

우리나라 쥐라기 화강암의 스위트/슈퍼스워드 분류에 대한 예비적 연구

좌 용 주*

경상대학교 지구환경과학과

A Preliminary Study on Granite Suite and Supersuite for the Jurassic Granites in South Korea

Yong-Joo Jwa*

Department of Earth & Environmental Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

요약: 우리나라 중생대 쥐라기(~트라이아스기) 화강암의 관입 연대는 화강암이 분포하는 지체구조에 따라 210~170 Ma와 180~160 Ma의 두 시기로 재설정될 수 있다. 경기육괴의 쥐라기 화강암의 관입 시기는 주로 180~160 Ma에 속하여 쥐라기 중기의 화성활동으로 규정된다. 한편, 영남육괴의 쥐라기 화강암의 경우 210~170 Ma의 관입 연대를 보여 트라이아스기 말기에서 쥐라기 중기에 걸친 화성활동으로 정의될 수 있다. 우리나라 중생대 쥐라기 화강암에 대한 스위트/슈퍼스워드 구분에서 경기육괴의 북동-남서방향의 커다란 쥐라기 저반은 '경기 슈퍼스워드'로 설정될 수 있다. 이 슈퍼스워드는 화성기원의 지각성분에 좀 더 부화된 지각성분이 포함된 근원물질에서 유래하며, 충돌환경으로부터 약 50 Ma 후에 일어난 후조산환경(post-orogenic)에서 형성되었을 것으로 판단된다. 영남육괴의 쥐라기 화강암은 하나의 슈퍼스워드와 두 개의 스위트로 구분된다. 북동-남서 방향의 저반형 화강암체들로부터 '영남 슈퍼스워드'가 설정될 수 있다. 이 슈퍼스워드는 화성기원의 지각성분에 좀 더 부화된 지각성분이 포함된 근원물질에서 유래한다. 영남육괴의 안동-김천 사이의 화강암체들은 '안동 스위트'로 설정될 수 있는데, 이 스위트는 결핍된 맨틀 성분에 화성기원 지각성분이 혼합된 근원물질에서 유래하며, 화산전면에 비교적 가까운 지역에서 형성되었을 것으로 생각된다. 영남육괴의 대강 화강암과 함창 화강암은 '대강 스위트'로 설정될 수 있다. 대강 스위트는 영남육괴에서 일어난 대부분의 쥐라기 화성활동과는 지체구조적 환경이 다른, 즉 인장력이 우세하던 환경에서 마그마가 형성된 비조산성 화성활동으로 특징지어진다.

핵심어: 쥐라기 화강암, 경기 슈퍼스워드, 영남 슈퍼스워드, 안동 스위트, 대강 스위트

Abstract: Intruding ages for the Jurassic(~Triassic) granites in South Korea can be reestablished as 210~170 Ma and 180~160 Ma according to the tectonic provinces of magma emplacement. Most Jurassic granites in the Gyeonggi massif have the intrusion ages of 180~160 Ma, indicative of middle Jurassic igneous activity. On the other hand the intrusion ages (210~170 Ma) for the Jurassic granites in the Yeongnam massif represent late Triassic to middle Jurassic igneous activity. Using the concept of granite suite/supersuite, the Jurassic granites in South Korea can be hierarchically divided into two supersuites and two suites. Huge batholith of NE-SW direction in the Gyeonggi massif could be designated to be 'Gyeonggi Supersuite', which was originated from the mixture of igneous protolith and more evolved crustal materials and formed in the post-orogenic environment after collision of the north China and south China blocks. There are one supersuite and two suites in the Yeongnam massif. 'Yeongnam Supersuite' could be designated from the NE-SW trend batholith in the massif. This supersuite was originated from the mixture of igneous protolith and evolved crustal materials. Granitic rocks between Andong and Gimcheon areas could be defined as 'Andong Suite'. This suite was originated from the mixture of depleted mantle and igneous protolith. The Daegang and Hamchang granites could be designated as 'Daegang Suite'. This suite was formed in the anorogenic environment which was different from the orogenic environment of the other supersuite/suite in the Yeongnam massif.

Key words: Jurassic granites, Gyeonggi Supersuite, Yeongnam Supersuite, Andong Suite, Daegang Suite

*Corresponding author: Tel. 82-55-751-6004, E-mail: jwayj@gsnu.ac.kr

서 론

우리나라 중생대 화강암 중에서 쥐라기 화강암은 그 분포 면적이 가장 넓게 나타나며, 남한 면적의 약 25% 정도를 차지한다. 암주상으로 나타나는 트라이아스기 화강암 및 백악기 화강암과는 달리 쥐라기 화강암은 아주 넓은 저반상으로 나타나는 특징을 보인다. 전반적으로 북동-남서 방향의 분포를 보이며, 이 방향은 우리나라 지체구조의 구분 방향과 조화적이다(Fig. 1).

쥐라기 화강암은 북쪽의 경기육괴, 중앙의 옥천대, 남쪽의 영남육괴에 널리 분포하지만, 경상분지에는 노출되어 있지 않다. 따라서 쥐라기 화강암의 형성은 백악기 경상분지 형성 이전에 한반도 지각 기반에 관입한 것으로 생각할 수 있다. 쥐라기 화강암은 지역적으로 차이가 있기는 해도, 선캠브리아기 변성퇴적암, 고생대 퇴적암, 트라이아스기 퇴적암 등 쥐라기 이전 암석을 관입하고 있으며, 백악기의 경상누층군을 이루는

퇴적암 및 화산암류에 의해 피복되어 있다.

넓은 저반상의 쥐라기 화강암은 하나의 거대 화강암 복합체로 생각되기 쉬우나, 무수히 많은 개별 암체들의 집합체이며, 또한 성인적인 유사성과 이질성이 함께 나타나는 특징을 보인다. 한편, 거대 저반이기에 화강암체의 형성시기가 동일할 것으로 생각되어 왔지만, 최근까지 얻어진 관입연대의 자료들은 하나의 저반 내에서도 관입 시기가 다른 암체들이 존재함을 지시하고 있다. 따라서 쥐라기 화강암이 이루는 저반들의 경우 개별 암체들에 대한 기재적, 지구화학적 및 관입 연대의 자료를 종합적으로 해석하여 산성 화성활동의 시공간적 특징을 고찰해야 한다.

우리나라 쥐라기 화강암을 대상으로 시공간적으로 밀접히 관련된 화강암체들을 계층적으로 구분하고, 그들이 나타내는 암석성인적 특징을 고찰하기 위해서 화강암 스위트/슈퍼스워드의 분류를 적용해 보기로 한다. 한편, 현재까지 발표된 우리나라 쥐라기 화강암의 여러

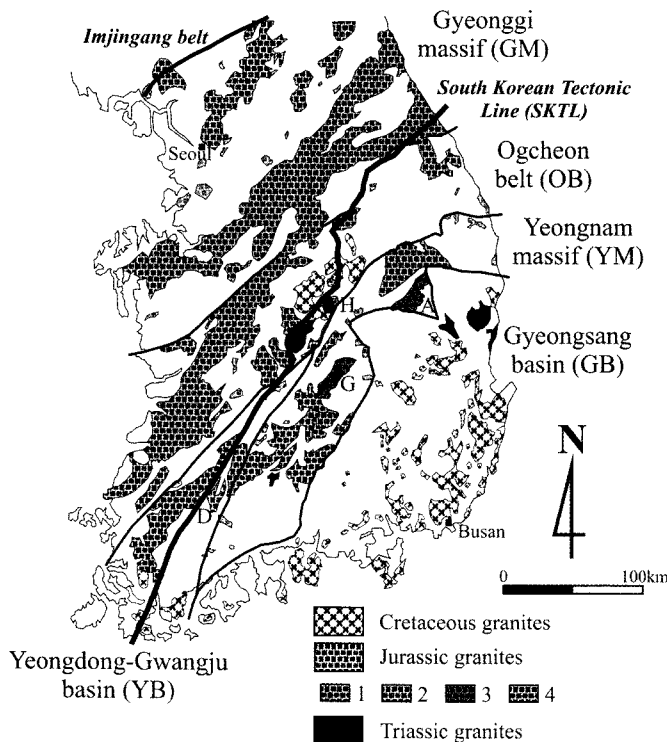


Fig. 1. Distribution of Mesozoic granites in South Korea. The location of the Imjingang belt and the NE South Korean Tectonic Line (SKTL) were modified after Chough *et al.* (2000). The SW SKTL is designed on the basis of the distribution of the Paleozoic strata, which can be regarded as the lithologic boundary between the Gyeonggi massif and the Yeongnam massif. Numbers in the Jurassic granites: 1 for Gyeonggi Supersuite, 2 for Yeongnam Supersuite, 3 for Andong Suite, and 4 for Daegang Suite. A, G, D, and H indicate Andong granite, Gimcheon granite, Daegang granite, and Hamchang granite (also called as Ian granite), respectively.

자료들은 그 양이 방대하여 전체적으로 나열할 수 없기 때문에, Jwa(2004)의 논문에서 제시된 자료와 도표를 이용하여 재해석하는 방법으로 논의하고자 한다. 그리고 화강암에 대한 스위트/슈퍼스위트의 구분에 대한 이론적 배경과 적용 및 해석에 대해서는 White *et al.* (2001)과 좌용주 외(2005)의 방법을 따르기로 한다.

우리나라 쥬라기 화강암의 기재적 특징

쥬라기 화강암은 일반적으로 중립질 내지 조립질의 반상 혹은 모 화강암이 우세하게 나타나지만, 미그마타이트질 화강암, 복운모 화강암, K-장석 거정을 포함하는 화강암 등의 다양한 암상 또한 나타난다. 모드 조성의 특징은 쥬라기 화강암이 토날라이트에서 섬장 화강암에 이르는 넓은 조성을 가진다는 것이다(Fig. 2). 그러나 화강섬록암과 화강암이 가장 우세한 모드 조성이라고 할 수 있다.

쥬라기의 화강섬록암은 주변 모암과의 접촉부에서는 세립질의 연변상 암석이 적으며, 선캠브리아기 기반암과의 접촉부에서는 포획암을 많이 포함한다. 화강섬록암 중의 일부는 약한 엽리를 보이기도 하는데, 이는 화강섬록암의 형성기 내지 후기에 일어난 전단운동의 결과로 해석되어, 연구자들에 따라서는 동시 지구조성(syn-tectonic) 화강암으로 명명되기도 한다.

우리나라 쥬라기 화강암의 지구화학적 특징

우리나라 쥬라기 화강암의 일부 주성분원소와 미량 원소 성분의 변화 경향을 Fig. 3에 나타내었다. 사용된 자료와 해석은 Jwa(2004)의 논문과 그에 포함된 문헌들에서 추출되었다.

Fig. 3에서 SiO_2 함량에 따른 ASI의 변화 경향을 살펴보면 우선 쥬라기 화강암의 경우 그 성질이 메타알루미나질과 과알루미나질의 양쪽을 보이지만, 과알루미나질이 우세함을 알 수 있다. 특히 알루미나 포화도가 SiO_2 63% 이상에서 높아지는 경향이 있고, ASI 값이 1.1 보다 높은 경우 이 화강암에는 적은 양의 백운모와 석류석이 포함된다. 석류석을 포함하는 쥬라기 화강암은 경기육괴의 북부에서 드물게 관찰되는데, 대개 1.1~1.2 사이의 ASI 값을 가진다. 한편, 1.2 이상의 ASI 값의 화강암은 높은 실리카 함량, 즉 SiO_2 70% 이상에서 나타나는데, 이들은 경기육괴와 옥천대에서 매우 분화된 화강암의 특징을 보인다.

이 특징은 영남육괴 화강암에서는 관찰할 수 없는 특징이다. ASI 값은 종종 I-타입과 S-타입 화강암을 구분하는데 사용된다(Chappell & White, 1974, 1992). Hinc *et al.*(1978)은 호주 코시우스코 저반의 I-타입/S-타입 화

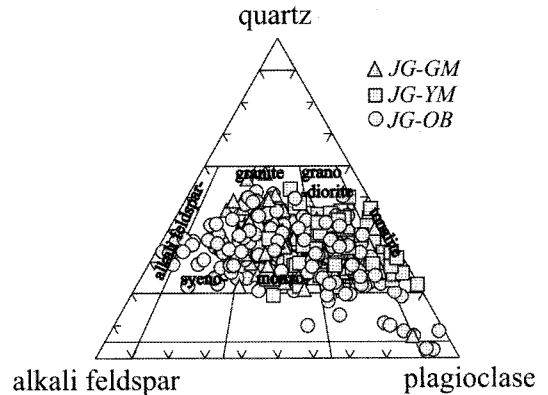


Fig. 2. Modal compositions (quartz-alkali feldspar-plagioclase) of the Jurassic granites in South Korea. Symbols: triangle, Jurassic granites in the Gyeonggi massif; square, Jurassic granites in the Yeongnam massif; circle, Jurassic granites in the Okcheon belt.

강암의 구분자로서 ASI 값 1.1을 사용하였으며, Chappell (1999)은 호주 라클란 습곡대에서 분별된 I-타입과 S-타입 화강암의 구분자로 ASI=1.1을 제안하였다. 이 값을 차용하여 쥬라기 화강암의 타입을 구분해보면, 쥬라기 화강암의 경우 SiO_2 63% 이하에서는 모두 I-타입에 속하게 되지만, 그 이상이 되면 S-타입도 나타나게 된다. 여기서 S-타입 화강암은 주로 복운모 화강암 같은 매우 분화된 경우를 지시하는 것이다. 하지만, 드문 S-타입의 화강암을 제외하고 쥬라기 화강암의 대부분이 I-타입에 속함을 주목할 필요가 있으며, 따라서 쥬라기 화강암을 펠릭한 I-타입으로 정의할 수 있다.

CaO 함량은 SiO_2 함량이 증가함에 따라 체계적으로 감소하는 특징을 보인다. 이는 화강암질 마그마로부터 각섬석 등과 같은 Ca를 포함한 광물상이 점진적으로 형성되고 분별된 결과로 해석할 수 있다. 한편, CaO의 절대 함량에서 영남육괴 쥬라기 화강암이 다른 두 지역 화강암보다 높게 나타난다.

P_2O_5 함량은 SiO_2 함량에 따라 일반적으로 감소하는 경향을 보인다. P 함량 변화에서 지적할 수 있는 것은 영남육괴 쥬라기 화강암이 다른 두 지역의 화강암보다 높게 나타난다는 것이다. 한편, 실리카 함량에 따라 P 함량이 감소하는 것은 I-타입 화강암의 특징 중 하나이다. P는 과알루미나질 멜트에 많이 녹아드는데, 그 이유는 인회석이 과알루미나질 멜트 조성에 용해도가 크기 때문이다(Montel *et al.*, 1988; Pichavant *et al.*, 1993; Wolf & London, 1994).

Rb 함량은 실리카 함량에 따라 증가하는 경향을 보인다. 특히 경기육괴와 옥천대 쥬라기 화강암의 경우

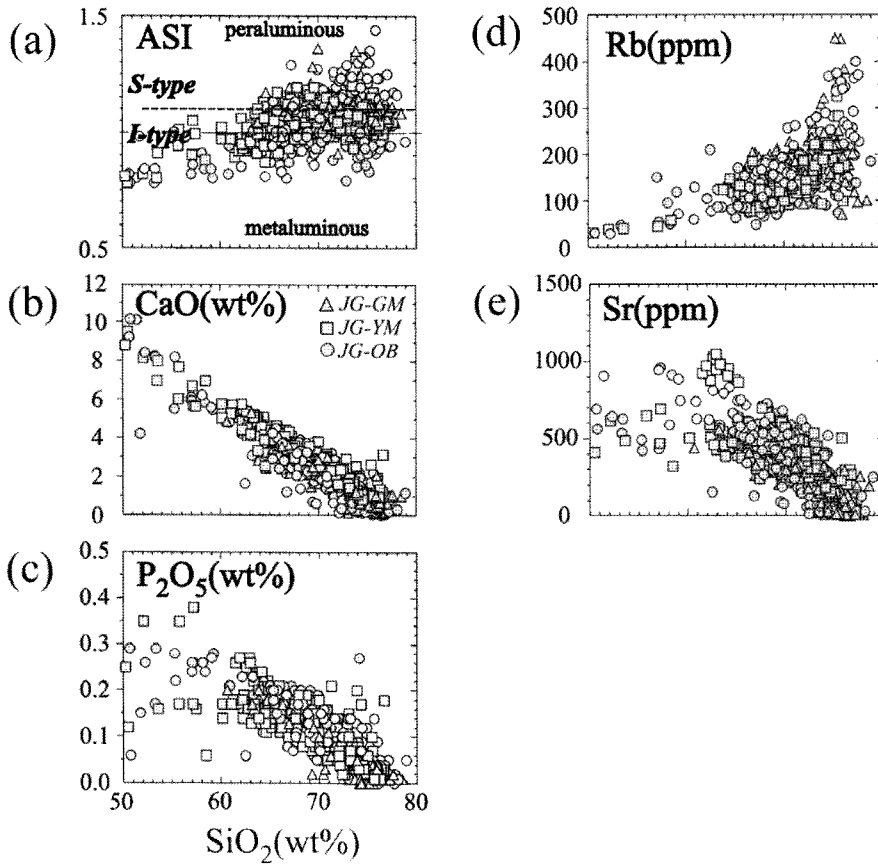


Fig. 3. Elemental variation diagrams for the Jurassic granites in South Korea. Symbols are the same as those in Fig. 2.

SiO₂ 75% 이상에서 Rb 함량이 급증하는 것을 볼 수 있는데, 이는 펠식한 멜트에서의 장석 분별의 결과로 해석된다. 높은 실리카 함량에서의 Rb 함량 급증은 경기육괴 및 옥천대 화강암과 영남육괴 화강암과의 뚜렷한 차이이다.

Sr 함량은 실리카 함량에 따라 일반적으로 감소하는 경향을 보인다. 그런데 특정 실리카 함량의 범위(SiO₂ 60~65%)에서 보면, 영남육괴 쥐라기 화강암의 Sr 함량이 가장 높으며, 옥천대 쥐라기 화강암이 중간, 경기육괴 쥐라기 화강암이 가장 낮은 Sr 함량을 보인다. 이 특징은 이 세 종류 화강암이 적어도 근원물질에서 이질적이었음을 시사하는 것이다.

쥐라기 화강암 분포의 지체구조 구분 : 새로운 시도

우리나라의 쥐라기 화강암이 분포하는 지체구조는 북으로부터 남을 향해 경기육괴, 옥천대, 영남육괴 등

으로 나누는 것이 보편적이었다. 그러나 최근의 연구에서 쥐라기 이전에 이미 한반도의 기반은 병합되었으며, 따라서 쥐라기 화강암을 만든 마그마의 근원물질을 고찰할 때의 지체구조는 퇴적암의 분포에 의한 기존의 구분보다는 지각의 종류에 따른 구분이 더욱 효과적이다. 특히 옥천대의 경우 경기육괴와 영남육괴 사이의 고생대 퇴적분지로서의 의미는 우리나라 지질에서 매우 중요하지만, 배태된 쥐라기 화강암의 근원 지각물질을 고려함에 있어서 그 의미가 매우 약하다. 한편, 옥천대 내부, 즉 중부 옥천대를 관통하는 South Korean Tectonic Line(Fig. 1 참조; 경기육괴와 영남육괴의 지체구조 경계에 해당할 것으로 생각됨: Chough *et al.*, 2000; Ree *et al.*, 2001)이 화강암질 마그마의 근원물질을 고찰함에 있어 훨씬 더 본질적으로 작용할 것으로 판단된다. 따라서 아래에서는 옥천대를 SKTL을 경계로 북쪽은 경기육괴로, 남쪽은 영남육괴로 구분하여 논의를 진행하기로 한다.

우리나라 중생대 쥐라기 화강암의 관입 연대

쥐라기 화강암에 대한 관입 연대의 정의

화강암의 스위트/슈퍼스워드 분류에 앞서 대상이 되는 쥐라기 화강암의 관입 연대를 살피는 것은 동시대 화강암인지 아닌지를 구별하는데 매우 중요하다. 1990년대 말까지의 화강암 생성에 관한 시대적 구분은 관입연대가 아닌 냉각연대로 이루어져 왔으며, 이는 화성활동의 시간축을 정의하는데 도움이 되지 못한다. 그러나 최근에 활발하게 보고되고 있는 화강암의 연대에는 관입연대로 생각할 수 있는 자료가 많으며, 이들을 기초로 하여 논의하는 것이 바람직하다.

Sagong *et al.*(2005)은 우리나라의 중생대 화성활동이 크게 세 시기, 즉 삼첩기(248-210 Ma), 쥐라기(197-158 Ma), 백악기-초기 제3기(110-50 Ma)로 나뉘며, 쥐라기와 백악기 사이에 50 Ma의 간격이 지체구조 발달사에 관련하여 존재함을 밝혔다. 이로부터 우리는 쥐라기 화강암의 관입이 대체적으로 200~160 Ma 사이의 시기에 활발히 일어났던 것으로 정의할 수 있다. 그러나 이 쥐라기의 화성활동의 시기는 공간적으로 재고찰되어야 할 필요가 있다.

쥐라기 화강암에 대한 새로운 관입 연대들과 문제점

위에서 정의했듯이 쥐라기 화강암의 관입 연대는 약 200~160 Ma의 화성활동의 결과로 판단된다. 그러나 쥐라기 화강암으로 구분되어 오던 개별 암체들의 연대를 살펴보면, 200~160 Ma의 범위를 벗어나는 경우가 최근 보고되고 있다. 특히 옥천대의 SKTL 남쪽에 분포하는 백록, 점촌 암체는 220 Ma 부근이며, 경기육괴의 남양 및 정암리 암체는 230 Ma 부근, 영남육괴의 대강 암체는 210~220 Ma 부근이다(Sagong *et al.*, 2005; Cho *et al.*, 2008). 다시 말해 기존의 쥐라기 암체들 중 다수는 200~160 Ma 사이의 연대를 보이지만, 일부의 관입시기는 이 범위를 벗어난 트라이아스기와 쥐라기 경계부근이 된다. 그리고 트라이아스기/쥐라기 경계의 관입 연대를 가지는 화강암들이 속속 보고되고 있다. 이 연구에서는 쥐라기와 트라이아스기의 연대가 함께 보고된 암체의 경우 쥐라기 화강암에 포함시켜 논의하고자 한다.

쥐라기 화강암의 시간적, 공간적 분포를 논의하기 위해서는 우선 화강암의 관입연대에 근거한 시간축이 설정되어야 한다. 동일한 시간축을 설정하기 위해서는 가능한 동일한 연대측정의 방법으로 구한 자료가 바람직

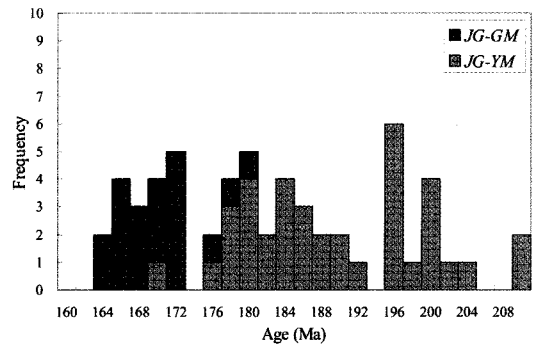


Fig. 4. Age distribution of the Jurassic granites in South Korea. Data were selected from U-Pb zircon and sphene ages and CHIME monazite ages (Turek and Kim, 1995; Kim and Turek, 1996; Cho *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2003; Park *et al.*, 2005; Sagong *et al.*, 2005; Park *et al.*, 2006; Jwa *et al.*, 2008).

하다. 하지만, 현재까지는 단일 연대측정방법으로 구한 자료가 부족하기 때문에 관입연대에 가까운 연대를 지시하는 U-Pb 지론 및 스펀 연대와 CHIME 모나자이트 연대만을 대상으로 하여 고찰하기로 한다. 최근까지 발표된 이들 자료를 바탕으로 경기육괴와 영남육괴의 쥐라기 화강암의 연대분포를 구한 것이 Fig. 4이다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이, 경기육괴의 경우(옥천대의 SKTL 북쪽 포함) 화강암의 관입 연대의 대부분이 180~160 Ma에 속한다. 영남육괴(옥천대의 SKTL 남쪽 포함)의 경우 대부분이 210~170 Ma에 속함을 나타내고, 경기육괴의 쥐라기 화강암보다는 대체로 그 관입연대가 오래되었다. 따라서 SKTL을 경계로 북쪽의 경기육괴와 남쪽의 영남육괴에 관입한 화강암은 관입 시기에 차이가 있음을 알 수 있다.

한편, 경기육괴와 영남육괴에 트라이아스기/쥐라기 경계 시기에서 쥐라기 중기까지 관입한 화강암들은 관입 시기의 차이만 있는 것이 아니다. 지구화학적으로도 차이가 있으며, 특히 동위원소 비는 관입 시기의 차이와 더불어 아주 뚜렷한 대조적인데, 아래에서 고찰해 보기로 한다.

우리나라 중생대 쥐라기 화강암의 동위원소 특징

쥐라기 화강암의 Nd-Sr 동위원소 체계

Fig. 5에는 소위 쥐라기 화강암에 대해 경기육괴와 영남육괴의 암체로 구분하여 Nd와 Sr 동위원소비의 관계를 나타내었다(단, 170 Ma로 규정화한 값이다). 먼저

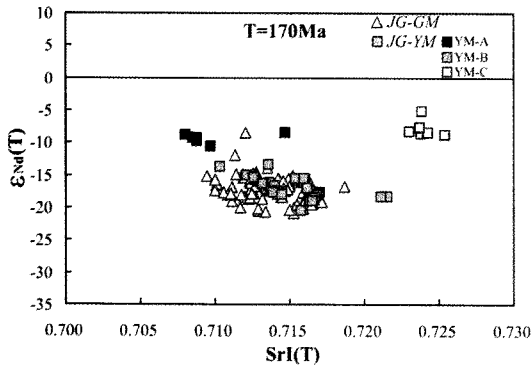


Fig. 5. Nd-Sr isotopic relationship in the Jurassic granites in South Korea. The $\epsilon_{Nd}(T)$ and $SrI(T)$ of the granites were calculated at the reference age of 170 Ma. JG-GM, Jurassic granites in the Gyeonggi massif including N of SKTL; JG-YM, Jurassic granites in the Yeongnam massif including S of SKTL.

경기육괴 화강암(JG-GM)을 보면 Sr의 초생값은 대체로 0.710~0.720 사이의 범위를 나타내며, eNd 값은 -8~-23의 범위를 보인다. 이 자료로부터 경기육괴 화강암 저반의 근원물질은 동위원소적으로 부화된 지각물질을 알 수 있다.

영남육괴 화강암(JG-YM)의 경우 매우 분산된 경향을 보인다. Sr 초생값은 0.707~0.726 사이이며, eNd 값은 -5~-22 사이이다. 그런데 영남육괴 화강암은 크게 세 부류로 구분된다. 하나는 Sr 초생값이 0.710 이하이고 eNd 값이 -10 전후의 그룹(이하 YM-A)이고, 또 하나는 SrI 0.723 이상, eNd -10 이하의 그룹(YM-C)이다. 나머지 하나는 Sr 초생값이 0.710~0.723 및 eNd 값이 -13~-21 사이의 범위를 가지는 것(YM-B)이다. 그룹 YM-A(안동암체와 김천암체)는 비교적 결핍된 지각물질을 근원으로 하며, 그룹 YM-B(영남육괴 저반)는 동위원소적으로 부화된 지각물질이 근원으로 생각된다. 한편, 그룹 YM-C(대강암체와 함창암체)는 아주 특징적인 Nd-Sr 체계를 가지는데, 이 그룹의 화강암은 소위 A-타입 화강암으로 알려진 것들이다. 결국 이 A-타입 화강암은 영남육괴 화강암 내에서도 아주 특징적인 것으로 동위원소 체계가 해수(seawater)에 의해 교란되었는지, 아니면 비조산성 화성활동의 결과로 해석된다.

한편, 경기육괴의 화강암은 부분적으로 YM-B 그룹의 화강암과 유사하지만, Sr 초생값의 0.710~0.715 범위에서는 보다 낮은 Nd 동위원소값을 가져 근원물질에서 이질성이 보인다.

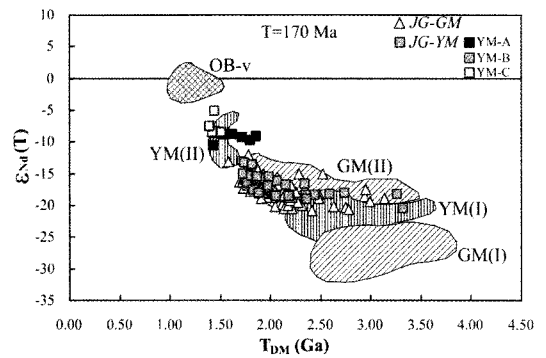


Fig. 6. Nd isotopic signatures of the Jurassic granites at the reference age of 170 Ma. Each field for the basement rocks is taken from Jwa (2004). The depleted mantle model ages (T_{DM}) for the granites are likely to indicate mixed model ages between the sources. OB-v represents the range of Nd isotopic signatures of the metavolcanic rocks in the Okcheon belt; GM(I) and GM(II) of more enriched and less enriched basement rocks in the Gyeonggi massif, respectively; YM(I) and YM(II) of more enriched and less enriched basement rocks in the Yeongnam massif, respectively. Symbols are the same as those in Fig. 5.

쥐라기 화강암의 근원물질의 차이

Fig. 6에서는 Nd 동위원소 비를 사용하여 경기육괴와 영남육괴 쥐라기 화강암을 형성시킨 마그마의 근원물질에서 어떠한 차이가 나는지를 살펴보았다. 앞에서 살펴본 바와 같이 영남육괴와 경기육괴 화강암은 관입시기에서도 차이가 나며, 마그마의 근원물질에서도 차이를 보인다. 아래에서는 이들 화강암의 근원물질이 과연 무엇인지를 고찰해 보기로 한다.

Fig. 6에서 넷으로 나뉜 지각성분 GM(I), GM(II), YM(I), YM(II)는 경기육괴의 두 성분과 영남육괴의 두 성분을 나타내는 것으로 GM(I)은 경기육괴의 오래된 시생대~원생대 전기의 형성시기를 가지는 기반암을 나타내며, GM(II)는 경기육괴의 중기 원생대의 형성시기를 가지는 기반암과 옥천대의 기반암을 나타낸다. 한편, YM(I)은 영남육괴의 시생대~원생대 전기의 기반암이며, YM(II)는 영남육괴 북쪽 중앙에 노출되어 있는 원생대 중기의 기반암을 나타낸다. 이 네 가지 지각성분의 형성시기 및 동위원소 특징에 대한 자세한 사항은 Jwa(2004)를 참고하기 바란다. 먼저 경기육괴 쥐라기 화강암은 마그마의 근원이 되는 물질이 GM(II)와 YM(I)의 지각물질 사이의 동위원소적 특징을 보인다. 그리고 경기육괴 쥐라기 화강암의 근원물질은 대부분

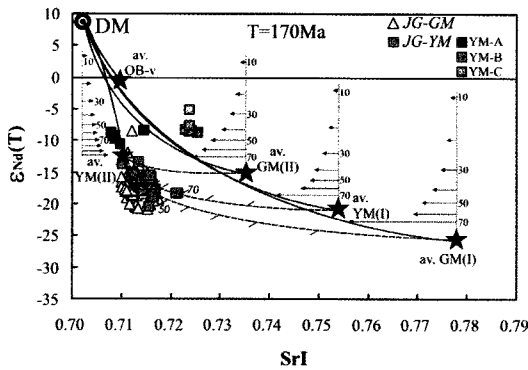


Fig. 7. Mixing lines describing $\epsilon_{Nd}(T)$ and $SrI(T)$ in mixtures of two components. The compositions for the depleted mantle(DM) are 136 ppm of Sr, 8 ppm of Nd, +10 of $\epsilon_{Nd}(0)$ and 0.7026 of $SrI(0)$, and the isotopic compositions were recalculated with respect to the reference ages of 170 Ma. The average compositions of five crustal components [GM(I), GM(II), YM(I), YM(II) and OB-v] are taken from Jwa (2004). Solid lines indicate the DM-crust mixing, whereas broken lines represent the crust-crust mixing. The relative weight fraction(%) of the crustal component in the mixture is marked with a number. Symbols are the same as those in Fig. 5.

이 거의 유사하다. 하지만 경기육괴 화강암이 자신이 노출되어 있는 경기육괴 기반암 GM(I)의 동위원소 특징과 전혀 다름을 주시할 필요가 있다.

한편, 영남육괴 류라기 화강암은 크게 두 부류로 나뉜다. 먼저 YM-A와 YM-C 그룹은 함께 YM(II)의 물질 영역에 도시되며, 이 두 화강암 그룹이 공통적인 근원물질을 가짐을 나타낸다. 그러나 YM-B 그룹은 경기육괴 류라기 화강암과 비슷하게 GM(II)와 YM(I) 근원물질의 혼합으로 설명될 수 있다. 영남육괴의 경우 Nd-Sr 체계(Fig. 5)에서 나타난 차이가 Fig. 6에서도 나타나며, 이는 화강암 그룹들이 마그마 근원물질의 이질성 및 마그마 형성과정이라는 차원에서 반드시 구분되어야 함을 지시한다. 한편, 경기육괴 류라기 화강암과 유사하게 영남육괴 류라기 화강암에서도 대부분의 화강암이 자신이 노출되어 있는 기반암, 즉 YM(I)의 동위원소 특징과 다르다. 결국 경기육괴와 영남육괴에 화강암의 근원물질은 현재 노출된 기반암과는 동위원소 조성적으로 다른 물질로부터 유래된 것임이 분명하다. 그렇다면 근원물질의 차이가 궁극적으로 무엇을 의미하는 지를 알아보기로 한다. Fig. 7은 Fig. 6의 자료와 Sr 동위원소의 자료를 복합적으로 해석하여 화강암질 마그마의 근원물질을 정량적으로 추정된 것이다.

경기육괴의 류라기 화강암을 형성시킨 마그마의 근

원물질은 두 지각성분, 즉 YM(II)와 GM(I)의 혼합으로 나타난다. 이 혼합 물질은 대부분이 YM(II) 성분을 가지지만 GM(I) 성분이 최대 50%까지 포함될 수 있음을 보이는 것이다. 다시 말해 경기육괴 류라기 화강암은 YM(II)와 GM(I)이라는 지각 성분들이 불균질하게 혼합된 물질에서 유래되었음을 뜻하며, 지각-지각 혼합물질을 의미한다.

영남육괴의 류라기 화강암은 Fig. 5와 유사하게 세 가지 그룹으로 나타난다. 먼저 YM-A 그룹은 그 근원이 결핍된 맨틀(DM)과 YM(II) 지각 성분의 혼합으로 설명된다. 이 화강암은 근원의 대부분이 YM(II)이지만 결핍된 맨틀 성분이 최대 50%까지 포함될 수 있음을 보인다. 즉, 그룹 YM-A 화강암은 맨틀-지각의 혼합 성분이 근원물질이었다는 것이다.

그룹 YM-B는 두 지각 성분 YM(II)와 YM(I)의 혼합으로 설명된다. 대부분이 YM(II) 성분이지만 YM(I) 성분이 최대 70%까지 포함된 지각-지각 혼합물질에서 기원되었다.

그룹 YM-C는 위의 경우와는 달리 근원물질이 맨틀-지각이나 지각-지각의 혼합으로 설명되지 않는다. 이 사실은 이미 위에서 언급했듯이 화강암의 동위원소적 체계가 다른 요인에 의해 교란되었음을 지시한다.

우리나라 류라기 화강암의 스위트/슈퍼스워드 구분

이상에서 살펴본 바와 같이 우리나라 류라기 화강암은 분포하는 지체구조에 따라 상이한 특징을 나타내며, 영남육괴 류라기 화강암의 경우 비록 동일 지체구조에 분포하지만 다른 세 가지 그룹으로 구분될 수 있다. 이 결과는 화강암의 스위트와 슈퍼스워드를 구분하는데 매우 중요하다. 우선 경기육괴 류라기 화강암과 영남육괴 류라기 화강암은 관입 시기에서 차이가 나며, 동위원소적인 체계에서도 이질적이다. 따라서 두 지체구조의 차이는 화강암의 근원과 마그마과정에서의 차이를 지시하는 것으로 동일한 스위트/슈퍼스워드로 취급될 수 없다.

경기육괴의 류라기 화강암은 개별 암체들에서의 기재적, 지구화학적 특징은 다소간의 차이가 있으나, 관입 시기, 동위원소 특징, 근원물질의 유사성 등 여러 가지 특징에서 하나의 거대한 슈퍼스워드로 구분될 수 있으며, 이를 '경기 슈퍼스워드'로 명명하고자 한다. 이 경기 슈퍼스워드는 일반적으로 높은 실리카 함량에서 알루미늄 포화도와 Rb 함량이 높게 나타나며, 매우 분화된 암상을 포함하는 특징을 가진다. 경기 슈퍼스워

트의 화강암 관입은 약 180~160 Ma의 시기에 일어났으며, 화강암질 마그마의 근원물질은 YM(II) 지각과 GM(I) 지각의 성분이 혼합된 물질에서 유래한다.

경기 슈퍼스워드트는 우리나라 지체구조 발달에서 보면, 230 Ma 무렵의 북중국-남중국지괴의 충돌에 기인한 압축장이 임진강대를 위시한 경기육괴의 북쪽에 발달했으며, 그로부터 50 Ma 후에 후조산환경(post-orogenic stage)에 광역적으로 발생한 마그마로부터 배태된 결과로 해석될 수 있다(Oh, 2006).

영남육괴의 쥐라기 화강암은 하나의 슈퍼스워드트와 두 개의 스위트로 구분할 수 있다. 우선 YM-B 그룹에 속하는 화강암은 영남육괴에서 가장 넓은 분포를 보이는 화강암들로, 북동쪽의 영주에서부터 남서쪽의 남원에 이르기까지 북동-남서 방향의 저반형 암체들이다. 이 저반의 개별 암체들에서의 기재적, 지구화학적 특징은 다소간의 차이가 있으나, 관입 시기, 동위원소 특징, 근원물질의 유사성 등 여러 가지 특징에서 하나의 슈퍼스워드트로의 설정이 가능하며, 이를 '영남 슈퍼스워드트'로 명명하고자 한다. 영남 슈퍼스워드트의 화강암들은 경기 슈퍼스워드트에 비해 CaO, MgO, P₂O₅ 함량에서 높게 나타나고, 또한 Sr 함량도 높은 편으로 대조적이다.

한편, 안동과 김천으로 이어지는 암체들(YM-A 그룹)은 비록 지리적으로 떨어져 있으나, 암상(각섬석 화강섬록암)의 기재적 특징과 지구화학적 특징에서 아주 유사하고, 영남 슈퍼스워드트와는 동위원소적 특징에서 차별적인 하나의 스위트로 설정되어야 한다. 여기서는 '안동 스위트'로 제안하고자 한다. 영남육괴의 안동 스위트는 SiO₂ 60~65% 범위에서 매우 높은 P₂O₅, Sr 함량으로 특징지어지며, 동위원소적으로는 소위 쥐라기 화강암에서 비교적 결핍된 특징을 보인다.

영남육괴에는 아주 독특한 화강암이 존재하며, YM-C 그룹으로 구분되었던 암체이다. 이 암체에는 북동쪽의 함창 화강암(이안 화강암으로도 불림)과 남서쪽의 대강 화강암이 속하며, 동시기의 알칼리 화성활동으로 대변될 수 있다. 이 그룹은 앞서 분류한 영남 슈퍼스워드트와 안동 스위트와는 별개로 구분되어야 하는데, 여기서는 '대강 스위트'로 제안하고자 한다. 대강 스위트는 SKTL의 구조선을 따라 분포하는데, 영남육괴에서 일어난 대부분의 쥐라기의 화성활동과는 지체구조적으로 다른, 인장력이 우세하던 환경에서 마그마가 형성된 비조산성 화성활동으로 특징지어질 수 있다. 최근 Cho *et al.*(2008)의 연구에서는 대강 스위트에 해당하는 화강암이 충돌 이후의 인장 환경에서 배태된 것으로 해석하고 있다.

이 연구는 우리나라 쥐라기 화강암에 대한 현재까지의 자료를 근거로 한 것이지만 개별 암체에 대한 보다 구체적인 연구가 진행된다면, 슈퍼스워드트 내에서도 여러 종류의 스위트가 설정될 가능성이 존재한다. 또한 계속적으로 정밀한 연대측정이 시도됨에 따라 일부 암체의 연대가 쥐라기에서 트라이아스기로 변경될 가능성도 있다. 따라서 향후 쥐라기 화강암에 대한 구체적인 연구가 계속 필요하며, 도출되는 결과에 따라 슈퍼스워드트/스위트의 구분이 부분적으로 재설정될 수 있을 것으로 생각된다.

결 론

(1) 우리나라 중생대 쥐라기(~트라이아스기) 화강암의 관입 연대는 화강암이 분포하는 지체구조에 따라 210~170 Ma와 180~160 Ma의 두 시기로 재설정될 수 있다.

(2) 경기육괴의 쥐라기 화강암의 관입 시기는 주로 180~160 Ma의 쥐라기 중기에 속하며, 영남육괴의 쥐라기 화강암의 경우 210~170 Ma의 트라이아스기 말기에서 쥐라기 중기에 속한다.

(3) 우리나라 중생대 쥐라기 화강암의 경우, 경기육괴에서는 하나의 커다란 경기 슈퍼스워드트가 설정되었다. 이 슈퍼스워드트는 화성기원의 지각성분에 좀 더 부화된 지각성분이 포함된 근원물질에서 유래하며, 충돌 환경으로부터 약 50 Ma 후에 일어난 후조산환경(post-orogenic)서 형성되었다.

(4) 영남육괴의 쥐라기 화강암은 하나의 슈퍼스워드트와 두 개의 스위트로 구분된다. 북동-남서 방향의 저반형 화강암체들로부터 영남 슈퍼스워드트가 설정되었다. 이 슈퍼스워드트는 화성기원의 지각성분에 좀 더 부화된 지각성분이 포함된 근원물질에서 유래한다.

(5) 영남육괴의 안동-김천 사이의 화강암체들은 안동 스위트로 설정되었다. 이 스위트에는 결핍된 맨틀 성분에 화성기원 지각성분이 혼합된 근원물질에서 유래하며, 화산전면대에 비교적 가까운 지역에 형성되었다.

(6) 영남육괴의 대강 화강암과 함창 화강암은 대강 스위트로 설정되었다. 영남육괴에서 일어난 대부분의 쥐라기의 화성활동과는 지체구조적으로 다른, 인장력이 우세하던 환경에서 마그마가 형성된 비조산성 화성활동으로 특징지어진다.

사 사

이 연구는 학술진흥재단의 선도연구자 연구비(KRF-

2004-041-C00399)에 의해서 지원되었다. 이 논문에 대한 건설적인 비평과 조언을 해 주신 연세대학교 권성택 교수님과 전북대학교 오창환 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- 박계현, 이호선, 정창식, 2005, 영남육괴 중부 김천, 성주 및 안의지역 화강섬록암의 스피인 U-Pb 연대. 암석학회지, 14, 1-11.
- 박계현, 이호선, 송용선, 정창식, 2006, 영남육괴 함양, 거창 및 영주 화강암-화강섬록암의 스피인 U-Pb 연대. 암석학회지, 15, 39-48.
- 좌용주, 김종선, 김건기, 2005, 우리나라 트라이아스기 화강암의 스위트/슈퍼스워드 분류. 암석학회지, 14, 226-236.
- Chappell, B.W., 1999, Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 46, 535-551.
- Chappell, B.W. and White, A.J.R., 1974, Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8, 173-174.
- Chappell, B.W. and White, A.J.R., 1992, I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83, 1-26.
- 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 shear. *Geosciences Journal*, 3, 1-15.
- 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-Science Reviews*, 52, 175-235.
- Hine, R., Williams, I.S., Chappell, B.W. and White, A.J.R., 1978, Contrasts between I- and S-type granitoids of the Kosciusko Batholith. *Journal of Geological Society of Australia*, 25, 219-234.
- Jwa, Y.-J., 2004, Possible source rocks of Mesozoic granites in South Korea: implications for crustal evolution in NE Asia. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 95, 181-195.
- Jwa, Y.-J., Lee, Y.I. and Orihashi, Y., 2008, Zircon U-Pb ages of the Mesozoic granites in the central Yeongnam Massif: Including newly found Cretaceous granites (abstract). *Geological Society of Korea. Abstract with program*, 14.
- Kim, C.-B. and Turek, A., 1996, Advances in U-Pb zircon geochronology of Mesozoic plutonism in the southwestern part of Ryeongnam massif, Korea. *Geochemical Journal*, 30, 323-336.
- Kim, C.-B., Chang H.-W. and Turek, A., 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. *The Island Arc*, 12, 366-382.
- Lee, B.-J., Lee, S.-R., Cho, D.-L. and Armstrong, R., 2001, Multiple ductile shearing during Jurassic times in the Jeonju ductile shear zone, Korea (abstract). *Geological Society of Korea. Abstract with program*, 116.
- Montel, J.M., Mouchel, R. and Pichavant, M., 1988, High apatite solubility in peraluminous melts. *Terra Cognita*, 8, 71.
- Oh, C.W., 2006, A new concept on tectonic correlation between Korea, China and Japan: Histories from the late Proterozoic to Cretaceous. *Gondwana Research*, 9, 47-61.
- Pichavant, M., Montel, J.M. and Richard, L.R., 1992, Apatite solubility in peraluminous liquids: experimental data and an extension of the model of Harrison and Watson(1984). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56, 3855-3861.
- Ree, J.-H., Kwon, S.-H., Park, Y., Kwon, S.-T. and Park, S.-H., 2001, Pre-tectonic and post-tectonic emplacement of the granitoids in the south central Okcheon belt, South Korea: Implications for the timing of strike-slip shearing and thrusting. *Tectonics*, 20, 850-867.
- Sagong, H., Kwon, S.-T. and Ree, J.-H., 2005, Mesozoic episodic magnetism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics*, 24, TC5002, doi:10.1029/2004TC001720.
- Turek, A. and Kim, C.-B., 1995, U-Pb zircon ages of Mesozoic plutons in the Damyang-Geochang area, Ryeongnam massif, Korea. *Geochemical Journal*, 29, 243-258.
- White, A.J.R., Allen, C.M., Beams, S.D., Carr, P.F., Champion, D.C., Chappell, B.W., Wyborn, D. and Wyborn, L.A.I., 2001, Granite suites and supersuites of eastern Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48, 515-530.
- Wolf, M.B. and London, D., 1994, Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: an experimental study of solubilities and mechanisms. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 4127-4145.

2008년 10월 7일 접수
2008년 10월 9일 심사개시
2008년 11월 5일 채택