

## 경상분지 남동부 백악기말-제3기초 화강암질 마그마의 형성 및 진화과정

황병훈\*, 이준동, 양경희

부산대학교 지구환경시스템학부(bhhwang@pusan.ac.kr)

### 1. 서론

경상분지에는 백악기말-제3기초로 알려진 많은 화강암체들이 산재되어 분포하고 있으며, 이들은 각 지역별로 암주상의 암체를 이루고, 각각 다양한 암상을 나타내며, 현재 노출되어 있다. 경상분지 전역에 걸친 이들 화강암류의 화성활동에 대한 암석학적 연구와 이들의 조구조적 환경에 대해 이미 많은 선행연구가 진행되어 왔고, 지역별 암체에 대한 암석학적 및 지화학적 연구도 활발히 진행되어왔으며, 절대연령측정에 의한 지역별 암체의 연령과 동위원소 조성비를 이용한 근원물질에 관한 연구도 최근에 많이 진행되고 있다. 하지만, 대부분 각 지역별 암체에 국한되어 진행되었기 때문에 인접한 지역의 동일 암상에 대하여 단절된 암상을 보이며, 연구자에 따라 동일 암석이면서도 다른 암석명이 사용되는 문제점도 제시된다. 근래에 이런 문제점을 제시하며 특정 암상에 대하여 넓은 지역에 확대 적용시킨 연구사례도 있었지만(Lee, 1991), 미분상조직을 가지는 한 암상에만 국한된 경향이 있었다. 따라서, 경상분지 전역에 걸쳐 통일된 분류방법을 통한 암상분대가 절실히 요구되며, 지역을 감안한 암상별 성인연구가 필요할 것으로 판단된다.

지금까지 이들 지역별 화강암류의 성인은 주성분원소 지화학과 미량원소 및 동위원소 연구에 의하여, 칼크-알칼리 안산암질 또는 화강섬록암질 마그마로부터 결정분화된 I-형 화강암체로 알려져 왔다(Jin, 1980; Hong, 1987). 그러나 최근 연구에 의하면, 화강암체 내에 포함되어 있는 다량의 염기성 미립 포유체(MME: mafic micrgranular enclave)의 성인이 성분이 다른 두 마그마의 혼합에 의한 결과라고 보고되었으며(Barbarin and Didier, 1992; Hibbard, 1995), 경상분지 전역에 걸친 이들 염기성 마그마의 혼합영향(김종선, 2001)은 화강암류의 성인과 마그마 형성 및 진화과정에 지대한 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 따라서 단순 암석성인 모델로 경상분지 동남부의 화강암류를 적용시키는데 재고가 필요할 것으로 판단된다.

또한, 조구조환경과 관련된 기존 연구결과에서, 유라시아 대륙판 밑으로 섭입하는 태평양판의 압축환경에서 형성된 백악기말의 불국사화강암류가, 경주지역에서 신장환경으로 추정되는 A-형 화강암류인 알칼리장석화강암의 발견으로(윤성효와 황인호, 1990; 고정선, 2001) 조구조환경의 재고가 필요하게 되었다.

그리고, 최근 남한의 중생대 화강암류의 근원암에 대한 동위원소적 연구결과는 대보화강암류와 불국사화강암류의 근원물질이 서로 달랐음을 시사하고, 불국사화강암류가 더 젊은 근원암을 나타낸다고 보고하였다(사공희, 2000). 그러나 경상분지 내 불국사화강암류의 성인이 모두 동일한 근원지에서 출발하였다고 보는 데에는 문제점이 있음이 지적되었으며(정창식 외, 1998), 근원물질로 추정되는 하부지각 및 상부맨틀의 불균질성이 조심스럽게 대두되고 있으며, 기원물질이 달랐을 가능성도 배제할 수 없다(황병훈, 2004). 이는 조구조환경과 시기가 유사한 일본의 중생대~제3기초 화강암류들에 대한 연구에서도 비슷한 결과로 해석되고 있다(Kagami et al., 1992).

본 연구는 경상분지 남부지역의 화강암류를 형성한 마그마의 기원과 진화과정에 대한 연구로서, 연구지역 내 분포하는 화강암류 전체에 대하여 야외조사와 암석기재, 광물화학 그리고 암석지화학 및 동위원소적 연구를 실시하였으며, 이들 자료를 토대로 하여 화강암질 마그마의 형성 및 진화에 대한 지구조적 환경과 관련된 암석성인적 고찰을 실시하였다.

## 2. 화강암질 마그마의 형성 및 진화과정

연구지역 화강암류를 야외산상, 암석기재적, 광물화학, 암석지화학, 그리고 동위원소적 특징에 근거하여, 6 암상으로 분류하였으며, 이들을 다시 성인과 관련하여 3 그룹으로 묶었다. 첫번째 그룹(그룹 I)에는 화강섬록암, 포유체 함량이 많은 반상화강암, 그리고 포유체 함량이 적은 반상화강암의 3암상이 포함되며, 이들은 마그마혼합 또는 불균질혼합을 암시하는 MME와 염기성광물 집합체를 다량 함유한다. 두번째 그룹(그룹 II)에는 등립질화강암, 미문상화강암이 포함되며, 이들은 낮은 압력하에서 형성된 천소관입의 특징을 나타낸다. 세번째 그룹(그룹 III)은 알칼리장석화강암의 한 암상이 포함되며, I-형 특징을 나타내는 다른 화강암류와는 달리 신장환경 하에서 형성된 A-형 화강암류의 특징을 나타낸다.

이들 화강암류의 각 암상별 성인을 알아보기 위하여, 마그마 형성 및 분화작용의 전 과정들에 대한 가능성을 살펴보았다. 본 연구에서는 마그마의 분별결정작용, 부분용융작용, 마그마혼합작용, 모암과의 동화작용 및 혼염작용, 열수변질 및 2차 변질작용에 관하여 살펴보고, 마그마의 근원물질을 추정하여 보았다.

### 2.1 분별결정작용

연구지역 화강암류는 암상별로 주성분원소의 성분변화가 연속적이며, 체계적인 분화양상을 보여준다. 하지만, 미량성분과 희토류원소의 변화패턴은 암상별로 뚜렷한 차이가 나타나므로, 하나의 마그마에서 분별결정작용으로 형성되었다고 보기에는 다소 어려움이 따른다. 특히, 동위원소 조성을 살펴보면, 동일한 SiO<sub>2</sub> 함량을 가지는 암석에서 서로 다른 동위원소 초생비(SIR, NIR)를 가지며, 동일한 Sr 함량을 가지는 암석들에서도 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr의 동위원소 초생비가 차이를 관찰할 수 있는데, 이것은 단순한 분별결정작용으로 설명하기가 곤란하다 (DePaulo, 1981).

### 2.2 부분용융작용

최근 대륙연변부의 섭입환경하에서 형성되는 화강암질 마그마의 성인에 관하여 염기성 하부지각의 부분용융에 관한 많은 논의가 진행되어 왔다. Cobbing et al. (1981)은 지각아래로 첨가된(underplated) 염기성 암석의 부분용융에 의하여, 화강암질 마그마를 형성시킬 수 있다고 하였고, 염기성 근원물질의 탈수용융작용(dehydration melting)으로 화강암질 마그마가 형성될 수 있다는 실험적으로 보고되었다(Hansen et al., 2002). 연구지역 화강암류들의 경우도 부분용융의 작용이 매우 중요한 역할을 하였을 것으로 추정되지만, 그룹별 또는 암상간의 차이는 부분용융 작용보다는 오히려 마그마혼합 또는 동화작용 및 혼염작용이 더 중요한 역할을 한 것으로 판단된다. 특히, 그룹 I 과 나머지 그룹들은 근원물질 자체가 달랐을 것으로 추정된다.

### 2.3 마그마혼합작용

연구지역 화강암류의 그룹 I 에 해당되는 암체는 대부분 마그마혼합의 영향을 받은 암석

기재적 특징이 잘 나타난다. 화학성분 변화만으로는 혼합작용과 분별결정작용 또는 부분용융작용의 차이를 명확히 밝혀내기가 어렵기 때문에, 반드시 야외산상과 암석기재적 연구가 선행되어야 할 것이다. 마그마 혼합작용의 증거로 가장 많이 거론되는 것은 MME의 산출이며, 이와 더불어 염기성광물 집합체의 성인도 마그마혼합의 부산물로 사료된다. 그룹 I에 해당되는 3가지 암상의 차이는 아마도 혼합을 일으키는 두 마그마의 화학적 성분과 물성차이에 기인한 것으로 판단된다.

#### 2.4 동화작용 및 혼염작용

모암의 종류와 성분에 따라서 관입하는 화강암질 마그마의 동화작용 및 혼염작용이 다르게 나타날 것으로 사료된다. 특히, 화강암질마그마에 의해 관입당하는 퇴적암류의 접촉변성작용에 관하여 많은 연구가 진행되어 왔지만, 화강암질마그마 내에서의 동화작용 및 혼염작용에 관한 연구는 아직 미비한 실정이다. 이 연구를 위해서는 주변 모암에 대한 암석학적 연구가 활발히 진행되어야 할 것이다.

#### 2.5 과쇄변형작용 및 변성교대작용

경상분지 남동부 화강암질 암체 내에서 지각변형에 의한 과쇄작용의 증거가 나타나며, 화강암류의 다양성을 일으키는 하나의 요인으로 포함시킬 수 있을 것이다. 특히, 울산지역의 화강암질 암체는 매우 심하게 변질되어 원암의 조성까지 구분하기 힘든 경우가 많은데 이들의 요인은 아마도 울산광상 주변의 사문암화 작용을 일으킨 열수, 또는 화강암을 관입한 것으로 추정되는 사문암으로 변질되기 전 초염기성 원암에 의해 변성교대작용을 일으켰을 가능성이 있다.

#### 2.6 근원물질의 추정

마그마의 근원물질을 추정하기 위하여, 성인적으로 연관된 그룹별로 관입시기와 동위원소적 특징을 살펴보면 다음과 같다.

	Age (Ma)	SIR	NIR	T <sub>2</sub> DM (Ga)
그룹 I	58~59	0.7048~0.7052	0.51252~0.51257	0.8~1.0
그룹 II	50~53	0.7058~0.7062	0.51261~0.51273	0.6~0.7
그룹 III	49~50	0.7057~0.7076	0.51270~0.51276	0.6~0.8

그룹 I의 암상들은 그룹 II와 그룹 III의 암상들과 관입시기, 동위원소 조성비, 그리고 근원물질의 모델연령에서 뚜렷한 차이를 나타낸다. 또한 그룹 I의 근원물질은 상대적으로 오래된 하부지각을 의미하며, 그룹 II와 그룹 III의 근원물질은 상대적으로 젊은 상부지각 물질을 나타낸다. 한편, 그룹 II와 그룹 III은  $\epsilon T(0)$  치를 제외한 관입시기 및 동위원소 조성이 매우 유사하므로 같은 근원물질의 동일 마그마로부터 형성된 암체로 판단된다. 하지만 희토류원소의 변화패턴에서 매우 높은 HREE 함량과 극단적으로 낮은 Eu이상을 보이므로, 동일 마그마가 상승 또는 정치하는 과정에서 매우 다른 진화과정을 겪었던 것으로 추정된다.

### 3. 결론

경상분지 화성활동이 단순한 지구조환경하에서 단순한 마그마활동으로 형성된 것이 아니라, 다양한 마그마의 진화과정을 통하여 다양한 암상으로 분화한 것으로 추정된다. 이들은

단순한 분별결정 또는 마그마혼합, 그리고 단순한 조성의 마그마 근원물질로부터 부분용융의 차이로 진화한 것으로 보기는 어려우며, 적어도 그룹 I 과 다른 그룹들(그룹 II, III)은 근원물질에서 차이가 있었던 것으로 판단되고, 지구조환경도 압축응력장에서 신장응력장으로 진화한 것으로 추정된다.

#### 4. 참고문헌

- 고정선, 2001, 경상분지내 남산 A-형 화강암과 경주 I-형 화강암류에 대한 광물학적, 지화학 적 및 Sr-Nd 동위원소 연구. 부산대학교 박사학위논문, 173p.
- 김종선, 2001, 경상분지 남부 지역의 화강암류에 산출되는 포유체의 암석학적 연구: 마그마 불균질 혼합에 관한 고찰. 부산대학교 이학박사 학위논문, 211p.
- 사공희, 2000, 남한의 현생이연 화강암류에 대한 U-Pb 스피인 지질연대와 알칼리장석의 납 동위원소 연구: 한반도의 지각의 진화에 대한 의미. 연세대학교 박사학위논문, 165p.
- 윤성효, 황인호, 1990, 경주 남산일대의 화강암의 암석학 및 지구화학의 특성. 한국지구 과학회지, 11(1), 51-66.
- 정창식, 권성택, 김정민, 장병욱, 1998, 경상분지 북부에 분포하는 온정리 화강암에 대한 암석화학적, 동위원소 지구화학적 연구 : 경상분지 다른 지역과 서남 일본 내대 에 분포하는 백악기-제3기 화강암류와의 고찰. 암석학회지, 7(2), 77-97.
- 황병훈, 2004, 경상분지 남부지역의 화강암질암에 대한 암석학, 동위원소 및 성인. 부산대학교 박사학위논문, 309p.
- Barbarin, B., and Didier, J., 1992, Genesis and evolution of mafic microgranular enclaves through various types of interaction between coexisting felsic and mafic magma. *Trans. R. Soc. Edinburgh, Earth Sci.*, 83, 145-153.
- Cobbing, E.J., Pitcher, W.S., Wilson, J.J., Baldock, J.W., Taylor, W.P., McCourt, W., and Snelling, N.J., 1981, The geology of the Western Cordillera of northern Peru. *Overseas Mem. Inst. Geol. Sci. Lond.*, 5.
- Depaolo D.J., 1988, Nd isotope geochemistry-An Introduction. Springer-Verlag, 187p.
- Hansen J., Skjerlie K.P., Pederson R.B., and De Ra Rosa J., 2002, Crustal melting in the lower parts of island arcs: an example from the Bremanger Granitoid Complex, west Norwegian Caledonides. *Contrib. Mineral. Petrol.* 143, 316-335.
- Hibbard, M.J., 1995, Petrology and petrogenesis. Prentice-Hall, 587p.
- Hong, Y.K., 1987, Geochemical Characteristics of Pre-cambrian, Jurassic and Cretaceous Granites in Korea. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, 20(1), 35-60.
- Jin, M.S., 1980, Geological and Isotopic contrasts of the Jurassic and the Cretaceous Granites in South Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, 16(4), 205-215.
- Kagami, H., Tainosho, Y., and Owada, M., 1992, Spatial variations of Sr and Nd isotope ratios of Cretaceous-Paleogene granitoid rocks, Southwest Japan Arc. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 112, 165-177.
- Lee, J.I., 1991, Petrology, mineralogy and isotopic study of the shallow-depth emplaced granitic rocks, southern part of the Gyeongsang basin Korea: Origin of micrographic granite. Ph D. thesis, Univ. of Tokyo, 197p.