를 보면 평해 화강편마암과 하대 우백질화강편마암의 상부교점연대는 각각 1990 ± 23 Ma (2σ)와 1939 ± 41 Ma (2σ)이고 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 가중평균연령은 각각 1982 ± 6.3 Ma (2σ)와 1959 ± 28 Ma (2σ)로 오차범위에서 서로 겹치는 연대를 보인다. 따라서 이 지역에서의 선캠브리아기 화강암류의 관입시기는 분천화강편마암의 관입과 동시대이며, 태백산지역에서의 화강암질마그마작용은 대부분 이 시기에 대륙화산호 환경에서 있었던 것으로 해석된다.

핵심어: 영남(소백산)육괴, 태백산지역, 선캠브리아, 평해 화강편마암, 하대 우백질화강편마암, 고분해능이온파이크로프로브, 저어콘 U-Pb 연대

Abstract: We performed petrological, geochemical, and geochronological study for the Pyeonghae granite gneiss and the Hada leuco-granite gneiss intruding the Paleoproterozoic meta-sedimentary rocks (Pyeonghae formation and Wonnam formation) of the Pyeonghae area located in northeastern part of the Yeongnam (Sobaeksan) massif. The Pyeonghae granite gneiss generally has higher abundance of mafic minerals (biotite etc.), and possesses higher Fe_2O_3 , MgO , CaO , TiO_2 , P_2O_5 contents but lower SiO_2 and K_2O contents than the Hada leuco-granite gneiss which tends to have slightly high Al_2O_3 and Na_2O contents and slightly high larger negative Eu anomalies. However both gneisses reveal very similar REE concentrations and chondrite-normalized patterns and apparently show differentiation trend affected by crystallization of biotite, plagioclase, apatite and sphene. Their peraluminous and calc-alkaline chemistry suggests tectonic environment of volcanic arc. SHRIMP Zircon U-Pb age determinations yield upper intercept ages of 1990 ± 23 Ma (2σ) and 1939 ± 41 Ma (2σ), and weighted mean $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages of 1982 ± 6.3 Ma (2σ) and 1959 ± 28 Ma (2σ) for the Pyeonghae granite gneiss and the Hada leuco-granite gneiss respectively, showing overlapping ages within the error. Our study suggests that the Precambrian granitoids in this area intruded contemporaneously with the Buncheon granite gneiss in volcanic arc environment.

*Corresponding author

Tel: 82-51-629-6627; Fax: 82-51-629-6623

E-mail: yssong@pknu.ac.kr

Key words: Yeongnam (Sobaeksan) massif, Taebaeksan area, Pyeonghae area, Precambrian, Pyeonghae granite gneiss, Hada leuco-granite gneiss, SHRIMP, zircon U-Pb age

서론

남령육괴, 경기육괴와 함께 한반도 땅의 선캄브리아 기반을 이루는 영남(소백산)육괴의 북동부에 해당되는 태백산지역은 선캄브리아기의 분천 화강편마암과 홍제사 화강암이 중앙부 대부분을 차지하며 동서 방향으로 가로질러 넓게 분포하고 있다(Fig. 1). 그 남쪽 평해지역은 평해층, 원남층 및 울리층의 변성퇴적암류와 이를 관입한 평해 화강편마암과 우백질의 하다 화강편마암 등 화강암류로 주로 구성되어 있고, 북쪽지역은 원남층에 대비되는 호산리층과 이를 관입한 이천 화강암질편마암, 임원 우백질화강편마암 등

의 화강암류로 구성되어 있어 선캄브리아기에 이 지역에 화강암질 마그마작용이 활발하게 일어났음을 지시하고 있다.

태백산 지역의 선캄브리아기 화강암류에 대한 연대 측정 결과는 약 2.1 Ga, 1.95~1.92 Ga, 1.82 Ga 등 다양한 연대를 보이고 있어(박계현 외, 1993; Kim and Turek, 1996; Cheong *et al.*, 2000; Kim and Cho, 2003; Chang *et al.*, 2003) 여러 시기에 걸쳐 화강암질 마그마작용이 일어난 것으로 해석되고 있다.

Cheong *et al.*(2000)은 평해지역 화강편마암류에 대해 2093 ± 86 Ma (2σ)의 Pb-Pb 전암 등시선 연대를 구하였는데, 측정연대의 오차가 크고 기존 지질도폭

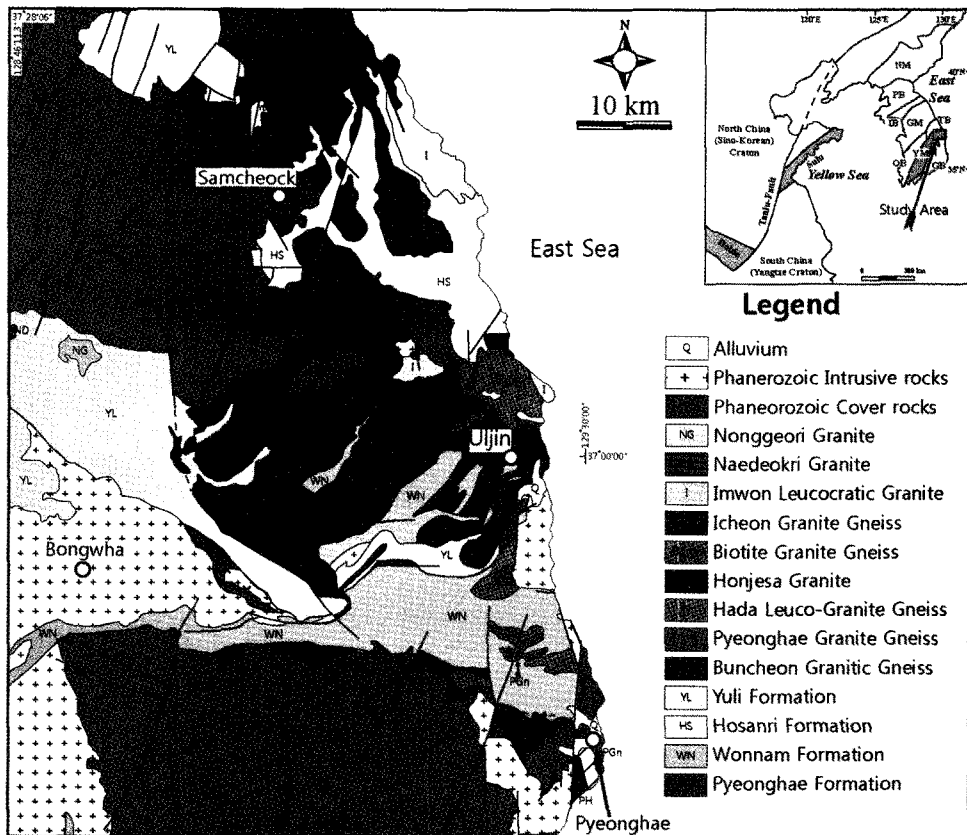


Fig. 1. Regional geological map of northeastern Yeongnam massif modified after Whang *et al.* (1996) and Kim *et al.* (2001). The inset figure shows the location of the study area. NM: Nangrim Massif, PB: Pyeongnam Basin, IB: Imjingang Belt, TB: Taebaeksan Basin, GM: Gyeonggi Massif, OB: Okcheon Belt, YM: Yeongnam Massif, GB: Gyeongsang Basin.

(김옥준 외, 1963a)에서 암상에 따라 구분한 평해 화강편마암과 하다 우백질화강편마암을 따로 구분하지 않고 시료들을 채취하여 구한 연대이다. 또한 Chang *et al.*(2003)은 평해 화강편마암에서 분리한 저어콘에 대해 U, Pb 동위원소 희석법으로 1936 ± 21 Ma (2σ)를 보고하였는데 분석치들의 불일치도(discordance)가 너무 커서 확실한 관입연대를 나타낸다고 보기 어렵다.

이 연구에서는 평해 화강편마암과 하다 우백질화강편마암의 암석기재적, 지구화학적 특징을 조사비교하고, 이들 암체에서 분리한 저어콘에 대해 고분해능이온마이크로프로브(SHRIMP)를 이용한 연대측정으로 각 암체의 관입시기를 구함으로써 이 지역에서 일어난 선크브리아기 마그마작용의 시기와 특성을 밝히는 데 목적을 두었다.

일반지질 및 암석기재

연구지역은 울진군 기성면과 원남면 일대로 거의 대부분의 지역에 걸쳐 선크브리아기의 변성퇴적암층과 화강편마암류가 분포하고 있다. 이 지역 선크브리아기 변성퇴적암층은 1:50,000 평해도폭(김옥준 외, 1963a), 울진도폭(윤석규와 신병우, 1963), 삼근리도폭(김옥준 외, 1963b), 도계동도폭(김옥준 외, 1963c) 등의 지질조사에 의해 하부로부터 평해통, 기성통, 원남통, 그리고 울리통의 층서가 설정되어 영남육괴를 비롯한 우리나라 선크브리아기 암층의 층서를 분류하고 대비하는데 기준으로 사용되어 왔다. 원남통은 원래 원남층, 동수곡층, 장군석회암층 및 두음리층 등으로 구성되어 있는 것으로 보고 되었으나(김옥준 외, 1963a), 이후의 연구들(황덕환과 Reedman, 1975; 이현구 외, 1992; 이상만 외, 1986; 김기영 외, 1996 등)에서 원남층을 제외한 층들, 즉 동수곡층, 장군석회암층, 두음리층 등은 모두 선크브리아기가 아닌 고생대층으로 재분류되어 두음리층과 장군석회암층은 조선누층군에 동수곡층은 평안누층군에 대비되고 있다.

평해층, 기성층, 그리고 원남층의 관계는 변성화산암층인 기성층에 의해 서로 부정합관계로 해석되고 있지만(김옥준 외, 1963a) 최근의 연구(김남훈, 2001; 김남훈 외, 2002)는 기성층이 변성화산암층이 아니라 압쇄암 내지 초압쇄암으로 평해층과 원남층의 경계를 전단대로 설명한 바 있다. 이에 대해서는 앞으로 보다 깊은 연구가 필요하지만, 기존의 기성층 분포지역이 주 전단대의 남쪽으로 평해층에 대비되므로 여기

서는 기성층을 평해층에 포함되는 것으로 보았다.

평해층과 원남층을 관입한 고기의 화강편마암류는 암상과 선후관계에 의해 평해 화강편마암과 하다 우백질화강편마암으로 분류된다. 평해 화강편마암과 하다 우백질화강편마암은 평해지질도폭(김옥준 외, 1963a)에서 명명된 것으로, 우백질, 페그마타이트질 내지 애플라이트질로 후기 마그마 분화물의 특징이 강한 암상을 보이는 화강편마암들을 하다 화강편마암, 보통의 흑운모 화강편마암의 특징을 갖는 편마암상, 호상, 반상변정질 내지 안구상의 화강편마암들을 평해 화강편마암으로 분류하였는데 야외에서 그 구분이 어려운 경우도 있다. 이러한 암상에 따른 분류기준에 따라 이 연구에서 울진도폭(윤석규와 신병우, 1963)의 화강편마암A는 평해 화강편마암으로, 화강편마암B와 도계동도폭의 우백질화강편마암은 하다 우백질화강편마암으로 통일하였다.

장군석회암층과 동수곡층 등 고생대로 분류되는 퇴적기원 암층들은 연구지역 내에서는 덕신리와 망양리 등 북동쪽 일부 지역에 소규모로 분포하며, 북동쪽 해안을 따라 분포된 주라기 흑운모 화강암의 관입을 받았다. 남서부 지역에는 백악기의 경상누층군 퇴적암층인 울련산층, 동화치층, 가송동층, 청량산층이 분포하며, 이들을 백악기 말에 온정리 화강암(87 Ma, 정창식 외, 1998)에 의해 관입되었다. 백악기에서 제3기에 걸쳐 관입 및 분출한 유문암질의 산성 맥암 및 화산암류가 원남면 광대골 부근에 매우 소규모로 분포하고 있다(Fig. 2).

평해 화강편마암

평해 화강편마암은 연구지역 중앙부와 동부 해안지역에 넓게 분포하고 있다. 동부에선 해안선을 따라 남북방향의 대상분포를 나타낸다. 평해 화강편마암은 조립질이고 엽리가 잘 발달된 흑운모 화강편마암 및 반상변정질 내지 안구상의 화강편마암으로 주로 구성되며 원남층을 관입하였다.

평해도폭(김옥준 외, 1963a)에 따르면 본 암은 가장 고기 화성기원변성암으로 후포리층에 의하여 부정합으로 덮히고 원남층을 관입하므로 선크브리아기에 속하는 화강편마암으로 기재되어 있다.

중앙부 지역에 분포된 평해 화강편마암은 안구상 조직을 보이는 부분도 있지만 대체로 엽리가 현저하게 발달된 조립질 흑운모 화강편마암(Fig. 3 a & b) 또는 입자가 조금 작고 엽리가 덜 현저한 화강편마암

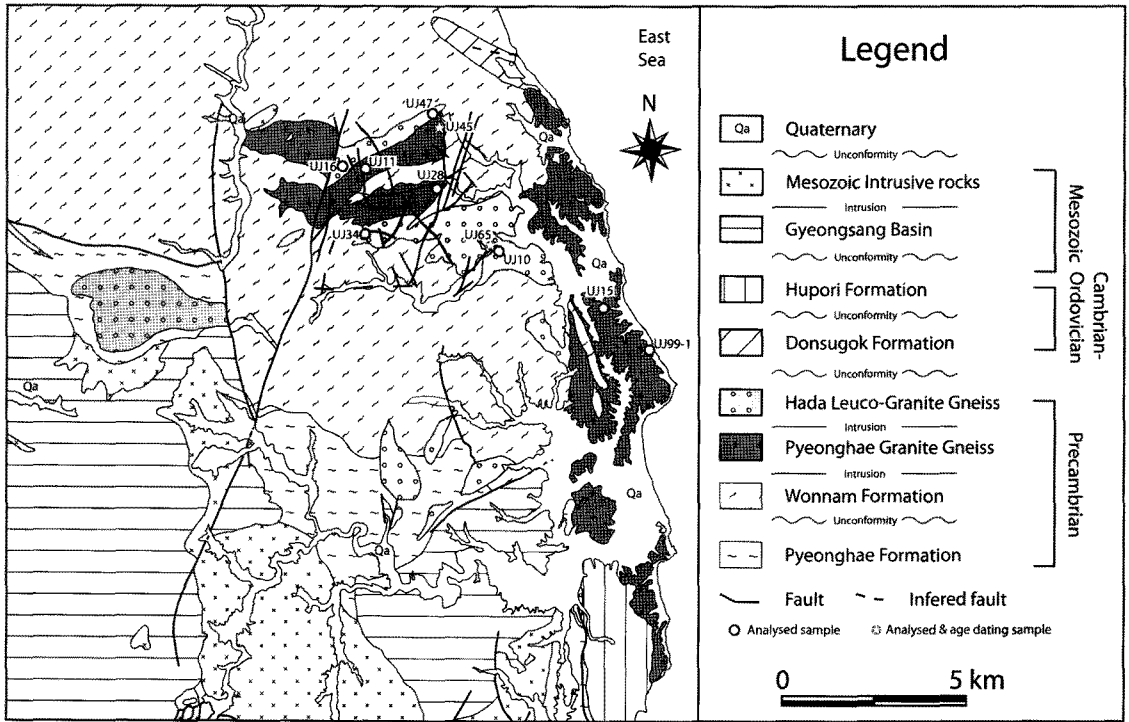


Fig. 2. Geological map of study area modified after Kim et al. (1963a), Kim et al. (1963b), Kim et al. (1963c), and Yoon and Shin (1963).

들이 주이다. 후자의 경우 흑운모의 함량이 낮은 편이어서 하다 화강편마암과 구별이 쉽지 않은 경우도 있다. 석영, 사장석, 미사장석 그리고 흑운모가 주성분이며 국부적으로 각섬석이 포함되는 경우도 있다 (Fig. 3b). 동부해안을 따라 분포한 평해 화강편마암은 거의 대부분 2-3 cm 정도 크기의 미사장석 반상변정이 잘 발달된 반상변정질이거나 변정들이 안구상으로 신장된 안구상 조직이 잘 발달된 반상변정질 내지 안구상 화강편마암이다(Fig. 3b). 평해 화강편마암들은 원남층과 함께 중첩된 변형 및 변성작용을 받아 이들 암석 내에는 흔히 습곡구조가 잘 발달되어 있으며, 부분적으로는 미그마타이트질 우백부가 발달되기도 하였다. 또한 석류석들은 미그마타이트질 우백부에 잘 수반되는 경향을 보인다.

현미경하에서 관찰해보면 주구성광물은 알칼리장석, 석영, 사장석, 흑운모이며 백운모, 갈렘석(allanite), 녹니석, 모나자이트, 저콘 등이 부성분 광물로 나타난다 (Fig. 4a). 알칼리장석은 주로 반정으로 산출하는데 내부에 사장석과 석영 리본 등의 포유물을 수반하기도 하며 반정의 주변부에 2차적으로 생성된 알칼리 장석

과 석영의 연정으로 이루어진 문상조직을 보이기도 한다. 또한 미르메카이트 조직도 부분적으로 발달한다. 비교적 신선한 시료에서도 변질작용의 산물이 많이 관찰된다. 사장석의 경우 변질에 의해 세리사이트화 된 부분이 많으며, 부수광물로 나타나는 녹니석은 대부분이 흑운모의 변질에 의해 형성된 것으로 보인다. 암석에서 나타나는 엽리의 방향성은 주로 안구상 미사장석의 배열, 석영 리본, 흑운모, 백운모의 배열에 의해 규제된다(Fig. 4b).

하다 우백질화강편마암

하다 우백질화강편마암은 주로 조사지역 중앙부에서 동서방향의 대상으로 원남층을 관입하였으나 평해 화강편마암과의 관계는 불명확하다. 점이적인 관계를 보이기도하고 지역에 따라서는 단층접촉을 이루기도 한다. 대체로 유백색이고 괴상의 다소 엽리가 발달되어 있고 곳에 따라 석류석 반정을 포함하기도 한다 (Fig. 3c & 4c). 또한 원남층 내에도 좁은 폭으로 페그마타이트질 내지 애플라이트질의 주입상으로 자주 산출된다. 부분적으로는 흑운모의 함량이 높고 안구

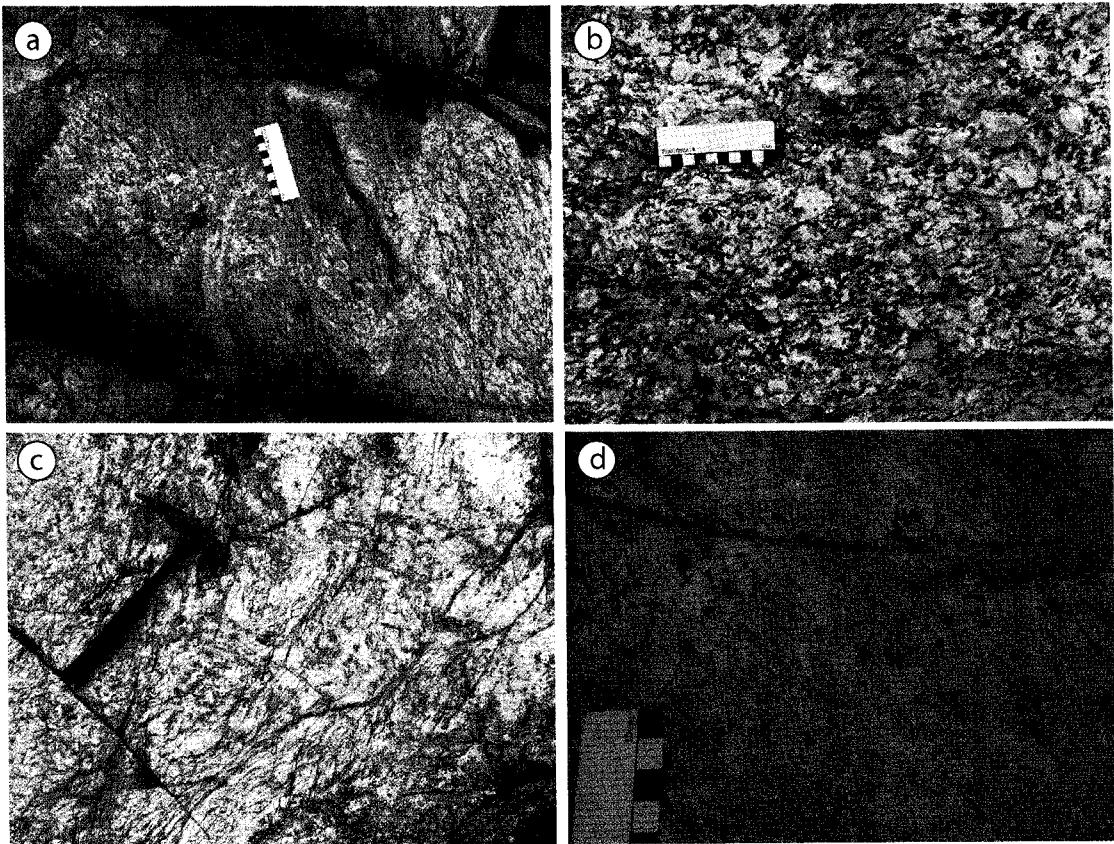


Fig. 3. Outcrop photographs of Pyeonghae granite gneiss (a, b) and Hada Leuco-granite gneiss (c, d).

상 조직을 보이기도 하여 평해 화강편마암과의 구별이 어려운 경우도 있다. 연구지역 중앙부에서 약간 남쪽에 위치한 다천리 하다지역이 표식지로 이 지역에 분포된 하다 화강편마암은 조립이고 등립질이며, 엽리가 잘 발달된 소량의 운모를 함유한 우백질이다 (Fig. 3c & d). 부분에 따라 엽리가 미약해지기도 하며, 같은 노두상에서도 유색광물의 함량이 불균질하여 흑운모의 함량이 약간 높은 부분과 아주 우백질인 부분이 섞여 있다.

현미경하에서 관찰해보면 대체로 괴상이며 등립질의 조직을 보여준다. 주구성광물은 알칼리 장석과 석영이며 흑운모, 석류석, 백운모, 저콘, 녹니석, 모나자이트가 부성분 광물로 산출한다. 알칼리장석의 경우 대부분 미사장석 쌍정을 이루고 있고, 약간의 퍼사이트 조직을 보이기도한다. 석류석은 대부분이 반상변정으로 산출하며 주변부에 흑운모를 같이 수반하기도 한다 (Fig. 4c & d).

암석화학

분석방법

평해 화강편마암과 하다 우백질화강편마암을 대표하는 시료들을 각각 6개와 4개를 선정하여 주성분원소 및 미량성분원소 분석을 실시하였다. 주성분원소 분석은 부경대학교 공동실험실습관에 설치된 SHIMADZU XRF-1700의 X선 형광분석기를 사용하였다. 분석의 전처리과정은 선정된 시료를 얇게 여러 조각으로 자른 후 70°C 오븐에서 24시간 건조하여 수분을 완전히 제거한 뒤 Disc-mill을 이용하여 분말을 만들었다. 분말 2-3 g을 사기도가니에 넣고 무게를 측정 후 전기로(Thermolyne 46100)에 990°C로 30분 동안 다시 가열한 뒤 건조기에서 30분 동안 식힌 후 무게를 측정하여 LOI(Loss On Ignition) 값을 구하고, 이 시료 중 1 g을 용융제(Li₂B₄O₇)와 무게비 1:7로 혼합한 뒤 버너(Claissé fluxy model)에서 완전히

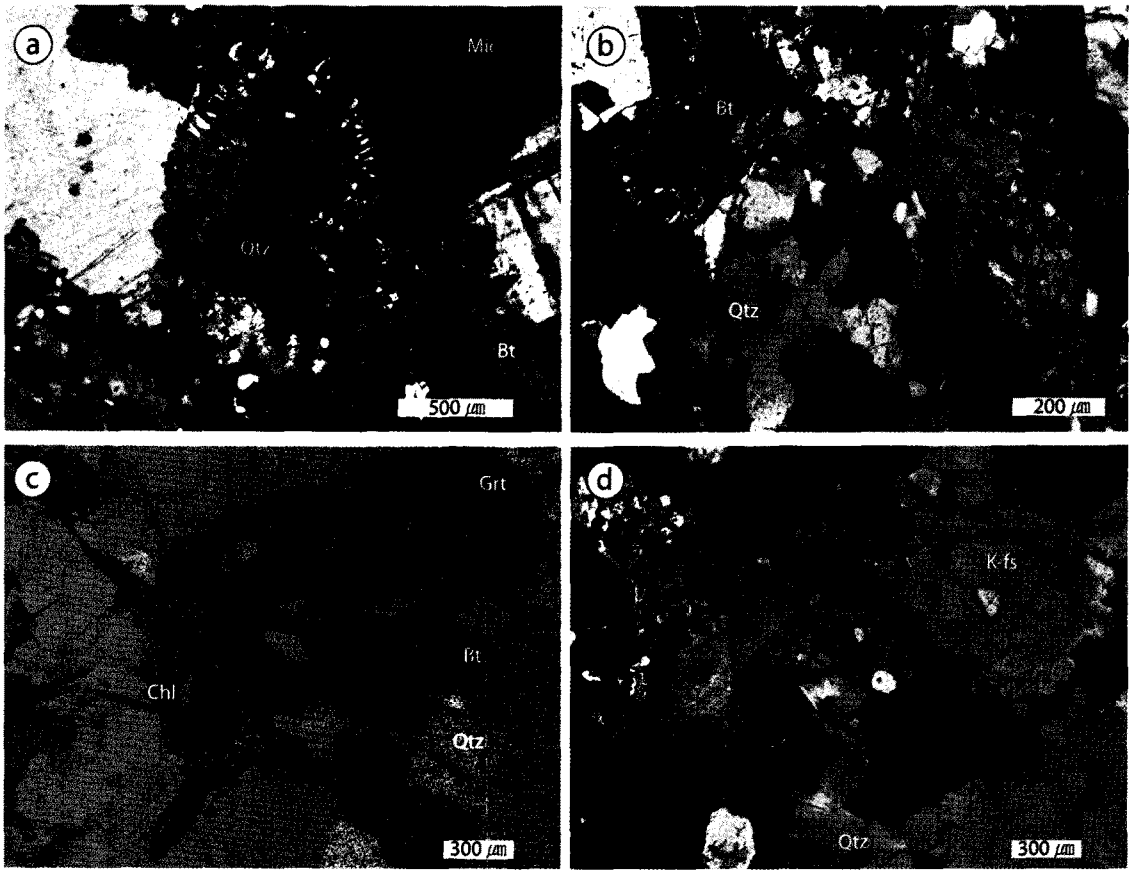


Fig. 4. Photomicrographs of Pyeonghae granite gneiss (a, b) and Hada leuco-granite gneiss (c, d).

균질화 될 때까지 녹여 유리원판(Glass bead)을 제작하였다. 정량분석을 위한 검량선은 USGS 표준시료(BIR-1, Basalt; RGM-1, Rhyolite; STM-1, Nepheline syenite; SDC-1, Mica schist), MBH 표준시료(SARM1, 2, 6, 44, 48; Granite, Syenite, Dunite, Sillimanite schist, fluorspar Granite), 그리고 BRAMMER 표준시료(MO11, Anorthosite; VS2119-1, Gabbro; BGW3114, Siliceous Material; GBW7110, Andesite; GBW7111, Granodiorite)으로 만들었다. 분석조건은 가속전압 40 kV, 전류 70 mA이고, 3회 측정된 후 평균값을 계산하였다. 분석결과는 Table 1에 나타내었다. 미량 및 희토류원소 분석에는 한국기초과학지원연구원의 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS; Thermo Elemental X-series(X5, X7))와 유도결합 플라즈마 원자방출분광기(ICP-AES; Perkin Elmer Optima 4300DU Model)를 이용하였다. 분석방법은

최만식 외(1994)의 방법을 따랐고 그 결과는 Table 2에 나타내었다.

분석결과

본 연구대상 암체들을 형성시킨 마그마의 화학적 성질에 대해 알아보기 위해 주성분원소를 이용하여 AFM, ANK-ACNK 다이어그램에 도시해보았다(Fig. 5). 평해 화강편마암과 하다 우백질화강편마암은 모두 비알칼리 계열의 칼크-알칼리 조성이며(Fig. 5a & b), A/CNK가 1.05~1.20, 1.10~1.24, CIPW norm 강옥(corundum) 함량이 0.47~1.60, 0.86~1.75로 과알루미나질이며 I-형과 S-형의 경계에 걸치는 조성을 나타낸다(Table 1 & Fig. 5b). 과알루미나질 성질은 그 암체를 형성한 마그마가 (a) 과알루미나질(peraluminous) 퇴적암의 부분용융, (b) 메타알루미나질(metaluminous) 마그마의 분별작용, (c) 마그마 과정 후기의

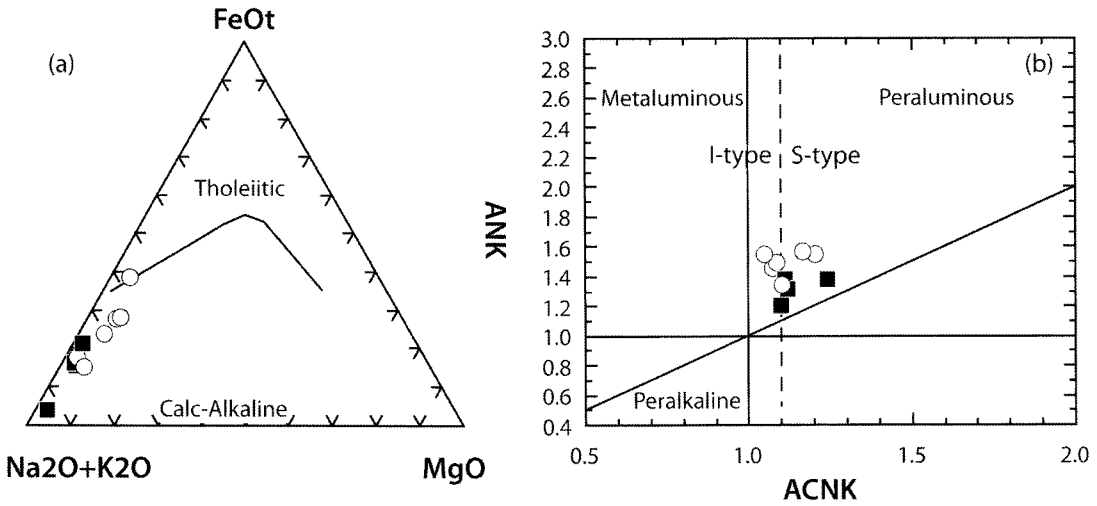


Fig. 5. Geochemical classification diagrams for analysed samples. A: Irvine and Baraga(1971), B: Maniar and Piccoli(1989). open circle, Pyeonghae granite gneiss; solid square, Hada leuco-granite gneiss.

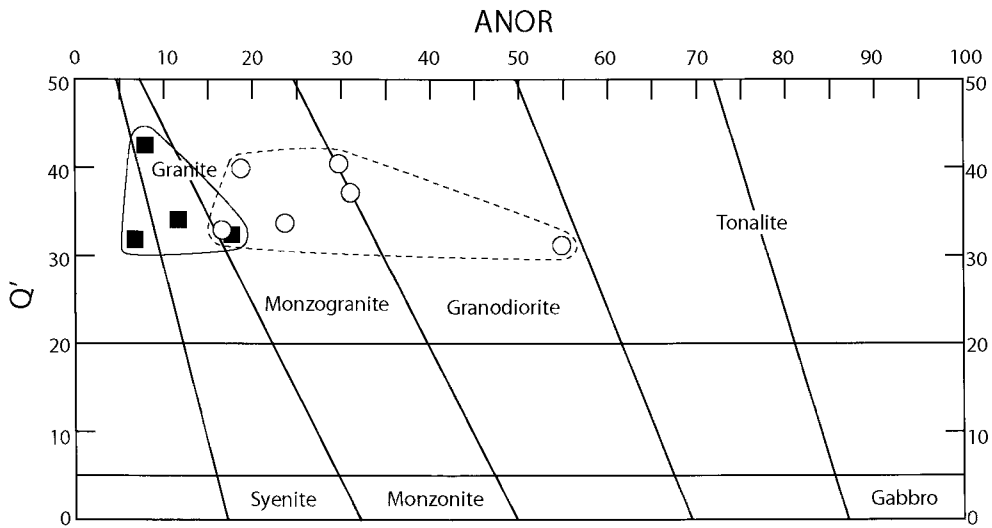


Fig. 6. The classification of plutonic rocks using their molecular normative compositions (after Streckesien and Le Maitre, 1979). Symbols are the same as Fig. 5.

휘발성분에 의한 알칼리 원소의 손실(Zen, 1986; Clarke, 1992) 등에 기인할 수 있다. (b)의 경우 연구지역에 분포하는 과알루미나질 화강암류의 분포면적으로 볼 때 메타알루미나질 모암의 양이 상당량 존재해야하나(Zen, 1986; Spear, 1987), 연구지역에서는 메타알루미나질의 모암이 거의 관찰되지 않으며, 분별정출작용이 하커 다이어그램에서 체계적으로 인지되지 않는다 점으로 미루어 볼 때 메타알루미나질 마그마의 분별작용을 원인으로 보기 힘들다. (c)

의 경우 마그마 과정 후기의 휘발성분에 의한 알칼리 원소의 손실이 있었을 경우 메타알루미나질 광물과 알칼리와 휘발성분이 농집된 광물들과 수반되어야 한다. 하지만 이러한 특성을 나타내는 부분들은 일부 지역에서 소규모의 페그마타이트(수 cm-수십 cm)로 한정되어 산출하므로 전체 암체들의 성분에 영향을 주기에는 부족하다. 또한 연구지역 암체들이 모두 마그마 분화의 최후기 산물로 볼 수 없다. 따라서 과알루미나질 퇴적암에서 유래되었을 가능성이 가장 높다.

Table 1. Major element and CIPW norm data of Pyeonghae granite gneiss and Hada leuco-granite gneiss.

Rock Type	Pyeonghae granite gneiss						Hada-leucogranitic gneiss					
	UJ11	UJ15	UJ16	UJ28	UJ45	UJ99-1	UJ10	UJ34-1	UJ47	UJ65		
Sample Location*	N36°49'15.6" N36°47'09.7" N36°49'19.5" N36°48'57.3" N36°49'57.7" N36°46'33.1" N36°48'02.0" N36°48'14.2" N36°50'08.8" N36°48'05.1" E129°22'48.3" E129°27'20.6" E129°22'22.2" E129°24'09.6" E129°24'26.7" E129°28'19.9" E129°25'15.4" E129°22'47.5" E129°24'06.8" E129°25'11.6"											
Major elements (wt %)	74.93	71.00	71.94	72.10	73.06	72.13	76.13	73.02	74.55	73.51		
SiO ₂	12.88	14.11	15.43	13.27	14.24	14.31	12.62	14.34	13.94	13.44		
Al ₂ O ₃	0.25	0.45	0.14	0.24	0.22	0.43	0.21	0.12	0.07	0.15		
TiO ₂	2.44	3.45	1.41	5.11	1.99	3.19	1.52	1.78	0.43	2.53		
Fe ₂ O ₃ ^t	0.02	0.04	0.03	0.26	0.02	0.03	0.02	0.07	0.01	0.05		
MnO	0.55	0.79	0.46	0.54	0.31	0.76	0.31	0.30	0.26	0.25		
MgO	1.71	1.95	2.59	1.35	1.25	1.73	0.54	1.39	0.62	0.95		
CaO	3.35	2.69	4.97	2.28	3.22	3.70	2.65	2.94	2.82	2.60		
Na ₂ O	3.10	4.65	1.68	4.45	4.94	2.83	4.44	5.13	6.40	5.53		
K ₂ O	0.05	0.11	0.03	0.06	0.03	0.09	0.05	0.04	0.04	0.03		
P ₂ O ₅	0.41	0.67	0.79	0.45	0.40	0.80	1.35	0.42	0.52	0.71		
LOI	99.70	99.92	99.46	100.14	99.68	99.99	99.83	99.54	99.66	99.76		
Total	1.45	1.49	1.54	1.55	1.34	1.56	1.38	1.38	1.21	1.31		
ANK	1.07	1.08	1.05	1.20	1.10	1.16	1.24	1.11	1.10	1.12		
ACNK												
CIPW norm vol %												
Q	38.74	31.64	30.28	36.54	31.79	34.75	42.55	32.38	31.82	34.11		
an	8.17	9.05	12.70	6.50	6.08	8.05	2.39	6.79	2.84	4.52		
ab	29.34	23.74	43.58	20.28	27.93	32.76	23.22	25.52	24.17	22.74		
or	19.41	29.29	10.51	28.30	30.62	17.93	27.81	31.82	39.27	34.49		
c	0.65	0.89	0.47	1.60	0.90	1.50	1.75	0.96	0.86	1.01		
hy	3.04	4.29	2.09	5.80	2.17	3.99	1.78	2.13	0.85	2.64		
ap	0.10	0.22	0.06	0.12	0.06	0.18	0.10	0.08	0.08	0.06		
il	0.27	0.49	0.15	0.26	0.24	0.47	0.23	0.13	0.07	0.16		
mt	0.28	0.39	0.16	0.59	0.22	0.37	0.17	0.20	0.04	0.29		
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00		
or*(or+an+ab)/(or+an)	40.06	47.42	30.23	44.79	53.92	40.53	49.19	52.85	61.81	54.60		
an*(or+an+ab)/(or+an)	16.86	14.66	36.55	10.29	10.70	18.21	4.23	11.28	4.47	7.15		
an/(an+ab)	0.22	0.28	0.23	0.24	0.18	0.20	0.09	0.21	0.11	0.17		
salic	96.31	94.61	97.54	93.23	97.31	94.99	97.72	97.46	98.96	96.86		
femic	3.69	5.39	2.46	6.77	2.69	5.01	2.28	2.54	1.04	3.14		

*WGS84 datum

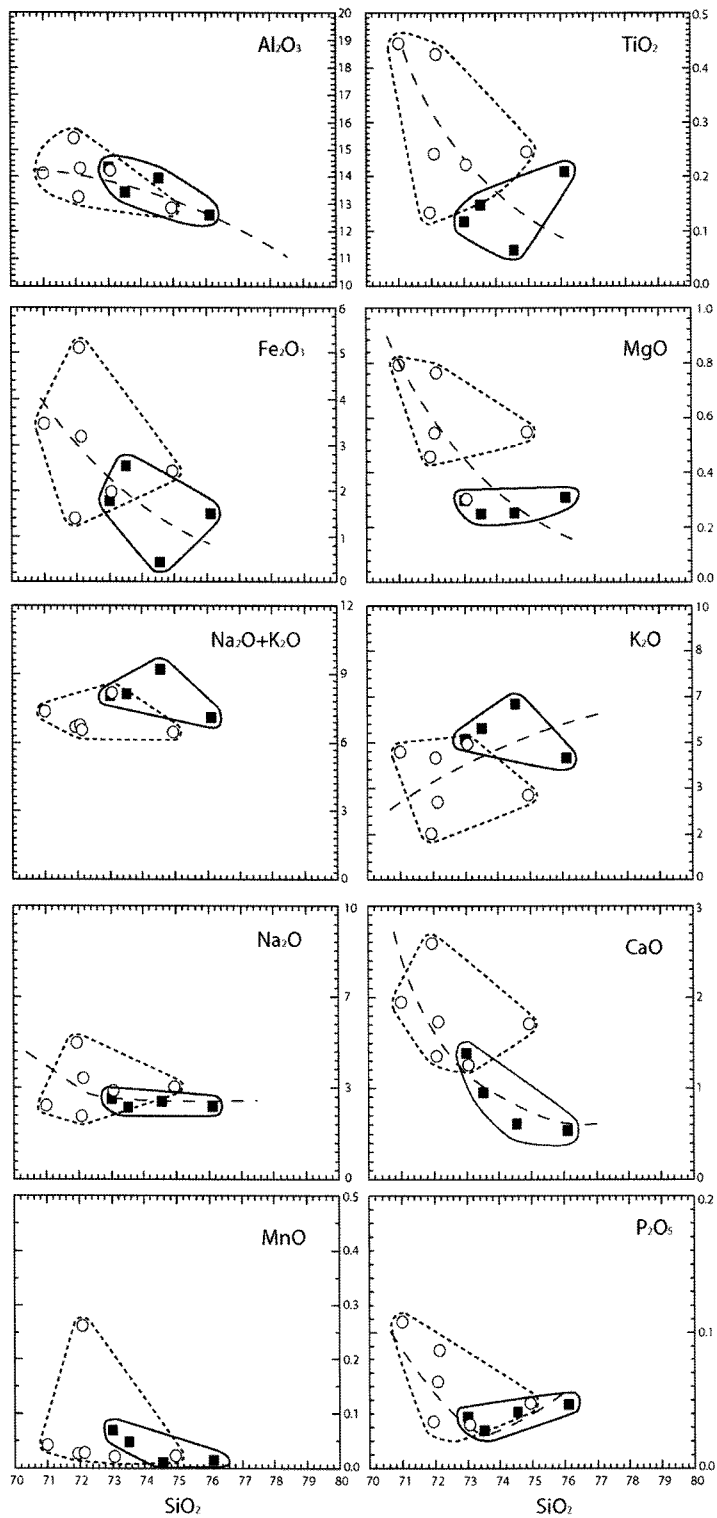


Fig. 7. Harker variation diagram for the analysed samples. Symbols are the same as Fig. 5.

즉, 하다 우백질화강편마암과 평해 화강편마암은 연구지역에 넓은 면적으로 분포하는 선캠브리아 변성퇴적암류(평해층 혹은 원남층)들의 부분용융에 의해 생성된 것으로 유추된다.

하다 우백질화강편마암과 평해 화강편마암의 SiO_2 값은 각각 73.02~76.13 wt%와 71.00~74.93 wt%의 범위를 보이고, Al_2O_3 는 12.62~14.34, 12.88~15.43 wt%, Fe_2O_3 는 0.43~2.53, 1.41~5.11 wt%, MgO 는 0.25~0.31, 0.31~0.79 wt%이며 CaO 는 각각 0.54~1.39, 1.25~1.95 wt%와 Na_2O 는 2.60~2.94, 2.28~4.97 wt%이며 평해 화강편마암 내의 Fe_2O_3 와 MgO 의 함량이 다소 높게 나타난다. 이러한 현상은 평해 화강편마암에서 유색광물 특히 흑운모의 함량이 높은 것과 부합된다. CIPW 노름(norm) 값으로 구한 사장석 함량($\text{an} \times (\text{or} + \text{ab} + \text{an}) / (\text{or} + \text{an})$)은 평해 화강편마암은 10~36, 하다 우백질화강편마암은 4~11이고(Table 1), 노름 값을 이용해 도시한 화강암의 분류도(Streckesien and Le Maitre, 1979)에서 평해 화강편마암은 몬조 화강암 내지 화강섬록암 영역, 하다 우백질화강편마암은 주로 화강암 영역에 도시되어 평해 화강편마암에 비해 하다 우백질화강편마암이 보다 규장질임을 나타낸다(Fig. 6).

SiO_2 를 기준으로 다른 주성분원소들의 변화경향을 하커 성분변화도(Harker variation diagram)에 도시하면(Fig. 7), SiO_2 의 함량이 증가함에 따라 Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O 성분은 감소하며, P_2O_5 는 감소하다가 다소 증가하며, K_2O 성분은 분산이 심해지는 하나 다소 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 성분변화는 흑운모, 사장석, 인회석 또는 스피의 정출

에 의한 분화작용으로 해석된다.

Fig. 8은 희토류원소와 불호정원소들을 콘드라이트(Fig. 8a; Taylor and McLennan, 1985)와 시원맨틀(Fig. 8b; Sun and McDonough, 1989)에서의 농도로 나눈 표준화 값을 도시한 것이다. 콘드라이트에 표준화시킨 REE(Rare Earth Element) 패턴(Fig. 8a)은 경희토류원소(LREE: La~Sm)가 상대적으로 농집되어 있으며 원자번호 증가에 따라 점차 감소하는 경향을 보인다. 중희토류(HREE: Gd~Lu)는 경희토류와 비슷한 경향을 나타내며 원자번호 증가에 따라 감소하는 것과 원자번호에 따른 변화가 거의 없는 것, 그리고 원자번호 증가에 따라 함량이 증가하는 것으로 구분된다. 이러한 현상은 각섬석과 단사회석의 분별 정출 및 변정 알칼리 장석내 포유물로 산출하는 석류석의 함량 차이에 기인한 것으로 생각된다. Eu은 모든 시료에서 강한 음의 이상치를 나타낸다. 이러한 희토류원소의 패턴은 모마그마에서의 사장석의 분별정출에 의한 현상으로 생각된다.

시원맨틀로 표준화시킨 미량원소 패턴(Fig. 8b)에서는 친액원소(incompatible element)가 부화되며 Nb, P, Ti가 음의 이상치를 나타내고 있다. Briquet *et al.* (1984)는 이들 원소 중 Ti-Nb-Ta의 음의 이상치는 섭입과 관련된 화강암류에서 나타나는 일반적인 현상이라 보고하였다. 또한 음의 Nb 이상치가 나타나는 것은 마그마와 기원물질 자체가 지각물질일 가능성을 시사한다.

Y-Nb과 Y+Nb-Rb 판별도(Pearce *et al.*, 1984)는 화강암의 생성환경을 규명하는데 유용하게 사용되고 있다(Fig. 9). 하다가 평해 화강편마암들은 모두 화산

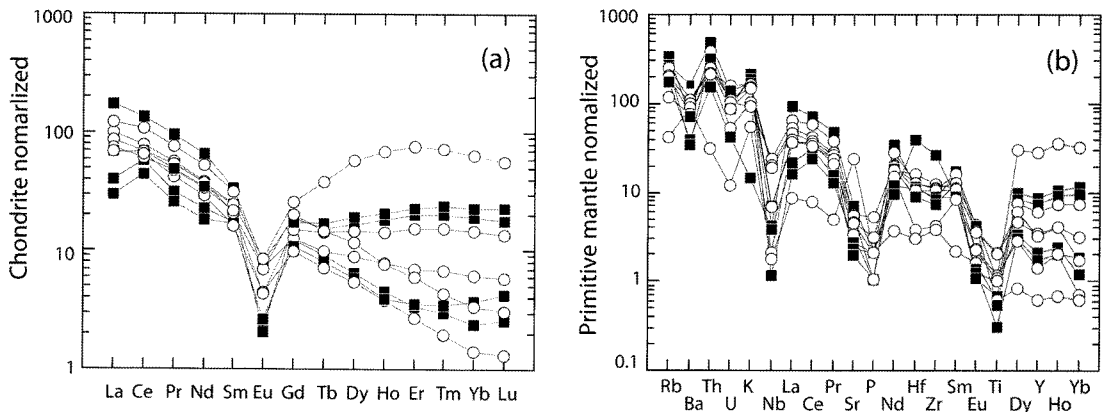


Fig. 8. REE patterns (a) and multi-element patterns (b) for the analysed samples. Symbols are the same as Fig. 5.

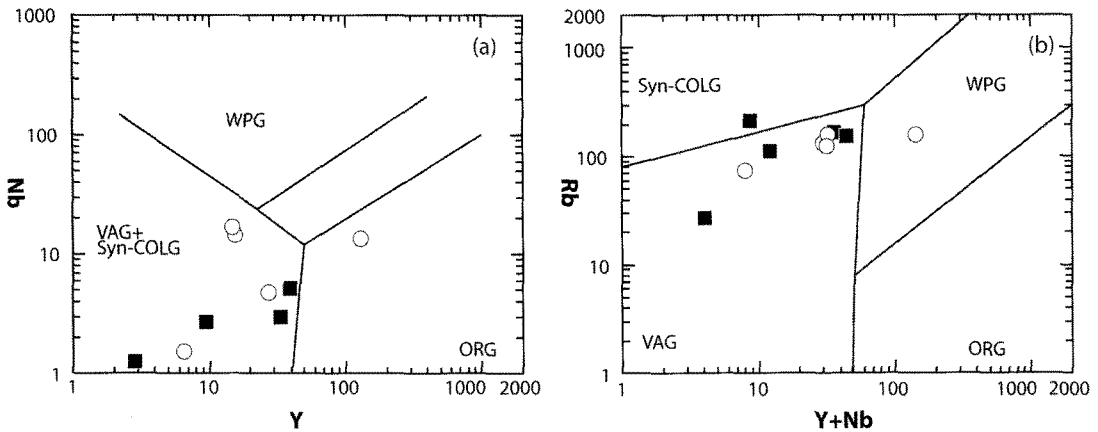


Fig. 9. Tectonic discrimination diagrams (after Pearce *et al.*, 1984) based on (a) Y vs. Nb and (b) Y+Nb vs. Rb. Symbols are the same as Fig. 5. Tectonic abbreviations: Syn-collisional granite (Syn-COLG), volcanic arc granite (VAG), within plate granite (WPG), and oceanic ridge granite (ORG).

호 화강암(Volcanic Arc Granite) 영역에 도시되었다. 영남육괴 북동부 지역에 폭넓게 분포하는 다른 화강 암류들 역시 충돌동시형 화강암류 내지 화산호 화강 암 환경에서 생성된 것으로 알려져 있다(정원석 외, 2006; 정원석과 나기창, 2008; 정창식 외, 2004; Kim and Cho, 2003; Lee *et al.*, 2005).

연대측정

연대측정시료 및 분석 방법

평해 화강편마암(UJ-45)과 하다 우백질화강편마암(UJ-65)의 대표적인 시료 1점씩 선택하여 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대측정을 실시하였다. 시료로부터 저어콘을 분리하기 위해 약 10kg 내외의 암석시료들을 조쇄기(jaw crusher)와 미분기(pulverizer)를 사용하여 작은 알갱이와 분말을 만든 다음, 이들을 #80(180 μm), #120(125 μm), #170(90 μm)의 체를 이용하여 체질한 후 자력선별기, 패닝, 중액을 이용하여 중광물을 분리하였다. 최종 분석대상 저어콘은 중광물 농집체에서 수작업으로 선별한 후 회수된 저어콘을 형태별로 40-50개의 입자를 표준 저어콘인 TEMORA (417 Ma, Black *et al.*, 2003)와 SL13(Sli Lankan gem zircon, U-238 ppm)과 같이 에폭시계열 수지에 마운트 시킨 후 입자들이 절반정도가 드러날 때까지 연마를 시키고, 저어콘 표면을 다이아몬드 페이스트(6, 3, 그리고 1 μm)로 차례로 연마시켰다. 편광, 반사, 후방산란전자영상(BSE; Backscattered Electron

image), 음극선발광영상(CL; Cathodoluminescence image)을 이용하여 저어콘 내부구조 관찰 및 분석 위치를 선정하였다.

BSE 및 CL 이미지는 기초과학지원연구원 전주센터의 전계방출 주사전자현미경(Field-Emission Scanning Electron Microscope)와 그에 장착된 MonoCL (Gatan)을 이용해서 관찰 및 측정하였다.

U-Pb-Th 분석을 위해 호주 캔버라 호주국립대학(ANU)에 설치되어 있는 SHRIMP II를 사용하였다. SHRIMP 분석방법과 절차는 Williams and Claesson (1987), Williams(1998)에 의해 기재되어 있으며, U와 Th의 붕괴상수는 Steiger and Jäger(1977)의 값을 사용하였다. 분석점 직경은 25 μm이며 한 점의 U-Pb 분석마다 필요한 모든 질량의 동위원소를 5번 반복 정량하였다. 저어콘 동위원소 자료들은 SQUID (Ludwig, 2001a)와 Isoplot(Ludwig, 2001b) 프로그램을 사용해 처리하였다.

연대측정 결과

평해 화강편마암(UJ-45)에서 분리한 저어콘은 노란색을 띄며 대체로 자형의 결정형을 이루고 있으며, 장축의 길이는 100-150 μm 범위이다. CL 이미지(Fig. 10)는 대체로 자형 내지 둥근형의 상속핵(inherited core)를 대체적으로 포함하고 있으며, 그 주변부를 마그마에서 직접적으로 정출되는 것으로 알려져있는 진동형 누대구조(oscillatory zoning structure)가 뚜렷이 관찰된다. 또한 일부의 시료에서 가장

Table 2. Trace and REE data of Pyeonghae granite gneiss and Hada leuco-granite gneiss.

Rock Type	Pyeonghae granite gneiss						Hada-leucogranitic gneiss			
Sample No.	UJ11	UJ15	UJ16	UJ28	UJ45	UJ99-1	UJ10	UJ34-1	UJ47	UJ65
Trace elements (ppm)										
Ba	529	701	635	775	771	534	276	1154	494	240
Mn	104.9	227.1	129.3	1724.4	116.6	177.0	64.7	489.4	48.4	305.5
Sr	94.5	119.3	511.2	98.1	70.5	116.0	48.0	151.7	57.2	41.3
Cr	6.02	12.09	5.41	8.77	5.69	16.92	5.77	3.76	0.68	3.69
Ga	16.87	17.65	18.59	2.93	19.00	21.80	17.43	11.00	16.33	12.97
Li	19.71	37.06	16.29	28.94	27.92	34.70	11.87	11.85	13.62	10.02
P	177.1	442.4	158.5	364.8	107.5	510.1	228.4	120.3	167.4	33.1
Sc	1.11	6.31	2.33	19.15	3.83	4.83	2.81	5.65	1.29	3.48
V	14.67	16.52	8.71	17.42	9.41	20.43	7.13	5.93	0.32	4.88
Zn	40.16	37.48	26.18	36.34	26.27	50.52	22.96	13.38	14.04	18.43
Zr	46.96	117.18	42.33	124.00	136.89	122.92	100.47	94.76	300.72	81.36
Co	41.40	42.65	37.21	28.23	43.25	18.26	40.73	36.33	35.24	32.91
Ni	2.87	4.50	2.92	4.55	2.16	6.49	2.09	0.91	0.42	1.60
Cu	1.21	3.62	0.14	1.47	0.66	3.42	0.59	1.87	0.49	0.40
Rb	74.27	130.22	27.02	159.89	160.50	125.19	110.64	166.77	211.73	156.50
Y	6.47	15.39	2.80	129.11	27.53	14.75	9.46	33.09	7.87	39.57
Nb	1.51	14.48	1.25	13.54	4.82	17.01	2.72	2.96	0.82	5.09
Mo	0.00	0.54	0.00	0.27	0.00	0.00	0.56	0.00	0.00	0.67
Cs	0.63	3.36	0.49	1.19	1.56	4.46	3.01	1.18	1.29	0.99
Hf	1.17	3.28	0.94	4.01	4.96	3.95	3.33	3.55	12.30	2.80
Pb	17.56	21.51	12.84	23.26	31.56	25.28	25.53	30.85	48.83	32.68
Th	17.80	21.51	2.65	21.55	18.73	32.16	12.72	40.48	21.04	26.46
U	1.12	2.28	0.25	1.82	3.27	2.17	0.89	2.90	1.84	2.06
Rare Earth Elements (ppm)										
La	25.63	36.34	6.02	31.90	27.15	44.18	14.85	63.03	11.05	25.47
Ce	62.65	74.80	13.83	66.85	58.38	104.27	56.00	128.14	41.98	66.15
Pr	5.80	7.78	1.36	7.33	6.54	10.43	4.25	13.16	3.49	6.70
Nd	20.68	27.36	4.90	26.72	23.96	37.78	16.28	46.56	12.84	24.68
Sm	3.70	4.76	0.96	5.66	5.04	7.15	3.99	7.72	3.91	5.69
Eu	0.38	0.61	0.27	0.73	0.37	0.59	0.21	0.70	0.23	0.18
Gd	2.98	3.82	0.77	7.88	4.57	6.06	3.74	5.68	3.27	5.32
Tb	0.41	0.57	0.11	2.20	0.82	0.84	0.52	0.89	0.47	0.97
Dy	2.05	3.39	0.62	21.96	5.59	4.39	2.42	6.22	2.23	7.18
Ho	0.33	0.66	0.11	5.80	1.20	0.66	0.39	1.53	0.34	1.73
Er	0.66	1.74	0.33	18.91	3.82	1.47	0.85	4.96	0.89	5.71
Tm	0.07	0.24	0.04	2.61	0.55	0.15	0.11	0.72	0.12	0.85
Yb	0.35	1.51	0.31	15.78	3.59	0.85	0.59	4.75	0.92	5.67
Lu	0.05	0.22	0.04	2.15	0.52	0.12	0.10	0.67	0.16	0.87
Total REE	125.76	163.81	29.66	216.47	142.11	218.93	104.28	284.73	81.89	157.18
La _N /Lu _N	53.00	17.15	17.11	1.54	5.43	39.59	15.65	9.71	7.18	3.06
Eu/Eu*	0.35	0.44	0.96	0.33	0.24	0.28	0.16	0.32	0.20	0.10

$$Eu/Eu^* = Eu_N / \sqrt{[(Sm_N)(Gd_N)]}$$

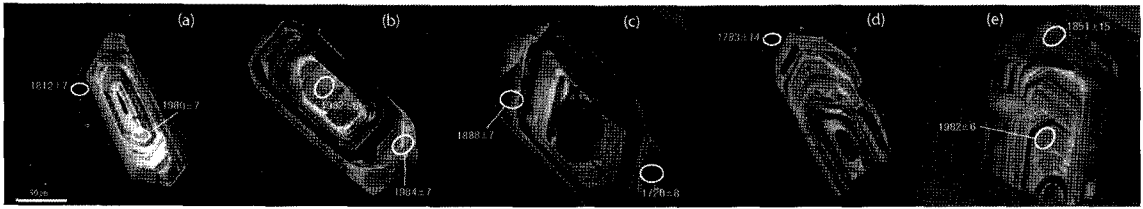


Fig. 10. Cathodoluminescence images showing the analytical spots of zircon from the Pyeonghae granite gneiss. ²⁰⁷Pb*/²⁰⁶Pb ages (Ma) together with one sigma errors are given.

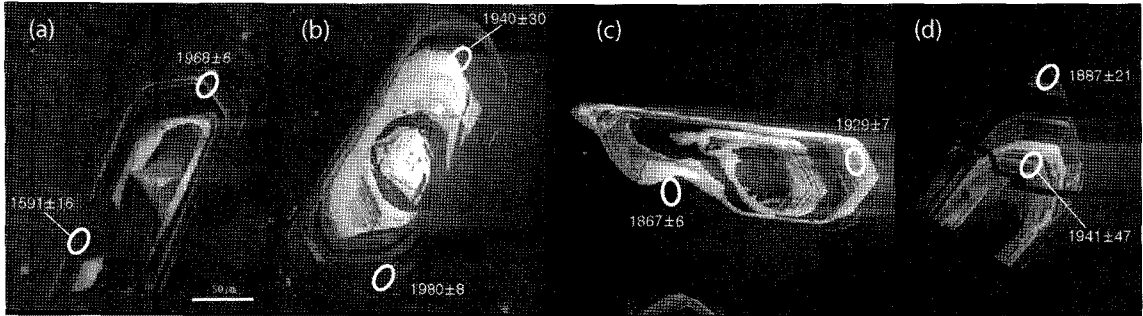


Fig. 11. Cathodoluminescence images showing the analytical spots of zircon from the Hada leuco-granite gneiss. ²⁰⁷Pb*/²⁰⁶Pb ages (Ma) together with one sigma errors are given.

외연부에 CL 방출이 상대적으로 낮아 어둡고 진동누대가 발달되지 않은 주변부들이 발달하고 있는데 기존의 누대구조와 조화적인 것(Fig. 10a, b, d)으로 혹은 부조화적으로 성장한 조직을 보여주기도 한다(Fig. 10c & e). SHRIMP 분석은 주로 진동형 누대를 나타내는 지점(4지점)에서 분석을 실시하였으며, CL 이미지에서 어둡게 나타나는 주변부 4지점을 측정하였다. 그 분석결과는 Table 3에 나타내었다. 분석된 결과는 일치곡선(concordia) 도형(Fig. 12a)에 도시한 결과, 비교적 일치곡선 부근에 도시되며 1990±23 Ma (MSWD=86)의 상부교점 연대와 1982±6.3 Ma ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 가중평균치 연령(weighted mean age, MSWD=0.064)을 나타낸다.

하다 우백질화강편마암(UJ-65)에서 분리한 저어콘은 150-300 μm 범위의 장축을 가지며, 대체로 자형의 결정형을 띠고 있다(Fig. 11). CL 영상은 자형 내지 등근형의 상속핵을 가지고 있으며, 그 주변부를 결정형과 조화적인 진동형 누대를 나타내고 있다. 일부의 시료의 CL 영상에서 어둡고 진동누대가 발달되지 않은 주변부가 관찰된다. Fig. 11a의 입자에서는 기존의 진동형 누대를 부분적으로 절단하며 발달하고 있으며, Fig. 11d의 경우는 기존의 결정형과 조화적

로 덧성장(overgrowth)한 조직을 나타내고 있다. 측정된 결과를 U-Pb 일치곡선 도형(Fig. 12b)에 도시한 결과 1939±41 Ma (MSWD=86)의 상부교점 연대를 나타내며, 일치곡선에 인접한 4지점에 대한 ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb 가중 평균치연령은 1959±28 Ma (MSWD=6.8)이다.

토 의

저어콘 U-Pb SHRIMP 연대측정을 실시하여 각 암체들의 관입 시기는 평해 화강편마암은 1982±6.3 Ma이고, 하다 우백질화강편마암은 1959±28 Ma이다. 후자가 다소 젊은 값을 나타내지만 두 암석의 관입 시기는 오차범위에서 중첩된다. 이러한 결과는 Chang *et al.*(2003)의 평해 화강편마암에 대한 저콘 U-Pb 연대(1936±21 Ma)와 어느 정도 유사하지만, Cheong *et al.*(2000)이 보고한 화강암질 편마암의 전암 Pb-Pb 연대인 2093±86 Ma와는 100 Ma 정도 차이가 있으나 전암 Pb-Pb 연대측정의 오차가 크고 암종 구분없이 측정된 결과이기 때문에 정확도가 떨어지는 것으로 판단된다.

영남육괴 북동부 일대에 광범위하게 분포하는 화강

Table 3. SHRIMP zircon data from Pyeonghae granite gneiss (UJ-45) and Hada Leuco-granite gneiss (UJ-65) in the northeastern part of the Yeongnam massif of Korea.

Spot name	Zircon type*	Pb** ppm	U ppm	Th ppm	Th/U	²⁰⁶ Pbc/%	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb	1σ	Apparent Ages (Ma)			
													²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb		
UJ45-1.1	OZ	120.33	419.70	156.51	0.39	0.02	0.00002	50.126	0.786	1.800	0.122	0.361	1856.0	22.3	1979.9	6.6
UJ45-1.2	MR	144.36	971.05	119.99	0.13	0.15	0.00009	17.852	0.351	2.105	0.112	0.334	1027.5	12.8	1811.9	7.3
UJ45-2.1	OZ	128.74	438.88	160.34	0.38	0.05	0.00003	26.727	0.920	1.983	0.122	0.383	1892.8	22.5	1984.1	7.1
UJ45-2.2	UC	131.83	464.07	214.79	0.48	0.02	0.00001	53.709	0.811	0.469	0.122	0.340	1841.2	22.6	1981.7	6.3
UJ45-3.1	MR	148.66	1401.72	155.40	0.11	0.14	0.00008	21.469	0.280	2.739	0.106	0.374	749.5	9.5	1720.0	8.3
UJ45-3.2	OZ	209.94	1126.56	236.69	0.22	0.11	0.00006	14.434	0.475	2.510	0.116	0.348	1264.4	15.5	1888.1	6.7
UJ45-4.1	MR	224.13	1577.08	201.23	0.13	0.60	0.00035	5.831	0.326	3.231	0.114	0.559	981.8	12.4	1782.7	13.5
UJ45-5.1	MR	281.39	1282.59	23.97	0.02	0.00	0.00000	71.262	0.653	2.856	0.113	0.812	1466.1	20.6	1851.1	14.7
UJ45-5.2	OZ	155.44	565.86	230.44	0.42	0.02	0.00001	49.721	0.784	1.155	0.122	0.317	1788.2	21.4	1982.4	5.8
UJ65-1.1	OZ	1064.68	3487.48	476.25	0.14	0.00	0.00000	171.590	0.355	1.337	0.121	0.323	1960.1	22.6	1967.9	5.8
UJ65-1.2	MR	157.13	2257.43	77.86	0.04	0.09	0.00005	23.940	0.081	1.532	0.098	0.875	501.8	7.4	1591.3	16.3
UJ65-2.1	OZ	80.50	264.48	91.07	0.36	0.02	0.00001	98.478	0.354	2.285	0.119	1.710	1954.7	38.5	1940.3	30.6
UJ65-2.2	OZ	503.94	1586.77	264.02	0.17	0.00	0.00000	54.192	0.370	1.558	0.122	0.448	2028.0	27.1	1979.8	8.0
UJ65-3.1	OZ	272.59	1010.91	182.20	0.19	0.01	0.00000	52.700	0.314	1.350	0.118	0.399	1759.6	20.8	1929.1	7.1
UJ65-3.2	MR	419.09	1601.23	48.97	0.03	0.12	0.00008	9.876	0.304	1.346	0.114	0.326	1712.5	20.2	1867.2	5.9
UJ65-4.1	OZ	413.14	1564.73	18.26	0.01	0.00	0.00000	329.051	0.307	1.852	0.115	1.155	1727.6	28.1	1887.1	20.8
UJ65-4.2	MR	125.28	430.88	129.61	0.31	0.02	0.00001	35.819	0.338	1.398	0.119	2.624	1878.8	22.8	1941.0	46.9

*Zircon texture: UC, unzoned core; OZ, oscillatory zoning; MR, metamorphic rim

**Radiogenic-corrected for common Pb using either ²⁰⁴Pb or ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb and Th/U

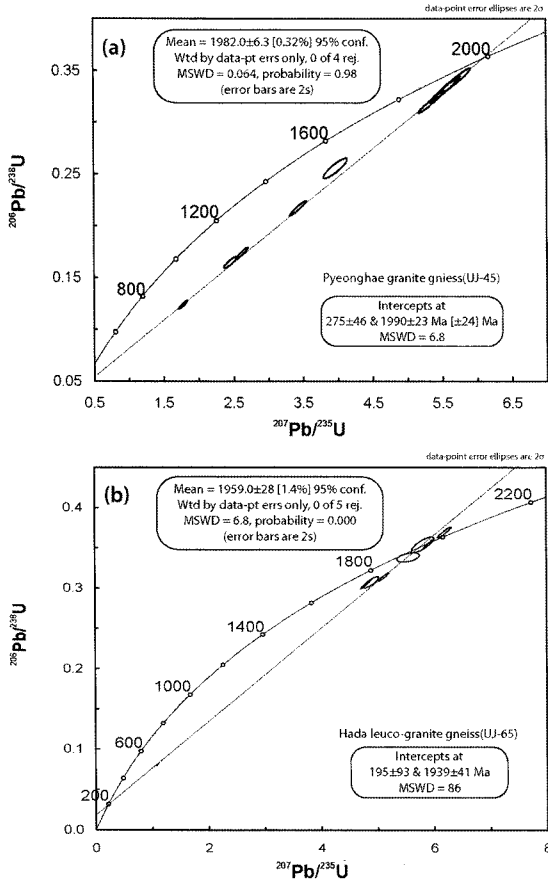


Fig. 12. Concordia plot of SHRIMP U-Pb data for zircons from (a) Pyeonghae granite gneiss and (b) Hada leuco-granite gneiss.

편마암류에 대한 기존 연구결과는 분천화강편마암 (1920 ± 56 Ma 전암 TIMS Pb-Pb 연대, 박계현 외, 1993; 1963 ± 5 Ma 저콘 U-Pb 연대, Chang *et al.*, 2003)과 흥제사화강암(1919 ± 160 Ma Rb-Sr 전암연대, 1899 ± 200 Ma Pb-Pb 전암연대, 정창식 외, 2004), 평해화강편마암(1936 ± 21 Ma U-Pb zircon 연대, Chang *et al.*, 2003), 임원 우백질화강편마암(1826 ± 29 Ma U-Pb 저콘 연대, Chang *et al.*, 2003) 등이 있다. 본 연구와 기 보고된 연대측정 결과들은 영남 육괴 북동부 일대는 약 1.9 Ga 시기에 광역적으로 활발한 마그마 활동이 있었다는 것을 알 수 있다.

결론

영남육괴 북동부 남부인 평해 일대에는 선캠브리아

기의 평해층과 원남층의 변성퇴적암류와 이를 관입한 평해화강편마암 및 우백질화강편마암 등으로 구성되어 있다.

평해 화강편마암과 하다 우백질 화강편마암은 유색 광물(특히 흑운모)의 함량에 의해 구별되며, 화학조성에서 하다 우백질화강편마암이 평해 화강편마암에 비해 SiO_2 , K_2O 등의 함량은 높고, CaO , MgO , Fe_2O_3 는 보다 낮은 규장질 조성을 가진다.

이들 화강암류들의 희토류원소 패턴은 다소의 음(-)의 Eu 이상치를 나타내고, 경희토류가 부화된 전형적인 화강암류의 경향을 보인다.

지구화학적으로 이들 화강암류들은 비알칼리 계열의 칼크-알칼리 조성으로 화산호 환경을 지시한다.

SHRIMP 저콘 U-Pb 연대측정 결과 평해 화강편마암의 관입 연대는 1982 ± 6.3 Ma로 그리고 하다 우백질화강편마암의 관입 연령은 1959 ± 28 Ma로 확인되었으며 후자가 다소 젊은 값을 보이지만 오차범위 내에서 겹친다.

영남육괴 북동부 태백산지역에서의 선캠브리아기 화강암류의 주 관입시기는 1.94 내지 2.0 Ga로 이 시기에 태백산지역에서는 화산호 환경에서 화강암질마그마작용이 활발했던 것으로 해석된다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단의 특정기초과제(R01-2004-000-10825-0)에 의해 지원되었으며 이에 감사드립니다. 투고논문의 문제점들을 지적하고 유익한 조언을 해주신 익명의 심사자님들께 깊은 감사를 드립니다. 야외 조사, 실험 및 논문의 작성과정에 여러 가지로 도움을 준 부경대학교 암석지구구조환경연구실 대학원생 및 학부생들에게도 감사를 표한다.

참고문헌

김기영, 김형식, 오창환, 박찬수, 강지훈, 류영복, 1996, 장군봉 일대 선캠브리아대-고생대 변성퇴적암류의 다변성 작용 -북부 소백산육괴의 중앙부지역의 지각진화와 환경지질-, 암석학회지, 5, 168-187.
 김남훈, 2001, 소백산육괴 북동부 평해-울진지역 선캠브리아기 기반암의 변성작용, 부경대학교 석사 학위논문, p.92.
 김남훈, 박계현, 송용선, 강지훈, 2002, 평해-울진지역 선캠브리아기 기성통의 부재 및 평해통과 원남통의 관계에 대한 소고. 암석학회지, 11, 271-277.

- 김옥준, 홍만섭, 원종관, 박희인, 박양대, 김기태, 1963a, 한국지질도 1:50,000 평해도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 28p.
- 김옥준, 홍만섭, 박희인, 김기태, 1963b, 한국지질도 1:50,000 삼근리도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 36p.
- 김옥준, 홍만섭, 원종관, 박희인, 박양대, 김기태, 1963c, 한국지질도 1:50,000 도계동도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 23p.
- 김정찬, 고희재, 이승렬, 이창범, 최성자, 박기화, 2001, 1:250,000 강릉-속초 지질도폭 설명서. 한국지질자원연구원, 76p.
- 박계현, 정창식, 이광식, 장호완, 1993, 태백산지역의 고기화강암 치 화강편마암류에 대한 납 동위원소 연구. 지질학회지, 29, 387-395.
- 윤석규, 신병우, 1963, 한국지질도 1:50,000 울진도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 23p.
- 이상만, 김형식, 오인석, 1986, 삼척-죽변 일대 선캄브리아가 편마암류에 관한 변성암석학적 연구. 지질학회지, 22, 257-277.
- 이현구, 박노영, 이마이나오야, 1992, 장군 광산 주변의 지질과 변성 작용. 이석 남기상 선생 논문집, 21-44.
- 정원석, 나기창, 2008, 삼척지역 북동 영남육괴에 분포하는 우백질 화강암의 기원 및 진화. 암석학회지, 17, 16-35.
- 정원석, 정상원, 나기창, 2006, 삼척지역 이천화강편마암의 암석화학과 지질구조. 암석학회지, 15, 25-38.
- 정창식, 권성택, 김정민, 장병욱, 1998, 경상분지 북부에 분포하는 온정리 화강암에 대한 암석학적, 동위원소 지구화학적 연구: 경상분지 다른 지역과 서남 일본 내대에 분포하는 백악기-제3기 화강암류와의 비교 고찰. 암석학회지, 2, 77-97.
- 정창식, 김영우, 김정민, 정연중, 임창복, 2004, 영남육괴 북동부 죽변 지역 선캄브리아기 기반암류의 지구화학적 특징. 지질학회지, 40, 481-499.
- 최만식, 정창식, 박계현, 1994, 암석 용해방법에 따른 미량 원소 분석결과 비교. 암석학회지, 3, 41-48.
- 황덕환, A.J. Reedman, 1975, 삼한 장군 광산 조사보고서. 한국 지질 광물 연구소, 지질 광물 조사 보고서, 9-30.
- 황재하, 김동학, 조동룡, 송교영, 1996, 1:250,000 안동 지질도폭 설명서. 과학기술처, 67p.
- Black, L.P., Kamo, S.L., Allen, C.M., Aleinikov, J.N., Davis, D.W., Korsh, R.J., and Foudoulis, C., 2003, TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. Chem. Geol., 200, 155-170.
- Brique, L., Bougault, H., Joron, J.L., 1984, Quantification of Na, Ta, Ti, and V anomalies in magmas associated with subduction zone-petrogenetic implications. Earth Planet. Sci. Lett., 28, 297-308.
- Chang, H.W., Turek, A., and Kim, C.B., 2003, U-Pb zircon geochronology and Sm-Nd-Pb isotopic constraints for Precambrian plutonic rocks in the northeastern part of Ryeongnam massif, Korea. Geochem. Jour. 37, 471-491.
- Cheong, C.S., Kwon, S.-T., Park, K.-H., 2000, Pb and Nd isotope constraints on Paleoproterozoic crustal evolution of the northern Yeongnam Massif, South Korea. Precam. Res. 102, 207-220.
- Clarke, D., 1992, Granitoid rocks. Chapman and Hall, London, 238p.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common rocks. Can. J. Earth Sci., 8, 523-548.
- Kim, C.B. and Turek, A., 1996, Advances in U-Pb zircon geochronology of Mesozoic plutonism in the southwestern part of Ryeongnam massif, Korea. Geochem. J., 30, 323-338.
- Kim, J. and Cho, M., 2003, Low-pressure metamorphism and leucogranite magmatism, northeastern Yeongnam Massif, Korea: implication for Paleoproterozoic crustal evolution. Precam. Res. 122, 235-251.
- Lee, S.-G., Shin, S.-C., Jin, M.-S., Ogasawara, M., and Yang, M. K., 2005, Two Paleoproterozoic strongly peraluminous granitic plutons (Nonggeori and Naedeokri granites) at the northeastern part of Yeongnam Massif, Korea: Geochemical and isotopic constraints in East Asian crustal formation history, Precam. Res., 139, 101-120.
- Ludwig, K.R., 2001a, SQUID 1.00: A user's manual. Berkeley Geochronology Center special publication, No. 2, 2455 Ridge Road, Berkeley, CA 94709, USA, 17p.
- Ludwig, K.R., 2001b, User's manual for Isoplot/EX, version 2.49: a geochronological toolkit for microsoft excel. Berkeley Geochronology Center special publication, No. 1a, 2455 Ridge Road, Berkeley, CA 94709, USA, 17p.
- Maniar, P.D. and Piccoli, P.M., 1989, Tectonic discrimination of granitoids. Geol. Soc. Am. Bull. 101, 635-643.
- Pearce J.A., Harris N.B.W., and Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Jour. Petrol., 25, 956-983.
- Spear, J.A., 1987, Evolution of magmatic AFM mineral assemblages in granitoid rocks: the hornblende+melt=biotite reaction in the Liberty Hill pluton, South Carolina. Am. Mineral., 72, 863-878.
- Steiger, R. and Jger, E., 1977, Subcommittee of geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmo-chronology. Earth Planet. Sci. Lett., 36, 359-362.
- Streckeisen A. and Le Maitre R.W., 1979, A chemical approximation to the modal QAPF classification of igneous rocks. Neues Jahrb. Min. Abh., 136, 169-206.
- Taylor, S.R., and McLennan, S.M., 1985, The continental crust: its composition and evolution. Blackwell, Oxford, 312p.
- Williams, I.S. and Claesson, S., 1987, Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high grade paragneisses from the Seve Nappe, Scandinavian Caledonides. II. Ion microprobe zircon U-Th-Pb. Contrib. Mineral. Petrol., 97, 205-217.

Williams, I.S., 1998, U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: Mckibben, M.A., Shnackn, W.C.III., Ridley, W.L. (eds.), Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Society of Economic Geologists, Socorro, Rev. Econ. Geol., 7, 1-35.

Zen, E., 1986, Aluminum enrichment in silicate melts by

fractional crystallization: Some mineralogic and petrographic constraints. Jour. Petrol., 27, 1095-1117.

접수일: 2009년 2월 5일
심사개시일: 2009년 2월 9일
채택일: 2009년 3월 13일