

## 울산 광산에 분포하는 탄산염암체의 성인에 관한 연구

양경희\*, 황진연

부산대학교 자연과학대학 지구환경시스템학부 지질환경과학전공  
(yangkyhe@hyowon.pusan.ac.kr)

### 1. 서 론

경상분지 동남부에 위치하는 울산 철-사문암광산 지역에는 유일하게 국내에서는 초염기성암과 탄산염암체가 공간적으로 연관성을 가지고 소규모로 분포하고 있다. 사문암체는 초염기성암이 열수변질에 의해 생성된 것이며(Choi, 1983; 최수용, 1988; 김규한 외, 1990), 탄산염암체는 대부분 학자들이 고생대 석회암이라는 연구결과를 보고하고 있다(박기화와 박희인, 1980; Choi, 1983; 김규한 외, 1990; Choi, *et al.*, 1999). 우리 나라에는 카보내타이트가 보고된 적이 없다는 것, 맨틀기원의 카보내타이트와 비교할 때 지화학적 증거가 호의적이지 않다는 이유로 울산의 탄산염암체는 관입암체라는 제의에 매우 회의적이거나 부정적이었다. 그러나 탄산염암체가 초염기성암에 의해 둘러싸여 공간적으로 연관성을 가지는 동심원상의 타원형을 이루고 있는 산출상태를 포함하는 여러 야외 증거들 역시 퇴적암기원이라고 설명하기에는 어려운 것 같아 울산광산의 탄산염암체의 성인에 대하여 재검토하게 되었다. 즉, 탄산염암체는 퇴적기원이라기보다는 마그마에서 형성된 카보내타이트의 가능성을 제시한다.

### 2. 연구 및 실험방법

울산의 철-사문암 광산지역에 분포하는 퇴적암, 화산암, 화강암, 사문암, 탄산염암체에 대한 cross-cutting관계를 밝히기 위해 지질조사가 수행되었다. 대한광업진흥공사에서 1972-1990년 동안에 보고한 69개의 울산광산의 광상시추데이터를 검토하여 광상 주변의 지하지질을 검토하였다. 탄산염암의 기원에 대한 실마리를 얻기 위해 울산광산의 탄산염암에 대한 산소, 탄소에 대한 안정동위원소비 분석을 하였다. 시료는 시추코어에서 채취한 세립 내지 중립의 방해석과 자철석과 함께 산출되고 있는 조립의 방해석을 이용하였다. 분석은 대전의 기초과학지원연구소에서 이루어졌다.

### 3. 결과

광산 부근의 지질은 백악기 퇴적암인 울산층, 이를 관입 내지 분출한 화산암류, 화강암류, 이를 다시 관입한 초염기성암, 초염기성암을 관입하고 있는 탄산염암체, 초염기성암과 탄산염암체를 관입하고 있는 염기성맥으로 구성된다. 시추코어에서 회수된 암석분포를 중심으로 지하내부의 지질을 5개의 그룹으로 나누어지며, 광상주변에서 실시한 시추자료 주상도와 탄산염암체와 광체의 관계를 나타낸 지하 지질도(Choi, 1983)를 참고로 하여 단면도를 그려보면 철광체는 파이프상으로 산출되고, 탄산염암체는 다시 사문암체와

거의 수직으로 접하며 깔때기상 내지 나팔꽃상으로 사문암체의 동쪽지역에 치우쳐 산출된다. 산소, 탄소 안정동위원소비에 대한 분석결과는 이원성 형태를 나타내고 있다. 하나("I"그룹)는  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 가 2.4~4.0‰,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 는 17.0 ~ 19.5‰이다. 또 다른 하나("II"그룹)는  $\delta^{13}\text{C}$ 는 -10.3~-11.1‰,  $\delta^{18}\text{O}$ 는 9.8 ~ 11.2‰를 나타낸다. 이러한 이원성형태의 값은 김규한 외(1990)가 보고한 안정동위원소분석치와 거의 동일한 값을 보여주고 있으며, Choi, et al.(1999)의 분석결과는 "I"그룹의 값에만 해당된다.

#### 4. 결론 및 토의

카보네타이트의 성인에 관한 토론은 지금도 계속중이며, 많은 부분이 분명하게 해결되지 않고 있다. 최근 연구에 의하면, 맨틀뿐만 아니라 지각 내에서도 탄산염용융체가 형성되어질 수 있으며, 석회암에 의해 오염된 알칼리 마그마의 분화과정중 분별과정을 거쳐 2차적 카보네타이트 마그마를 형성할 수 있다는 것이다(Lentz, 1998; 1999). 이때 미량원소와 동위원소의 거동은 탈탄산(decarbonation)반응과 열수의 교환작용에 의해 단성분인 맨틀기원의 카보네타이트와 퇴적기원의 석회암사이의 연속적인 지화학적, 동위원소적 스펙트럼을 보이게 된다고 제의되어지고 있다.

안정동위원소, 혹은 미량원소등 지화학적 자료에 의해서는 울산의 탄산염암체가 맨틀기원의 카보네타이트라고 해석하기에는 무리가 있다. 그러나 야외의 산출상태, 노두에서 관찰된 자료들은 분명히 관입의 산상을 나타내고 있다. 탄산염암체가 깔대기형태로 산출되며 지하 650 m 이하까지도 연장되고 있다는 것, 철광체도 파이프형으로 지하연장이 계속되고 있다는 것, 초염기성암과 연합하여 동심원상의 모습으로 산출되고 있는 것(Kamitani and Hirano, 1990; Evans, 1993), 초염기성암이 화강암과 울산층을 관입하고 있는 노두, 탄산염암체의 내부에 사문암편, 호른펠스암편이 포획된 노두는 초염기성암과 탄산염암이 화강암과 퇴적암보다 후기이며 분명히 우리에게 관입암상의 모습을 보여주고 있다.

울산의 탄산염암체가 고생대의 석회암이라면, 초염기성암과 화강암의 관입시에 열변성작용에 따른 동위원소 값이 변화하였을 것이고, 스카르화 받은 석회암의  $\delta^{13}\text{C}$ 은 거의 대부분 -5~-8‰의 범위에 속하며(Bowman, 1998), 그 기원을 구별하기 어렵게 된다(Faure, 1986; Nabelek, 1991; Bowman, 1998). 더욱이 화강암에 의해 스카르화 되어진 석회암이라면 화강암과의 접촉부로 갈수록  $\delta^{13}\text{C}$ 이 결핍되어지며, 탄산염암체의 중앙부로 갈수록  $\delta^{13}\text{C}$ 이 변질 받지 않은 값으로 부화되어지는, 해양성퇴적암 값에 근접하는 값을 나타내야 한다(Faure, 1986). 그러나 울산의 탄산염암체의 경우에는 이와는 반대의 양상을 나타내고 있다. 한편, "II"그룹의  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  값(-10.3~-11.1‰)은 전형적인 카보네타이트값에 비해 약간 결핍된 값을 나타내고 있으며, 이는 마그마가 퇴적물내의 유기물, 흑연, 혹은  $\text{CH}_4$  성분에 의해 오염되어졌을 가능성이 높다(Bowman, 1998).

그렇다고 이러한 이유로 울산 탄산염암체가 카보네타이트라고 하기에 논리적이지 않다. 하지만 야외산출상태가 관입상임을 나타내고 있는 것을 기초로 카보네타이트라고 가정하여 안정동위원소데이터를 다음과 같이 설명할 수는 있다. 즉, "I"그룹의 동위원소값이 전형적인 맨틀기원의 데이터와는 상당히 이탈되어 보이지만  $\delta^{13}\text{C}$ 가 5.5‰까지 부화된 맨틀기원의 카보네타이트가 보고되어진 것을 찾아볼 수 있다(Ray and Ramesh, 1999). 주변 퇴적암내의 방해석 혹은 지각물질의 오염(Andrade, et al., 1999), 지하수의 영향으로  $\delta$

$^{13}\text{C}$ 이 부화된 유체에 의해 카보네타이트의 변질작용, 섭입대에서 이미  $^{13}\text{C}$ 이 부화된 해양 지각물질이 맨틀에 연합하면서 순수 맨틀기원의 탄소보다  $\delta^{13}\text{C}$ 이 부화된 모습을 보일 수도 있다(Ray *et al.*, 1999).

만약 지각내부에서 퇴적기원의 석회암성분이 부분용융되어 형성된 카보네타이트 마그마가 관입하였다면, 탄산염암체의 접촉부와 중앙부의 지화학적, 안정동위원소 특징이 다르게 나타날 수 있지 않을까 여겨진다. 뜨거운 탄산염마그마는 불균질한 동위원소적 특징을 이미 지니고 있었으며, 찬 모암과의 반응시 탈탄산반응에 의해, 혹은 후기 염기성 암맥의 집중적인 관입시 동위원소분별작용이 일어났을 것이다. 이때, 방출되는  $\text{CO}_2$ 가스에  $^{13}\text{C}$ 이 부화되고, 방해석에는  $^{13}\text{C}$ 이 결핍되어진다, 그리하여,  $\text{CO}_2$ 가스는 용융체로부터 도망쳐버렸거나, 용융체의 상부부분에 모이게 되었을 것이다. 이로 인해 울산 탄산염암체의 중앙부와 접촉부에 서로 다른 이원성의 동위원소값을 형성하게 되지 않았나 여겨진다. 그 이후 이 지역에 형성되었던 마그마-열수계에 기상수의 혼입과 주변의 퇴적암 혹은 화산암에 의한 열수의 교환반응이 일어나 또 다른 동위원소 재평형에 의해 현재의 복합적이면서도 독특한  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ 값을 보여주고 있는 것으로 여겨진다.

화강암관입에 의해 석회암이 접촉교대작용을 받은 경우라면 가장 격렬한 접촉교대작용은 화강암과의 접촉부에 가장 잘 발달되어 있는 것이 일반적인 모습이다. 그러나 울산 광상에서는 접촉교대광물이 화강암과의 접촉부가 아니고 화산암과의 접촉부에서 발달되어 있으며, 울산광상에서는 화강암과 탄산염사이에는 화강암을 중심으로 어떠한 대상배열을 관찰할 수 없다((박기화와 박희인 1980; Choi and Imai 1993). 암질이 매우 다른 두 암석(뜨거운 탄산염마그마와 비교적 차거운 화산암)의 접촉부에는 Ca-Fe-Al-Mg-Mn 규산염광물이 생성될 수 있으며 이는 진정한 스카른과 구분하기에 어려움이 있다(Einaudi, *et al.*, 1981; Evans, 1993; Lentz, 1998). 한편, 탄산염암체와 초염기성암과의 접촉부에는 성분과 온도의 차이가 그렇게 심하지 않았고, 화강암류는 초염기성암에 의해 격리되어 접촉하지 않았기 때문에, 이들 접촉부에는 접촉교대광물의 발달이 드물거나 미약한 것으로 여겨진다.

이러한 관점에서 연구결과를 종합적으로 검토해보면, 울산 탄산염암체가 용융체에서 형성되어진 관입체로서의 카보네타이트라는 시나리오는 다음과 같이 설정되어질 수 있다. 백악기에서 신생대초 경상분지는 화산-심성활동이 활발하여 지각내부는 높은 지온구배를 형성하고 있었으며, 울산지역은 울산 콜드론의 함몰에 의해(차문성, 1985) 그 이전에 발달하고 있던 조구조선과 함께 심부의 파쇄대를 형성하거나 더욱 발달시켰을 것이다. 이러한 심부의 파쇄대는 초염기성암인 페리도타이트 혹은 듀나이트 마그마가 상승할 수 있는 호의적인 조건을 제공하게 된다. 한편 이 시기에 동해의 형성이 시작되어지면서 경상분지에는 초염기성암이 관입하게 되는 지질학적 환경이 조성되었고, 이때 경상분지의 기반암으로 위치하고 있는 암석이 높은 지온구배에 의해 석회암성분이 용융하게 된다. 초염기성암(지금은 사문암체)이 먼저 관입을 하고 곧 뒤를 이어 탄산염마그마가 북쪽의 초염기성암을 뚫고 관입하였으며, 그 이후에도 약대인 이 지역에 국부적이고 집중적으로 염기성 맥이 최후기로 관입하게 된다. 만약에 경상분지의 하부에 석회암질암이 존재하지 않는다면, 맨틀기원의 초염기성암이 상승도중에 분화과정중 듀나이트와 카보네타이트로 분리되었으며, 어떠한 이유로 카보네타이트내의 맨틀기원의 지화학적 증거가 지워졌을 것이라는 가설도 배제할 수 없는 점이다. 여기에 대해서는 더욱 세밀한 지화학적 조사가

이루어져야 하겠다.

## 5. 참고문헌

- 김규한, 박재경, 양종만, 요시다나오히로, 1990, 울산철광산의 탄산염암과 사문암의 성인. 지질학회지, 26, 407-417.
- 박기화, 박희인, 1980, 울산 철·중석광상의 성인. 광산지질, 13, 104-116.
- 차문성, 1985, 경상분지 동남부의 환상구조(I). 부산대학교 사대논문집, 11, 369-386.
- 최수용, 1988, 울산광산에서 산출되는 사문암의 성인적 연구. 부산대학교 박사학위논문, 87p.
- Andrade, F., Moller, P., Luders, V., Dulski, P., and Gilg, H., 1999, Hydrothermal rare earth elements mineralization in the Barra do Itapirapua carbonatite, southern Brazil: behavior of selected trace elements and stable isotopes(C, O). Chem. Geol., 155, 91-113.
- Bowman, J.R., 1998, Stable-isotope systematics of skarn. In: Lentz, D.R. (ed.), Mineralized intrusion-related skarn systems. Mineral. Assoc. of Canada Short Course, 26, 99-145.
- Choi, S.G., 1983, Skarn evolution and iron-tungsten mineralization and the associated polymetallic mineralization at the Ulsan mine, Republic of Korea. Unpub. Ph. D. Dissertation, Waseda Uni. 271p.
- Choi, S., So, C., Youm, S., and Kim, S., 1999, Stable isotope and fluid inclusion studies of iron-tungsten mineralization at Ulsan skarn deposit (abstr.). Soc. Econ. Environ. Geol., 148-149.
- Einaudi, M.T., Meinert, L.D. and Newberry, R.J., 1981, Skarn deposits, Econ. Geol., 75th Anniversary, 371-391.
- Evans, A., 1993, Ore geology and industrial minerals. 3rd, Blackwell Science, 389p.
- Faure, G., 1986, Principles of isotope geology. 2nd, John Wiley & Sons, 589p.
- Kamitani, M. and Hirano, H., 1990, Important carbonatite-alkaline/alkaline complexes and related mineral resources in the world. Bull. Geol. Sur. Japan, 41, 631-640.
- Lentz, D., 1998, Late-tectonic U-Th-Mo-REE skarn and carbonatitic vein-dyke systems in the southwestern Grenville province: a pegmatite-related pneumatolytic model linked to marble melting (limestone syntexis). In: Lentz, D.R. (ed.), Mineralized intrusion-related skarn systems. Mineral. Assoc. of Canada Short Course, 26, 99-145.
- Lentz, D., 1999, Carbonatite genesis: A reexamination of the role of intrusion-related pneumatolytic skarn processes in limestone melting. Geol., 27, 335-338.
- Nabelek, P.I., 1991, Stable Isotope Monitors. In: Kerrick D.M. (ed.) Contact metamorphism. Mineral. Soc. of Am. Rev. in Mineral., 2, 395-435.
- Ray, J. and Ramesh, R., 1999, Evolution of carbonatite complexes of the Deccan flood basalt province: stable carbon and oxygen isotopic constraints. J. Geophys. Res., 104, 471-483.
- Ray, J., Ramesh, R., and Pande, K., 1999, Carbon isotopes in Kerguelen plume-derived carbonatites: evidence for recycled inorganic carbon. Earth Planet. Sci. Lett., 170, 205-214.