

화산 생성과 활동의 근본적인 원인에 대한 지진학적 고찰*

김 영 희** · 김 은 영***

백두산의 분화 가능성 및 화산 활동성을 관측하고 평가하기 위해서는 하부에서 일어나고 있는 화산 생성 및 발달과정에 대한 근원적인 연구가 필요하다. 대부분의 화산은 섭입대에서 화산호의 형태를 나타내며 발달하기 때문에 섭입대에서의 화산 생성 및 활동에 관한 지구물리/지구화학적 프로세스들은 백두산 하부의 화산 특성을 이해하는 데에 크게 기여할 수 있다.

판이 섭입하는 수렴경계의 상부 판에서는 화산 활동이 동반되는 경향이 있다. 즉, 섭입 시스템과 화산호 사이에는 강한 인과관계가 있다. 하지만 섭입대에 따라서 마그마 활동의 정도와 양상은 크게 다르며, 화산 활동을 보이지 않기도 한다. 섭입하는 판 속에는 유체(주로, 물과 이산화탄소)를 함유하는 함수 광물이 존재한다. 섭입판 속에 유체의 양은 섭입대 마그마 및 화산 활동에 영향을 미치는 주요 변수 중 하나이다. 섭입판은 40km 이상의 깊이에서 변성 작용을 겪고, 함유하던 물과 이산화탄소를 방출한다. 방출된 물과 이산화탄소는 섭입판 위 맨틀 켜기의 화학조성을 바꾼다. 화학조성의 변화는 맨틀 켜기의 부분 용융 조건을 때때로 만족하며, 이것은 마그마 활동으로 이어진다.

지진파가 섭입대를 직접 통과하여 지표에서 기록되면, 그 속에는 섭입대의 물리적 정보가 포함되어 있다. 지진학적 방법론은 지진파형으로부터 섭입대에 관한 정보를 추출하는 것을 가능하게 한다. 그리고 그것으로부터 섭입판과 맨틀 켜기의 물리적 성질을 규명할 수 있다. 또한, 물리적 성질로부터 유체의 양이나 유동 양상을 추론할 수 있다. 섭입판은 일반적인 판과 비교해서 지진파의 속도가 느리다. 섭입판 최상부 S파 속도는 평균적인 해양지각과 비교해서, 약 20~30% 느리다. “섭입판에 함수 광물이 많음”, “유체 공급 압력이 높음”, 또는 “지진파 비등방성”이 이것의 주요한 원인으로 해석된다. 이 논문에서는 섭입 시스템(섭입하는 판, 맨틀

* 본 연구는 기상청 기상지진기술개발 사업단(CATER-2013-8010)의 지원으로 수행되었음.

** 서울대학교 지구환경과학부 교수

*** 서울대학교 지구환경과학부 박사과정

썰기, 호상 마그마 활동과 화산)과 관련 있는, 지진학적으로 중요한 결과를 설명한다. 그리고 지진학적 결과를 기반으로 어떻게 섭입하는 판에서 유체의 방출과정이 진행되는지, 그리고 유체 방출 때문에 발생하는 호상 마그마 활동의 메커니즘이 어떻게 규명되는지 요약한다.

주제어 : 화산호, 섭입대, 해양 지각, 맨틀 썰기, 호상 마그마 활동, 지진파

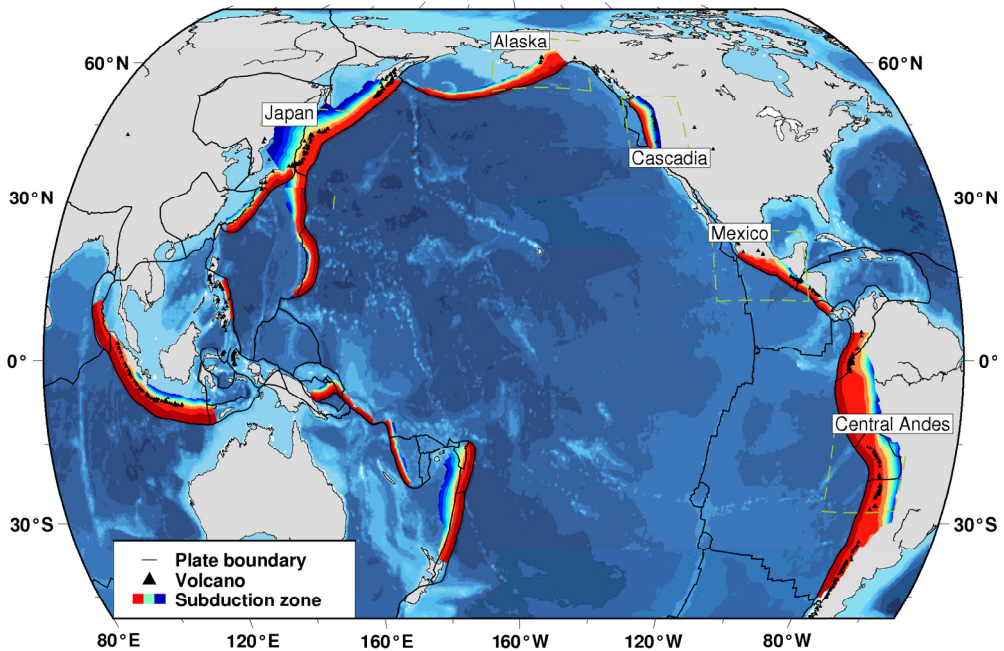
I. 서론

백두산의 분화 가능성 및 활동성에 대한 관심이 증대되고 관련 연구가 점차 활발해짐에 따라 화산 활동성에 대한 명확한 메커니즘 규명이 중요한 과제로 대두되고 있다. 백두산의 화산 활동을 분석하고 모니터링하기 위해서는 대표적인 화산 생성 및 활동 지역인 섭입대에서의 화산호 특성을 파악하여 그 프로세스를 이해하는 것이 최우선되어야 한다. 섭입대에서 일어나는 화산 생성 및 활동에 대한 근원적 탐구는 백두산 하부 구조를 규명하는 것 뿐만 아니라, 마그마 활동에 관련된 지구물리/지구 화학적 프로세스들을 파악하여 백두산 화산 활동성을 모니터링하는 데에 기여할 수 있다.

섭입대는 해양 암석권(해양판: 해양 지각과 맨틀 최상부를 포함하며, 표면에 많은 퇴적물이 쌓여 있음)이 다른 판과 만나 수렴형 경계(해구)를 형성하고, 판의 아래로 내려가서 맨틀까지 도달하는 지역을 말한다(그림 1). 섭입대의 상부판 표면에는 수렴형 경계를 따라서 화산이 연속적으로 나타난다(그림1, 화산호). 화산호는 새로운 대륙 지각이 생겨나는 원천의 역할을 한다고 알려졌다. 상부판 아래의 맨틀(맨틀 썰기)과 섭입판의 경계부에서 생겨난 용암은 상부판을 뚫고 지표로 분출한다. 지표에 노출된 마그마에 포함되어 있던 휘발성 물질들은 대부분 빠져나가고 남은 물질만 냉각되어 새로운 대륙 지각을 만든다. 화산호는 평균적으로 섭입판이 약 100km 깊이에 도달한 곳 위에 있다(Wada 외 2009). 또한, 화산호의 두께는 50km에서 200km에 이르고, 길이는 매우 다양하다.

섭입대 마그마 생성 조건은 섭입판 속의 함수 광물이 포함하는 유체(주로 이산화탄소와 물)와 밀접한 관련이 있다. 유체 또는 함수 광물은 섭입판이 약 100km 깊이에 도달한 곳에서 중요한 변성 작용을 겪는다. 이와 같은 섭입판 속 유체의 특성 연구는 섭입대의 깊은 곳에서 형성되었을 것으로 보이는 지표의 암석 샘플을 이용하여, 암석학 또는 광물학적인 접근이 이루어진다. 다른 방식으로는, 지표 아래의 온도와 압력 조건을 인위적으로 조성하여 함수 광물이 겪는 변화 과정을 재현하기도 한다. 재현 실험이 실제 섭입대의 거대한 시간과 공간 규모를 구현하지 못하기 때문에, 컴퓨터와 수치해석적인 방법을 이용하여 섭입시스템을 모델링하기도 한다. 실측하여 얻은 물리·화학적 자료를 기반으

로 역산(inversion)을 통해 섭입대를 영상화하기도 한다. 섭입대 천부(10km~40km)에 대해서는 위의 다양한 방법을 이용하여 비교적 분명하게 규명되었다(Bostock 외 2001 및 그에 포함된 문헌). 하지만 섭입대 심부(40km 이상)의 암석 표본이 지표로 노출되는 경우는 매우 드물다. 지진학적 결과는 P파 또는 S파의 값이 얼마나 빠르고 느린지로 도출된다. 지진파의 속도로부터 매질, 즉 암석이나 광물의 조성을 추론하는 것은 암석과 광물 표본에 대한 직접적인 연구를 기반으로 한다. 섭입대 심부에 대한 지진학적 결과를 올바르게 해석하기 위해서는 섭입대 심부를 구성하는 암석과 광물의 성질을 이해하는 것이 필수적이다. 하지만, 심부를 근원으로 하는 암석과 광물 샘플의 양이 매우 적기 때문에, 고온·고압 재현 실험이나 컴퓨터 모델링과 같은 방법에 초점이 맞춰지고 있다.



<그림 1> 섭입대(파선과 함께 지역 이름이 표시되어 있음)와 화산호. 섭입대는 Slab1.0 모델을 기반으로 표시하였다(Hayes 외 2012). 판의 경계는 Bird(2003)의 모델이다. 화산의 위치는 “Volcanoes World”를 출처로 한다.

이 논문에서는 “유체와 함수 광물이 섭입대에 미치는 영향”, “섭입 과정에 따른 유체의 진화 과정”, 그리고 “유체가 마그마와 화산활동에 미치는 영향”에 대한 주요 연구 결과를 살펴본다. 그리고 이런 연구들의 전제와 연구가 기반으로 하는 지질·지구물리·지구화학·지진학적 가정들과 증거를 되

짚어본다. 마지막으로, 섭입 시스템을 구성하는 지각, 맨틀 췌기, 그리고 화산호에 대한 지진학적 주요 연구 결과에 대해서 설명한다. 특히, 고밀도로 설치된 지진 네트워크에서 관측된 지진 자료를 이용하여 멕시코 중부 섭입대의 화산호 성질이 잘 규명된 예시를 자세히 설명하고, 이러한 고밀도 지진 관측이 수행되면 백두산에서도 유의미한 연구 결과들이 도출될 것이라는 기대로 끝을 맺는다.

II. 섭입대의 유체 프로세스

마그마가 연간 생성되는 양과 마그마 속의 유체를 포함하는 휘발성 물질(volatile)의 농도를 측정하면, 화산호에서 용암 속에 포함되어 지표로 빠져나오는 휘발성 물질의 양을 계산할 수 있다 (Peacock 1999). 또한, 판의 섭입하는 속도(연간 수~수십 cm)도 측정 가능하기 때문에, 섭입에 의해 지하로 들어가는 휘발성 물질의 양도 계산 가능하다. 즉, 휘발성 물질이 섭입에 의해서 지하로 내려가는 양과 화산 활동에 의해서 빠져나가는 양을 비교할 수 있다. 새로운 해양 지각이 해령의 마그마 활동에 의해서 연간 약 20km^3 생성된다(Crisp 1984; Reymer 외 1986). 또한, 수렴형 경계에 도달한 해양 지각이 비슷한 속도로 섭입하여 지하로 사라진다. 이때, 지하로 내려간 휘발성 물질의 기원은 크게 부가대(accretionary wedge)에 퇴적된 것과 본래 해양 지각에 포함되어 있던 것으로 나뉜다.

휘발성 물질(주로 H_2O)은 열수 순환 과정을 거치면서 중앙해령의 현무암질 해양 지각에 흡수된다. 그리고 중앙해령에서부터 해양 지각이 점점 퍼져나가는 동안, CO_2 와 H_2O 를 함유한 광물은 해양 지각 표면에 퇴적 혹은 형성된다. 섭입된 휘발성 물질의 양이 화산호의 마그마에 포함된 휘발성 물질의 양보다 약 10배 많다는 사실이 보고되어 있어(Peacock 1999) 오차 범위를 고려하더라도, 두 값이 비슷하다고 보기에는 무리가 있으며, 섭입되는 휘발성 성분의 양이 훨씬 더 많아 보인다. 그렇다면 섭입된 휘발성 물질의 양(100%) 중에서 화산호의 마그마에 포함된 휘발성 물질의 양(10%)을 제외한 나머지(90%)는 어디에 가 있을까? 이 질문에 대한 가능성 있는 해답들은 다음과 같다(Peacock 1999). (1) 화산호에서 분출되는 과정을 통해 모두 대기로 빠져나갔다. (2) 섭입판에서 일어난 변성작용에 의해 휘발성 물질이 빠져나오고, 이것이 섭입판과 맨틀 췌기의 경계에 발달한 전단대(shear zone)를 따라 빠져나왔다. (3) 변성작용에서 빠져나온 휘발성 물질이 맨틀 췌기로 이동하고, 그곳에서 수화 광물의 형태로 고정되었다. 현재까지의 연구로는 (1), (2), 그리고 (3)의 설명이 모두 실제로 일어날 수 있다는 것이 밝혀졌다.

1. 해양 부유 퇴적물 속의 유체

해양에서 부유하던 퇴적물을 기원으로 하는, 해양 지각 내에 포함된 CO_2 양은 섭입하는 판에 포함된 CO_2 양의 상당한 부분을 차지한다(Peacock 1999). 해양 부유 퇴적물의 총 질량은 약 $1.4 \times 10^{20} \text{ kg}$ 에 이른다(Hay 외 1988). 이것의 구성 성분을 부피 비율로 나타내면 약 72%가 탄산염 연니(carbonate ooze), 19%가 붉은 점토(red clay), 그리고 9%가 규산질 연니(siliceous ooze)이다(Poldevaart 1955). 이 비율은 평균적인 값이고, 실제로는 해양 지각의 나이, 수심, 섬이나 대륙과의 거리에 따라서 차이가 있다. 섭입대 속에 포함된 휘발성 물질의 상당한 양은 해양 부유 생물을 그 기원으로 한다. 따라서, 해양 생물의 종이 다양한 만큼 섭입판 속의 휘발성 물질의 종류와 양은 지역마다 다양하다.

2. 해양 지각 속의 유체

중양해령의 현무암 속 마그마는 매우 소량의 휘발성 물질을 포함하고 있으며, H_2O 가 약 0.15%~0.40% 그리고 CO_2 가 400ppm 미만인 것으로 보인다(Fine 외 1986). 즉, 해양 지각이 처음 중양해령에서 형성될 때에는 휘발성 물질을 거의 포함하고 있지 않았으며, 휘발성 물질이 많다면 그 이후에 포함된 것이다. 해양 지각의 주요 수화 광물인 녹니석(chlorite), 각섬석(amphibole), 그리고 사문석(serpentine)은 중양 해령에 의한 열수 순환과 중양해령의 고온·저압 환경에서 변성 작용으로 형성된다(Alt 외 1984). 또한, 해양 지각은 저온 변화와 해저 풍화에 의해서 제올라이트(zeolites)와 점토 광물(clay minerals)의 형태로 H_2O 를 포함한다(Honnorez 1981). 해양 지각에 포함되어 있는 수화 광물은 지역에 따라 균일하지 않고, 단층대와 같이 해수의 침투성이 높은 곳에 더 많이 존재한다(Alt 외 1986).

해양 지각에서 H_2O 와 CO_2 를 포함하는 광물의 양은 해양 지각의 표면에서 아래로 내려갈수록 양이 감소한다. 해양 지각의 휘발성 물질 함량 측정은 시추 코어(drill cores), 준설 채취(dredge hauls), 또는 오피올라이트(ophiolites)를 이용하면 함수 광물의 양을 측정하는 것이 가능하다. 실제 해양 지각의 시추 코어를 화학적인 방법으로 분석한 결과에 따르면, 2.5km 두께의 현무암으로 구성된 층은 질량대비 약 2%의 H_2O 와 약 0.1%의 CO_2 를 광물 속에 포함하고 있는 것으로 보인다. 두 함량 값은 위에서 언급한 중양해령 지하에 존재하는 마그마의 그것보다 큰 것을 확인할 수 있다(Fine 외 1986).

오피올라이트(ophiolites)는 오버쓰러스트(overthrust) 작용과 함께 지표에 노출된 해양 지각(또는 맨틀을 포함)의 일부분이다. 오만 오피올라이트(Oman ophiolite)에서 반려암 속 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 비를 측정할

연구결과에 의하면(Gregory 외 1981), 해양 지각의 현무암보다 깊은 곳에 있는 반력암은 매우 광범위하게 유체와 고온에서 반응하는 것으로 보인다. 동시에, 광물의 변성작용은 없는 것으로 보인다. 매우 제한된 양이지만, 해양 지각 반력암 샘플에 의하면 3km에서 5km 두께의 반력암 층은 질량 대비 약 1%의 H_2O 와 약 0.1%의 CO_2 를 포함하는 것으로 보인다(Peacock 1999).

Ⅲ. 지진학적 관측

1. 해양 지각

섭입한 해양 지각의 두께는 평균적으로 6km에서 10km로 관측된다. 섭입한 해양 지각은 그렇지 않은 해양 지각에 비해서 지진파 속도가 느린 것으로 관측된다. 섭입한 해양 지각의 최상부 경계면에서는 S파의 속도가 평균적인 지각에 비해서 약 20%에서 30% 느리다. 즉, 섭입한 해양 지각의 경계면에서는 P파와 S파의 속도비가 높게 측정이 되며, 이것은 “함수 광물의 구성 비율이 높음”, “유체 공극 압력이 높음”, 또는 “지진파의 비등방성”에 의한 것으로 해석된다.

해양 지각 내의 함수광물이 존재하면 지진파의 속도는 해양 지각 주변의 맨틀보다 훨씬 더 느려지는 것으로 입증되었다(예: Jacobsen 외 2006). 해양판이 섭입함에 따라 광물에 함유된 H_2O 는 맨틀 깊숙이 이동한다(Abers 2000; Hacker 외 2003b; Jacobsen 외 2006; Maruyama 외 2007; Mainprice 외 2009). 이것에 대한 증거는 다양한 섭입대에서 원거리 지진파의 P파-S파 변환을 토대로 한 수신함수(receiver function)분석과 토모그래피(tomography)를 통해서 얻어졌다. 대부분의 섭입대에서 두 방법을 적용하였을 때, 섭입한 판의 최상부 경계에서 저속도층이 공통으로 발견되었다(예: 알래스카(Alaska)–Ferris 외 2003; 캐스캐디아(Cascadia)–Nicholson 외 2005; Abers 외 2009; Audet 외 2009; Peacock 외 2011, 중앙 안데스(central Andes)–Yuan 외 2000, 일본 남서부(southwest Japan)–Shelly 외 2006, 일본 북동부(northeast Japan)–Kawakatsu 외 2007; Tsuji 외 2008, 멕시코 중부(central Mexico)–Perez-Campos 외 2008; Kim 외 2010; 2012; 2013).

2. 맨틀

고밀도 지진계 네트워크를 통해 얻은 실체파(body wave) 토모그래피 방법으로 화산호 아래의 맨틀 깊이에서 지진파 속도 구조를 자세하게 확인할 수 있다. 토모그래피를 이용한 맨틀에 관한 연구는 “단위 면적당 지진계의 수”, “지진의 발생 빈도”, 그리고 “얼마나 오랫동안 관측이 이루어졌는지”에 따라 정확도가 달라진다. 토모그래피 방법을 이용하면 섭입대의 실체파(P파와 S파)의 속도뿐만 아니라, 감쇠(attenuation)에 관한 정보도 얻는 것이 가능하다.

지진파를 이용한 화산호 토모그래피 영상의 특성을 짚고 넘어갈 필요가 있다. 일본 화산호(Japan arc) 지역(그림 1)은 토모그래피 방법을 이용하여 그것의 지하 구조가 매우 잘 분석되었다. 왜냐하면, 일본에서는 매우 고밀도의 지진 관측 네트워크가 일본 전역에 오래전부터 설치되어 운영되었기 때문이다. 그리고 일본은 잘 알려진 바와 같이 지진이 자주 발생하는 지역이다. 일본의 고밀도 지진계를 이용한 토모그래피 영상은 일본 화산호(호상 열도)의 마그마의 상태를 잘 보여준다. 토모그래피 영상에서는 모호면과 섭입한 판 사이에서 느린 지진파 속도와 높은 감쇠를 보이는 구역이 있다는 것을 확인하였다. 이 구역은 섭입한 판을 따라 약 150km 깊이까지 이어진다. P파 그리고 S파가 가장 느리게 나타나는 부분은 각각 7.4km/s 그리고 4.0km/s에 이르며, P파와 S파의 비율은 최대 1.85이다. 전 세계적 평균 지진파 속도 모델(IASPEI91: Kennett 외 1991)과 비교해서 속도는 약 8% 그리고 비율은 약 10% 정도 낮은 값이다.

토모그래피 방법의 불확실성을 고려하더라도 일본 맨틀 켜기의 감쇠율은 같은 깊이의 맨틀에 비해서 분명히 높다(Stachnik 외 2004 및 그에 포함된 문헌). 또한, 같은 섭입대라 하더라도 화산호의 분포는 일정하지 않다. 같은 섭입대이지만 화산호가 존재하는 부분이 있고, 그렇지 않은 부분이 있다(그림 1). 지진학 영상에 의하면 화산호가 거의 없는 섭입대 지역의 맨틀 켜기 지역은 빠른 지진파 속도와 낮은 감쇠율을 그 특징으로 한다. 화산호가 없는 맨틀 켜기의 이와 같은 특징은 화산호가 존재하고 마그마 활동이 활발한 맨틀 켜기와 대비된다. 화산호가 존재하는 맨틀 켜기는 지진파 속도가 느리고 감쇠율이 높은 것이 특징이다. 이것은 마그마 활동에 의한 것으로 해석된다. 따라서 화산호가 없는 맨틀 켜기의 빠른 지진파 속도와 낮은 감쇠율 특징은 마그마의 부재에 의한 것으로 해석하는 것에 무리가 없다. 예를 들면, 알래스카 섭입대(그림 1) 중에서 마그마가 없는 맨틀 켜기 부분은 마그마 활동이 있는 지역보다 낮은 감쇠율을 분명하게 보인다. 칠레 섭입대의 S파 속도와 P파 S파 속도 비율은 마그마 활동이 활발한 부분에서 그렇지 않은 지역으로 옮겨감에 따라 분명하게 달라진다(Wagner 외 2005). 일본 북동 지역에서는 더욱 흥미로운 결과가 보고되어 있다. 일본 북동 지역의 지진파 토모그래피 영상에 의하면 평균적인 지진파 속도와 비교하여 속도가 느리거나 빠른 부분이 분명하게 나

타난다(Tamura 외 2002). 지진파 속도 이상(seismic velocity anomaly)의 패턴 간격은 비교적 최근에 생성된(신생대 제4기) 화산호의 분포와 비슷한 양상을 보이며, 강한 상관관계를 시사한다.

3. 화산호

화산호는 지표 아래 깊은 곳(맨틀)의 마그마 모체로부터 마그마가 분출되며, 새로운 대륙 지각이 형성되는 곳이다. 지하 깊은 곳에 있던 마그마는 상승하면서 온도가 감소한다. 온도가 감소한 마그마는 규장질(felsic) 광물 또는 규장질-고철질(mafic) 광물을 정출한다. 정출 과정은 중간 지각(middle crust) 또는 하부 지각(lower crust)에서 일어나는 것으로 보인다. 정출과정은 모호면 아래(하부 지각 아래)의 최상부 맨틀 부분에서도 어찌면 가능할 것으로 보이지만, 뚜렷한 증거는 아직 없다. 화산호에서 분출되는 용암은 맨틀에 있던 마그마가 바로 지표로 분출된 것은 아니다. 맨틀에 있는 마그마 방(magma chamber)에서 하부 지각을 지나 지각으로 올라온 뒤에 또 다른 마그마 방을 형성한다. 화산호에서 분출하는 용암은 이 얕은 마그마 방에서 나온다. 하지만 구체적인 마그마의 이동과 분출양상이 정확히 밝혀진 것은 아니다.

지진파를 분석하면 하부 지각과 최상부 맨틀의 화학적 구성을 추론하는 것이 가능하다. 우선, 지표 아래의 지진파 속도 구조의 절대적인 값을 구해야 한다. 실험적으로 광물과 암석의 지진파 속도 구조가 정확히 측정된다면(예: Christensen 외 1995), 지진파 속도로부터 지하의 암석·광물학적 조성을 추론할 수 있다. 또한, 여러 가지 광물이 섞여 있더라도 그것의 조합(mineral assemblages)과 탄성 파라미터(elastic parameters)를 추론할 수 있다(예: Hacker 외 2003; Calkins 외 2009). 지진학적 분석 방법과 함께 지각 열류량(heat flow), 중력(gravity), 그리고 자기지전류탐사(MT: magnetotellurics)를 이용한 분석도 함께 사용된다.

알래스카(예: Flidner 외 1999; 2000; Holbrook 외 1999; Lizzaralde 외 2002; Shillington 외 2004)와 이주-보닌-마리아나(IMB: Izi-Bonin-Mariana) 화산호(예: Kodiara 외 2007; Takahashi 외 2008; Tatsumi 외 2008)에서 수행된 대규모 반사파 및 굴절파를 이용한 연구는 매우 정확한 지진파 속도 구조를 계산하였다. 그리고 정확한 지진파 속도 구조를 전제로 화산호의 지하 구조에 관한 다양한 지질학·지구물리적 해석이 제시되었다. Tatsumi 외(2008)는 화산호 형성에 관한 두 가지 모델을 제시하고 어떤 모델이 더 타당한지 논증하였다. 첫 번째 모델은 “맨틀 유래의 현무암/아나텍시스(anatexis) 모델”이고, 다른 모델은 “맨틀 유래의 안산암(andesite) 모델”이다. 어떤 모델이 IBM 화산호의 구조와 진화과정을 더 잘 설명하는지 판단하는 것은 지진학적 결과를 기반으로 결정하였다. IBM의 지진파 속도구조는 다음과 같다. 상부 지각(upper crust)의 P파 속도는 6.0km/s 미만, 중간 지

각의 P파 속도는 $6.0\text{km/s} \sim 6.5\text{km/s}$, 하부 지각의 상부는 $6.5\text{km/s} \sim 6.8\text{km/s}$, 그리고 하부는 $6.8\text{km/s} \sim 7.2\text{km/s}$ 이다. “현무암/아나텍시스 모델”로 예측한 지각의 구성 및 탄성 파라미터의 계산 값이, 실제 IMB 지각의 관측 결과에 잘 부합한다.

“현무암/아나텍시스 모델”을 요약하면 다음과 같다. 우선 맨틀에서 유래한 마그마가 기존의 해양 지각을 대체하고 새로운 현무암질 지각을 형성한다. 새로운 현무암질 지각의 형성 이후에, 맨틀에서 올라오는 마그마 활동은 계속된다. 마그마 활동은 새로운 현무암질 지각을 부분 용융시키며, 분화작용을 촉진한다. 이때, 부분 용융되지 않고 남은 고철질(mafic) 암석(restite)은 모호면 아래로 이동한다. 흥미로운 점은, 이 연구와는 별개로 진행된 다른 지역의 화산호를 대상으로 한 연구에서 위 모델과 비슷한 결과가 도출되었다는 점이다. 그 첫 번째는, Calkins 외(2009)에서 표면파의 분산을 이용하여 서부 워싱턴 지역의 화산호에 대해 수행된 연구이다. 다른 하나는, 브리티시 컬럼비아 중부의 화산호 흔적에서 상부 맨틀의 S파 속도(4.1km/s)가 “현무암/아나텍시스 모델”이 예측한 그것과 매우 유사하다는 점이다(Stachnik 외 2004).

알루시안 화산호의 지진파 속도 구조는 위 연구들과는 상당히 다르다는 것이 밝혀졌다. Shillington 외(2004)는 알루시안 화산호가 IBM 화산호보다 더 두꺼우면서 지진파 속도는 더 빠르다는 것을 규명하였다. 주목할 만한 점은 중간 지각의 P파 속도가 $6.7\text{km/s} \sim 7.3\text{km/s}$ 인데, 이것은 IMB 화산호의 중간 지각 속도($6.0\text{km/s} \sim 6.5\text{km/s}$)보다 훨씬 더 빠르다는 점이다. 알루시안 화산호의 하부 지각의 속도($7.3\text{km/s} \sim 7.7\text{km/s}$)와 상부 맨틀의 속도($7.8\text{km/s} \sim 8.1\text{km/s}$)도 상대적으로 높게 나타난다. 중간 지각과 하부 지각의 지진파 속도가 같은 지진파 데이터를 사용한 다른 연구 결과(Fliedner 외 1999; 2000; Holbrook 외 1999; Lizaralde 외 2002)보다 다소 높게 나타나지만, 알루시안 동부 지역에 한해서는 다른 연구 결과(Abers 1994)와 잘 일치한다.

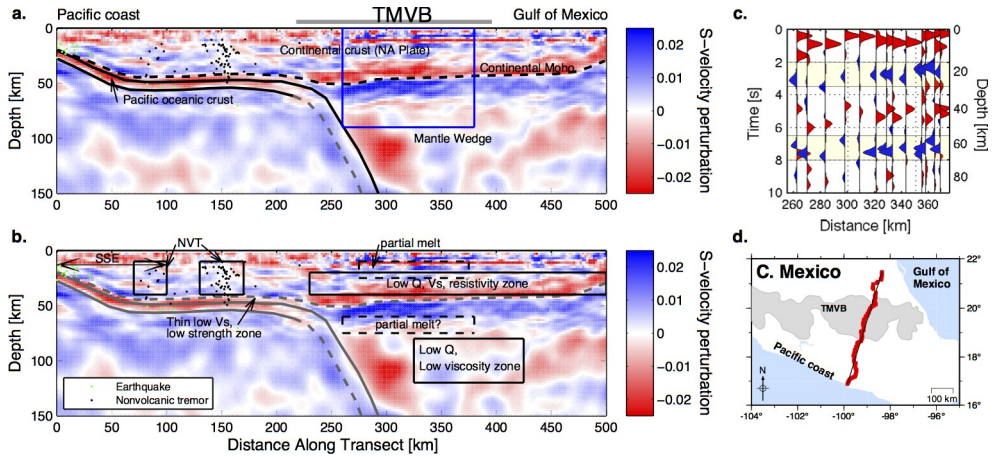
절대적인 P파의 속도 값을 알면 MgO 및 SiO_2 의 양에 대한 추정이 가능하다. 그리고 S파의 속도 값도 결정할 수 있다면, P파와 S파의 비율을 계산하고 이것으로부터 푸아송비(Poisson's ratio)를 계산할 수 있다. 푸아송비는 하부 지각의 구조에 대해서 지진파 속도보다 더 많은 정보와 향상된 정확도를 제공한다(예: Christensen 1996; Zandt 외 1995). 예를 들면, Behn 외(2006)는 반려암질노라이트(gabbro-norite)와 휘암(pyroxenite)의 P파 속도 범위가 많이 겹친다는 것을 발견했다. 반려암질노라이트와 휘암은 각각 하부 지각(lower crust)의 다른 진화 과정을 뒷받침하는 암석이기 때문에, 이 문제는 꽤 중요한 문제였다. 다행히도, 두 암석의 S파의 속도는 상당히 차이가 나는 것으로 나타났고, 두 암석을 지진학적으로 구분하는 것이 가능해졌다. 이 연구와 같이 P파와 S파의 비율(또는 푸아송비)은 주로 어떤 암석으로 구성되어 있는지를 결정하는 것을 가능하게 한다. 또한, 용융체의 존재 여부를 확인할 때에도 유용하다. P파에 비해서, S파는 용융체가 존재하는지 그렇지 않은지에 따라, 매우 민감하게 속도가 달라진다. 유한 다공체(finite porosity)에 관한 모델 연구에서도, 용융체가 다공체를

채울 때 전단 탄성률(shear modulus)이 체적 탄성률(bulk modulus)에 비해서, 더 민감하게 반응한다는 것이 밝혀졌다(예: Takei 2002; Schmeling 1985; Mainprice 2007).

IV. 멕시코 섭입대의 지진학적 연구에 대한 심층 분석

지진계를 촘촘하게 배열하면 매우 정확한 지각 또는 맨틀의 지진파 속도 구조를 얻어낼 수 있다. 최근 이와 같은 고밀도 지진파 측정이 이루어지고, 의미 있는 연구 결과가 많이 보고되었다. 멕시코 섭입대는 코코스판(Cocos tectonic plate)이 북아메리카판(North American plate)의 대륙 가장자리를 수렴 경계로 하며 섭입하고 있는 지역이다(그림 1). 코코스판이 북아메리카판 아래로 섭입하면서 북아메리카판의 지표에는 눈에 띄는 지형적 특징이 있다. 그중에서 가장 흥미로운 것은 “멕시코 화산 벨트(TMVB: Trans-Mexican Volcanic Belt)”라는 지형이다(그림 2d). 멕시코 화산 벨트는 북아메리카판의 남쪽에 위치하며, 신생대 제3기에 형성된 화산호의 일종이다(Ferrari 외 1999; 2011).

2007년 북미판 아래로 섭입하는 코코스판의 섭입 메커니즘을 규명하기 위하여 “중남아메리카 섭입대 관측 실험(MASE: Meso-America Subduction Experiment, MASE 2007)”이 이루어졌다. MASE가 설치된 지역은 코코스판이 매우 평평하게 섭입한다. MASE의 주요 목적 중 하나는 섭입하는 코코스판의 정확한 기하학적 구조와 섭입 시스템의 지진파 속도 구조를 명확히 규명하는 것이었다. 그리고 도출된 지진학적 결과로부터 섭입하는 해양 지각과 맨틀 켜기의 광물의 화학 반응과 유체의 반응 양상을 밝힐 수 있을 것이라고 기대했다. MASE는 총 100개의 지진계가 2년(2005년 3월~2007년 2월) 동안 6km에서 8km 간격을 두고 섭입방향을 따라서 나란히 설치되었다(그림 2d). 전체 MASE의 관측 길이는 약 500km에 이른다.



<그림 2> “중앙아메리카 섭입대 관측 실험(MASE 2007)”과 지진학 연구 결과(출처: Kim 외 2012; 2013). a. 구조 보정(migration) 영상. 태평양 쪽 해안선(Pacific coast), 멕시코만(Gulf of Mexico), 대륙성 지각(Continental crust), 북아메리카판(NA plate), 맨틀 썩기(mantle wedge), 대륙 지각 아래 모호면(Continental Moho), 태평양 해양 지각(Pacific oceanic crust), 천천히 미끄러지는 지진(SSE: Slow slip earthquake), 비화산성 트레머(NVT: Non-volcanic tremor) 등의 위치가 영문으로 표시되어 있다. b. a의 보정 영상에다가 이 논문에서 언급한 연구 결과를 표시한 그림. c. 2006년 4월 20일에 쿠릴 열도(Kuril Islands)에서 발생한 지진의 수신함수 단면도. MASE 관측 데이터 중에서 북동쪽의 자료만 포함되어 있다. 2초~33초 주기 대역으로 필터링 되어 계산되었다. 6.5초와 8.0초 사이 범위(약 65km~75km 깊이에 해당) 에서 강한 음의 진폭(negative amplitude)이 노란색으로 표시되어 있다(b에서 부분 용융(partial melt)로 표시된 부근). d. MASE의 관측 위치. 전체 관측 길이는 약 500km에 이른다.

MASE를 이용하여 도출된 주요 연구 결과는 다음과 같다.

- 코코스판은 북아메리카판 아래로 섭입한다(그림 2a). 코코스판은 중간에 평평하게 섭입(flat subduction)하며, 이때 상부 판과의 지체구조적 커플링(tectonic coupling)은 없는 것으로 보인다. 이와 같은 결과는 기존의 지질학과 측지학적인 연구결과와 일치한다.
- 코코스판과 북아메리카판 아래의 맨틀 썩기 사이에서 2~4km 두께의 얇은 저속도층이 발견되었다(Song 외 2009; Kim 외 2010). 원거리 수신함수를 이용한 지진학적 방법에서 저속도층이

미지는 MASE를 따라서 매우 분명하게 나타난다(Perez-Campos 외 2008; Kim 외 2010). 또한, 코코스판 내부에서 발생하는 지진에서 방사된 지진파가 판의 경계면에서 변환되는 것을 이용하여 이 저속도층의 존재는 더욱 명확해졌다(Song 외 2009). 얇은 저속도층은 이 지역에서 천 천히 미끄러지는 지진(SSEs: Slow slip events)의 미끄러지는 면 역할을 하는 것으로 보인다. 코코스판의 얇은 저속도층과 비슷한 것은 일본 섭입대에서도 보고된 적이 있다(Hirose 외 2005). 하지만 일본의 경우 그것의 존재는 비화산성 트레머(NVT: non-volcanic tremor)를 통해 간접적인 방법으로 보고되었지만, 코코스판의 경우 MASE를 이용하여 매우 분명하게 확인되었다.

- TMVB 화산활동의 시기 및 생성원인과 코코스판의 찢어짐(tearing)은 연관이 깊어 보인다. 이전 연구에서 TMVB의 화산활동은 TMVB의 서쪽에서 1,150만 년 전에 시작해서, 동쪽에서는 600만 년 전에 끝난 것으로 보고되었다. Ferrari(2004)는 TMVB 화산활동 이동 현상이, 코코스판의 찢어짐 또는 분리 작용 때문일 것이라고 제안하였다. 코코스판이 찢어지거나 분리 작용으로 일부가 떨어져 나가면, 그 사이로 연약권 물질이 침투해 들어오고, 이것이 TMVB가 생성되는 원인이 되었을 것이라고 설명한다. Ferrari(2004)의 제안은 또한 멕시코 시티(Mexico City) 근처의 화산에서 발견되는 아다카이트(Adakites)와 해양성 현무암(OIBs: oceanic basalts)이 존재하는 이유를 잘 설명해 주기도 한다(Ferrari 외 2001).
- 일반적으로 섭입대의 감쇠율 영상은 배호지역(화산호를 기준으로 해구방향의 반대쪽, barkarc) 아래의 맨틀 췌기에서 높은 감쇠율을 보인다. MASE를 통해 계산한 멕시코 섭입대의 배호지역 맨틀 췌기도 마찬가지로 높은 감쇠율을 보이는 것으로 확인되었다. 특히 100km 깊이에서 감쇠율의 큰 하락으로 나타났다(Chen 외 2008). 이 연구 결과는 섭입판이 방출한 물이 판의 점성도(viscosity)에 영향을 줄 것이라는 연구 결과와 잘 부합한다(Hebert 외 2008). 이 연구에서는 섭입판이 수십 km 부근에서 탈수 작용을 시작하고, 판이 깊게 섭입하여 온도가 올라감에 따라 점성이 낮아질 것이라고 말한다.
- 섭입대에 대한 수치 모델링 연구(Numerical modeling)는 맨틀 췌기 부근의 낮은 점성이 섭입하는 판이 평평하게 되도록 만든 원인일 수 있다는 것을 제시하였다(Manea 외 2007). 연구 결과에 의하면, 섭입판의 탈수반응으로 인해 “맨틀 췌기 부근의 낮은 점성도” 또는 “섭입하는 판 표면에 낮은 점성을 가진 얇은 층”이 섭입 시스템에서 힘의 평형상태에 변화를 줄 수 있을 것이라고 말한다. 힘의 평형상태가 깨지면 결과적으로 섭입하는 판 운동에 영향을 주고, 그것이

결과적으로 판이 평평하게 섭입하는 결과를 가져왔다고 말한다. 또한, 맨틀 켜기의 점성이 낮으면 섭입판과의 지체구조적 커플링(tectonic coupling)이 줄어들다는 사실도 확인되었다(Billen 외 2001). 이 밖에도, 맨틀 켜기의 점성이 낮으면 맨틀 켜기와 섭입판의 접촉부에서 용해 침식(thermal erosion)이 발생할 수 있다는 연구도 보고되었다(Arcay 외 2005). 맨틀 켜기의 낮은 점성을 보이는 범위가 얇은 깊이까지만 한정되어 있는지, 또는 그렇지 않은지에 따라서도 섭입 시스템은 다른 양상을 보인다(Manea 외 2007). 낮은 점성을 보이는 범위가 얇은 경우(200km까지) 섭입각은 작거나 평평할 뿐만 아니라, 이런 양상이 수백 km까지 계속되는 것으로 보인다. 역학적 관점으로 설명하면, 점성이 낮은 범위가 얇으면, 섭입판의 운동에 의해 발생하는, 점성에 의한 열에너지 손실(viscous dissipation)을 최소화할 수 있는 경로를 제공해 준다. 반대로, 맨틀 켜기에서 낮은 점성을 보이는 범위가 깊은 경우(400km 까지)에는 섭입각이 가파른 경향을 보인다.

- 맨틀 켜기의 약 65km~75km 깊이에서 지진파 속도가 느려지는 불연속면(음의 불연속면, negative discontinuity)이 발견되었다(그림 2c; 약 6.5초~8.0초 사이에서 음의 진폭(파란색), 열은 노란색으로 표시되어 있음). 음의 불연속면은 멕시코 중부의 화산 벨트(TMVB)가 있는 지역 전체에 걸쳐서 발견된다. 계산에 의하면 지진파의 속도는 약 18%에서 20% 감소하는 것으로 나타났다. 비슷한 결과가 P파 토모그래피를 이용하여 일본의 북동 지역 섭입대를 연구한 결과에서도 발견되었다(Zhao 외 1992; Iwamori 외 2000). 최근에는, “2차원 라돈 변환(2D Generalized radon transform)”을 이용한 구조보정 영상에서, 알래스카 중부의 약 60km 부근에서 음의 불연속면(약 10%~13% 속도 감소)을 보이는 부분 용융체가 발견되었다(Rondenay 외 2010). 따라서 멕시코 중부 지역의 맨틀 켜기에서 발견된 음의 불연속면은 TMVB를 형성한 부분 용융체의 위 경계면이라고 가정해도 큰 무리는 없다. 부분 용융체의 아래 경계면이 확인되지는 않지만, 이것은 지진파의 속도나 온도의 변화가 점진적이기 때문으로 보인다(Rondenay 외 2010). 이 부분 용융체는 섭입판에서 탈수 작용에 의해 생겼을 것으로 보인다. 탈수 작용이 오랜 시간 동안 계속해서 일어났고, 방출된 유체가 맨틀 켜기와 화학적 반응을 일으키며 부분 용융 작용을 일으켰다. 이것은 상승하다가 음의 불연속면이 발견된 깊이를 경계로 계속해서 축적되었다. 이후에, 코코스판 또는 리베라판(Rivera plate)이 해구 쪽으로 물러나면서(rollback) TMVB와 지하의 부분 용융체의 이동도 함께 이루어졌을 가능성이 있다(Iwamori 1998; Ferrari 2004; Ferrari 외 2011).
- TMVB 아래에는 약 25km 부근에서 또 다른 저속도층이 발견되었다(그림 2c; 약 3.0초에서 음

의 진폭(파란색), 열은 노란색으로 표시되어 있음). 이 층은 비교적 얇아서 표면파를 이용한 연구에서도 확인된다(Iglesias 외 2010). 이 연구에서는 지진파의 속도가 느려진 것은 매질의 밀도가 감소했기 때문이라고 설명하며 프랫(Pratt)의 지각 평형 모델을 적용한다. 저속도층의 P파와 S파 비율은 높게(1.806) 나타나는데 이것은 규장질의 암석 성분이 많다는 것을 뜻한다(Zandt 외 1995). TMVB의 북쪽 하부 지각은 높은 감쇠율을 보이는데, 이것은 그 영역에서 전기 비저항이 낮게 측정되었던 연구 결과와 잘 부합한다(Jödicke 외 2006). 즉, TMVB의 북쪽 하부 지각에서 지진파의 저속도, 높은 감쇠율, 그리고 낮은 전기비저항 현상이 관측되었으며, 이것은 다량의 유체 또는 부분 용융에 의한 것으로 해석된다. 이전 연구에 의하면, 마이오세 후기(Late Miocene) 동안에 계속해서 분출작용을 일으킨 지하의 규장질 화산 활동(pulse of mafic volcanism)이, TMVB의 서쪽에서 시작하여 TMVB를 따라 동쪽으로 옮겨갔다. 7,500만 년 전에서 6,500만 년 사이에는, 이 규장질의 마그마 활동은 베라쿠르즈 지역(MASE 지진관측 라인의 북쪽 끝)에까지 이른다(Ferrari 2004). TMVB의 북쪽 하부 지각에서 보이는 높은 감쇠율은 (베라쿠르즈 지역까지 이동해 온) 마그마 활동에 의해 생긴 부분 용융체나 변성 유체(metamorphic fluid)에 의한 것으로 보인다. 또한, 마이오세 후기 동안에 TMVB를 서쪽부터 동쪽까지 가로지른 화산 활동은 그 아래에 존재하던 섭입판 찢어짐(slab tearing)이 동쪽으로 진행한 것 때문이라는 가설이 있다(Ferrari 2004). 이 가설은 MASE를 통한 최근 연구 결과들과 잘 맞아 떨어진다. Prez-Campos 외(2008)는 섭입판의 이미지를 보여주면서, 찢어짐이 약 80km 깊이에서 발생했다고 주장한다. 또한, 찢어짐 뒤에 섭입판이 해구 방향으로 물러나가는 현상(rollback)이 발생했을 것이라고 설명하는데, 이것은 TMVB 전체가 해구 쪽으로 이동했다는 이전 연구결과(Ferrari 외 1999)와 잘 맞아 떨어진다. TMVB 전체적으로 지하에서 지진파 저속도 지대가 발견되는 것은 아마도 과거 2,000만 년 동안의 화산활동과 관련 있는 부분 용융 때문일 것이다. 또한, 저속도 지대는 동시에 섭입판의 함수 광물에 함유되어 있는 유체와 관련이 깊을 것으로 보인다.

V. 연구 제언

멕시코 중부에 설치된 고밀도 지진 관측 실험(MASE)에서 도출된 다양한 연구 예시를 통해서, 고밀도 지진 관측망으로부터 정확하고 신뢰할만한 지진파 속도 구조가 도출되는 연구 사례를 확인하였다. 이것이 다양한 학문적 관점에서 해석되며 화산호와 섭입 시스템에 관한 다양한 결론들로 이어졌

다. MASE는 고밀도 지진 관측으로만 발견할 수 있는 현상이 섭입대에 숨어있다는 것을 확인시켜주었다. 현재 지진학계 전반에서 고밀도 지진 관측이 이루어지고 있으며, 의미 있는 다양한 연구 결과가 나오고 있다. 앞으로 이와 같은 측정이 계속된다면 화산 내부를 포함하여 지구 내부의 발견하지 못했던 성질을 밝혀내는 데 큰 도움이 될 것으로 예상된다. 백두산(화산, Mt. Baekdu, a.s.l 2,750m)에도 MASE와 같은 고밀도 지진 관측 프로젝트가 진행되길 기대하며, 이것은 지구물리학, 지구화학, 그리고 지질학에 새로운 연구 관점을 제시할 것으로 예상된다.

다양한 학문적 관점에서, 백두산과 그 지하의 마그마에 대한 구조적 특징뿐만 아니라 시간적인 변화에 대한 연구가 필요하다. 백두산 분출 위험을 낮추기 위해 선행되어야 하는 것은 마그마가 상승하는 조건과 상승 과정에 대한 메커니즘을 규명하는 것이다. 또한, 마그마 상승을 실시간으로 정확하게 관측하는 기술적인 면도 물론 필요하다. 지구물리적인 관점에서 보면, 지진학(Seismology), 측지학(Geodesy), 중력탐사(Gravity survey), 그리고 자기지전류탐사(Electromagnetic survey)를 통해 지하 마그마 구조를 규명할 수 있다는 것이 많은 연구를 통해 확인되었다. 예를 들면, 지진파의 방사 패턴으로부터 지진의 메커니즘(focal mechanism)을 밝히는 것이 가능하고, 이것으로부터 응력(stress)의 분포를 결정할 수 있다. 그리고 S파의 속도가 방향에 따라 미세하게 다른 현상(shear wave splitting)을 관측하면 마그마 분포의 시간적 변화나 응력 변화를 측정할 수 있다. 지구화학적 관점에서는 조금 더 미시적으로 접근이 가능하다. 용암이나 화산 쇄설물 샘플 속 광물에 대한 암석학적 그리고 광물학적 측정과 실험이 이루어진다. 동위원소 측정법은 화산 분출의 지질학적 절대 시간을 측정할 수 있는 유일한 방법이다. 이와 같은 방법으로 광물이 마그마 속에 잔류했던 시간을 추정하거나, 압력과 온도를 통해 과거나 현재의 마그마 깊이를 추론한다. 지구물리적인 방법론과 지구화학적 방법론이 화산과 그것의 지하 구조에 대해서 볼 수 있는 것은 서로 다르다. 두 관점이 종합적으로 다루어진다면, 백두산의 지각 구조와 그 속의 마그마의 특성을 분명하게 결정하는 것이 가능할 것이다.

VI. 요약 및 결론

유체(주로 물과 이산화탄소)의 생성 조건, 암석 용융의 정확한 발생 조건, 그리고 그것의 이동 현상을 규명하는 것은 화산호 활동의 근본적 원인과 맨틀 췌기(보통 화산 마그마 활동의 장소가 됨) 내에 물리·화학적 현상을 규명하기 위한 필요조건이다. 화산호의 지하 깊은 곳 맨틀에서는 암석이 용융되면서 화학적 구성성분이 변화를 일으키고, 그것이 상승하거나 종종 지표로 분출한다. 상승한 마그마는 다시 응고되면서 판의 새로운 구성성분이 되어 오랜 지질학적 시간 동안 그 자리를 지킨다. 섭

입대의 화산호는 맨틀 물질이 용융되어 대륙 지각을 뚫고 지표로 분출되는 지역이다. 그리고 화산호는 지각에 물질 공급 역할을 수행한다(예: McLennan 외 1982). 하지만 구체적으로 어떤 방식으로 상부 맨틀(upper mantle)과 하부지각이 물질과 열을 교환하는지는 여전히 밝혀지지 않았다(예: Behn 외 2006; Zellmer 외 2006). 이 논문 전반에 걸쳐서 지진파의 속도 구조를 알면 어떻게 섭입판, 맨틀 췌기, 그리고 화산호의 성질을 규명할 수 있는지 살펴보았다. 이와 같은 연구 예시들은 고밀도 지진 관측망을 기반으로한 정확한 지진학적 결론에서 도출되었다. 백두산에도 고밀도 지진 관측망이 설치되어 운용된다면 정확한 지진학적 연구 결과들이 도출될 수 있으며, 이것으로부터 다양한 지구과학적 관점에서의 결과들이 파생될 것을 기대한다.

《참 고 문 헌》

- Abers, G. A. 1994. "Three-dimensional inversion of regional P and S arrival times in the East Aleutians and sources of subduction zone gravity highs." *Journal of Geophysical Research* 99, 4395-4412, doi:10.1029/93JB03107.
- Abers, G. A. 2000. "Hydrated subducted crust at 100 - 250 km depth." *Earth and Planetary Science Letters* 176, 323-330, doi:10.1016/S0012-821X(00)00007-8.
- Abers, G. A., L. S. MacKenzie, S. Rondenay, Z. Zhang, A. G. Wech and K. C. Creager. 2009. "Imaging the source region of Cascadia tremor and intermediate-depth earthquakes." *Geology* 37, 1119 - 1122, doi:10.1130/G30143A.1.
- Alt, J. C. and J. Honnorez. 1984. "Alteration of the Upper Oceanic-Crust, Dsdp Site-417 - Mineralogy and Chemistry." *Contributions to Mineralogy and Petrology* 87(2), 149-169.
- Alt, J. C., J. Honnorez, C. Laverne, and R. Emmermann. 1986. "Hydrothermal alteration of a 1 km section through the upper oceanic crust, Deep Sea Drilling Project Hole 504B: Mineralogy, chemistry and evolution of seawater-basalt interactions." *Journal of Geophysical Research*, 91(B10), 10309-10335.
- Arcay, D., E. Tric and M.-P. Doin. 2005. "Numerical simulations of subduction zones: effect of slab dehydration on the mantle wedge dynamics." *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 149, 133 - 153.
- Audet, P., M. G. Bostock, N. I. Christensen and S. M. Peacock. 2009. "Seismic evidence for overpressured subducted oceanic crust and megathrust fault sealing." *Nature* 457, 76-78, doi:10.1038/nature07650.
- Behn, M. D. and P. B. Kelemen. 2006. "Stability of arc lower crust: insights from the Talkeetna arc section, south central Alaska, and the seismic structure of modern arcs." *Journal of Geophysical Research* 111(B11207), doi:10.1029/2006JB004327.
- Bird, P. 2003. "An updated digital model of plate boundaries." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(3), doi:10.1029/2001GC000252.
- Billen, M. I. and M. Gurnis. 2001. "A low viscosity wedge in subduction zones." *Earth and Planetary Science Letters* 193, 227-236.
- Bostock, M. G., S. Rondenay and J. Sharagge. 2001. "Multiparameter two-dimensional inversion of scattered teleseismic body waves: 1. Theory for oblique incidence." *Journal of Geophysical*

- Research* 106(B12), 30,771-730,782, doi:10.1029/2001JB000330.
- Calkins, J. A., G. Zandt, J. Girardi, K. Dueker, G. E. Gehrel and M. N. Ducea. 2009. "Characterization of the crust of the Coast Mountains Batholith, British Columbia, from P to S converted seismic waves and petrologic modeling." *Earth and Planetary Science Letters* 289, 145-155, doi:10.1016/j.epsl.2009.10.037.
- Chen, T. and R. W. Clayton. 2009. "Seismic attenuation structure in central Mexico: Image of a focused high-attenuation zone in the mantle wedge." *Journal of Geophysical Research*, 114(B07304), doi:10.1029/2008JB005964.
- Christensen, N. I. 1996. "Poisson's ratio and crustal seismology." *Journal of Geophysical Research*, 101(B2), 3139-3156, doi:10.1029/95JB03446.
- Christensen, N. I. and W. D. Mooney. 1995. "Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view." *Journal of Geophysical Research* 100(B7), 9761-9788, doi:10.1029/95JB00259.
- Crisp, J. A. 1984. "Rates of magma emplacement and volcanic output." *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 20, 177-221.
- El Wakeel, S. K. and J. P. Riley. 1961. "Chemical and mineralogical studies of deep-sea sediments." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 25, 110-146.
- Ferrari L., M. Lopez-Martinez, G. Aguirre-Diaz and G. Carrasco-Nuñez. 1999. "Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt." *Geology* 27, 303-306.
- Ferrari, L., C. M. Petrone and L. Francalanci. 2001. "Generation of oceanic island basalt-type volcanism in the western Trans Mexican volcanic belt by slab rollback, asthenosphere infiltration, and variable flux melting." *Geology* 29, 507 - 510, doi:10.1130/0091-7613(2001)029<0507:GOOIBT>2.0.CO;2.
- Ferrari, L. 2004. "Slab detachment control on mafic volcanic pulse and mantle heterogeneity in central Mexico." *Geology* 32, 77 - 80, doi:10.1130/G19887.1.
- Ferrari, L., T. Orozco-Esquivel, V. Manea and M. Manea. 2011. "The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico Subduction zone." *Tectonophysics* 522 - 523 (5), 122 - 149, doi:10.1016/j.tecto.2011.09.018.
- Ferris, A., G. A. Abers, D. H. Christensen and E. Veenstra. 2003. "High resolution image of the subducted Pacific (?) plate beneath central Alaska, 50 - 150 km depth." *Earth and Planetary*

- Science Letters* 214, 575 - 588, doi:10.1016/S0012-821X(03)00403-5.
- Fine, G., and E. Stolper. 1986. "Dissolved carbon-dioxide in basaltic glasses: concentrations and speciation." *Earth and Planetary Science Letters* 76, 263-278, doi:10.1016/0012-821X(86)90078-6.
- Flidner, M. M., and S. L. Klemperer. 1999. "Structure of an island-arc: Wide-angle seismic studies in the eastern Aleutian Islands, Alaska." *Journal of Geophysical Research* 104, 10,667 - 610,694, doi:10.1029/98JB01499.
- Flidner, M. M., and S. L. Klemperer. 2000. "Crustal structure transition from oceanic arc to continental arc, eastern Aleutian Islands and Alaska Peninsula." *Earth and Planetary Science Letters* 179, 567-579, doi:10.1016/S0012-821X(00)00142-4.
- Gass, G., S. J. Lippard, and A. W. Shelton. 1984. *Ophiolites and oceanic lithosphere*. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Graeber, F. and G. Asch. 1999. "ree-dimensional models of P wave velocity and P-to-S velocity ratio in the southern central Andes by simultaneous inversion of local earthquake data." *Journal of Geophysical Research* 104, 20,237 - 220,256, doi:10.1029/1999JB900037.
- Gregory, R. T. and H. P. Taylor. 1981. "An oxygen isotope profile in a section of Cretaceous oceanic crust, Samail Ophiolite, Oman: Evidence for $\delta^{18}\text{O}$ buffering of the oceans by deep (>5 km) seawater-hydrothermal circulation at mid-ocean ridges." *Journal of Geophysical Research* 84(B4), 2737-2755, doi:10.1029/JB086iB04p02737.
- Hacker, B. R., G. A. Abers, and S. M. Peacock. 2003a. Subduction factory: "1. Theoretical mineralogy, densities, seismic wave speeds, and H₂O contents." *Journal of Geophysical Research* 108(B1), doi:10.1029/2001JB001127.
- Hacker, B. R., S. M. Peacock, G. A. Abers and S. D. Holloway. 2003b. Subduction factory "2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions?" *Journal of Geophysical Research* 108(B1), doi:10.1029/2001JB001129.
- Hay, W. W., L. S. James, and N. W. Christopher. 1955. "Mass/age distribution and composition of sediments on the ocean floor and the global rate of sediment subduction." *Journal of Geophysical Research* 93, 14933-14940.
- Hayes, G. P., D. J. Wald and R. L. Johnson. 2012. "Slab1. 0: A three dimensional model of global subduction zone geometries." *Journal of Geophysical Research* 117(B1), doi: 10.1029/2011JB008524

- Hebert, L. B., P. Antoshechkina, P. Asimow and M. Gurnis. 2009. "Emergence of a low-viscosity channel in subduction zones through the coupling of mantle flow and thermodynamics." *Earth and Planetary Science Letters*, 278, 243 - 256, doi:10.1016/j.epsl.2008.12.013.
- Holbrook, W. S., D. Lizarralde, S. McGeary, N. Bangs and J. Dieblod. 1999. "Structure and composition of the Aleutian island arc and implications for continental crustal growth." *Geology* 27(1), 31-34, doi:10.1130/0091-7613(1999)027<0031:SACOTA>2.3.CO:2.
- Honnorez, J. 1981. *The sea*, New York: Wiley Interscience.
- Husker, A. and P. M. Davis. 2009. "Tomography and thermal state of the Cocos plate subduction beneath Mexico City." *Journal of Geophysical Research*, 114(B04306), doi:10.1029/2008JB006039.
- Iglesias, A., R. W. Clayton, X. Pérez-Campos, S. K. Singh, J. F. Pacheco, D. García and C. Valdés-González. 2010. "S wave velocity structure below central Mexico using high resolution surface wave tomography." *Journal of Geophysical Research* 115(B06307), doi:10.1029/2009JB006332.
- Iwamori, H. 1998. Transportation of H₂O and melting in subduction zones, *Earth and Planetary Science Letters* 160, 65 - 80, doi:10.1016/S0012-821X(98)00080-6.
- Iwamori, H. and D. Zhao. 2000. "Melting and seismic structure beneath the northeast Japan arc, *Geophysical Research Letters*.", 27(3), 425 - 428, doi:10.1029/1999GL010917.
- Jacobsen, S. D., and S. van der Lee. 2006. *Earth's Deep Water Cycle*, Washington, DC: American Geophysical Union.
- Jödicke, H., A. Jording, L. Ferrari, J. Arzate, K. Mezger and L. Rüpke. 2006. "Fluid release from the subducted Cocos plate and partial melting of the crust deduced from magnetotelluric studies in southern Mexico: Implications for the generation of volcanism and subduction dynamics, *Journal of Geophysical Research* 111(B08102), doi:10.1029/2005JB003739.
- Kawakatsu, H. and S. Watada. 2007. evidence for deep-water transportation in the mantle." *Science* 316, 1468 - 1471, doi:10.1126/science.1140855.
- Kennett, B. L. N., and E. R. Engdahl. 1991. Traveltimes for global earthquake location and phase identification, *Geophysical Journal International* 105, 429 - 465, doi:10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x.
- Kim, Y., R. W. Clayton, P. D. Asimow, and J. M. Jackson. 2013. "Generation of talc in the mantle wedge and its role in subduction dynamics in central Mexico." *Earth and Planetary Science*

- Letters* 384, 81-87, doi:10.1016/j.epsl.2013.10.006.
- Kim, Y., R. W. Clayton and J. M. Jackson. 2010. "The geometry and seismic properties of the subducting Cocos plate in central Mexico." *Journal of Geophysical Research* 115(B06310), doi:10.1029/2009JB006942.
- Kim, Y., M. S. Miller, F. D. Pearce and R. W. Clayton. 2012. "Seismic imaging of the Cocos plate subduction zone system in central Mexico." *Geochemistry Geophysics Geosystems* 13(Q07001), doi:10.1029/2012GC004033.
- Kodaira, S., T. Sato, N. Takahashi, S. Miura, Y. Tamura, Y. Tatsumi and Y. Kaneda. 2007. "New seismological constraints on growth of continental crust in the Izu-Bonin intraoceanic arc." *Geology* 35(11), doi:10.1130/G23901A.
- Lizarralde, D., W. S. Holbrook, S. McGeary, N. Bangs and J. Diebold. 2002. "Crustal construction of a volcanic arc, wide-angle seismic results from the western Alaska Peninsula." *Journal of Geophysical Research* 107(8), 2164, doi:10.1029/2001JB000230.
- Mainprice, D. 2007. "Seismic anisotropy of the deep earth from a mineral and rock physics perspective." G. Schubert, ed. *Treatise on Geophysics*. Elsevier Oxford.
- Mainprice, D. and B. Ildefonse. 2009. *Subduction Zone Geodynamics*. Springer.
- Manea, V. C. and M. Gurnis. 2007. "Subduction zone evolution and low viscosity wedges and channels." *Earth and Planetary Science Letters* 264, 22 - 45, doi:10.1016/j.epsl.2007.08.030.
- Maruyama, S. and K. Okamoto. 2007. Water transportation from the subducting slab into the mantle transition zone." *Gondwana Research* 11, 148 - 165.
- MASE. 2007. Meso America Subduction Experiment. Caltech. Dataset.
- McLennan, S. M. and S. R. Taylor. 1982. "Geochemical constraints on the growth of the continental crust." *Journal of Geology* 90, 347 - 361.
- Nicholson, T., M. G. Bostock and J. F. Cassidy. 2005. "New constraints on subduction zone structure in northern Cascadia." *Geophysical Journal International* 161, 849 - 859.
- Pardo, M. and G. Suárez. 1995. "Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico, seismic and tectonic implications." *Journal of Geophysical Research* 100, 12,357 - 312,373, doi:10.1029/95JB00919.
- Peacock, S. M. 1990. "Fluid processes in subduction zones." *Science* 248(4953), doi:10.1126/science.248.4953.
- Peacock, S. M., N. I. Christensen, M. Bostock and P. Audet. 2011. "High pore pressures and porosity

- at 35 km depth in the Cascadia subduction zone.” *Geology* 39(5), 471 - 474.
- Pérez-Campos, X., Y. Kim, A. Husker, P. M. Davis, R. W. Clayton, A. Iglesias, J. F. Pacheco, S. K. Singh, V. C. Manea and V. Gurnis. 2008. Horizontal subduction and truncation of the Cocos Plate beneath central Mexico.” *Geophysical Research Letters* 35(L18303), doi:10.1029/2008GL035127.
- Poldervaart, A. 1955. “Chemistry of the earth’s crust.” *Special Paper - Geological Society of America* 62, 119 - 144.
- Poli, S. and M. W. Schmidt. 2002. “Petrology of subducted slabs.” *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 207-235, doi:10.1146/annurev.earth.30.091201.140550.
- Reymer, A. and G. Schubert. 1986. “Rapid growth of some major segments of continental crust.” *Geology* 14, 299-302.
- Rondenay, S., L. G. J. Montési and G. A. Abers. 2010. “New geophysical insight into the origin of the Denali volcanic gap.” *Geophysical Journal International* 182, 613 - 630, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04659.x.
- Schmeling, H. 1985. “Numerical models on the influence of partial melt on elastic, anelastic, and electric properties of rocks. Part I: elasticity and anelasticity.” *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 41, 34-57.
- Shelly, D. R., G. C. Beroza, S. Ide and S. Nakamura. 2006. “Low-frequency earthquakes in Shikoku, Japan, and their relationship to episodic tremor and slip.” *Nature* 442, 795 - 797.
- Shillington, D. J., H. J. A. Van Avendonk, W. S. Holbrook, P. B. Kelemen and M. J. Hornbach. 2004. “Composition and structure of the central Aleutian island arc from arc-parallel wideangle seismic data.” *Geochemistry Geophysics Geosystems* 5(10), doi:doi:10.1029/2004GC00715.
- Song, T. R. A., D. V. Helmberger, M. R. Brudzinski, R. W. Clayton, P. Davis, X. Pérez Campos and S. K. Singh. 2009. “Subducting slab ultra-slow velocity layer coincident with silent earthquake in southern Mexico.” *Science* 324, 502 - 506, doi:10.1126/science.1167595.
- Stachnik, J. C., G. A. Abers and D. H. Christensen. 2004. “Seismic attenuation and mantle wedge temperatures in the Alaska subduction zone.” *Journal of Geophysical Research*, 109(B10304), doi:10.1029/2004JB003018.
- Takahashi, N., S. Kodaira, Y. Tatsumi, Y. Kaneda and K. Suyehiro. 2008. “Structure and growth of the Izu-Bonin-Mariana arc crust: 1. Seismic constraint on crust and mantle structure of the Mariana arc-back-arc system.” *Journal of Geophysical Research* 113(B01104),

- doi:10.1029/2007JB005.
- Takei, Y. 2002. "Effect of pore geometry on Vp/Vs: from equilibrium geometry to crack." *Journal of Geophysical Research* 107(B2), doi:10.1029/2001JB000522.
- Tamura, Y., Y. Tatsumi, D. Zhao, Y. Kido and H. Shukuno. 2002. "Hot fingers in the mantle wedge: new insights into magma genesis in subduction zones." *Earth and Planetary Science Letters* 197, 105 - 116.
- Tatsumi, Y., H. Shukuno, K. Tani, N. Takahashi, S. Kodaira and T. Kogiso. 2008. "Structure and growth of the Izu-Bonin-Mariana arc crust: 2. Role of crust-mantle transformation and the transparent Moho in arc crust evolution." *Journal of Geophysical Research* 113, doi:10.1029/2007JB005.
- Tsuji, Y., J. Nakajima and A. Hasegawa. 2008. "Tomographic evidence for hydrated oceanic crust of the Pacific slab beneath northeastern Japan: implications for water transportation in subduction zones." *Geophysical Research Letters* 35, doi:10.1029/2008GL034461.
- van Hunen, J., A. P. van den Berg and N. J. Vlaar. 2004. "Various mechanisms to induce present-day shallow fl at subduction and implications for the younger Earth: A numerical parameter study." *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 146, 179 - 194, doi:10.1016/j.pepi.2003.07.027.
- Volcanoes World, "http://volcano.oregonstate.edu/"(검색일: 2014.6.19.)
- Wada, I. and K. Wang. 2009. "Common depth of slab-mantle decoupling: Reconciling diversity and uniformity of subduction zones." *Geochemistry Geophysics Geosystems* 10(Q10009), doi:10.1029/2009GC002570.
- Wagner, L. S., S. L. Beck and G. Zandt. 2005. "Upper mantle structure in the south central Chilean subduction zone (30 to 36S)." *Journal of Geophysical Research* 110(B01308), doi:10.1029/2004JB003238.
- Yuan, X., et al. 2000. "Subduction and collision processes in the Central Andes constrained by converted seismic phases." *Nature* 408, 958 - 961.
- Zandt, G. and C. J. Ammon. 1995. "Continental crust composition constrained by measurements of crustal Poisson's ratio." *Nature* 374, 152 - 154, doi:10.1038/374152a0.
- Zellmer, G. F. and C. Annen. 2008. "An introduction to magma dynamics." C. Annen and G. G. Zellmer, eds. Dynamics of crustal magma transfer, storage, and differentiation, 304. London: Geological Society, Special Publications.

Zhao, D., A. Hasegawa and S. Horiuchi. 1992. "Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan." *Journal of Geophysical Research* 97, 19,909 - 19,928, doi:10.1029/92JB00603.

■ 김영희

김영희는 현재 서울대학교 지구환경과학부 조교수로 재직 중이며, 주요 관심분야는 지진학, 지구물리, 지구 동역학으로 지체구조학적 활성 지역에서 일어나고 있는 물리적 프로세스를 지진파를 통해 연구하는 것이다.

(연락처: younghkim@snu.ac.kr, 02-880-6735)

■ 김은영

김은영은 현재 서울대학교 지구환경과학부 박사과정생이며, 주요 관심분야는 중앙해령 및 섭입대 지각구조의 지구물리 해석이다.

(연락처: brilliant@snu.ac.kr, 02-885-6130)

■ 논문 접수일 : 2014년 07월 29일 ■

■ 심사 완료일 : 2014년 09월 01일 ■

■ 게재 확정일 : 2014년 09월 11일 ■

Abstract

Seismological views into the roots of volcanic systems

Kim, YoungHee · Kim, Eunyoung

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

Fluids play a critical role in subduction zone processes and arc magmatism. At greater depths ($>40\text{km}$), H_2O and CO_2 released by metamorphic reactions in the subducting oceanic crust may alter the bulk composition in the overlying mantle wedge and trigger partial melting reactions. Seismic imaging provides an opportunity to image the fluid migration and to constrain seismic properties of the subducted oceanic crust and mantle wedge. The subducted oceanic crust is typically observed as a low velocity, and near its top interface the shear wave velocities are observed as 20~30 % reduced than (normal) lower crustal velocities. High P-to-S wave velocity ratio (V_p/V_s : exceeding 1.8) near the slab-mantle interface is currently considered due to a large concentration of hydrous minerals, high pore-fluid pressure, and/or seismic anisotropy. The mantle wedge is characterized by a low attenuation forearc, a zone of low velocities above the subducting slab, and a high attenuation zone beneath the volcanic arc. In this paper, we review fluid processes in subduction zones to understand their effects on arc magmatism, and then highlight previously published seismological observations constraining the structures of the oceanic crust, mantle wedge, and volcanic arc.

Key Words : volcanic arc, subduction, oceanic crust, mantle wedge, arc magmatism, seismic waves

