남한의 백악기-제3기초 화강암과 마그마 혼합
: 시공간적 변화와 지구조적 의미(다중 슬랩 윈도우 모델)

김종선¹ · 김건기² · 좌용주² · 손 문^{1*}

¹부산대학교 지구환경시스템학부, ²경상대학교 지구환경과학과

Cretaceous to Early Tertiary Granites and Magma Mixing in South Korea
: Their Spatio-temporal Variations and Tectonic Implications
(Multiple Slab Window Model)

Jong-Sun Kim¹, Kun-Ki Kim², Yong-Joo Jwa² and Moon Son^{1*}

¹Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²Department of Earth & Environmental Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

요 약: 한반도 남부의 백악기-제3기초 화강암의 암석학적 특징과 연대측정 자료들을 종합하여 시공간적 변화를 반영하는 지구조 모델을 제안하고자 하였다. 여러 암석기재와 지화학적 연구결과로부터 이들 화강암류는 대륙 연변부에서 해양지각의 섭입에 의해 형성된 마그마 기원으로 지각 천처에서 정치된 특징을 보인다. 또한 화강암류 내에는 고화과정 중 맨틀에서 유래한 염기성 마그마의 주입에 의한 마그마 혼합을 지시하는 다양한 형태와 크기의 MME들이 분포한다. MME의 분포와 화강암의 연령자료를 함께 살펴보면 시공간적으로 일정한 시기의 것들이 일정한 지역에 한정되어 분포하는 양상을 보인다. 이러한 특징은 후기 백악기의 이자나기-태평양판의 해령섭입으로 인한 다중 슬랩 윈도우 모델에 의해 설명될 수 있다.

핵심어: 백악기, 화강암, 마그마 혼합, 해령섭입, 다중 슬랩 윈도우

Abstract: Based on the petrologic and age data of the Cretaceous to early Tertiary granites in south Korea, we propose a new tectonic model reflecting their temporal and spatial variations. A number of petrographic and geochemical studies on the granites suggest that they originated from the magma formed by subduction of oceanic crust in continental margin and were emplaced in epizone. The MMEs with various shapes and sizes, which were produced due to the magma mixing caused by the injection of mafic magma from mantle during the crystallization of the granitic magma, are observed in the granites. The distributions of the MMEs and ages of the granites show a distinctive spatio-temporal distribution pattern. The distribution pattern can be explained by a multiple slab window model related to the ridge subduction of Izanagi-Pacific plates during the Late Cretaceous.

Key words: Cretaceous, granites, magma mixing, ridge subduction, multiple slab window

서 언

이 논문은 한반도 남부에 분포하는 백악기-제3기초 화강암의 암석학적 특징과 연대측정 자료들을 종합하

여 이들 화강암의 시공간적 현재 분포를 설명하는 하나의 지구조적 모델을 제안하는데 목적이 있다. 이를 위해 선행 여러 논문들과 함께 대한지질학회에서 발간된 한국의 지질(이종혁 외, 2002) 그리고 한국지질자원연구원에서 발간된 한국의 지질 심포지움 자료집-중생대편(Jin et al., 2002) 등을 종합·정리하여 암석학적 특징들을 요약하였다. 또한 우리나라 백악기-

*Corresponding author

Tel: 051-510-2248

E-mail: moonson@pusan.ac.kr

제3기초 화강암의 기원을 설명하는데 있어 중요한 열쇠가 될 수 있는 맨틀로부터 유래된 매픽 마그마의 주입에 관한 증거와 분포를 살펴보고, 최근 획득된 저콘 U-Pb 연대를 비롯한 기존 연대측정 자료들을 종합하였다. 이들로부터 백악기말에서 제3기초까지 이르는 약 95에서 50 Ma까지의 화강암의 시간적 분포와 매픽 마그마의 주입에 따른 혼합 양상의 공간적인 특성을 정리하였다. 그리고 이를 통해 밝혀진 우리나라 백악기말-제3기초 화강암의 시공간적 변화 특성을 설명하는 하나의 지구조적 모델을 제안하고자 한다.

이번 연구에서 제안하는 모델은 다중 슬랩 윈도우 모델(multiple slab window model)로 명명될 수 있는데, 슬랩 윈도우 개념은 1960년대 이래로 지질과학에서 하나의 패러다임으로 발전해 온 판구조론 관점에서 예측될 수 있는 섭입경계 아래의 해양판 배열을 기반으로 한다(McKenzie and Morgan, 1969). 섭입경계에서 해령이 섭입되면 슬랩 윈도우가 형성될 것이라는 생각은 1970년대 후반에 이르러 처음으로 개념화되었다(Snyder et al., 1976; Dickinson and Snyder, 1979). 슬랩 윈도우에 대한 증거로는 전호 화산활동(forearc volcanism)과 함께 현생 판구조에서 해령의 섭입이 일어나는 곳에서 슬랩(베니오프존; Wadati-Benioff zone) 지진활동의 부재(Pardo and Suarez, 1995; Johnston and Thorkelson, 1997; Ferrari, 2004; Levin et al., 2005) 그리고 주변보다 100-200°C 높은 열적 이상대를 지시하는 낮은 지진파 속도 이상대(Frederiksen et al., 1998; Gorrington and Kay, 2001; Levin et al., 2005) 등이 있다. 2009년 Tectonophysics 464호는 해령의 섭입에 따른 슬랩 윈도우를 주제로 한 특별호에 이 관련 13편의 논문이 소개되고 있다. 이 특별호에는 태평양 주변 알래스카(Alaska), 남극(Antarctica), 캐나다(Canada), 파타고니아(Patagonia), 통가(Tonga), 북미 등에서의 백악기에서 현재까지 마그마의 동위원소 조성 변화 그리고 지판의 운동학적(kinematic) 복원 등 슬랩 윈도우 진화 양상과 관련된 다양한 연구들이 소개되어 있다(McCrory and Wilson, 2009).

남한의 백악기 화강암류

경상분지의 발달초기 즉, 백악기 초인 약 140 Ma 경에는 패러론(Farallon)판과 이자나기(Izanagi)판 사이의 남북 주향을 가지는 해령경계가 유라시아 대륙의 동변부에 도착하였을 가능성이 높다(Engelbreton

et al., 1985). 이후 백악기 동안 유라시아판 아래로 이자나기-태평양판의 섭입과 관련된 화성활동이 동아시아 일원에 광범위하게 일어났으며(Chough and Sohn, 2010), 이로 인한 코디레라-형 조산운동은 강력한 중성-산성의 화성활동을 발생시켜 유라시아 대륙의 지각성장의 원인이 된 것으로 알려져 있다(Rogers, 1993). 따라서 캄차카반도 북부에서 연해주, 서남 일본, 한반도 동남부와 중국 동남부를 잇는 지역은 백악기-제3기의 심성암과 화산암이 광범위하게 분포하는 유라시아 대륙의 활동성 연변부(active continental margin)로 해석된다(정창식 외, 1998; Roddick, 1983).

이종혁 외(2002)에 따르면, 남한의 백악기 화강암류는 공간적인 분포에 따라 경상분지, 옥천분지(대), 경기육괴, 소백산육괴 화강암으로 구분된다. 한편, Jwa (2002)는 옥천분지 남서부와 소백산육괴 사이의 영동-광주함몰대(분지)를 백악기 동안 활발한 마그마의 관입이 있었던 하나의 독립적인 화강암 분포 구조구역으로 구분한 바 있다. 이번 논문에서는 이들 백악기-제3기초 화강암류 중 비교적 넓은 범위의 분포를 보이는 경상분지, 영동-광주함몰대 그리고 옥천분지의 것들에 대해 중점적으로 논의하도록 하겠다. Rb-Sr 연대측정 자료에 근거하면(진명식 외, 1992, 1993; 신인현 외, 1997; Lee, 1991), 옥천대의 화강암은 백악기 초기에서 중기(120~85 Ma)에 그리고 영동-광주분지의 것은 후기 백악기(76~67 Ma)에 관입한 것으로 알려져 있다. 또한 경상분지의 화강암은 대부분 백악기 말에서 제3기초에 관입하였으며 분지의 동측(85~50 Ma)에 비해 서측에서 보다 오래된 연령(106~100 Ma)을 보이는 것으로 보고되었다. 일본열도는 신생대 마이오세의 동해 확장 이전에는 유라시아 대륙과 연결되어 있었으며(Otofugi et al., 1985), 일본열도의 중앙구조선(Median Tectonic Line) 이북의 서남내대(Inner Zone)와 한반도 경상분지에는 I-형(Chappell and White, 1974)으로 칼크-알칼리 계열의 화강암류가 분포하는 것으로 알려져 있다(김상욱, 1986; 이상만 외, 1987; 정창식 외, 1998; Jin, 1985a; Nakajima, 1996).

야외산상과 암석기재

세 구조구역의 화강암류는 암석기재적 관점에서 서로 간에 약간의 차이가 인지된다. 각 지역의 주요 암상을 출현 빈도에 따라 나열하면, 옥천분지에는 알칼

리장석화강암, 섬장화강암(syenogranite), 문조화강암과 화강섬록암, 영동-광주분지에는 문조화강암과 섬장화강암 그리고 경상분지에는 문조화강암, 섬장화강암, 화강섬록암과 알칼리장석화강암이다(Jwa, 2002).

경상분지에 분포하는 화강암은 둥근형태의 산점상 심성암체로 천소 관입(마이아롤리틱 정동, 세립질의 미문상조직, 각섬석 지압계)을 하였으며, 각 암체의 지열역사 해석을 통해 관입 후 빠른 냉각을 겪었던 것으로 보고되었다(Shin and Nishimura, 1993; Lee et al., 1995). 둥근 저반 또는 작은 암주상이 보편적이며, 수직절리가 잘 나타나고, 암상은 반려암-섬록암-석영섬록암-토날라이트-화강섬록암-화강암-알칼리장석화강암의 집합체이다(이중혁 외, 2002). 또한 현무암-안산암-테사이트-유문암의 화산암 집합체와 밀접하게 관련되어 산출된다. 화강암의 조직은 큰 저반에서는 대체로 등립질이며 중립질에서 조립의 입자크기를 보이고, 암주상에서는 내부를 향해 세립에서 점진적으로 중립으로 변화된다. 미문상조직과 마이아롤리틱 정동이 알칼리장석 화강암의 작은 암주상 암체에서 발달하는 것이 일반적이며 엷리는 발달하지 않는다. 광물조합은 석영, 퍼사이트, 사장석, 흑운모, 각섬석이 주 구성광물로 산출되며, 저콘, 인회석, 갈렙석, 자철석, 스펀, 황화광물이 부 구성광물로 수반되며, 간혹 단사회석과 사방회석이 산출되기도 한다.

경상분지 외곽의 화강암류가 갖는 암석기재적 차이점을 살펴보면, 상대적으로 고기의 화강암은 판상절리를 가지는 둥근 저반상으로 산출되나, 그 외 화강암은 대부분 암주상의 암체로 산출된다. 암상은 화강섬록암보다 미문상화강암과 알칼리장석화강암이 우세하며, 화산암체는 잘 수반되지 않는다. 입자크기를 살펴보면, 우백질화강암과 미문상화강암에서 세립에서 중립질의 조직을 가진다(이중혁 외, 2002).

백악기 화강암은 암체에 따라 특징적으로 미문상조직이 발달하는데, 이 조직의 성인과 관련하여 Lee (1997)는 감압동안 냉각율의 정도가 미문상조직의 형성을 좌우하는 것으로 보고하였다. 지각 천처에 관입한 물에 포화된 마그마가 중간정도의 냉각율에서 미문상 조직의 석영이 형성되며, 특히 단층 또는 열극의 발달이 감압에 따른 휘발성 성분의 제거에 중요한 역할을 할 것으로 보았다. 좌용주(1997)는 남해지역 미문상화강암의 경우 물에 포화되고 K-성분이 풍부한 마그마가 감압에 의해 과냉각되는 조건하에서 고결되었으며, 과냉각 조건을 충족시키는 요인으로 정

치심도보다는 구조적인 요인(단층, 파쇄대 등)에 의한 마그마 관입·냉각속도에 더 의존하는 것으로 보았다.

경상분지에 분포하는 백악기 화강암과 같은 천처관입의 칼크-알칼리계열 화강암들은 특히 반상화강암에서 엔클레이브(enclave; 포유암)로 알려진 모암과는 다른 암석들이 다량 포함되는 것으로 알려져 있다(김종선, 2001). 화강암체 내에 산출되는 다양한 종류의 포유암은 여러 연구자들에 의해 연구되었다(Chappell et al., 1987; Chen et al., 1989; Dodge and Kistler, 1990; Barbarin and Didier, 1991; Didier and Barbarin, 1991; Elburg, 1996; Mass et al., 1997). 경상분지 화강암류 내에 산출되는 대부분의 포유암은 짙은 회색-흑회색으로 세립질이며 대체로 타원형(ellipsoid)이 우세한데, 이는 소위 염기성 미립 포유암(mafic microgranular enclave, 이하 MME)에 해당된다(김종선 외, 1998, 2000; 김춘식 외, 1999; 김종선과 이준동, 2000). 칼크-알칼리계열의 화강암체 내의 이러한 MME는 세계 여러 지역에서 조성적으로 대비되는 두 마그마의 혼합의 결과로 해석되고 있다(Didier, 1973; Didier and Barbarin, 1991; Bateman, 1995; Wiebe, 1996; Bonin, 2004; Janoušek et al., 2004; Wiebe et al., 2004; Barbarin, 2005; Kerim, 2006). 우리나라 백악기-제3기초 화강암에 산출되는 MME도 마그마 혼합의 결과물로 해석된다(김종선 외, 1998, 2000, 2004; 진미정 외 2000, 2002; 좌용주와 김건기, 2000; 김종선과 이준동, 2000; 김건기, 2006; Kim et al., 2002; Hwang et al., 2011). 이들 MME의 암석기재적 특징을 살펴보면, 첫째 모암보다 어두운 색을 가지며, 타원형의 외형이 우세하다. 둘째, 화강암류 내에 전반적으로 분포하며, 셋째, 화강암류 주변에 이들 MME의 모암으로 추정되는 암체가 발견되지 않는다. 넷째, 모암인 화강암류에서 유입된 것으로 추정되는 반정을 제외하면 반정을 가지지 않는 세립의 등립질조직을 보인다. 다섯째, 모암과의 접촉부에서 접촉변성작용 흔적이 관찰되지 않는다. 마지막으로 화성 기원을 지시하는 조직과 과냉각에 의해 형성된 광물들이 관찰된다. 그 외에도 사장석의 진동누대, 세립의 사장석과 유색광물을 포유결정으로 가지는 포이킬리틱(poikilitic) 석영과 알칼리장석(김종선 외, 1998), 라파키비(rapakivi)장석(진미정 외, 2002), 혼성대의 화강암 포유암(Kim et al., 2002), 망토조직(mantling texture)(김건기 외, 2005) 등이 관찰된다.

경상분지 내 화강암류를 암석기재학적 특징을 근거

로 분류한 연구 중 주목할 만한 것으로, 황병훈 외 (2004)는 야외산상, 관입관계, 광물함량, 조직, MME/염기성 집합체(mafic clot)의 함유 정도에 따라 그룹 I(화강섬록암, 포유암 함량이 많은 반상화강암, 포유암 함량이 적은 반상화강암), 그룹 II(등립질-흑운모 화강암과 미문상화강암) 그리고 그룹 III(남산과 기계의 A-형 화강암)으로 화강암을 분류하였다. 그룹 I과 II는 야외에서 MME의 포함 유무로 구분이 용이한데 (김종선과 이준동, 2000), 이는 경상분지 내 백악기 화강암은 매픽 마그마의 영향을 받은 화강암체와 그렇지 않은 것으로 구분될 수 있음을 의미한다.

지화학적 특징

경상분지에 분포하는 화강암류는 전형적인 I-형, 자철석 계열(Ishihara, 1977)의 광물학적, 암석화학적 특징을 보이며(김상욱, 1986; 이상만 외, 1987; Jin, 1980, 1985b), 경상분지 밖의 화강암에 비해 특징적으로 낮은 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비와 높은 ϵ_{Nd} 값, 덜 방사기원적인 (less radiogenic) Pb 동위원소비를 가져(권성택, 1991, 1992; Jin, 1988; Kim et al., 1996; Chang, 1997; Kwon and Sagong, 2002), 맨틀 내지 하부지각에서 기원한 비교적 초생적인 마그마에서 유래된 것으로 알려져 있다(정창식 외, 1998). 그리고 경상분지 내 화강암의 Nd 모델연령은 7억 내지 9억년 정도로 경상분지 밖의 화강암에 비해 특징적으로 젊어(권성택, 1991; Kim et al., 1996) 경상분지 안팎의 기반암의 생성시기가 달랐음을 시사한다(정창식 외, 1998).

세 구조구역의 화강암에 대한 지화학적 내용은 Jwa (2002)를 참고하기 바라며, 간략히 소개하면 다음과 같다. 옥천분지 화강암은 영동-광주분지와 경상분지 화강암보다 높은 K_2O , $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, Rb와 Nb를 가진다. 경상분지 화강암은 다른 두 화강암보다 알칼리원소와 Nb에서 낮은 함량을, TiO_2 , P_2O_5 와 Sr에서 높은 함량을 가진다. 영동-광주분지 화강암은 일반적으로 옥천분지와 경상분지 화강암의 중간적인 원소함량을 가지나, 특징적으로 CaO , P_2O_5 , Sr은 낮은 함량을 보이는 반면, Al_2O_3 는 높은 함량을 보인다.

경상분지 화강암은 낮으면서 일정한 LREE/HREE 비와 약하거나 중간정도의 Eu 부(negative)의 이상을 보이는 반면, 옥천분지 화강암과 영동-광주분지 화강암은 분화와 함께 감소하는 높은 LREE/HREE 비를 가지고, 약한 것에서 강한 Eu 부의 이상을 보인다.

알루미나 포화도에서 옥천분지 화강암과 경상분지 화강암은 메타알루미나에서 과알루미나 사이에 놓이고, I-형 화강암에 속한다. 반면 영동-광주분지 화강암은 대부분 과알루미나와 S-형 화강암에 도시된다.

경상분지 화강암과 영동-광주분지 화강암은 자철석-계열의 화강암에 분류되는 반면, 옥천분지 화강암은 자철석과 티탄철석의 두 계열의 특징을 모두 보여준다. 세 가지 화강암들은 모두 화산호 화강암에 도시되고, 백악기 동안 활동적인 대륙연변부에서 관입하였음을 지시한다. 경상분지 화강암의 모마그마는 맨틀에서 유래된 화성기원 모암으로부터 기원된 반면, 옥천분지 화강암은 대륙지각내의 물질로부터 기원된 것으로 보인다. 영동-광주분지 화강암은 화성기원 모암과 대륙지각의 혼합된 물질로부터 기원되었을 것이다(Jwa, 2002, 2004). 한편, 화강암의 자철석/티탄철석 계열과 관련하여 Ishihara(2007)는 최근 화산호(island arc)의 조구조환경에서 화강암계열의 조성을 좌우하는 중요한 열쇠는 상부맨틀로부터의 염기성 마그마의 양에 좌우되는 반면, 대륙관 내부에서 화강암류의 조성을 좌우하는 요인은 기원암(protolith)의 초기 조성(original composition)에 좌우된다고 하였다.

MME의 마그마 혼합 기원을 지지하는 지화학적 특징으로는, 각 암체에서 MME와 화강암들이 주성분원소들에서 두 성분 혼합을 지시하는 선적인 변화경향을 보인다(좌용주와 김건기, 2000; 김건기 외, 2005). 그리고 희토류 원소 변화에서 중간조성의 MME에서 양 단성분(end-member)으로 가면서 혼합을 지시하는 종 모양의 함량 변화를 보인다(진미정 외, 2000; Poli and Tommasini, 1991; Poli et al., 1996). 광물성분 변화로는 사장석 누대조직에서 An함량의 급격한 증가와 MME와 화강암에서 일치하는 사장석의 연변부 조성을 가진다(김종선, 2001; 김건기, 2006). Sr 함량에 대해서는 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비에서 혼합을 지시하는 곡선적인 변화경향을 보인다(김건기, 2006; Holden et al., 1987, 1991). 또한 양산지역에서 MME와 MME를 포함하는 화강암의 저콘 SHRIMP-RG 분석결과 각각 연령이 74.9 ± 0.6 Ma와 75.0 ± 0.5 Ma로 거의 일치하는 연령이 제시되었으며(황병훈 외, 2008), 이 또한 마그마 혼합을 지지하는 결과로 판단된다.

관입 시기

경상분지 백악기-제3기초의 화강암류에 대한 기준

연대 자료(한국의 지질 발췌)에 따르면, 경상분지 내 백악기 심성활동은 백악기 초기(115~90 Ma), 중기(90~70 Ma) 그리고 후기(70~50 Ma)로 나누어지며, 조성 또한 섬록암에서부터 알칼리장석화강암으로 변화된다. 백악기 초기(115~90 Ma)에 관입한 심성암류는 섬록암과 흑운모-각섬석화강섬록암 조성으로 경상분

지 연변부(경상분지 남서부와 북동부 동해해안가)에 분포한다. 이들은 대부분 비등립질이며, 세립-중립질의 입자크기를 가진다(한국자원연구소, 1995; 김근수 외, 1997; 김상중, 1997; Lee et al., 1995). 백악기 중기(90~70 Ma)에 관입한 화강암류는 각섬석-흑운모 화강섬록암과 흑운모화강암으로 경상분지의 중앙부에

Fig. 1. Distribution of the Phanerozoic granites (modified from Jin, 2002) and summary of the zircon ages (data from Park, T.H. et al., 2005; Hwang et al., 2008, 2011; Yun et al., 2011; Zhang et al., 2012; unpublished data) of the Cretaceous to early Tertiary granitic rocks in south Korea. IB: Imjingang Basin, GM: Gyeonggi Massif, YM: Yeongnam Massif, GB: Gyeongsang Basin, YGDZ: Yeongdong-Gwangju Depression Zone.

분포한다. 이들은 등립질이며, 중립질의 입자크기를 가진다(한국자원연구소, 1995; 김근수 외, 1997; Jin, 1988; Shin and Nishimura, 1993; Lee et al., 1995; Choe and Jwa, 2004). 백악기 후기에서 제3기초(70~50 Ma)에 관입한 것으로 알려진 흑운모화강암, 미문상화강암 또는 알칼리장석화강암은 진해, 김해, 부산, 양산, 경주지역 등에 분포하며, 미문상조각과 마

이아롤리틱조각을 가진다(한국자원연구소, 1995; 고정선, 2001; 황병훈, 2004; Lee, 1991; Na, 1994; Lee et al., 1995). 따라서 경상분지 내에 심성활동은 약 115 Ma에서부터 시작되어 제3기초인 약 50 Ma 까지 진행되었다고 할 수 있다. 하지만 정창식 외(1998)는 다른 방법으로 재확인되지 않은 분산된 Rb-Sr 전암등시선연대와 같은 암체에 대해 오차범위를 초과하는

Fig. 2. Distribution of the Phanerozoic granites(modified form in, 2002) and age map based on the zircon ages for the Cretaceous to early Tertiary granites with or without MMEs in South Korea. Abbreviations are the same as those in Fig. 1.

K-Ar 연대를 제외하고, 기존에 보고된 Rb-Sr 전암등시선연대와 K-Ar 각섬석연대를 기준으로 경상분지 백악기-제3기초 화강암류를 연령을 재설정하였다. 그 결과 100 Ma 내외[마산(창원), 화왕산(창녕), 진동, 영해(장사동)]의 화강암류는 경상분지 남서쪽과 북부지역에 분포하며, 75~67 Ma의 화강암류는 경상분지 중부지역에 분포하는 것으로 보고하였다. 그리고 60 Ma 보다 젊은 화강암체의 분포지는 방어진, 가대리, 토함산, 남산, 덕동, 오유리, 사방리 그리고 보현산 지역으로 주로 경상분지 동편에 좁게 산출되는 것으로 보고하였다. 그리고 이들 연대는 100 Ma 내외, 75~67 Ma 그리고 50 Ma 내외로 불연속적인 분포를 보이며, 이러한 시공간적 분포는 김해암체(84 Ma)와 온정리암체(87 Ma)를 제외한 대부분의 화강암류가 잘 일치하는 것으로 보고하였다.

그러나 좌용주 외(2004, 2005)는 화강암체에 대한 계층적 구분을 하는 데에 있어서, 화강암류의 관입시기와 퇴적층서의 부조화에 대해 문제점을 제시하였다. 예를 들면 백악기 화강암류 중 진동층을 관입한 진동화강암은 관입 연대(Rb-Sr 전암등시선 연대)가 106 Ma 정도로 알려져 왔지만(김근수 외, 1997), 진동층의 연대(화산쇄설성입자 K-Ar 전암 연대)는 약 85 Ma로 보고되어(김현주와 백인성, 2001), 관입한 화강암과 피관입 퇴적층서 사이에 시간적 불일치성에 관한 문제점을 제시하였다. 그리고 U-Pb 저콘 연대(80 ± 2 Ma) 측정결과를 이용하여 기존 연대측정에 관한 문제점을 논의하였다(좌용주 외, 2004).

이상과 같이 백악기-제3기초의 화강암류에 대한 기존 연령은 연구자에 따른 차이로 현재까지 논란의 대상이 되고 있어, 이번 논문에서는 최근에 보고된 U-Pb 저콘 연대(황병훈 외, 2008; 윤성호 외, 2011; Park et al., 2005; Hwang et al., 2011; Zhang et al., 2012; unpublished data)를 이용하여 화강암류의 시공간적인 분포를 재고찰하고자 하였다(Fig. 1). 경상분지에 분포하는 백악기-제3기초의 화강암류에는 고화과정 중 맨틀에서 유래한 염기성 마그마의 주입에 의한 마그마 혼합으로 다양한 형태와 크기의 MME들이 분포하는데, 화강암의 연령자료와 함께 이들의 분포 유무를 종합하여 함께 도시하면 Fig. 2와 같다. 마그마 혼합이 인정되는 MME를 포함하는 화강암들은 전체 화강암류의 약 81%에 해당한다. 그리고 이들은 시공간적으로 일정한 시기에 일정한 영역에 주로 분포하는 양상을 보인다. 대체적으로 약 75 Ma

보다 오래된 화강암은 경상분지 밖의 화강암과 경상분지의 서측에 주로 분포하고, 65-75 Ma 경의 화강암은 양산단층 부근과 남해안 일원에, 65 Ma 보다 젊은 화강암은 양산단층의 동편 해안가에 주로 분포한다. 또한 각 시기에 마그마 혼합이 인정되는 화강암과 그렇지 않은 화강암이 공간적으로 함께 분포하는 양상을 보인다.

다중 슬랩 윈도우 (multiple slab window) 모델

화강암 또는 심성암은 지각 하부의 열적 구조를 보여주는 창이다. 따라서 화강암의 시공간적 분포는 지각 하부에서 일어나는 시공간적 열적 변화를 해석하는데 있어 중요한 증거를 제공할 것이다. 앞서 논의한 바와 같이 한반도 남부의 백악기에서 제3기초 화강암 내에 포함된 포유암의 암석기재학적 그리고 지화학적 연구를 통해 당시에 염기성 마그마와 화강암질 마그마 사이의 마그마 혼합/불균질혼합 사건이 발생하였음이 밝혀져 있다. 일본 남서부의 료케-산요(Ryoke-San'yo) 마그마대에도 염기성과 산성의 마그마가 혼합 또는 불균질 혼합이 서로 일어나 많은 염기성 포유암이 화강암체 내에서 관찰된다(Yoshikura and Yamamoto, 1995). 한편 화강암질 마그마로 염기성 마그마가 주입되어 발생하는 다양한 마그마 혼합의 양상은 상부 맨틀로부터 지각에 직접적인 물질의 주입을 지시하므로, 해령섭입에 따른 섭입판의 열개(slab window) 현상을 반영할 가능성 높다(Thorkelson, 1996; Osozawa, 1997; Kinoshita, 1999, 2002; Madsen et al., 2006; McCrory and Wilson, 2009). 또한 슬랩 윈도우의 대륙 연변부 상부에는 고-Mg 안산암과 데사이트(아다카이트)가 분출하는데(Kay et al. 1993; Thorkelson and Breitsprecher, 2005; Guo et al., 2007; Imaoka et al., 2011), 한반도에서도 백악기말의 아다카이트질 심성암체가 보고되고 있다(위수민 외, 2006, 2007; 박영록 2009; 위수민과 박재용, 2009).

이상에서 제시한 백악기 화강암의 연령 분포와 마그마 혼합의 유무 등의 특징을 근거하고 섭입판의 열개 즉, 슬랩 윈도우 개념을 도입하여 한반도 남부의 화강암질 마그마의 정치과정을 설명하는 하나의 지구조 모델을 제시하고자 한다. 이를 위하여 먼저 백악기의 한반도 주변의 고지리에 대한 자료가 필요하였

Fig. 3. Possible tectonic rearrangement and multiple slab window model explaining the magmatism both in Korea and in the inner zone of southwest Japan during the Late Cretaceous. The direction of the Median Tectonic Line (MTL) is restored to be N35°E (modified from Thorkelson, 1996; Kinoshita, 2002; Lee, 2008). Around 90-85 Ma, the Izanagi-Pacific ridge reached and subducted beneath the NNE-trending trench and multiple slab window began to affect the Korean peninsula in the eastern margin of the Eurasian continent. At about 70 Ma, the slab window reached near the Yangsan fault in the Gyeongsang Basin and occupied around the southern part of the Korean peninsula. As a result, the extensive intrusion of acidic magma and magma mixing due to the injection of mafic magma occurred there.

으며, 이를 위해 퇴적암의 암상, 포함된 역의 암석학적 · 연대학적 특징, 화석, 지화학적 특징 등에 근거한 기원지 분석과 고자기학적 자료를 통하여 재구성한 중생대 고지리에 대한 두 결과(Lee, 2008; Chough and Sohn, 2010)를 참고하였다. Lee (2008)와 Chough and Sohn (2010)에 의해 제안된 두 모델의 큰 차이는 일본의 고위도와 고해구의 방향이다. 테토리(Tetori)분지에 대한 고자기 연구에 따르면(Hirooka et al. 2002), 일본열도의 고위도는 유라기말까지 24°N 부근에 위치하다 백악기 동안 약 1,800 km 이동하여 위도 40°N까지 북상한 것으로 알려져 있다. 이는 일본열도가 백악기 동안 한반도에 비해 상대적으로 빠르게 북상하였음을 지시한다(Lee and Kim, 2005; Park, Y.H. et al., 2005). 따라서 후기 백악기 초인 85 Ma 경에는 Lee(2008)가 제안한 바와 같이 일본열도가 한반도에 비해 보다 남쪽의 저위도에 위치하였을 가능성이 높다(Fig. 3).

고해구의 방향과 관련하여 Lee(2008)는 Zhao et al.(1999)의 논문을 인용하여 고제3기에 한반도와 일본이 23° 시계방향 회전하고, 동해의 확장(Otofuiji, 1996; Uno, 2002)에 의해 일본열도가 차별적으로 시계방향으로 보다 회전하여 일본열도가 현재 약 N75°E 방향으로 놓여 있는 것으로 해석하였다. 때문에 Lee(2008)는 고지리도에서 이를 복원하여 고해구의 방향을 약 N12°E 방향으로 도시하였다. Lee(2008)의 고지리도의 근거가 된 Zhao et al.(1999)의 연구에 따르면, 경상분지는 유라시아에 비해 상대적으로 최대 $29.9 \pm 9.9^\circ$ 시계방향으로 회전되었으며, Park Y.H. et al.(2005)도 이와 유사하게 경상분지가 유라시아에 비해 $21.1 \pm 5.5^\circ$ 시계방향으로 회전하였음을 주장한 바 있다. 그러나 Lee et al.(1987), 김인수 외(1993a, b) 그리고 강희철과 김인수(2000)는 경상분지 퇴적층의 잔류자기가 유라시아에 비해 약 10° 내외로 시계방향으로 회전되어 있지만, 오차범위를 고려하면 실제적인 회전의 의

미는 없음을 주장한 바 있다. 또한 Zhao et al.(1999)과 Park Y.H. et al.(2005)의 결과는 화강암 관입 이전의 경상누층군에서 얻어진 것으로 실제 경상분지 화강암에서 얻어진 잔류자기에서는 시계방향 회전 현상이 인지되지 않음이 보고되어 있다(강희철 외, 1996). 더욱이 한반도와 일본열도가 백악기에서 고제3기 동안 같이 회전되었다면, 고지리 복원에서 이를 보정하기 위해 일본열도만 반시계방향으로 회전하는 것은 논리적이지 못하며 정확한 고지리 복원을 위해서는 한반도도 반시계방향으로 회전시켜야 할 것이다. 따라서 Chough and Sohn(2010)에서 제시된 바와 유사하게 고지리 복원을 위해 동해확장 동안 발생한 차별적인 일본열도 회전만 고려하는 것이 타당하며, 때문에 약 N35°E 방향으로 해구가 놓여 있었던 것으로 판단하였다(Fig. 3).

90-80 Ma 경에 유라시아 대륙의 동쪽 연변부에는 이자나기-태평양 해령(Izanagi-Pacific ridge)이 북북동-남남서 방향의 해구에 도달하여 섭입된 것으로 알려져 있다(Uyeda and Miyashiro, 1974; Hilde et al., 1977; Engebretson et al., 1985; Maruyama et al., 1997; Kinoshita, 2002; Chough and Sohn, 2010; Hwang et al., 2011). 당시의 해구와 해령은 Kinoshita (2002)의 연구결과에 따라 약 52°의 각도로 서로 사교한 것으로 가정하였다(Fig. 3). Kinoshita(2002)는 일본열도에 분포하는 백악기 화강암 연령의 통계학적 자료를 근거로 동시기 화강암 분포지의 중심 방향으로 해령이 놓이는 것으로 가정하고 후기 백악기 동안 해구와 해령이 약 52° 각도로 사교하는 것으로 설계하였다. 한편 일본의 고자기 자료들에 의하면, 히다(Hida) 지괴는 쥐라기-백악기 동안 약 40°N에 위치하였으며(Hirooka et al., 1983), 후기 백악기의 좌수향 운동에 의해 미노(Mino) 지괴와 병치된 것으로 알려져 있어(Tsukada, 2003; Lee, 2008), 이번 연구에서는 이를 참고하여 고지리를 복원하였다(Fig. 3).

Kinoshita(2002)는 K-Ar 흑운모 연령에 근거하여(실제 정치시기와는 약 10 Ma의 차이), 일본의 백악기 화강암의 정치시기(Kinoshita, 1995, 1999)가 남서일본에서 북동으로 그리고 외대(Outer zone)에서 내대로 젊어지는 체계적인 시공간적 변화가 있음을 보고하고, 이러한 원인을 슬랩 윈도우 모델로 설명하였다. 그러나 한반도의 경우에는 대체적으로 북서에서 남동 또는 동쪽으로 연령이 감소하는 양상을 보인다(Fig. 2). 특히 영동-광주분지와 옥천분지 중앙부 그리고 경상

분지의 서부에서 유사한 연령의 화강암이 분포하고 있다. 때문에 일본열도와 한반도의 화강암 정치시기 분포를 함께 설명하는 모델이 현재까지 제시되어 있지 못하다. 이번 연구에서는 이들 두 지역의 화강암류의 연령 분포의 원인을 동시에 설명하기 위해 다중창(multiple window) 모델(Thorkelson, 1996)을 제안하고자 한다(Fig. 3). 이 모델은 Kinoshita (2002)에 의해 제시된 일본의 백악기 화강암뿐만 아니라 한반도 남부의 백악기-제3기초 화강암의 연령이 남동 또는 동쪽으로 감소하는 이유를 효과적으로 설명할 수 있을 것으로 판단한다.

슬랩 윈도우의 열개(opening)로 인해 상승하는 맨틀로부터 대류열의 공급, 맨틀유동, 맨틀웨지(wedge)의 가열, 슬랩 맨틀의 상-하부 사이의 혼합, 젊고 뜨거운 슬랩 연변부에서의 탈수용융 등의 작용으로 인해, 윈도우의 상부에는 화강암과 아다카이트, 마그마 혼합과 같은 에피소딕(episodic)한 마그마의 이동과 관입이 기대된다(Kinoshita, 2002; Thorkelson and Breitsprecher, 2005). 또한 맨틀에서 유래한 염기성 마그마의 유입에 의한 마그마 혼합 양상이 시공간적으로 변화를 보이는 것도 이 모델을 통해 설명될 수 있다.

Fig. 1과 2에 나타나는 바와 같이 경상분지에는 마그마 혼합의 증거가 관찰되지 않는 흑운모(등립질)화강암 또는 미문상화강암(황병훈 외(2004)의 그룹 II)이 80, 70 그리고 60 Ma 전후로 약 10 Ma를 간격으로 분포하고 있다. 만약 단순히 한 번의 지속적인 해령 섭입이 백악기 동안 있었고, 이를 통해 마그마 혼합이 일어났다면 주기적으로 반복되는 이와 같은 분포를 설명하기 어렵다. 그러나 이번 연구에서 제시하는 다중창 모델은 윈도우가 도달하기 이전의 화강암질 마그마의 관입, 윈도우가 도달하면서 아다카이트의 형성과 매픽 마그마의 주입 그리고 다시 윈도우가 지나간 다음의 산성 마그마의 관입으로 창 모양에 따라 각 시기별로 마그마 혼합과 마그마 혼합이 일어나지 암체의 분포를 설명할 수 있다. 한편, 한국 지질자원연구원의 물리탐사(구성분 외, 1997) 자료에는 경상분지 내에 사다리꼴의 이상대가 나타남이 보고되어 있다. 이 물리탐사에서 나타나는 이상대는 이번 연구에서 제안하는 슬랩 윈도우의 분포 및 모양과 흡사함이 흥미롭다.

최근에 발표된 Chough and Sohn(2010)의 연구는 경상분지의 발달과 관련된 새로운 지구조적 시각을

제공하고 있다. 이 연구에서는 경상분지가 대규모 단층운동에 의해 만들어진 구조분지가 아니라, 백악기 동안 동아시아 섭입대에서 유라시아 판과 섭입하는 해양판이 강하게 결합(coupling)되지 못해 인장 혹은 횡인장(좌수향)의 지구조 응력장이 작동하여 만들어진 화산호(volcanic arc)와 그 배후에 발달하는 배호 분지(backarc basin)로 구성된 하나의 배호-화산호 시스템으로 해석하고 있다. 백악기 동안 경상분지는 수렴경계의 지구조 환경에도 불구하고 진화과정 동안 지속적으로 인장/횡인장성 상태에 놓여 있었다. 이는 분지충전물 내에 빈번한 화산암의 협재, 곳곳의 화산합몰구조와 칼데라의 발달, 퇴적동시기 습곡이나 역단층 운동이 거의 관찰되지 않는다는 점에서 지지된다(Chough and Sohn, 2010). 그러나 이러한 경상분지의 특징은 슬랩 윈도우 모델 하에서도 설명이 어느 정도 가능하다. 즉, 해양지각의 섭입과 관련한 압축응력 하에서도 슬랩 윈도우 열개는 지하내부로 부터의 열원에 의해 지역적으로 확장환경을 유도할 수 있으며, 경상분지와 같이 시공간적으로 빈번하게 발생한 화산활동과 광범위한 산성 마그마의 관입을 발생시킬 수 있다. 그러나 제시된 모델은 대부분 경상분지 내 화강암에 대한 자료들에 의존하고 있어 보다 자세한 모델 수립을 위해서는 경기육괴와 영남육괴를 포함하는 우리나라 전역에 분포하는 백악기-제3기초 화강암의 상세한 추가적인 연대측정 자료와 더불어 마그마 혼합과 고-Mg 화성암의 존재와 같은 다양하고 보다 상세한 암석기재와 지화학적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

결 론

한반도 남부의 백악기-제3기초의 화강암류는 I-형, 칼크-알칼리 계열의 화강암으로 이자나기-태평양 해양판의 섭입과 관련된 대륙연변부의 화강암으로 지각 천층으로 관입하여 비교적 빠른 냉각과정을 거친 것으로 판단된다. 또한 화강암 내에는 고화 과정 중 맨틀에서 유래한 염기성 마그마의 주입에 의한 마그마 혼합을 지시하는 다양한 형태와 크기의 MME들이 분포한다. 화강암의 연령자료를 살펴보면, 경상분지 내와 주변 백악기-제3기초의 화강암류는 유사한 암상을 가지는 유사한 시기의 것들이 일정한 영역에 분포하는 양상을 보인다. 대체적으로 약 75 Ma 보다 오래된 화강암은 경상분지 서측 외곽인 옥천분지와 영동

-광주합몰대와 경상분지의 서부에 주로 분포하고, 65-75 Ma 사이의 화강암은 양산단층 주변과 남해안 일원에, 65 Ma보다 젊은 화강암은 양산단층의 동편 해안가에 주로 분포한다. 또한 각 시기에 마그마 혼합이 인정되는 화강암과 그렇지 않은 화강암이 공간적으로 함께 분포하는 양상을 보인다. 이런 분포는 이자나기-태평양 해양판의 해령 섭입에 따른 다중 슬랩 윈도우 모델로 설명이 가능한데, 이 모델은 한반도 남부의 백악기-제3기초 화강암뿐만 아니라, 일본의 동시기 화강암류의 시공간적인 분포를 함께 설명할 수 있는 장점이 있다. 또한 이 모델은 해양지각의 섭입과 관련한 압축응력 하에서도 지하내부로부터 상승하는 열원에 의해 지역적으로 확장환경이 유도될 수 있음을 보여주며 경상분지 내에 빈번하게 산출되는 화산암류와 광범위한 산성 마그마의 관입에 관해서도 설명해 준다.

사 사

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었다. 그리고 한국암석학회의 20주년을 기쁜 마음으로 축하드리며, 논문의 심사과정에서 유익한 조언을 해 주신 극지연구소의 이종익 박사님과 익명의 심사자에게 감사드린다.

참고문헌

- 강희철, 김인수, 2000, 영양지역에 분포하는 전기 백악기 해양층군에 대한 고자기 연구. 지질학회지, 36, 47-71.
- 강희철, 김인수, 손문, 정현정, 1996, 양산단층지역에 분포하는 퇴적암 및 화성암류에 대한 고자기 연구. 자원환경 지질, 29, 753-765.
- 고정선, 2001, 경상분지내 남산 A-형 화강암과 경주 I-형 화강암류에 대한 광물학적, 지화학적 및 Sr-Nd 동위원소 연구. 부산대학교 이학박사 학위논문, 173p.
- 구성분, 이태섭, 최중호, 김광은, 박영수, 성낙훈, 1997, 안계, 김천, 선산지역 항공방사능/자력탐사 및 경상분지 자료종합. KR-96(C)-2, 한국자원연구소, 98p.
- 권성택, 1991, 우리나라 현생이인 화강암질암에 대한 사마리움-니오디미움 동위원소 연구: 지각의 성인 및 구조 고찰 (요약문). 지질학회지, 27, 528-529.
- 권성택, 1992, 남한 현생이인 화강암질암에 대한 납 동위원소 연구: 예비보고서 (요약문). 지질학회지, 28, 514.
- 김건기, 2006, 경상분지 백악기-제3기초 화강암류의 마그마 혼합과 불균질 혼합에 관한 연구. 경상대학교 이학박사 학위논문, 232p.
- 김건기, 김종선, 좌용주, 2005, 경상분지 남서부 와룡산 일

- 대에 분포하는 백악기 화강암류에 관한 암석학적 연구: 마그마 불균질 혼합에 의한 화강암류의 조성변화. 암석학회지, 14, 12-23.
- 김근수, 김정진, 박맹언, 1997, 경상분지에 분포하는 화강 암질암체에 대한 Rb-Sr 연대 (요약문). 한국암석학회 학술발표회 요약집, 20, 20p.
- 김상욱, 1986, 경상분지에서의 후기 백악기 화성활동에 관한 연구. 이상만 교수 송수기념논문집, 167-194.
- 김상중, 1997, 북부 경상분지의 화성활동과 다금속 광화작용에 관한 지화학 및 지질연대학적 연구. 충남대학교 이학박사 학위논문, 276p.
- 김인수, 강희철, 이현구, 1993a, 경상분지 남서부 진교-사천 지역 전기 백악기 퇴적암에 대한 고자기 연구. 광산지질, 26, 519-539.
- 김인수, 이현구, 윤혜수, 강희철, 1993b, 의성지역 백악기 암석에 대한 고자기 연구. 광산지질, 26, 403-420.
- 김종선, 2001, 경상분지 남부 지역의 화강암류에 산출되는 포유체의 암석학적 연구: 마그마 불균질 혼합에 관한 연구. 부산대학교 이학박사 학위논문, 210p.
- 김종선, 김진기, 좌용주, 이준동, 2004, 경상분지 화강암류에서 발견되는 엔클레이브(포유암)에 대한 암석기재적 연구. 암석학회지, 13, 1-15.
- 김종선, 이준동, 2000, 거제도 화강암질암의 지화학적 특성에 의한 마그마 불균질 혼합 증거. 지질학회지, 36, 19-38.
- 김종선, 이준동, 김인수, 백인성, 최보심, 2000, 울산 방어진 일대 화강암 내에 산출되는 포획암의 암석학적 연구. 지질학회지, 36, 73-92.
- 김종선, 이준동, 윤성효, 1998, 거제도 화강암질암의 마그마 불균질 혼합 증거: 1. 그 기재적 특성. 지질학회지, 34, 105-121.
- 김춘식, 김석옥, 김근수, 김국락, 손문, 김종선, 1999, 경남 양산 원동칼데라 중앙부의 각섬석-흑운모 화강암에 나타나는 포획암의 기원: 1, 암석기재학적 및 고자기학적 연구. 자원환경지질학회지, 32, 339-351.
- 김현주, 백인성, 2001, 경상남도 고성군에 분포하는 백악기 진동층의 퇴적상 및 퇴적환경. 지질학회지, 37, 235-256.
- 박영록, 2009, 정선 일대에 분포하는 백악기 물운화강암체의 아다키틱한 지화학적 특성: 분별정출작용-동화작용에 의한 칼크-알칼리 마그마로부터 아다키틱한 마그마로의 전이. 지질학회지, 45, 345-360.
- 신인현, 김희남, 안건상, 1997, Sr, Nd 동위원소비에 의한 한반도 남서부지역 화강암류의 기원. 한국지구과학회지, 18, 99-104.
- 윤성효, 김동현, 김병훈, 김동현, 구태우, 2011, 감포일대 제3기분지내 화강암체의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대. 2011년 춘계지질과학기술 공동학술대회 논문집, 118.
- 위수민, 김윤지, 최선규, 박정우, 유인창, 2007, 진동화강암체의 아다카이트릭한 특성. 자원환경지질, 40, 223-236.
- 위수민, 박재용, 2009, 영남육괴 남서부 북내지역에 분포하는 아다카이트질 화강암체의 성인 및 지화학적 특성. 지구과학회지, 30, 427-443.
- 위수민, 최선규, 유인창, 신흥자, 2006, 경상분지 서남부에 분포하는 백악기 진동화강암의 지화학적 특성: 아다카이트(adakitic)한 특성을 중심으로. 자원환경지질, 39, 555-566.
- 이상만, 김상욱, 진명식, 1987, 남한의 백악기-제3기 화성활동과 지구조적 의미. 지질학회지, 23, 338-359.
- 이종혁, 원종관, 김정환, 이창진, 2002, 한국의 지질. 대한지질학회, 시그마프레스, 서울, 802p.
- 정창식, 권성택, 김정민, 장병욱, 1998, 경상분지 북부에 분포하는 온정리 화강암에 대한 암석화학적, 동위원소 지구화학적 연구: 경상분지 다른 지역과 서남 일본 내대에 분포하는 백악기-제3기 화강암류와의 비교 고찰. 암석학회지, 7, 77-97.
- 좌용주, 1997, 남해지역 금산 미문상화강암에 대한 암석기재. 한국지구과학회지, 18, 426-432.
- 좌용주, 김진기, 2000, 의성분지 보현산 일대 화강암류와 포획암에 대한 암석학적 연구. 암석학회지, 9, 187-203.
- 좌용주, 김종선, 김진기, 2005, 우리나라 트라이아스기 화강암의 스위트/슈퍼스위트 분류. 암석학회지, 14, 226-236.
- 좌용주, 이용일, Orihasi, Y., 2004, 구산동 응회암과 진동 화강암에서 산출되는 저콘에 대한 U-Pb 연대와 진동층 퇴적시기에 대한 고찰. 대한지질학회 2004년 추계학술발표회 초록집, 73.
- 진명식, 김성재, 지세정, 신성천, 주승환, 1993, 옥천습곡대 중앙부 고생대-중생대 화강암체의 방사성 연대측정연구. 한국자원연구소, KR-92-1G-2-1. 34p.
- 진명식, 주승환, 지세정, 김성재, 신성천, 1992, 방사성 동위원소 연대측정에 의한 옥천습곡대 북서부 중생대 화강암체의 관입시기와 지열사 연구. 한국자원연구소, KR-91-1D-2. 35p.
- 진미정, 김종선, 이준동, 2002, 방어진 화강암에 나타나는 라파키비 조직의 성인에 관한 연구. 암석학회지, 11, 30-48.
- 진미정, 김종선, 이준동, 김인수, 백인성, 2000, 양산시 원효산 화강암에 산출되는 포획암에 대한 암석학적 연구. 암석학회지, 9, 142-168.
- 한국자원연구소(KIGAM), 1995, 한국 심성암 동위원소연대지도. 성지문화사.
- 황병훈, 2004, 경상분지 남부지역의 화강암질암에 대한 암석학, 동위원소 및 성인. 부산대학교 이학박사 학위논문, 306p.
- 황병훈, W. G. Ernst, 손문, 이준동, 2008, 경상분지 양산단층 주변 화강암류의 SHRIMP-RG 연대와 지구조적 의미. 한국암석학회·한국광물학회 2008년 공동학술발표회 논문집, 22.
- 황병훈, 이준동, 양경희, 2004, 양산단층 주변에 분포하는 화강암질암의 암석학적 연구: 양산단층의 수평 변위량. 지질학회지, 40, 161-178.
- Barbarin, B., 2005, Mafic magmatic enclaves and mafic rocks associated with some granitoids of the central Sierra Nevada batholith, California: nature, origin, and relations with the hosts. Lithos, 80, 155-177.
- Barbarin, B. and Didier, J., 1991, Macroscopic features of mafic microgranular enclaves. In Enclaves and Granite Petrology (ed. J. Didier and B. Barbarin), Elsevier, Amsterdam, 253-262.
- Bateman, R., 1995, The interplay between crystallization, replenishment and hybridization in large felsic magma chambers. Earth Science Reviews, 39, 91-106.

- Bonin, B., 2004, Do coeval mafic and felsic magmas in post-collisional to within-plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal, sources? A review. *Lithos*, 78, 1-24.
- Chang, B.U., 1997, A study on the lead isotopic compositions of ore deposits and igneous rocks in the Gyeong-sang basin, Korea. Ph. D. dissertation, Seoul National University, 100p.
- Chappell, B.W. and White, A.J.R., 1974, Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 173-174.
- Chappell, B.W., White, A.J.R. and Wyborn, D., 1987, The importance of residual source material (restite) in granite petrogenesis. *Journal of Petrology*, 28, 1111-1138.
- Chen, Y.D., Price, R.C. and White, A.J.R., 1989, Inclusion in three S-type granites from Southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 30, 1181-1218.
- Choe, W.H. and Jwa, Y.J., 2004, Petrological and geochemical evidences for magma mixing in the Palgongsan Pluton. *Geosciences Journal*, 8, 343-354.
- Chough, S.K. and Sohn, Y.K., 2010, Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-backarc system in the Korean peninsula: New view. *Earth-Science Reviews*, 101, 225-249.
- Dickinson, W.R. and Snyder, W.S., 1979, Geometry of subducted slabs related to San Andreas transform. *The Journal of Geology*, 87, 609-627.
- Didier, J., 1973, Granites and Their Enclaves: The Bearing of Enclaves on the Origin of Granites. In *Development in Petrology* (ed. J. Didier), Elsevier, Amsterdam, 393p.
- Didier, J. and Barbarin, B., 1991, Enclaves and Granite Petrology, Elsevier, Amsterdam, 625p.
- Dodge, F.C.W. and Kistler, R.W., 1990, Some additional observations on inclusions in the granitic rocks of the Sierra Nevada. *Journal of Geophysical Research*, 95, 17841-17848.
- Elburg, M.A., 1996, Evidence of isotopic equilibration between microgranitoid enclaves and host granodiorite, Warburton Granodiorite, Lachlan Fold Belt, Australia. *Lithos*, 38, 1-22.
- Engelbreton, D.C., Cox, A. and Gordon, R.G., 1985, Relative motion between oceanic and continental plates in the Pacific Basin. *Geological Society of America Special Paper*, 206, 1-59.
- Ferrari, L., 2004, Slab detachment control on mafic volcanic pulse and mantle heterogeneity in central Mexico. *Geology*, 32, 77-80.
- Frederiksen, A.W., Bostock, M.G., VanDecar, J.C. and Cassidy, J.F., 1998, Seismic structure of the upper mantle beneath the northern Canadian Cordillera from teleseismic travel-time inversion. *Tectonophysics*, 294, 43-55.
- Goring, J.L. and Kay, S.M., 2001, Mantle processes and sources of Neogene slab window magmas from southern Patagonia, Argentina. *Journal of Petrology*, 42, 1067-1094.
- Guo, F., Nakamura, E., Fan, W., Kobayoshi, K. and Li, C., 2007, Generation of Palaeocene adakitic andesites by magma mixing; Yanji area, NE China. *Journal of Petrology*, 48, 661-692.
- Hilde, T.W.C., Uyeda, S. and Kronenke, L., 1977, Evolution of the western Pacific and its margin. *Tectonophysics*, 38, 145-165.
- Hirooka, K., Kato, M., Morisada, T. and Azuma, Y., 2002, Paleomagnetic study on the dinosaur-bearing strata of the Tetori Group, central Japan. *Memoir of the Fukui Prefectural Dinosaur Museum*, 1, 54-62.
- Hirooka, K., Uchiyama, S., Date, T., Kannai, H., Hattori, I. and Nakajima, T., 1983, Paleomagnetic evidence of accretion and tectonism of the Hida and the Circum-Hida Terranes, central Japan. In *Proceedings of Circum-Pacific Terrane Conference* (ed. D.G. Howell et al.), Stanford University Publication, Geological Sciences, Stanford, 115-117.
- Holden, P., Halliday, A.N. and Stephens, W.E., 1987, Neodymium and strontium isotope content of microdiorite enclaves points to mantle input to granitoid production. *Nature*, 330, 53-56.
- Holden, P., Halliday, A.N., Stephens, W.E. and Henney, P.J., 1991, Chemical and isotopic evidence for major mass transfer between mafic enclaves and felsic magma. *Chemical Geology*, 92, 135-152.
- Hwang, B.H., Ernst, W.G. and Yang, K., 2011, Two different magma series imply a Palaeogene tectonic transition from contraction to extension in the SE Korean Peninsula. *International Geology Review*, DOI:10.1080/00206814.2011.636990.
- Imaoka, T., Kiminami, K., Nishida, K., Takemoto, M., Ikawa, T., Itaya, T., Kagami, H. and Iizumi, S., 2011, K-Ar age and geochemistry of the SW Japan Paleogene cauldron cluster: Implications for Eocene-Oligocene thermotectonic reactivation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40, 509-533.
- Ishihara, S., 1977, The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geology*, 27, 293-305.
- Ishihara, S., 2007, Origin of the Cenozoic-Mesozoic magnetite-series and ilmenite-series granitoids in East Asia. *Gondwana Research*, 11, 247-260.
- Janoušek, V., Baraithwaite, C.J.R., Bowes, D.R. and Gerdes, A., 2004, Magma-mixing in the genesis of Hercynian calc-alkaline granitoids: an integrated petrographic and geochemical study of the Sázava intrusion, Central Bohemian Pluton, Czech Republic. *Lithos*, 78, 67-99.
- Jin, M.S., 1980, Geological and isotopic contrasts of the Jurassic and Cretaceous granites in South Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 16, 205-215.
- Jin, M.S., 1985a, A relationship between tectonic setting and chemical composition of the Cretaceous granitic rocks in southern Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 21, 67-73.

- Jin, M.S., 1985b, Geochemistry of the Cretaceous to early Tertiary granitic rocks in Southern Korea, Pt. I. Major elements geochemistry. *Journal of Geological Society of Korea*, 21, 297-316.
- Jin, M.S., 1988, Geochemistry of the Cretaceous to early Tertiary granitic rocks in southern Korea. part II : Trace element geochemistry. *Geological Society of Korea*, 24, 168-188.
- Jin, M.S., 2002, The study of Mesozoic igneous activity in the southern part of the Korean Peninsula - History, problem and perspectives -. In *Mesozoic sedimentation, igneous activity and mineralization in South Korea* (ed. M.S. Jin et al.), KIGAM, 111-126.
- Jin, M.S., Lee, S.R., Choi, H.I., Park, K.H., Koh, S.M. and Cho, D.L., 2002, Mesozoic sedimentation, igneous activity and mineralization in South Korea. The 1st and 2nd Symposiums on the Geology of Korea Spacial Publication No. 1, KIGAM, 243p.
- Johnston, S.T. and Thorkelson, D.J., 1997, Cocos-Nazca slab window beneath Central America. *Earth and Planetary Science Letters*, 146, 465-474.
- Jwa, Y.J., 2002, Geochemistry of Cretaceous granites in South Korea: The implications for tectonically controlled granitic magmatism. In *Mesozoic sedimentation, igneous activity and mineralization in South Korea* (ed. M.S. Jin et al.), KIGAM, 157-166.
- 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: Earth Sciences*, 95, 181-198.
- Kay, S.M., Ramos, V.A. and Marquez, M., 1993, Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America. *Journal of Geology*, 101, 703-714.
- Kerim, K., 2006, Hybridization of mafic microgranular enclaves: Mineral and whole-rock chemistry evidence from the Karamadazi Granitoid, Central Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 95, 587-607.
- Kim, J.S., Shin, K.C. and Lee, J.D., 2002, Petrographical study on the Yucheon granite and its enclaves. *Geosciences Journal*, 6, 289-302.
- Kim, K.H., Park, S.S. and Na, C.K., 1996, Nd and Sr isotopic signatures of Mesozoic granitoids in South Korea. *Resource Geology*, 46, 215-226.
- 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., 1999, A migration model of magmatism explaining a ridge subduction, and its details on a statistical analysis of the granitic ages in Cretaceous southwest Japan. *The Island Arc*, 8, 181-189.
- Kinoshita, O., 2002, Possible manifestations of slab window magmatisms in Cretaceous southwest Japan. *Tectonophysics*, 344, 1-13.
- Kwon, S.T. and Sagong, H., 2002, Regional Pb-Nd-Sr isotopic differences of the Mesozoic granitoids in South Korea: Implications for the basement structure. *Goldschmidt Conference Abstracts*, A426.
- Lee, G., Besse, J. and Courtillot, V., 1987, Eastern Asia in the Cretaceous: New paleomagnetic data form South Korea and a new look at Chinese and Japanese data. *Journal of Geophysical Research*, 92, 3580-3596.
- Lee, J.I., 1991, Petrology, mineralogy and isotopic study of the shallow-depth emplaced granitic rocks, southern part of the Kyeongsang Basin, Korea: Origin of micrographic granite. Ph. D. dissertation, University of Tokyo, 197p.
- Lee, J.I., 1997, A review on the origin of micrographic granites Masanites in the southern Kyongsang Basin, Korea. *Geosciences Journal*, 1, 202-216.
- Lee, J.I., Kagami, H. and Nagao, K., 1995, Rb-Sr and K-Ar age determination of the granitic rocks in the Southern part of the Kyeongsang basin, Korea: Implications for cooling history of granitic magmatism during late Cretaceous. *Geochemical Journal*, 29, 363-376.
- Lee, Y.I., 2008, Paleogeographic reconstructions of the East Asia continental margin during the middle to late Mesozoic. *Island Arc*, 17, 458-470.
- Lee, Y.I. and Kim, J.Y., 2005, Provenance of the Hayang Group (Early Cretaceous) in the Yeongyang Subbasin, SE Korea and its bearing on the Cretaceous palaeogeography of SW Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 228, 278-295.
- Levin, V., Shaprio, N.M., Park, J. and Ritzwoller, M.H., 2005, Slab portal beneath the western Aleutians. *Geology*, 33, 253-256.
- Madsen, J.K., Thorkelson, D.J., Friedman, R.M. and Marshall, D.D., 2006, Cenozoic to Recent plate configurations in the Pacific Basin: Ridge subduction and slab window magmatism in western North America. *Geosphere*, 2, 11-34.
- Maruyama, S., Iozaki, Y., Kimura, G. and Terabayashi, M., 1997, Paleogeographic maps of the Japanese islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the Present. *The Island Arc*, 6, 121-142.
- Mass, R., Nicholls, I.A. and Legg, C., 1997, Igneous and metamorphic enclaves in the S-type Deddick Granodiorite, Lachlan Fold Belt, SE Australia: Petrographic, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence for crustal melting and magma mixing. *Journal of Petrology*, 38, 815-841.
- McCrory, P.A. and Wilson, D., 2009, Introduction to Special Issue on: Interpreting the tectonic evolution of Pacific Rim margins using plate kinematics and slab-window volcanism. *Tectonophysics*, 464, 3-9.
- McKenzie, D.P. and Morgan, W.J., 1969, Evolution of triple junctions. *Nature*, 224, 125-133.

- Na, C.K., 1994, Genesis of granitoid batholiths of Okchonzone, Korea and its implications for crustal evolution. Ph. D. dissertation, University of Tsukuba, 154p.
- Nakajima, T., 1996, Cretaceous granitoids in SW Japan and their bearing on the crust-forming process in the eastern Eurasian margin. In *The third Hutton symposium on the origin of granites and related rocks* (ed. M. Brown et al.), Geological Society of America Special Paper, 315, 183-191.
- Osozawa, S., 1997, The cessation of igneous activity and uplift when an actively spreading ridge is subducted beneath an island arc. *The Island Arc*, 6, 361-71.
- Otofugi, Y., 1996, Large tectonic movement of the Japan Arc in late Cenozoic times inferred from the paleomagnetism: Review and synthesis. *The Island Arc*, 5, 129-149.
- Otofugi, Y., Matsuda, T. and Nohda, S., 1985, Opening mode of the Japan Sea inferred from the palaeomagnetism of the Japan Arc. *Nature*, 317, 603-604.
- Pardo, M. and Suarez, G., 1995, Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: seismic and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research*, 100, 12357-12373.
- Park, T.H., Iwamori, H., Orihashi, Y., and Jwa, Y.J., 2005, Zircon U-Pb ages for Creta-Tertiary granites, south Korea: Implications for spatiotemporal changes in subduction-related magmatism (abstracts). *Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting (CD-ROM)*, Oceanographic Society of Japan, Volcanological Society of Japan, Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologists, Meteorological Society of Japan, Mineralogical Society of Japan et al.
- Park, Y.H., Doh, S.J., Ryu, I.C. and Suk, D., 2005, A synthesis of Cretaceous palaeomagnetic data from South Korea: Tectonic implications in East Asia. *Geophysical Journal International*, 162, 709-724.
- Poli, G.E. and Tommasini, S., 1991, Model for the origin and significance of microgranular enclaves in calc-alkaline granitoids. *Journal of Petrology*, 32, 657-666.
- Poli, G., Tommasini, S. and Halliday, A.N., 1996, Trace element and isotopic exchange during acid-basic magma interaction process. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*, 87, 225-232.
- Roddick, J.A., 1983, Circum-Pacific plutonic terranes: an overview. *Memorial of Geological Society of America*, 159, 1-3.
- Rogers, J.J.W., 1993, *A history of the Earth*. Cambridge University Press, Cambridge, 312p.
- Shin, S.C. and Nishimura, S., 1993, Thermal and uplift histories of Mesozoic granites in Southeast Korea: new fission track evidences. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 2, 104-121.
- Snyder, W.S., Dickinson, W.R. and Silberman, M.L., 1976, Tectonic implications of space-time patterns of Cenozoic magmatism in the western United States. *Earth and Planetary Science Letters*, 32, 91-106.
- Thorkelson, D.J., 1996, Subduction of diverging plates and the principles of slab window formation. *Tectonophysics*, 255, 47-63.
- Thorkelson, D.J. and Breitsprecher, K., 2005, Partial melting of slab window margins: genesis of adakitic and non-adakitic magmas. *Lithos*, 79, 25-41.
- Tsukada, K., 2003, Jurassic dextral and Cretaceous sinistral movements along the Hida marginal belt. *Gondwana Research*, 6, 687-698.
- Uno, K., 2002, Late Cretaceous palaeomagnetic results from Southwest Japan: New insights for early Cenozoic clockwise rotation. *Geophysical Journal International*, 149, 617-624.
- Uyeda, S. and Miyashiro, A., 1974, Plate tectonics and the Japanese islands: A synthesis. *Geological Society of America Bulletin*, 85, 1159-1170.
- Wiebe, R.A., 1996, Mafic-silicic layered intrusions: The role of basaltic injections on magmatic processes and evolution in silicic magma chambers. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*, 87, 233-242.
- Wiebe, R.A., Manon, M.R., Hawkins, D.P. and McDonough, W.F., 2004, Late-Stage mafic injection and thermal rejuvenation of the Vinal Haven Granite, Coastal Maine. *Journal of Petrology*, 45, 2133-2153.
- Yoshikura, S. and Yamamoto, T., 1995, Mafic magmatic enclaves in granitoids: an example in the Ryoke granite of the Takanawa peninsula, Shikoku. *Abstr., 102nd Ann. Meet. Geol. Soc. Jpn., Hiroshima*, 269.
- Zhang, Y.B., Zhai, M., Hou, Q.L., Li, T.S., Liu, F., Hu, B., 2012, Late Cretaceous volcanic rocks and associated granites in Gyeongsang Basin, SE Korea: Their chronological ages and tectonic implications for cratonic destruction of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47, 252-264.
- Zhao, X., Coe, R.S., Chang, K.H., Park, S.O., Omarzai, S.K., Zhu, R., Zhou, Y., Gilder, S. and Zheong, Z., 1999, Clockwise rotations recorded in Early Cretaceous rocks of South Korea: Implications for tectonic affinity between the Korean Peninsula and North China. *Geophysical Journal International*, 139, 447-463.

2012년 4월 16일 접수

2012년 4월 17일 심사개시

2012년 5월 3일 채택