

경상분지 백악기~제3기 화강암체에서 관찰되는 마그마 혼합 - 펠식 마그마 챔버에 주입된 매픽 마그마의 증거

좌용주

경상대학교 지구환경과학과 경남 진주시 가좌동 900
(jwayj@nongae.gsnu.ac.kr)

1. 서론

화성암의 다양성을 설명하는 마그마과정에는 여러 가지가 있지만, 우리 나라의 화강암 연구에서 가장 보편적으로 설명되고 있는 과정은 분별정출작용에 의한 마그마의 결정분화이다. 하지만 최근 들어 경상분지의 백악기~제3기 화강암체에서 펠식 마그마와 매픽 마그마 사이의 균질 내지 불균질 혼합과정에 대한 증거가 발표되어, 마그마 혼합과정 또한 화강암류의 다양성을 야기시킨 요인으로 보고되고 있다(김종선 외, 1998; 김춘식 외, 1999; 김종선·이준동, 2000; 김종선 외, 2000; 좌용주·김건기, 2000; 진미정 외, 2000; 좌용주·김건기, 2001). 이들 연구는 공통적으로 마그마의 혼합이 화강암질 조성의 펠식한 마그마 챔버에 보다 매픽한 마그마가 주입됨으로써 일어남을 지적하고 있다.

매픽 마그마의 주입은 펠식 마그마에 열적인 영향을 더하게 되어 마그마 챔버의 열이력을 고려하는데 매우 중요한 요소가 된다. 또한 펠식 마그마와 매픽 마그마 사이의 혼합은 그 둘 사이의 중간 조성의 산물(hybrid)을 형성시켜 다양한 화강암류를 형성시킨다. 이 논문에서는 마그마 혼합에 대한 이론적인 면을 알아봄과 동시에 경상분지 백악기~제3기 화강암체에서 발견되는 마그마 혼합에 대한 암석학적 증거를 살펴보기로 한다.

2. 마그마 혼합이란?

마그마 혼합은 마그마의 여러 분화과정에 있어서 액체-액체간의 상호작용을 의미한다(Didier and Barbarin, 1991). 마그마의 혼합은 크게 불균질 혼합(mingling)과 균질 혼합(mixing)으로 나눌 수 있다. Hibbard(1991, 1995)에 따르면, 서로 다른 조성, 온도 그리고 결정 단계의 두 마그마가 혼합할 경우, 야외에서 두 단성분이 발견되면 불균질 혼합, 그렇지 않으면 균질 혼합으로 정의한다. 혼합되는 펠식과 매픽 조성의 두 마그마는 온도, 밀도 그리고 점성에서 분명 서로 다른 특징을 보인다. 이 물리량들의 차이가 클 경우 역학적인 혼합(mechanical mixing), 작을 경우 화학적인 혼합(chemical mixing)으로 정의하는 경우도 있다(Poli et al., 1996).

3. 마그마 혼합의 유체역학적 및 열역학적 조건

마그마는 일반적으로 낮은 레이놀즈 수를 가지는 점성유체이며, 그 흐름은 층류의 특징

을 나타내고, 그 속도는 점성에 기인하는 저항력에 따라 감쇄한다. 만일 저점성의 마그마가 고점성의 마그마 내에 주입되게 되면, 매픽 마그마의 흐름 전단에 불안정한 양상이 나타나는데, 이를 *flow-front instability*라고 한다 (Snyder and Tait, 1995). 이 불안정성은 두 마그마 사이의 점성 차이에 기인하기도 하고(*Saffman-Taylor instability*), 또 부력 차이에 기인하기도 한다(*Rayleigh-Taylor instability*). 이 두 가지 요인의 불안정성은 주입된 매픽 마그마의 흐름을 여러 갈래로 분기시키는데, 이를 *fingering*이라 한다 (Snyder and Tait, 1995, 1998). 분기된 각각의 *finger*는 펠식 마그마 내에서 계속 분열되고, 결국에는 매픽 포획체(*mafic enclaves*)로 남게 되는 경우가 많다.

한편, 주입된 매픽 마그마는 호스트인 펠식 마그마보다 고밀도이기 때문에 챔버 내부로 가라앉으려는 경향이 강하고, 이로 말미암아 주입된 매픽 마그마와 그 하부의 펠식 마그마 사이에 *load cast*, *pipe*, *flame*, *lobate* 구조를 만들기도 한다 (Chapman and Rhodes, 1992; Wiebe and Collins, 1998).

호스트인 펠식 마그마에 매픽 마그마가 주입된 초기 단계에서는 두 마그마 사이의 온도, 밀도 및 점성 등의 물리량의 차이가 크기 때문에 혼합이 쉽게 일어나지 않는다. 그러나 점차 두 마그마의 경계부에서는 열적 평형이 이루어져, 다시 말해 펠식 마그마가 가열되고(*superheating*), 매픽 마그마가 냉각(*freezing*)되어 물리량들의 차이가 줄어들게 되면, 혼합이 빠르게 진행된다(Poli et al., 1996). 따라서 열적 평형이 이루어지기까지는 혼합의 과정은 거의 역학적인 혼합이 우세하게 나타난다. 그러나 일단 열적 평형에 도달하면 두 마그마 성분 사이에서 화학적인 혼합과정이 강하게 나타난다. 결국 혼합과정에서 균질 혹은 불균질의 결정은 두 마그마가 어느 정도 빨리 열적인 평형에 도달하느냐에 의존하는 것이다. 또한 두 마그마의 유동학적인 성질과 주입되는 매픽 마그마의 비율 역시 균질/불균질 혼합을 결정하는 중요 요소가 된다. 두 마그마 사이의 균질 혼합은 두 마그마가 점성 유체의 성질을 가지고, 주입되는 매픽 마그마의 비율이 많은 경우에 제한적으로 일어날 수 있다. 한편, 매픽 마그마의 비율이 적은 경우에는 비록 균질 혼합이 잘 일어나지 않는다고 할지라도, 보다 다양한 불균질 혼합의 양상을 나타낼 수 있다.

4. 마그마 혼합의 암석학적 증거

야외에서 관찰되는 마그마 혼합의 증거는 경상분지에서는 거제도, 양산, 울산-방어진, 영천 보현산 등지에 분포하는 백악기~제3기 화강암체에서 잘 관찰된다. 화강암체에서 발견되는 마그마 혼합의 결과는 화강암류에 포함되어 있는 매우 다양한 매픽 포획체(*mafic enclave*)가 대표적인 것이지만, 그 이외에도 많은 증거들이 존재하며 아래에서는 혼합에 대한 기재적인 증거의 대표적인 것을 열거하고 간략히 설명하기로 한다.

① *Disrupted mafic feeder dyke*

펠식 마그마 챔버에 주입된 매픽 마그마의 암맥이 냉각되고, 두 마그마의 물성 차이로 인해 끊어진 형태를 보이게 된다.

② *Fingered mafic sheet*

주입된 매픽 마그마는 *sheet* 형태로 펠식 마그마 챔버 내부를 흐르게 되고, 그 흐름의 전단부에서는 *flow-front instability*로 말미암아 *fingering*이 일어나게 된다.

③ *Chilled margin along the rim of the mafic enclave*

매픽 마그마는 보다 저온의 펠식 마그마와의 경계부에서 과냉각되어 급랭주변상을 나타낸다.

④ *Back-veining of the felsic melt into the mafic enclave*

매픽 마그마는 펠식 마그마 내부에 포획되는 과정에서 냉각에 의한 수축과 점성에 의한 저항력에 기인하는 전단응력을 받게 된다. 이 때 매픽 포획체 내부에 균열이 생기게 되면 그곳으로 펠식 멜트가 맥상으로 들어가게 된다.

⑤ *Hybridization*

펠식 마그마 내부의 매픽 마그마와 매픽 마그마 내부의 펠식 마그마 사이에 화학적인 혼합이 진행된다면, 두 마그마의 원래 조성과는 다른 변화된 조성의 부분이 형성된다.

⑥ *Recrystallization of the pre-existing crystals from the felsic magma*

펠식 마그마가 매픽 마그마의 열에 의해 가열되면, 펠식 마그마로부터 이미 정출되었던 광물들이 부분적으로 용융되고, 다시 냉각되는 과정에서 재결정작용이 일어난다.

⑦ *Crystallization of hydrous minerals along the rim of the mafic enclave*

펠식 마그마와 매픽 마그마가 접하는 경계부에서는 확산에 의한 원소의 이동이 일어나며, 이 때 H_2O 는 매픽 마그마 쪽으로 이동하고 그곳에 흑운모와 각섬석 같은 함수광물을 정출시킨다.

⑧ *Mantling texture*

마그마의 혼합으로 인해 펠식 마그마로부터 이미 정출되어 있던 알칼리 장석의 주변에 매픽 마그마로부터의 사장석이 둘러싸는 라파키비 조직이나, 펠식 마그마로부터의 알칼리 장석과 석영 주위를 매픽 마그마로부터의 각섬석과 흑운모가 둘러싸는 조직이 관찰된다.

5. 정리

야외에서 화강암류에 포획된 매픽 포획체가 발견되면, 흔히 매픽 포획체를 이루는 암석이 화강암의 관입 이전에 형성된 암석으로 생각하기 쉽다. 그러나 매픽 포획체의 성인이 펠식 마그마에 매픽 마그마가 주입되어 마그마 혼합이 일어난 결과로 해석되어야 하는 경우가 적지 않다. 적어도 경상분지의 백악기~제3기초에 관입한 화강암체에 포함된 매픽 포획체는 그 상당 부분이 마그마의 혼합으로 설명되어야 한다.

마그마의 혼합은 우선적으로 야외에서 그 기재적인 증거를 찾을 수 있다. 혼합의 타당성 여부는 광물의 화학조성이나 암석에 대한 동위원소를 포함한 지구화학적 원소들의 거동을 살펴으로써도 판단할 수 있으며, 이에 대해서는 다른 기회를 빌어 논의하고자 한다.

마그마의 혼합 과정을 이해하기 위해서는 혼합되는 두 마그마의 유체역학적 및 열역학적 특성을 살펴야 한다. 현재까지 알려진 마그마 혼합을 제어하는 중요 요소는 혼합되는 두 마그마 사이의 초기 점성 차이, 주입되는 매픽 마그마의 비율 그리고 두 마그마가 열적인 평형에 도달하기까지의 시간 등이다. 그리고 혼합이 일어나기 위해서는 두 마그마가 점성 유체의 유동학적 성질을 기본적으로 가져야만 한다.

6. 사사

이 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-2-13100-003-5)의 지원으로 수행되었다.

7. 참고문헌

- 김종선, 이준동 2000, 거제도 화강암질암의 지화학적 특성에 의한 마그마 불균질혼합 증거. 지질학회지, 36, 19-38.
- 김종선, 이준동, 윤성효, 1998, 거제도 화강암질암의 마그마 불균질 혼합 증거: 1. 그 기재적 특성. 지질학회지, 34, 105-121.
- 김종선, 이준동, 김인수, 백인성, 최보심, 2000, 울산 방어진일대 화강암내에 산출되는 포획암의 암석학적 연구. 지질학회지, 36, 73-92.
- 김춘식, 김성욱, 김근수, 김국락, 손 문, 김종선, 1999, 경남 양산 원동칼데라 중앙부의 각섬석-흑운모 화강암에 나타나는 포획암의 기원: 1, 암석기재학적 및 고자기학적 연구. 자원환경지질학회지, 32, 339-351.
- 좌용주, 김건기, 2000, 의성분지 보현산 일대 화강암류와 포획암에 대한 암석학적 연구. 암석학회지, 9, 187-203.
- 좌용주, 김건기, 2001, 의성분지 보현산 화강암체에 나타나는 마그마 불균질 혼합의 증거. 대한자원환경지질학회 춘계 공동학술발표회 논문집, 223-224.
- 진미정, 김종선, 이준동, 김인수, 백인성, 2000, 양산시 원효산 화강암에 산출되는 포획암에 대한 암석학적 연구. 암석학회지, 9, 142-168.
- Chapman, M. and Rhodes, J.M., 1992, Composite layering in the Isle au Haut Igneous Complex, Maine: Evidence for periodic invasion of a mafic magma into an evolving magma reservoir. Jour. Volcano. Geotherm. Res., 51, 41-60.
- Didier, J. and Barbarin, B., 1991, The different types of enclaves in granite-Nomenclature. In Enclave and Granite Petrology (eds. J. Didier and B. Barbarin), Elsevier, Amsterdam, 19-23
- Hibbard, M.J., 1991, Texture anatomy of twelve magma-mixed granotoid systems. In Enclave and Granite Petrology (eds. J. Didier and B. Barbarin), Elsevier, Amsterdam, 431-444.
- Hibbard, M.J., 1995, Petrography and petrogenesis. Prentis Hall, New Jersey, 587p.
- Poli, G., Tommasini, S. and Halliday, A.N., 1996, Trace element and isotopic exchange during acid-basic magma interaction processes. Trans. Royal Soc. Edinburgh, 87, 225-232.
- Snyder, D. and Tait, S., 1995, Replenishment of magma chambers: comparisons of fluid-mechanic experiments with field relations. Contrib. Mineral. Petrol., 122, 230-240.
- Snyder, D. and Tait, S., 1998, The imprint of basalt on the geochemistry of silicic magmas. Earth Planet. Sci. Lett., 160, 433-445.
- Wiebe, R.A. and Collins, W.J., 1998, Depositional features and stratigraphic sections in granitic plutons: implications for the emplacement and crystallization of granitic magma. Jour. Struct. Geol., 20, 1273-1289.