

고등학교 「과학」에 제시된 수렴경계(섭입대)에서의 화성활동에 관한 고찰

Igneous Activity of the Convergent Boundary(subduction zone) in the 「Science」, High School Textbook

안건상, 박경은, 김종일
(조선대학교)

서론

현재 일선 고등학교에서는 제7차 교육과정에 입각한 검정교과서를 이용하여 수업이 진행되고 있다. 새로 개정된 고등학교 「과학」교과서 내용 중, 지구과학분야에서 눈에 띄게 강조된 부분이 판구조론이다. 고등학교 교사를 대상으로 판구조론에 관해 설문조사를 하는 과정에서 유난히 다른 개념을 갖는 부분이 수렴경계에서의 화성활동 이었다. 그들은 대부분 “호상열도에서 활동하는 마그마는 해양판이 섭입하면서 생기는 마찰열에 의해 해양지각(베니오프대)이 용해되어 생성된다”고 믿고 있었다. 이는 최근에 발표된 연구 결과들과 상당한 차이를 보여 이에 대한 연구 및 대책이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 수렴경계, 특히 섭입대에서의 화성활동에 관한 부분에 대하여 11종의 고등학교 「과학」(제7차 교육과정 검정교과서) 및 교사용 지도서를 중심으로 그 내용을 분석함과 동시에 개인과 대학의 홈페이지의 인터넷문서, 시중에서 판매되는 각종 참고서 등의 내용을 분석하여 그 실태를 파악하고, 모순된 부분이 있으면 새롭게 전개된 이론들을 바탕으로 새로운 학습모델을 제시하는데 그 목적이 있다.

제7차 교육과정 교과서 및 지도서 내용분석

제7차 교육과정 [과학] 교과서 및 교사용 지도서에 수록된 별 수렴경계에서 마그마의 발생, 깊이, 발생과정 등을 포함하는 화성활동에 관한 내용을 분석한 결과 다음과 같이 분류할 수 있다.

1. 마그마의 발생원인에 따른 분류

1) 마그마의 발생원인에 대한 기재가 없음

서울교육정보 지도서, 디딤돌, 대한교과서, 금성교과서, 흥진P&M, 지학사,

- 천재교육, 교학사(정), 교학사(정) 지도서, 중앙교육진흥연구소지도서, 대한교과서지도서, 금성교과서지도서
- 2) 마그마의 발생원인을 섭입하는 해양판의 용융으로 발생한다고 설명함
서울교육정보, 지학사 지도서, 문원각, 문원각 지도서, 천재교육 지도서, 흥진P&M 지도서
2. 마그마의 발생 위치에 따른 분류
섭입하는 해양판의 상부(Benioff Zone)에서 마그마가 발생, 시작되는 위치(깊이)는 다름.
- 1) 섭입하는 해구 부근의 지각 내에서 발생
서울교육정보(p.232 그림 V-13)
- 2) 암석권 깊이에서 발생
서울교육정보(p.236 그림 V-17, p240 문제6번), 금성교과서(p.286), 지학사 지도서(p258), 문원각(p271 그림12-6), 천재교육(p238, p240), 천재교육 지도서(p238)
- 3) 암석권에서부터 연약권 깊이까지 발생
대한교과서(p.261), 흥진P&M(p263 그림5.11), 천재교육(p236 그림 V-15), 천재교육 지도서(p236)
- 4) 연약권 깊이에서 발생
디딤돌(p250 그림 V-10), 중앙교육진흥연구소(p.269), 대한교과서(p.260), 금성교과서(p.288), 지학사(p251 그림12-10), 지학사 지도서(p264), 교학사(강 p259 그림 V-2, p264), 천재교육(p232 그림 V-9), 천재교육 지도서(p241), 교학사(정 p256), 교학사(정)지도서(p253), 중앙교육진흥연구소 지도서(p260), 대한교과서 지도서(p273)

[그림 예시]



그림 1. 서울교육정보 232p. 그림 V-13

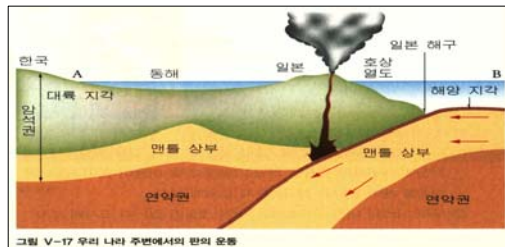


그림 V-17 우리 나라 주변에서의 판의 운동

그림 2. 서울교육정보 236p 그림 V-17



(가) 대륙판과 해양판이 만나는 곳

그림 3. 지학사 251p. 그림 12-10

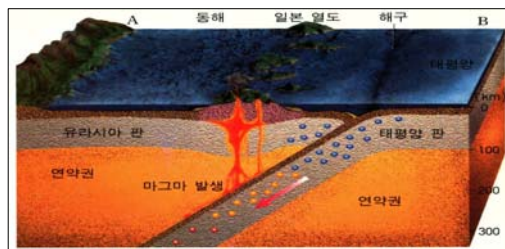


그림 4. 금성교과서 288p. 그림 14-24

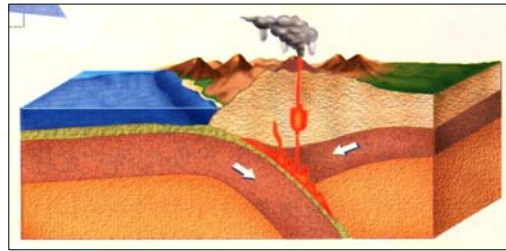


그림 5. 대한교과서 261p. 탐구5

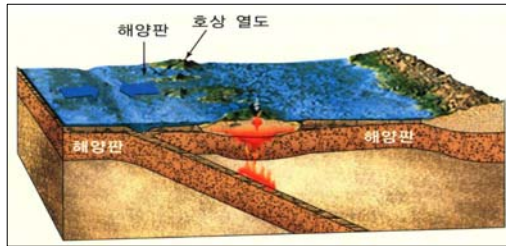


그림 6. 교학사 264p.

호상열도 하부에서 현무암질마그마의 생성

암석이 충분히 가열되면 용융되어 마그마가 생성된다. 이상적인 조건이라면, 625°C의 온도에서 암석은 녹아 화강암질마그마가 만들어진다. 맨틀물질이 녹아 현무암질 마그마가 생성되려면 1000°C이상의 온도가 필요하다. 암석의 용융 온도를 조절하는 몇 가지 요소가 있다. 암석의 용융에 영향을 주는 요인으로 는 압력, 가스(특히 수증기)의 함량 그리고 광물조합이다.

고압하에서 수증기가 충분히 존재하면, 용융과정이 드라마틱하게 변한다. 고압의 조건에서 물은 결정을 구성하는 규소와 산소의 결합을 파괴하여 광물의 용융온도는 상당히 하강시킨다. Tuttle and Bowen(1958)의 고압실험에 의하면, 중압 하에서 화강암에 혼합된 물은 10kbar에서 화강암의 용융온도를 900°C(건조상태)에서 약 650°C까지 하강시킨다. 10kbar는 지하 약 35km의 깊이에 해당한다(Plummer et al., 2003).

일부 교과서에서 해양지각이 용융된다는 설명이 부연되어 있는데, 이는 Green and Ringwood(1968)의 주장에서 비롯된 것이다. 석영에클로자이트로 전이된 해양지각이 부분 용융하여 칼크알칼리안산암질마그마가 형성된다는 그들의 가설은 많은 실험학자들에 의해 지지되었다.(예, Holloway and Burnham, 1972; Allen et al., 1975; Allen and Boettcher, 1978). 그러나 석영에클로자이트의 부분용액은 칼크알칼리안산암에 비해 결정적으로 높

은 Ca/(Ca+Mg) 또는 Ca/(Fe+Mg)비를 갖기 때문에(Stern and Wyllie, 1973; Stern, 1974; Sekine et al., 1981) 신뢰할 수 없다(Gill(1981)).

한편, Defant & Drummond(1990)는 비교적 젊고 뜨거운 해양판이 섭입하는 경우에 한정되어 에클로자이트 변성상 정도의 조건에서 해양지각의 일부가 용해되어 마그마가 만들어진다고 주장하고 이 암석을 아다카이트(Adakite)라 명명했다. 이 암석들은 SiO₂의 함량은 60-70wt.%이며, 가장 일반적인 분출암은 데사이트(dacite)이며, 안산암이나 나트륨 질유문암, 토날나이트 형태로도 산출된다. 화학적인 특징은 무거운 희토류원소의 함량이 낮으며, 높은 Sr/Y비를 나타내는데, 이는 호상열도에서 산출되는 일반적인 중성 내지 산성암과는 다른 양상을 보인다.

섭입대의 온도구조

섭입대의 온도구조는 수렴벡터(수렴속도와 경사)와 함께 섭입하는 암권의 연령의 의해 좌우된다. 오래된 암권은 두껍고 차가우며, 젊은 암권(해령과 아주 가까운)은 얇고 뜨겁기 때문에 전혀 다른 온도구조를 형성한다. (subduction Factory, 2003). 그림 7은 섭입속도가 비교적 완만한 곳의 모식적인 온도 구배이다. 이 그림에서 삼각표는 호상열도의 위치를 나타내며, 직하부(약 110km 지하)에 해당하는 베니오프대의 온도는 대략 650°C이다.

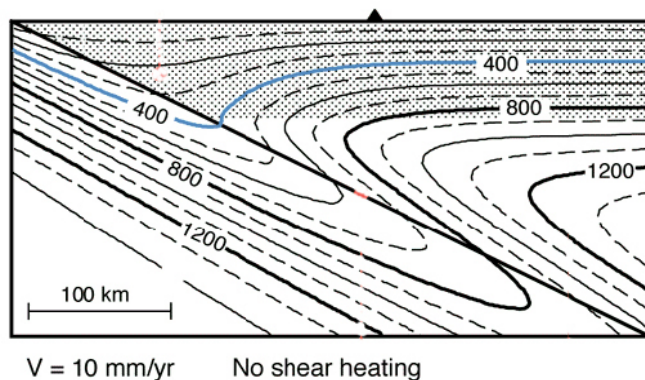


그림 7. 섭입대에서의 온도구조의 예

물의 공급과 현무암질마그마의 생성

지표에 있는 물이 암석의 공극이나 균열을 따라 지하로 내려갈 수 있다. 그러나 지표수가 지하로 침투할 수 있는 깊이는 지극히 제한적이다. 판구조론에서는 암권 심부의 물

은 해양지각에 붙잡힌 해수가 섭입이라는 과정을 통해 상당히 깊은 곳까지 운반된다고 설명한다(Plummer et al., 2003). 최근의 연구에 따르면, 대부분의 물은 현무암질 지각 내에 포함된 함유광물에 의해 운반된 것으로 알려져 있다. 그러나 마그마 생성에 영향을 주는 물을 공급하는 함유광물의 종류와 운반과정에는 다소 이견이 있다.

Coats(1962)는 해양저에서 지각내의 함유광물에 고정된 H₂O는 해양지각이 섭입됨에 따라 온도·압력이 상승하는데, 이 함유광물이 안정영역을 넘어서면 썩기맨틀로 물을 방출한다는 이론을 처음으로 제안했다. 이후 Fyee and MaBirney(1975)는 압권의 탈수분해와 마그마의 생성을 연관시켜 연구했다.

섭입하는 해양판(슬랩)은 세 가지 층(퇴적물층, 현무암층, 감람암층)으로 구성되어 있다. 퇴적물층 내에 포함된 금운모와 녹니석, 감람암층 내에 사문석이 있다. 금운모와 녹니석이 각각 독립하여 존재하면 상당한 고압에서도 안정하게 존재하지만, 퇴적물층의 주요광물인 석영과 공존하면 안정영역이 축소되어(Delany and Helgeson, 1978; Bohlen et al., 1983), 약 15kbar이내에서 분해된다. 현무암층을 구성하는 주요 함유광물은 각섬석, 녹염석, 녹니석이다(Anderson et al., 1976; Ito et al., 1983). Lambert and Wyllie(1972)는 함유현무암에 대한 고온고압실험을 근거로 각섬석은 약 25kbar(깊이 80km 이내)까지 안정하다고 주장한다. 따라서 섭입하는 압권 내의 함유광물은 대부분 호상열도 직하부 보다 해구 측에서 탈수분해가 끝난다고 볼 수 있다.

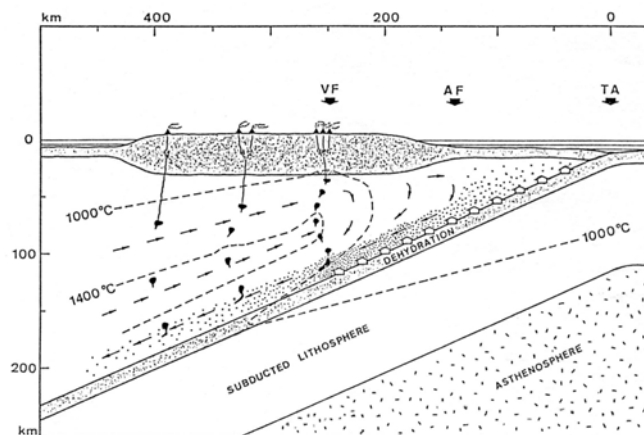


그림 8. Tatsumi(1986) 모델

Tatsumi Y.(1986)는 섭입대 마그마의 생성을 함유광물들의 안정영역과 마그마의 발생과 연관시켜 설명했다. 해양지각이 섭입함에 따라 슬랩에 내포되어 있던 H₂O은

함수광물의 탈수분해에 의해 썩기맨틀 내로 유입된다. 함수광물의 안정영역과 슬랩 내의 온도분포를 고려하면, 호상열도 직하부의 슬랩은 물이 없는 상태다. 화산전선보다 해구측에서 이루어진 슬랩의 탈수반응과 수반하여, 이온반경이 보다 큰 액상농집 원소들이 썩기맨틀에 첨가된다. 슬랩의 섭입이 시작되기 전의 상부맨틀은 “심해저현무암 잔존맨틀”과 동일한 조성일 것이다. 이 “심해저현무암 잔존맨틀”이 슬랩에서 유래된 액체상에 의해 오염된 것이 “호상열도현무암기원맨틀”이다 (Fig. 1에서 점으로 나타낸 부분). “호상열도현무암기원맨틀”의 실체는 소량의 금운모를 포함한 각섬석감람암(amphibole-peridotite)에 해당한다. 여기서 주목해야 할 것은 감람암에 포함된 각섬석의 안정영역이 현무암 또는 반려암에 포함된 각섬석보다 넓다는 것이다. 이렇게 형성된 “호상열도현무암기원맨틀”은 썩기맨틀의 대류에 의해 슬랩를 따라 심부로 운반된다. 화산전선을 형성하는 마그마의 기원이 되는 원액은 35kbar(110km)부근에서 “호상열도현무암기원맨틀”에 포함된 각섬석이 분해되어 방출되는 H₂O에 의해 생성된다. 이 시점에서 마그마는 물에 포화되어 있지만, 맨틀다이아필이 되어 상승함에 따라 부분용해의 정도가 커지고, 마그마에 포함된 물의 양은 상대적으로 감소한다.

그러나 Iwamori H.(1998, 2000)는 Tatsumi가 주장한 각섬석은 소량의 물(amphibole peridotite은 최대 1%) 밖에 포함하지 않으며, 또한 압력에 의해 탈수분해 되더라도 사문석에 의해 흡수되어버리기 때문에 마그마 생성에는 역할을 전혀 하지 못하며, 마그마 다음과 같은 과정을 거쳐 마그마가 생성될 것으로 보았다.

섭입대에서 물을 방출하는 광물은 (1) 해양지각 내의 각섬석, 로소나이트, 녹니석과 (2) 해양판의 맨틀부분(암권) 내의 사문석과 녹니석이다. 위 광물들이 어떤 깊이에서 물을 방출하는가는 섭입대의 온도구조, 섭입속도에 따라 크게 다르다. 예를 들면, 동북일본과 같은 차가운 판의 경우(cool slab)는 (1)의 광물들은 50~100km (2)의 광물들은 150~200km에서 탈수 분해될 것이다. 방출된 물은 부력으로 상승하면서 주위의 암석과 반응한다. 즉, (1)에서 방출한 물은 섭입하는 해양지각 바로 위에 있는 썩기맨틀(mantle wedge)의 감람암(peridotite)과 반응하여 그곳에서 사문석과 녹니석을 만들고, 섭입하는 판과 함께 조금 더 침강한다. 침강한 사문석과 녹니석이 분해하는 깊이는 동북일본의 경우, 150km부근, 중부일본의 경우는 200km부근이다. 이러한 광물들이 포함한 물의 총 함량은 7~8wt.% 정도로서 아주 중요하다. 따라서 탈수작용이 왕성한 곳은 화산전선(volcanic front)의 바로 하부(직하)가 아니라 해구로부터 좀더 멀리 떨어진 곳이다.

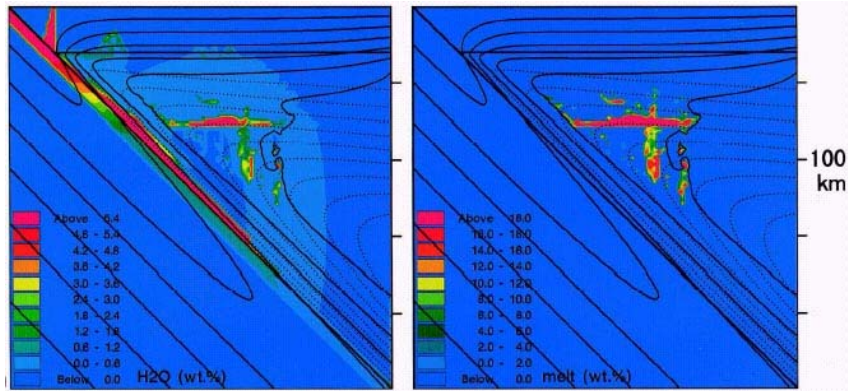


그림 9. Iwamori(2000) 모델(좌: 물의 함량, 우: 마그마 함량)

위 두 이론을 비교해 보면, 물을 공급하는 최종 함수광물(각섬석 vs 사문석)과, 탈수깊이(110km vs 100~200km)는 다르다. 그러나 섭입하는 해양판에서 물을 공급받아 썩기맨틀의 초염기성암이 부분용융하여 현무암질 마그마가 생성된다는 점은 동일하다.

결론 및 제안

호상열도 하부에서 현무암질마그마는 대략 지하 110km 깊이에서 생성되며, 이 깊이는 섭입하는 해양판이 연약권으로 미끄러져 들어가는 깊이와 대략적으로 일치한다. 대부분의 경우에 호상열도 하부에서 생성되는 마그마는 섭입하는 해양판에서 탈수되어 나온 물이 연약권(썩기맨틀) 내부로 유입되어 생성된다. 탈수된 물이 유입되면 썩기맨틀을 구성하는 초염기성암의 용융온도가 내려가, 부분용융이 일어나고 이들이 모여 현무암질 마그마가 만들어진다.

상승하는 현무암은 지각하부까지 도달하며 지각에 균열이 많은 경우에는 직접 지표까지 도달하여 분출되거나, 지각 내부에 마그마챔버를 형성하고 결정분화작용을 진행하기도 한다. 균열이 적은 경우에는 지각하부에 모여 커다란 마그마 챔버를 형성하고 바로 위에 놓인 지각하부를 부분용융시켜 산성마그마를 형성한다. 초기에 생성된 염기성마그마와 새로 만들어진 산성마그마의 혼합작용이나, 규장질 지각의 암석과의 동화작용 그리고 염기성마그마는 결정분별작용으로 중성마그마가 생성될 것이다.

한편, 특별한 경우이지만 뜨거운 해양지각이 부분적으로 용융하여 아다카이트(adakite)라고 하는 독특한 중성 내지는 산성마그마를 생성한다. 여기서 해양지각이 뜨거운 이유는 해구와 해령이 매우 가까워, 해령에서 새로 만들어지는 해양판이 뜨거운 상태

로 섭입하기 때문이다. 그러나 뜨거운 해양판을 생성하는 중앙해령 자체가 섭입하여 파괴되면 마그마 생성이 종료되므로 이 마그마 활동은 짧은 기간에 끝난다. 따라서 일반적인 호상열도에서 산출하는 마그마 생성에 관한 개념도는 Plummer et al.,(2003)이 제안한 다음 그림이 비교적 적절한 것으로 사료된다.

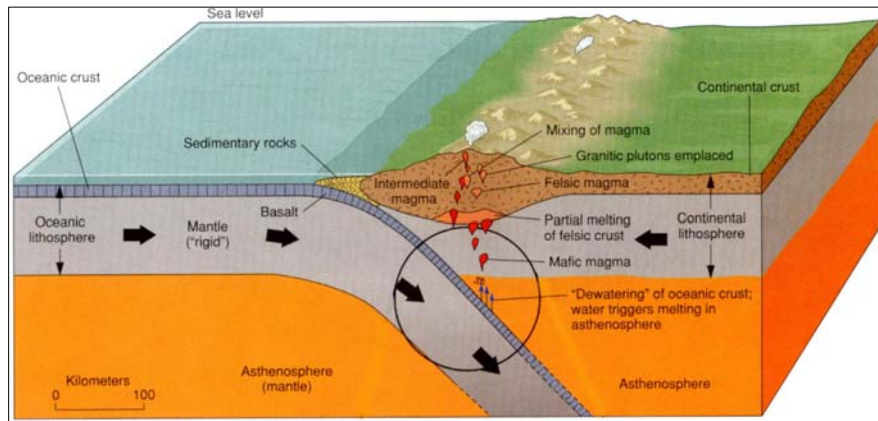


그림 10. 섭입대 하부에서 현무암질 마그마의 발생과 상승과정

참고문헌

- 교육부, 2001, 고등학교 교육과정 해설, [6]과학. 교육부고시 1997-15호, 244 p.
 제7차 교육과정 과학 교과서, 11종(서울교육정보, 디딤돌, 대한교과서, 금성교과서, 흥진 P&M, 지학사, 천재교육, 교학사(정), 중앙교육진흥연구소, 문원각).
- Defant, M.J. and Drummond M.S., 1990, Derivation of some modern island arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature* 347, 662-665
- Iwamori H., 2000, Deep subduction of H₂O and deflection of volcanic chain towards backarc near triple junction due to lower temperature, *Earth and Planetary Science Letters*, 181, 41-46
- Plummer C.C., McGeary D., and Carlson D.H., 2003, *Physical Geology* 9th ed. Macgraw-Hill, 574p.
- Tatsumi Y., 1986, Origin of Subduction Zone Magma, *Volcano*, 30, 153-172.
- Tuttle O.F. and Bowen N.L., 1958, Origin of granite in the light of experimental studies in the system NaAlSi₃O₈-KAlSi₃O₈-SiO₂-H₂O. *Geologic Society of America Memoir*, 74.