

## 고등학교 지구과학 교과서에 제시된 판 이동의 주된 원동력에 대한 고찰

전태환<sup>1</sup> · 서기원<sup>1,\*</sup> · 이규호<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 지구과학교육과, 151-742, 서울특별시 관악구 관악로 1

<sup>2</sup>경인교육대학교 과학교육과, 407-753, 인천광역시 계양구 계산로 62

### A Study on the Dominant Driving Force of Plate Movement presented in the High School Earth Science Textbooks

Taehwan Jeon<sup>1</sup>, Ki-Weon Seo<sup>1,\*</sup>, and Gyuho Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Science Education, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

<sup>2</sup>Department of Science Education, Gyeongin National University of Education, Incheon 407-753, Korea

**Abstract:** In the early model of plate tectonics, the plate was depicted as a passive raft floating on the convecting mantle and carried away by the mantle flow. At the same time, ridge push at spreading boundaries and drag force exerted by the mantle on the base of lithosphere were described as the dominant driving forces of plate movements. However, in recent studies of plate tectonics, it is generally accepted that the primary force driving plate motion is slab pull beneath subduction zones rather than other forces driven by mantle convection. The current view asserts that the density contrast between dense oceanic lithosphere and underlying asthenosphere is the substance of slab pull. The greater density of oceanic slab allows it to sink deeper into mantle at trenches by gravitational pull, which provides a dominant driving force for plate motion. Based on this plate tectonics development, this study investigated the contents of plate tectonics in high school Earth Science textbooks and how they have been depicted for the last few decades. Results showed that the early explanation of plate movement driven by mantle convection has been consistently highlighted in almost all high school textbooks since the 5th curriculum, whereas most introductory college textbooks rectified the early theory of plate movement and introduced a newly accepted theory in revised edition. Therefore, we suggest that the latest theory of plate tectonics be included in high school textbooks so that students get updated with recent understanding of it in a timely manner.

Keywords: plate movement, slab pull, textbook analysis

**요약:** 초기의 판 구조론에서 지각 판은 연약권 위에 떠서 맨틀의 움직임에 따라 움직이는 수동적인 모습으로 그려졌고, 자연히 해령에서 발산되는 힘이나 암석권 하부의 맨틀 견인력(drag force)이 판을 움직이는 주된 원동력으로 묘사되었다. 하지만 최근 여러 연구들은 판의 이동을 일으키는 원동력이 맨틀의 대류보다는 섭입대에서 침강하는 판이 만드는 섭입판 인력(slab pull)이라고 보고 있다. 최근 학계는 무거운 해양판과 주변 연약권의 밀도 차이가 섭입판 인력의 핵심이라고 설명한다. 해양판의 높은 밀도는 중력에 의해 판이 해구에서 맨틀 속으로 가라앉는 원인이 되며, 이것이 판을 움직이는 가장 큰 원동력을 발생시키는 것이다. 이러한 연구 결과들을 바탕으로, 본 연구는 고등학교 지구과학 교과서

\*Corresponding author: seokiweon@snu.ac.kr

Tel: +82-2-880-7779

Fax: +82-2-874-3289

의 관련 내용을 검토하고 최근 수십 년 간의 서술 경향을 분석하였다. 그 결과 5차 교육과정 이래로 지금까지 거의 대부분의 고등학교 교과서가 맨틀 대류를 판 이동의 주 원동력으로 서술하고 있다는 것을 확인하였으며, 이는 대학교 교재가 개정판을 통해 새로운 학설을 꾸준히 제시해온 것과 대조적인 모습이라 할 수 있다. 따라서 학생들에게 더욱 정확한 학술적 정보를 제공하기 위해 이와 같은 새로운 판 구조론 내용이 해당 교과서 관련 단원에 추가되어야 할 것이다.

주요어: 판 이동, 섭입판 인력, 교과서 분석

## 서론

교재는 학생, 교사와 함께 교육의 3요소 중 하나로 꼽히는 자료로서 정확한 내용과 교육적 목표를 갖고 구성되어야 한다. 그 중에서도 교과서는 어떠한 자료보다도 절대적인 위치를 차지하는 핵심 교재로서, 우리나라 교육 환경에서는 그 역할이 더욱 중요하게 강조되고 있다(Park and Cho, 1986; Angus, 2004). 특히 지구과학 과목은 지질, 대기, 해양, 천문 등 폭 넓고도 독립적인 분야들을 포함하고 있는데다, 관찰이나 실험이 다른 분야와 달리 시간, 공간적으로 규모가 크기 때문에 현장에서 재현하기가 쉽지가 않다(Ault, 1998; Duschl and Smith, 2001). 때문에 지구과학 과목 교육은 높은 비율로 교과서의 내용과 도해, 개념에 의존하게 되어 내용의 정확성은 그 중요도가 상대적으로 매우 높다고 할 수 있다.

한편 판 구조론은 4차 교육과정에서 처음 교과서 내용에 등장하였고 현재는 지구과학에서 가장 중요한 내용 중 하나로 자리잡았다. 20세기 초에 등장한 대륙 이동설은 당대의 패러다임에 정면으로 도전하여 맨틀 대류설, 해양저 확장설 등과 융합되면서 현재는 판 구조론이라는 거대한 학문 분야로 성장하였다. 이렇게 판 구조론은 20세기 전체에 걸쳐 술한 검증과 수정 과정을 거치며 초기에 제시된 가설에 비하여 많은 개선이 있었다. 특히 베게너의 대륙 이동설이 갖고 있던 가장 결정적인 문제점이었던 판 이동의 원동력 부분도 큰 보완과 발전이 있었는데, 현재 학계는 세부적인 부분에서 쟁점이 존재하긴 하지만 판 이동의 주된 원동력이 섭입대에서 침강하는 판의 인력이라고 보는 데에 이견이 없다(Forsyth and Uyeda, 1975; Carlson et al., 1983; Cox and Hart, 1986; Martin et al., 2008; Kreemer, 2009). 이와 같은 관점이 널리 받아들여진 약 30여 년의 기간 동안 우리나라는 5차에서 2009 개정 교육과정까지 5차례에 걸친 교육과정의 변화가 있었다. 나날이 발전하는 과학의 흐름이 학생들의 배우는 교과서에도 반영되어야 한다는 점은 지당하다 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 판 이동의 주된 원동력을 맨틀 대류보다 섭입대에서 침강하는 판의 인력으로 보게 된 몇 가지의 대표적인 증거들과 그에 따른 학계의 이론 발전 방향을 간략하게 요약하고, 5차 교육과정 하의 교과서부터 현재까지 지구과학 교과서에 기술된 판 이동의 주된 원동력에 대한 서술에 어떤 변화가 있었는지를 검토하였다. 이를 바탕으로 앞으로 만들어질 교과서에서 집필 방향에 대한 시사점과 개선 가능성을 찾아보고자 하였다.

## 이론적 배경

대륙 이동설(Wegener, 1912)이 제시된 이래로, 판을 움직이는 원동력은 학계의 끊임없는 관심사였다. 대륙 이동이 완전한 사실이라는 것이 널리 받아들여지기까지도 근 50여 년이 걸렸지만, 그 원동력을 제시하는 것은 그보다 더 큰 작업이었다. 그 중 Holmes (1929)는 지구 내부에 포함된 방사성 동위원소의 붕괴 열 에너지에 의해 맨틀이 대류하고, 이 흐름을 따라 지각이 이동한다고 설명하였다. 이때 맨틀의 상승이 일어나는 곳에서 해령이 만들어지고, 다른 대류 세포와 만나는 지점에서 침강하여 수렴대를 만든다고 보았다. 그의 학설은 해령 근처의 지자기 역전 관측들과(Vacquier and Affleck, 1941; Heirzler et al., 1966), 이어지는 해저 확장설(Hess, 1960; Dietz, 1961)로 뒷받침되었고, 이후 한동안 판의 이동은 맨틀의 대류가 일으키는 것으로 여겨졌다. 하지만 연약권의 상부 점성이 판을 움직일 만큼 충분하지가 않다는 것이 지적되면서, 연약권보다 밀도가 큰 판이 섭입대에서 가라앉으면서 판 전체를 움직인다는 설이 힘을 얻기 시작하였다(Forsyth and Uyeda, 1975; Harper, 1975; Solomon et al., 1975; Chase, 1978; Carlson et al., 1983; Cox and Hart, 1986; Conrad and Lithgow-Bertelloni, 2002; Martin et al., 2008; Kreemer, 2009). 기존의 판의 모습이 맨틀에 떠서 수동적으로 움직이던 존재로 묘사되었다면, 이 관점은 판 자체의 밀도에 의해 섭입대에서 가라앉음으로써

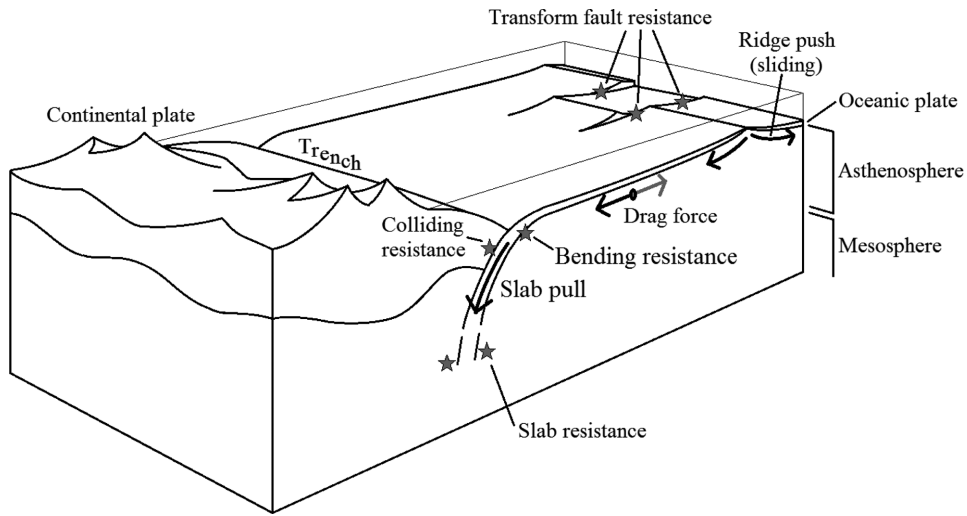


Fig. 1. Some forces acting on plates.

스스로 움직인다는 능동적인 모습으로 보고 있는 것이다. 특히 이 가설은 맨틀 대류만으로 설명되지 않았던 판 이동 모델의 여러 모순들을 해결함으로써 최근 학설의 주류가 되고 있다.

**판에 작용하는 힘들**

판의 이동에 관여하는 힘은 여러 가지가 있지만, 다음의 대표적인 몇 가지를 주로 언급하고자 한다 (Fig. 1). 덧붙여, 이 힘의 명칭들은 통일된 한글 용어가 없이 교재마다 다르게 사용하고 있어서 본 연구에서 임시로 명칭을 부여하여 사용하였다. 원어 명칭의 직역이 다소 매끄럽지 못하거나 그 의미상 힘의 속성을 온전히 반영하지 못한 경우가 있는데, 이를 조금 더 명확하게 전달하기 위하여 명칭을 새롭게 정하였다.

**1) 맨틀 견인력(drag force of mantle)**

이 힘은 판의 하부와 연약권의 상부 사이에 작용하는 힘이다. 맨틀 대류로 판이 움직인다는 가설의 관점에서 본다면 이 힘은 맨틀의 수평적인 흐름이 마찰로 인해 판을 끌어 움직이는 견인력으로 간주된다. 맨틀 대류가 판을 움직인다고 보는 초기의 설명에서는 이 힘이 가장 강력한 원동력으로 여겨졌다. 하지만 만약 맨틀 대류와 상관없이 판이 움직이는

것이라면, 이때는 맨틀과 판 사이의 마찰은 판의 이동에 저항력으로 작용하게 될 것이므로 이해의 관점이 뒤집히게 된다.

물리적으로 견인력의 크기는 접촉 면적이 넓고 거칠수록, 판과 연약권의 속도 차이가 클수록, 연약권의 점성이 클수록 커진다. 이렇듯 다양한 변수 때문에, 맨틀 견인력은 판의 각 부분 어디에나 작용하고 있지만 한 개의 힘으로 다루기보다 대륙판, 해양판, 또는 섭입된 판 등 위치에 따라 구분하는 경우가 많다.

**2) 해령 발산력(ridge push or gravitational sliding)<sup>1)</sup>**

벌어진 해령의 틈 아래에서 뜨겁고 낮은 밀도의 마그마가 상승하면 열 팽창으로 인해 연약권 상부와 암석권을 밀어 올리는데, 이 때문에 해령 인근은 심해져 평원보다 많게는 수 킬로미터까지 부풀게 된다 (McKenzie, 1967). 또한 해령에서 해양판이 멀어질수록 냉각으로 인해 밀도가 높아지고 하부의 연약권이 부착되어 두꺼워지므로, 오래 된 해양판은 연약권 속으로 조금씩 더 잠기게 된다. 이러한 양단의 효과는 해령과 심해져 평원 사이에 점진적인 암석권-연약권 경사면을 만들게 된다. 결국 해령 중심에서 만들어진 새로운 판은 이 경사면을 따라 완만하게 미끄러진다. 즉 중력에 의해 빙하가 경사를 따라 느리게 미끄러져 내려오는 것과 마찬가지로, 해령의 비탈을 따라

1) Cho et al. (2009)은 이를 ‘해령 밀침’으로 번역하였다. 하지만 본문에서 언급하였듯, 이 힘은 단순한 밀림으로 이해되기 보다는 중력에 의한 미끄러짐에 가까우므로, 이를 통합한 포괄적인 의미의 발산력이라는 말로 지칭하였다.

심해저 평원으로 해양판이 미끄러지는 힘이 바로 해령 발산력(ridge push)이다.

이 힘은 초기에 해령 끝을 수평하게 미는 힘으로 오해되었는데(이름에 남아있는 push가 그 흔적이다), 더욱 정확하게는 중력에 의해 경사면을 미끄러지는 힘(gravitational sliding)으로 이해되어야 한다. 따라서 이 힘은 해령 주변의 판 가장자리만이 아닌, 해령으로부터 시작된 경사가 충분히 완만해지는 지점까지 적지 않은 면적에 작용한다(Forsyth and Uyeda, 1975; Cox and Hart, 1986; Stern, 2007).

### 3) 섭입판 인력(slab pull)<sup>2)</sup>

앞에서 언급하였듯, 해령으로부터 만들어진 해양판은 시간에 따라 빠르게 냉각되어 밀도가 높아진다. 시간이 충분히 지나 해양판의 연령이 약 2천만년에서 4천만년 정도가 되면 그 밀도는 연약권의 밀도를 넘어서게 된다(Oxburgh and Parmentier, 1977; Hynes, 2005). 현재 지구에 분포한 해양판의 나이는 평균적으로 약 1억 년에 달하기 때문에(Parsons, 1982), 대부분의 해양판 영역은 밀도가 낮은 연약권 위에 떠 있지만 한, 중력적으로 불안정한 상태라고 할 수 있다. 하지만 판이 갑자기 조각나거나 휘어져서 가라앉지는 않으므로, 해양판은 다른 거대한 힘이 주어지기 전까지는 가라앉지 않는다. 시간이 더 흘러 해양판이 섭입대에 이르러 대륙판에 부딪치게 되면 그 조건이 만족되며, 아래로 휘어진 해양판의 끝은 이제 연약권보다 높은 밀도에 의해 자연스럽게 가라앉기 시작한다(Martin et al., 2008).

여기까지의 과정에서 해양판과 연약권의 밀도 차이는 그리 크지 않다. 하지만 섭입이 시작된 이후에는 온도 차이에 의해 밀도 차이도 더욱 심해진다. 섭입된 해양판도 맨틀로부터 열이 전도되어 가열되기는 하지만, 주변 맨틀의 온도 변화가 깊이에 따라 더욱 급격히 높아지는 양상을 보이므로 온도 차이는 깊게 들어갈수록 더욱 커진다. 이는 해양판이 충분히 가열되기 전까지는 온도 차에 의한 밀도 대비가 한동안 계속 증가한다는 것을 의미한다. 여기에 더해, 주변 압력에 의해 해양판의 주요 구성 암석인 현무암이 고밀도의 에클로자이트 상(eclogite facies)으로 변성되는 과정이 겹치면서 밀도 차는 더욱 심화된다

(Hacker, 2008). 판과 연약권의 밀도 차이는 약 200-300 km 깊이의 구간에서 최대가 되는데, 가라앉으려는 힘도 이에 비례하여 최대가 된다. 더욱 깊이 섭입하여 상대적으로 차가웠던 판의 온도가 맨틀의 온도와 동화되는 약 700~1000 km 깊이부터는 밀도 차이가 거의 없어진다(Cox and Hart, 1986).

섭입된 해양판이 가라앉으면 이어지는 해양판의 다음 부분들도 순차적으로 섭입대로 끌려들어온다. Fig. 1에서는 섭입된 부분에만 작용하는 것처럼 화살표가 표시하였으나, 극히 느린 속도에서는 판이 끊어지지 않고 응력에 의해 이 힘이 판에 수평하게 전달되므로, 결국 판 전체에 영향을 미치게 된다(Elsasser, 1969). 이와 같이 주변 맨틀과 판의 밀도 차이로 인해, 밀도가 큰 판이 중력에 의해 가라앉는 힘을 섭입판 인력(slab pull)이라고 부른다.

### 4) 저항력 (resistances)

이 외에 주로 마찰력의 형태로써 판의 이동에 저항력으로 작용하는 여러 가지 힘이 존재한다(Forsyth and Uyeda, 1975). 판의 속도가 현재 거의 등속이라는 점을 고려하면, 저항력의 총합은 원동력의 총합과 거의 같을 것이다.

우선, 변환단층 면을 중심으로 양쪽의 판이 반대로 움직이고 있으므로 여기에서 변환단층 저항력(transform fault resistance)이 발생한다. 변환단층에서 발생하는 무수한 천발 지진을 통해 판 사이의 상대적 움직임에 마찰이 작용하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 해양판이 섭입될 때 대륙판에 부딪친 접촉면에서도 깊이에 따라 발생하는 지진으로써 그 마찰을 짐작할 수 있다. 이 저항력을 충돌 저항력(colliding resistance)이라고 구분한다(Cox and Hart, 1986). 혹은 이 두 가지의 저항력과 여타 판 사이에 발생하는 마찰력을 모두 포함하여 판간 저항력(interplate resistance)이라고 통칭하기도 한다(Stern, 2007).

앞서 판이 섭입되는 과정에서 간략하게 언급하였듯이, 밀도가 높아진 오래된 판이 섭입되기 위해서는 대륙판과 같은 다른 판과의 충돌로 휘어질 에너지가 필요하다. 변형에 소모되는 힘 또한 판의 이동에 적지 않은 저항력으로 작용하는데, 이를 변형 저항력(bending resistance)이라고 한다(Bufferett and Rowley, 2006).

2) Cho et al. (2009)은 ‘섭입력’이라는 말로 포괄적으로 표현하거나, ‘섭입하는 판의 중력’과 같이 풀어서 설명하였다. 본 연구에서 정한 섭입판 인력이라는 용어는 당김(pull)이라는 원어의 뜻도 잘 반영하고 있고, 특히 밀도가 높은 물체가 중력에 의해 가라앉는 힘이므로 인력이라는 말의 보편적 용례와도 유사하다고 보았다.

변형 저항력과 함께 큰 비중을 차지하는 것은 깊이 섭입된 판(slab)이 연약권을 뚫고 그 아래의 중간권(mesosphere)에 도달할 때에 받는 섭입판 저항력(slab resistance)이 있다(Forsyth and Uyeda, 1975). 연약권에 비해 더욱 점성이 높아 고체에 가까운 물성을 보이는 중간권의 특성 때문에 섭입된 판의 선단은 중간권과 만나는 깊이에서 급격한 저항력을 경험하게 된다. 이 섭입판 저항력은 연약권 속으로 가라앉은 판의 끝부분 속도를 급격하게 늦추므로 뒤따르는 섭입을 방해하는 강한 저항력으로 작용한다(Cox and Hart, 1986; Stern, 2007).

### 수동적 판 모델과 능동적 판 모델

기존의 맨틀 대류로 움직이던 판은 마치 끓는 물에 뜬 판자 같은 형태로서, 모든 판의 움직임이 맨틀의 흐름으로만 결정되는 ‘뜨거운 지구’ 표면의 ‘수동적 판’ 모델이라 할 수 있다. 앞선 단락에서 자세히 설명하였듯이, 이 모델에서 설명하는 주된 판 이동 원동력은 열역학적으로 움직이는 맨틀과 판 하부의 접촉면에서 작용하는 맨틀 견인력이라 할 수 있다.

반면 판이 가라앉는 힘에 의해 판이 움직인다는 최근의 모델은 냉각으로 인해 밀도가 증가한 판이 자체적인 물성에 의해 중력에 반응하여 움직이는 것으로서, 대조적으로 표현하면 ‘식어가는 지구’ 위의 ‘능동적 판’ 모델이라 할 수 있다(Cox and Hart, 1986). 이 모델의 주된 원동력은 섭입판 인력이며, 약간의 해령 발산력이 거기에 더해진다. 이때 맨틀의 대류는 지구 내부의 열 에너지에 전적으로 의존하는 대류가 아니라, 판의 움직임으로 인해 유도되는 동역학적 대류의 역할이 강조된다는 것에 큰 차이점이 있다.

전자의 모델은 다음의 몇 가지 현상을 설명하지 못했는데, 후자의 모델은 거기에 직관적이고 설득력 있는 해설을 제시하였다.

우선 유체의 대류 세포는 자연적인 현상과 실험적인 재현 모두 그 수직적인 크기와 수평적인 크기가 거의 비슷한 규모로 형성된다(Chase, 1978; Davies, 1999). 이것이 곤장 문제시되는 부분이 바로 해령이다. 해령은 하나로 연결된 능선이 아니라 수 km 혹은 수십 km 길이의 단위 해령들이 변환단층을 끼고 불연속적으로 연결되어 있다. 각 단위 해령마다 순환 세포가 존재한다면 순환 세포의 수평 길이는 단위 해령의 길이와 일치할 것이고, 수직 깊이도 그러할

것이다. 즉 맨틀 깊은 곳에서 상승하는 단일의 거대한 대류 세포라는 전자의 설명과 달리 아주 얇은 깊이에서만 대류하는 형태가 되므로, 규모적인 모순점에 부딪힌다(Cox and Hart, 1986).

그에 반해 능동적 판 모델은 해구 근처에서 잡아당기는 힘이 더욱 강하기 때문에, 해령의 계단식 구조는 단순히 판의 양단에서 당겨져 발생한 균열이라고 설명한다. 이 인장력은 구면을 따라 왜곡되어 계단 형태의 균열을 만들게 되는 것이다(Cox and Hart, 1986). 이 관점에서 보면 해령에서 맨틀이 상승하는 것은 단지 갈라진 판의 틈새를 메우기 위한 국지적인 현상이 된다. 따라서 이 경우는 대류 규모의 모순이 발생하지 않는다.

두 번째 문제는 해령의 이동과 확장 현상이다. 해령의 위치나 크기는 늘 일정하지 않고 수백만 년 주기로 새로운 위치로 갑자기 이동하거나, 기존의 균열이 더욱 벌어지기도 한다는 사실이 알려져 있다(Cox and Hart, 1986). 이러한 변화를 대류 세포로 설명하려면 맨틀 상승류가 짧은 시간 안에 갑자기 옆으로 옮겨가거나 또는 기존의 대류 세포가 죽고 새로운 대류 세포가 생겨나는 모습을 가정해야 하는데, 수백만 년이란 시간 간격은 물리적으로 거의 불가능할 정도로 짧다. 반면 능동적 판 모델에서 해령은 단순히 해구에서 작용하는 섭입판 인력에 의해 잡아당겨져 벌어진 틈에 불과하기 때문에, 새로운 틈이 찢어지기 시작한 것이 해령의 이동이고, 기존의 틈이 더 벌어진 것이 해령의 확장으로 나타난다는 직관적인 설명을 제시한다.

세 번째 문제는 해령이 해구와 겹치게 되었을 때의 모습이다. 대부분이 북아메리카 판 아래로 섭입된 패럴론 판(Farallon plate)은 현재 후안 데 푸카 판(Juan de Fuca plate)과 코코스 판(Cocos plate) 등 태평양 동안의 중소 해양판들로 그 잔여 부분을 확인할 수 있다. 약 3천만 년 전에는 패럴론 판과 태평양 판이 캘리포니아 근해에 위치한 태평양-패럴론 해령(Pacific-Farallon ridge)을 경계로 하여 양쪽으로 발산하고 있었는데, 해령 중심이 동쪽으로 이동하다가 현재는 대부분의 패럴론 판은 물론, 태평양-패럴론 해령의 대부분도 캘리포니아 아래로 섭입되어 사라진 상태이다(Lonsdale, 2005).

수동적인 판 모델에 의하면 해령은 대류 세포의 상승 지점이고 해구는 대류 세포의 침강 지점이므로, 해구와 해령이 점점 가까워질수록 대류 세포의 모양

은 수평적으로 점점 작아진다. 이러한 기형적 형태는 앞서 첫 번째 예시에서 언급한 것처럼 대륙 세포의 규모적 모순에 부딪힌다. 이러한 대륙 세포가 여전히 활동한다고 가정하더라도, 수평적 규모가 작아질수록 상승류와 침강류는 점차 위치가 겹치므로 상쇄된다. 즉 맨틀 대류 세포에 의해 판이 움직인다면, 해구와 해령이 가까워질수록 대륙 세포가 약화 또는 소멸되기 때문에 판의 이동은 점차 느려지다가 정지하게 된다. 때문에 해령이 해구에 끌려들어가는 현상은 기존의 수동적 판 모델로는 설명되지 않던 대표적인 예시였다.

그에 반해 능동적 판 모델에서는 단지 해령에서 새로운 판을 만들어내며 벌어지는 속도보다 해구가 있는 동쪽으로 미끄러져 들어가는 속도가 더 빨랐기 때문이라고 설명한다. 가령 해령이 연간 10 mm의 판을 양 옆으로 만들어내고, 해구가 동쪽 방향으로 매년 30 mm의 판을 끌어들이는다면, 해령의 위치는 해구 방향으로 매년 20 mm의 상대속도로 이동하여 결국에는 해구로 들어가게 될 것이다. 능동적 판 모델에서는 해구 속으로 침강하는 판이 존재하는 이상 계속 후속 판을 끌어당기는 원동력을 제공하므로 해령이 해구로 사라지더라도 모순은 발생하지 않는다.

네 번째 예시는 가장 안정적인 판으로 불리는 남극 판의 경계 양상이다. 남극 판의 경계는 대부분 해

령과 변환단층으로, 판의 속도가 가장 느린 세계에서 가장 안정적인 판으로 꼽히고 있다. 수동적인 판 모델에 의하면 주변을 둘러싼 해령에서 상승이 있으므로 남극 대륙 중심으로 향하는 흐름이 판에 영향을 주고 있어야 하는데, 그에 따른 변형이나 이동에 관련된 증거가 없다. 하지만 후자인 능동적인 판 모델은 남극 판의 경계에 섭입대가 거의 없다는 점을 안정성의 첫 번째 요소로 꼽는다. 실제로 남극 판의 총 둘레는 약 40,000 km이지만, 그 중 해구는 남아메리카 판 아래로 섭입되는 좁은 영역에 약 600 km만 존재하고 있다(Bird, 2003). 또한 해령의 높이로부터 기인하는 위치 에너지인 해령 발산력은 그 힘이 크지 않을뿐더러, 판 반대편에 위치한 해령의 발산력과 반대 방향으로 작용하면 상쇄되는 경향이 있음을 들어 안정성에 힘을 실어주고 있다(Forsyth and Uyeda, 1975; Stern, 2007; Kreemer, 2009). 실제로 거의 원형에 가까운 남극 판에서 대부분의 해령은 발산 방향이 대칭적으로 상쇄되는 형태로 분포하고 있다. 이 때문에 남극 판을 둘러싼 해령의 총 길이는 약 20,700 km에 달하지만, 그 중 방향이 상쇄되는 것들을 제하고 나면 판 이동에 기여할 수 있는 해령은 모두 1,700 km에 불과하므로, 해령 발산력의 총합도 극히 작아진다(Cox and Hart, 1986; Bird, 2003).

**Table 1.** Absolute plate motion and boundary distribution of plates. The data of absolute motion refers to Kreemer (2009) and the classification of plate boundary is based on PB2002 model made by Bird (2003). The circumference of a plate (Circum.) is divided into divergent boundary (Div.), transform fault (Trans.), and convergent boundary (Conv.). The convergent boundary is further subdivided into simple colliding boundary without subducting slab (Col.) and subduction zone with the slab (Sub.)

Plate	Id.	Area (10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> )	Boundaries (km)					Abs. Motion (mm/yr)		
			Circum.	Div.	Trans.	Conv.		mean	min	max
						Col.	Sub.			
Africa	AF	61.3	41793.3	20313.9	14120.5	5024.0	1940.8	9.6	0.0	13.7
Antarctica	AN	60.9	40281.3	20725.2	16684.6	656.2	2215.3	1.6	0.0	2.9
Arabia	AR	5.0	10635.0	3640.5	2780.4	4214.1	0.0	27.6	17.6	37.3
Australia	AU	47.0	36893.1	15537.4	10017.5	4374.5	6963.7	66.4	43.8	71.5
Cocos	CO	2.9	8082.6	3910.4	1277.8	104.7	2789.7	62.6	31.2	89.0
Eurasia	EU	67.8	41567.0	17997.2	10686.6	12081.4	394.1	7.0	3.1	8.9
India	IN	11.9	17113.5	3953.6	4343.0	7400.2	1416.7	42.1	35.6	46.7
Nazca	NZ	15.9	20147.1	7609.9	5332.6	678.1	6526.5	40.9	29.1	47.3
North America	NA	75.9	34361.5	13797.8	10352.3	1983.9	934.6	20.6	7.1	24.3
Pacific	PA	103.3	48333.6	15136.2	13663.9	3386.0	13744.3	84.2	41.5	94.4
Philippine Sea	PS	5.5	11279.9	2197.7	1115.5	1627.2	3910.9	77.3	55.1	96.3
Scotia	SC	1.6	7723.8	1471.2	2961.8	2241.5	0.0	5.5	4.1	6.9
Somalia	SO	16.7	23444.2	13750.6	7543.2	2150.4	0.0	15.0	11.0	17.2
South America	SA	43.6	35538.7	11168.5	12621.2	4737.8	1983.1	20.1	11.4	22.6

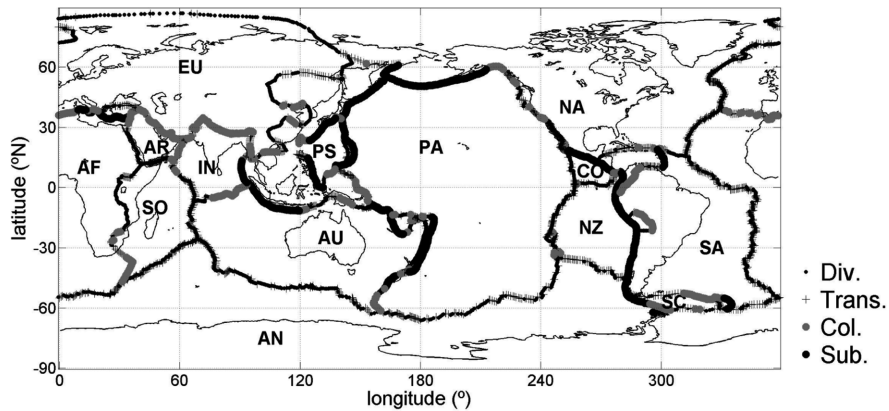


Fig. 2. Locations of major plates and their boundary types (Bird, 2003).

### 판의 절대 속도와 원동력과의 상관관계

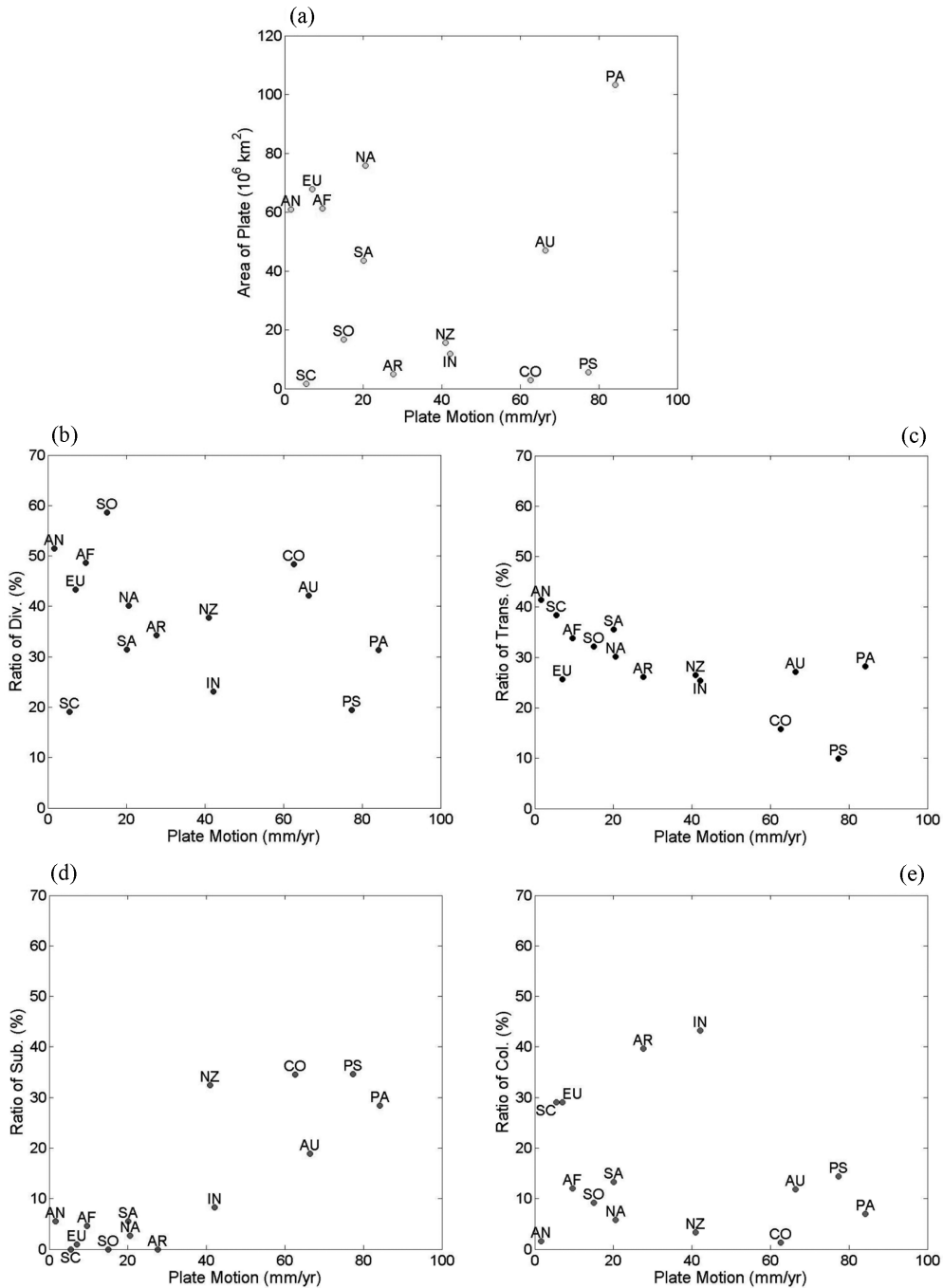
실제로 판의 이동이 어떠한 힘을 주된 원동력으로 하는지 확인하기 위해서, Forsyth and Uyeda(1975)는 판 이동 원동력과 직접적인 관련이 있는 판의 부속 조건과 판의 속도 사이의 상관관계(correlation)를 조사하였다. 판의 이동 방향에 대해서는 큰 논란이 없기 때문에, 이들은 속도의 크기, 즉 속력에 초점을 맞추어 판의 이동에 가장 큰 영향을 주는 힘을 추정하고자 하였다. 가령 해령 발산력이 판의 움직임에 미치는 영향이 크다면, 발산 경계가 둘레에서 차지하는 비율과 판의 속력 사이의 분포도는 양의 상관관계를 보일 것이다. 만약 맨틀 견인력이 판의 이동과 밀접한 관련이 있다면, 판의 면적이 속력에 대해 양의 상관관계를 보이게 될 것이다.

정확한 판의 속력이 이 분석의 핵심이 되기 때문에, 이들은 판의 절대 속도(absolute plate motion)로부터 속력을 얻어 분석을 시도하였다. 판의 절대 속도는 열점(hot spot)과 같은 지구 내부에 고정된 좌표계를 기준으로 서술하는 개념으로서, 인접 판과의 상대 속도로 판의 이동을 파악하던 초기의 방법에 비해 판들의 실제 이동 속도를 더욱 객관적으로 비교할 수 있게 해 준다. 특히 최근에는 발전된 기기와 기법들로 인해 더욱 정확한 절대 속도를 구할 수 있게 되었을 뿐만 아니라, 이전에는 구분되지 않았던 새로운 부속 판들의 경계까지도 더욱 세분되었다.

본 연구에서는 선행 연구(Forsyth and Uyeda, 1975)와 동일한 방식으로 상관관계를 재현하였다. 다만 해당 연구가 수행될 당시보다 더 정교해진 최근의 판 구조 모델(Bird, 2003)과 절대 속도(Kreemer, 2009)

자료에 근거하였다. Table 1은 주요 판의 경계와 절대 속도를 종합하여 나타낸 것이며, 경계의 종류와 위치는 Fig. 2에 표시하였다. 각 판의 총 둘레(Circum.)를 발산 경계(Div.), 변환 단층(Trans.), 수렴 경계(Conv.)로 분류하였고, 수렴 경계는 섭입판과 연결되어 있지 않은 단순 충돌 경계(Col.)와 침강하는 섭입판이 존재하는 섭입대(Sub.)로 더욱 세분되었다. 이는 섭입판 인력의 구조적 요건을 가장 완벽하게 갖추고 있는 섭입대를 다른 수렴 경계들과 구별하기 위한 것이다(Cox and Hart, 1986). 판의 절대 속도 자료 또한 속력만을 표시하였다. 판의 최대 부분 속력(max)과 최소 부분 속력(min)으로써 판의 부분별 속력 분포 범위를 짐작할 수 있는데, 본 연구의 상관관계 분석에서는 이를 판 전체 영역에 대해 평균한 평균 절대 속력(mean)을 주요 참조 값으로 사용하였다.

만약 맨틀 견인력이 주 원동력이고, 이에 영향을 미치는 기타 조건인 연약권의 점성과 속도 등이 전 지구적으로 비슷하다면, 판의 평균 절대 속력은 면적과 높은 상관성을 보여야 한다. 하지만 Figure 3a에서 나타나듯, 면적과 속력의 상관관계는 낮은 상관성을 보이고 있다. 이는 전 지구적으로 연약권의 물성이 각 판의 하부마다 극히 달라지는 복잡한 양상이거나, 아니면 상부 연약권의 점성이 너무나도 약하여 판의 이동에 맨틀의 견인력은 거의 영향을 주지 못한다는 결론을 시사한다(Forsyth and Uyeda, 1975; Harper, 1975; Solomon et al., 1975; Kreemer, 2009). 맨틀 상부의 조건을 다양하게 가정하여 비교한 모델 연구들은 상부 연약권의 점성이 판을 이끌기에는 부족하다는 점을 언급하며 맨틀 견인력의 가능성에 부



**Fig. 3.** Correlations between absolute motion and various factors of plates including (a) area, (b) the portion of divergent boundary, (c) the portion of transform fault, (d) the portion of subduction zone connected to sinking slab and (e) the portion of colliding boundary without subducting slab.

정적이다(Chase, 1978; Harper, 1978; Davies, 1999).

판의 총 경계 길이에서 발산 경계, 즉 해령이 차지하는 비율과 판의 속력 사이의 관계를 Fig. 3b에 나

타내었다. 해령의 비율은 판의 속력과 별다른 양의 상관관계를 나타내지 않음을 알 수 있다. 판마다 해령이 차지하는 비율은 20%에서 크게는 60%까지 비



교적 다양함에도 불구하고 판의 속력과 강한 연관이 없다는 것은 해령에서 미는 힘, 즉 해령 발산력이 판 이동의 주 동력원은 아님을 시사한다. 특히 Fig. 3b는 해령의 총 길이에 대해 상관관계를 얻은 것인데, 앞서 언급한 것처럼 해령 발산력이 상쇄되지 않는 유효 해령들의 길이를 적용하여도 뚜렷한 양의 상관관계는 얻을 수 없다(Forsyth and Uyeda, 1975).

판의 총 둘레에서 변환단층의 길이가 차지하는 비율과 판의 속력을 대비한 분포는 Figure 3c에 표시하였다. 각 판의 총 둘레에서 변환단층이 차지하는 비율은 대부분 30%에서 40% 정도의 비슷한 값을 보이고 있으며, 약간의 음의 상관관계를 보인다. 이는 변환단층에서 발생하는 마찰이 판의 이동에 저항력으로 작용하고 있음을 의미하나, 오차범위를 고려하면 기여도는 아주 작은 것으로 보고 있다(Forsyth and Uyeda, 1975; Cox and Hart, 1986).

반면, 판의 경계에서 섭입대, 즉 해구가 차지하는 비율과 판의 속력과의 관계는 뚜렷한 양의 상관관계를 얻는다(Fig. 3d). 속도가 빠른 판은 대부분 상당한 비율의 해구를 포함하고 있으며, 느린 판들은 해구가 적다. 이에 대비하여 침강하는 섭입판이 없거나 미약하다고 여겨지는 단순 충돌 경계의 비율은 판의 속력과 눈에 띄는 상관관계를 보이지 않는다는 점이 주목할 만하다(Fig. 3e). 이 결과는 해구에 섭입된 높은 밀도의 해양판이 가라앉으면서 발생하는 섭입판 인력이 후속 판 전체를 끌어당기는 가장 강력한 원동력임을 의미한다(Forsyth and Uyeda, 1975; Harper, 1975; Solomon et al., 1975; Cox and Hart, 1986; Kreemer, 2009).

이와 같은 상관관계 분석은 다른 후보 동력원들에 비해 섭입판 인력의 영향력을 직관적으로 보여줄 수 있는 방법으로서, 능동적 판 모델의 타당성을 언급하는 초기 연구들에서 다양하게 인용되었다. 게다가 더욱 정확해진 측정에 의거한 판 구조 연구는 이러한 초기의 추정을 확실시하는 판의 이동 성분들을 계속 제시하여 능동적인 판 모델을 지지할 굳건한 기반을 마련하였다(Conrad and Lithgow-Bertelloni, 2002; Stern, 2007). 앞선 단락에서 남극 판은 남아메리카 판 남단에 섭입되는 약 600 km의 작은 해구만 갖고 있음을 언급하였는데, 이 해구에서 발생하는 섭입판 인력에 의해 남극 판 전체가 이 지점으로 향하는 방향 성분에 의해 느린 속도로 회전하고 있음이 예견

및 관측되기도 하였다(Gordon et al., 1978; Kreemer, 2009). 또한 전 지구적인 판의 절대 속도 관측 결과가 섭입판 인력을 중심으로 해구 근처에 작용하는 힘들의 수치 모델 계산만으로도 유사하게 재현됨으로써 능동적 판 모델의 타당성을 재확인하였다(Conrad and Lithgow-Bertelloni, 2002). 이 외에도 최근 판 구조론의 연구들에서는 모두 판의 움직임이 일반적으로 섭입판 인력에 의해서 발생한다는 사실을 보편적으로 받아들이고 있다(Stern, 2007; Martin et al., 2008).

최근 발전된 능동적 판 모델은, 현재 등속운동 중인 지구의 판에 작용하는 모든 저항력과 원동력은 평형을 이루는 상태라고 보고 있다. 이에 따르면, 판을 구부리는 변형 저항력이 저항력 총합의 최소 15%에서 많게는 40%까지 평가되고 있으며, 판간 저항력과 섭입판 저항력 등 판의 모든 접촉면에 발생하는 저항력이 그 나머지를 차지하는 것으로 분석되고 있다(Buffett and Rowley, 2006; Stern, 2007). 한편 판을 움직이는 전체 원동력은 섭입판 인력을 중심으로 한 해구 근처의 인력들이 약 90%, 해령 경사면을 따라 미끄러지는 힘인 해령 발산력이 약 10%의 기여도를 차지하는 것으로 보고 있어서, 사실상 판의 이동에 맨틀 대류로부터 기인하는 힘이 미치는 영향은 거의 없다는 점을 확실히 하였다(Stern, 2007).

이와 같은 사실들로 인해 현재의 판 구조론은 기존의 수동적 판 모델보다 능동적 판 모델을 지지하고 있으며, 섭입대에서 밀도 차이에 의해 침강하는 해양판의 인력, 즉 섭입판 인력이 대부분을 원동력을 차지한다는 점에 이견이 없다. 즉, 맨틀의 대류 자체는 존재하지만 그 효과는 판의 이동에 거의 기여도가 없다는 점을 명확히 한 것이다. 맨틀의 열 에너지는 밀도 차이를 만들어 내어 섭입된 판이 상대적으로 가라앉게 하거나 갈라진 열곡을 따라 상승하게 되는 중요한 역할을 한다는 점은 분명하다. 하지만 뜨거운 맨틀이 그 자체로 대류하여 판을 움직일 정도는 아니라는 점에서, 맨틀 대류가 판의 이동을 이끌어낸다는 설명은 힘을 잃고 있는 것이다. 최근에는 오히려 판의 섭입, 발산, 이동 등의 움직임 자체가 맨틀을 뒤섞어 움직이게 하는 원동력이 된다는 정반대의 관점이 더욱 힘을 얻고 있다(Davies and Richards, 1992; Lithgow-Bertelloni and Richards, 1998; Davies, 1999).

## 교과서 내용 분석

### 고등학교 교과서 내용 분석

앞서 확인한 것과 같이, 이른바 능동적 판 모델은 1960년대 말에 논의가 시작되어 활발한 논의 끝에 21세기인 현재는 학계에 널리 받아들여진 상태이다. 이러한 흐름이 교과서에 반영되는 양상을 알아보기 위하여, 우선 우리나라 고등학교 지구과학 교과서를 분석하였다. 특히 당시의 연구 결과들이 어떻게 교과서에 잘 반영되고 있는지를 교차적으로 알아보고자 하였으므로, 현행 교과서만을 분석하는 데에 그치지 않고 5차 교육과정부터 현재에 이르는 교과서들을 검토하였다. 그 중 분석의 방향을 의미 있게 한정하기 위하여, 현행 교과서를 집필한 출판사들의 교과서들만을 택하였다. 현재 사용되는 지구과학 교과서는 총 2종으로, 이 출판사들은 5차 교육과정부터 현 시점까지 지속적으로 교과서를 집필하였기 때문에 지구과학 교육과정의 변화 추세를 알아보기에 적절하다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서 분석된 두 출판사의 교과서를 교육과정에 따라 기호를 부여하여 Table 2에 정리하였다.

제시된 Table 3은 해당 고등학교 지구과학 교과서들에서 서술된 판 이동의 원동력을 분류한 것이다. 이와 같은 분류 결과는 각각의 교과서에서 판 이동 원동력을 서술한 문장을 근거로 이루어졌다. 내용에서 맨틀 대류가 판을 움직인다고 설명한 경우는 C, 섭입판 인력이 판을 움직인다고 서술한 경우는 S라고 분류하였고, 모두 설명한 경우는 둘 다 표기하였다.

1980년대부터 시작된 5차 교육과정은 I, II 등으로 세분되지 않은 단일 지구과학 교과서를 사용하였다. 이 시기는 섭입판 인력을 중심으로 한 능동적 판 모델이 막 제안되어 본격적으로 논의되기 시작한 무렵이지

**Table 2.** Analyzed Earth Science textbooks in Korea and their identifiers. The publishers are indicated by capitals and the following number represents the cycle of curriculum. Suffix I and II are applied to distinguish the subdivided course, Earth Science I and II, instituted since the 6th curriculum

Publisher*	A		B	
5th curriculum	A5		B5	
6th curriculum	A6I	A6II	B6I	B6II
7th curriculum	A7I	A7II	B7I	B7II
2009 revision	A9I	A9II	B9I	B9II

\*A: Kyohaksa, B: Chunjae Education

**Table 3.** A summary of primary driving force of plate tectonics in analyzed textbooks for high school students. A capital “C” represents the traditional theory that tectonic plates are fully driven by thermal convection of mantle, and “S” denotes the latest theory which supports slab pull as the dominant driving force of plate motion

Publisher	Textbook	Main Driving Force
A	A5	C
	A6I	C
	A6II	C
	A7I	C
	A7II	S
	A9I	C
	A9II	C/S
B	B5	C
	B6I	C
	B6II	C
	B7I	C
	B7II	C
	B9I	C
	B9II	C

만 학계에서 공고한 위치를 점하지는 않은 때였다. 해당 시기의 집필된 A5, B5 교과서도 맨틀의 열적 대류를 판 이동의 주된 원동력으로 언급하는 것을 가장 최근의 학설이라 설명하고 있다. 교과서 A5에서 등장하는 다음의 서술은 당시 지배적인 관점이었던 수동적 판 모델에서 주장했던 대표적인 서술이다.

판이 맨틀의 연약권에서 일어나는 열대류의 방향에 따라 이동하며 판들의 경계에서 지진, 화산, 습곡, 단층 등 여러가지 지질 작용을 일으키고 있는 것이다(A5: p. 49).

교과서 B5 역시 이와 유사한 내용을 언급하고 있다.

판의 운동의 원동력은 맨틀 내에서 일어나고 있는 열대류에 있다고 생각되고 있다(B5: p. 40)

이를 보아 두 교과서 모두 당시의 최신 학설인 수동적 판 모델을 설명하고 있음을 확인할 수 있다. 특히 이보다 앞선 단원에 지구 내부 에너지를 선행하여 다루는데, 여기에서 언급되는 지각 열류량을 판 구조론 단원에서 원동력으로 연결지어 설명함으로써 맨틀 대류를 판 이동의 원동력으로 설명하기 위한 완결된 구조를 갖추었다고 할 수 있다.

90년대 중반부터 시작된 6차 교육과정부터는 지구과학 교과가 단일 교과서 체계에서 지구과학 I, II로 세분되었다. 지구과학 II의 내용은 지구과학 I에 비해

더욱 심화된 내용을 제공하고 있다는 것을 제외하면 교과서 서술의 큰 흐름은 거의 같다. 이 중 판 구조론의 내용은 지구과학 I, II 모두에 독립적인 단원으로 편성되어 비중 있게 다루어지고 있다. 이 시기 학계는 맨틀 대류를 원동력으로 한 수동적 판 모델의 문제점과 모순을 지적하며 능동적 판 모델의 타당성을 거듭 확인하던 시기였다. 하지만 분석된 6차 교육과정의 교과서 A6I, A6II, B6I, B6II 모두 맨틀 대류가 지각 운동 및 판 운동의 원동력이라 설명하고 있고, 내용의 구조와 세부적인 서술이 5차 교육과정의 교과서와도 크게 다르지 않은 모습을 보였다. 교과서 A6I와 A6II는 해당 단원의 핵심을 요약하는 단원 요약에서 판 구조론을 다음의 문장으로 정리하고 있다.

판 구조론이란 지구 표층부는 두께 약 100 km인 몇 개의 판으로 되어 있으며 이 판들이 맨틀의 대류에 의하여 움직이면 대륙이 이동할 뿐만 아니라(A6I: p. 63, A6II: p. 132).

교과서 B6I와 B6II의 단원 요약도 다음과 같이 동일한 문장으로 판 이동의 원동력을 서술하고 있다.

지구의 표층부는 몇 개의 판으로 이루어져 있으며, 맨틀 대류에 의한 판의 운동으로 지각 변동이 일어난다는 이론이 판 구조론이다(B6I: p. 64, B6II: p. 136).

이를 통해, 분석된 6차 교육과정의 교과서는 모두 수동적 판 모델의 설명을 채택하고 있음을 알 수 있다.

7차 교육과정은 2000년대 초반에 시작된 교육과정으로, 지구과학 I, II로 구분된 이전의 2원 체계를 그대로 따르지만 내용 면에서 상당한 변화가 있었다. 지구과학 I 교과서는 분량이 전체적으로 줄어들면서 판 구조론 단원은 이론이 정립되기까지의 변천 과정을 간략하게 요약하고 판의 경계와 특징을 서술하는 흐름으로 압축적으로 편성되어 있다. 21세기인 이 시점에는 이미 능동적 판 모델의 수치적, 현상적 증거들이 활발하게 수집되어 맨틀 대류로 판이 움직인다는 수동적 판 모델은 거의 폐기된 상태였다. 하지만 교과서 A7I는 맨틀 대류에 의해 판이 움직이는 것이 판 구조론의 핵심임을 여전히 내용에서 중요하게 언급하고 있다.

맨틀이 대류하면서 연약권 위의 판이 이동함에 따라 지각도 이동하여 여러 지질 현상이 일어난다(A7I: p. 83).

이에 더해 단원 요약에서는 “암권이 무른 연약권 위에 떠서 움직이면서”라는 표현을 썼는데, 이를 보아 수동적 판 모델의 전형적인 설명을 인용하고 있

음을 알 수 있다. 이는 교과서 B7I에서도 유사하게 등장하는 표현으로서, “물 위에 떠 있는 나무 도막처럼” 판이 움직인다는 비유를 신고 있다. 교과서 B7I도 본문 중에서 다음과 같이 판 이동의 원동력을 명시하고 있다.

지구의 표면부는 여러 개의 판으로 구성되어 있다. 이들은 맨틀 대류에 의해 그림 II-24와 같이 매년 수 cm씩 이동하면서(B7I: p. 86).

한편 지구과학 II 교과서는 이전 6차 교육과정의 형식을 상당 부분 유지하고 있는데, 대륙 이동설에서 해저 확장설을 거쳐 판 구조론에 이르는 역사적 흐름과 그에 따른 증거 제시의 구조가 이전 교육과정과 유사한 모습을 보였다. 교과서 B7II는 판 이동 원동력에 대한 자세한 언급은 피하였으나 연약권의 대류가 암석권을 이동시킨다는 수동적 판 모델의 관점에서 다음과 같이 간접적으로 언급하였다.

암석권 아래에서 대류 현상에 의해 암석권을 이동하게 하는 곳이 연약권이다(B7II: p. 78).

이에 대조적으로, 교과서 A7II는 판 구조론의 최근 연구 동향을 제시하면서 능동적 판 모델을 비중 있게 언급하고 있다. 특히 이 교과서는 맨틀 대류만 가지고 판 이동이 설명하기에 부족한 점이 많다는 맥락적 설명과 함께, “침강한 판 자체의 무게와 중력에 의한 힘”을 판을 움직이는 중요한 힘으로 설명하고 있다. 이는 앞선 내용에서 언급하였던 섭입판 인력의 핵심적 요소로, 다음의 정확한 설명으로 이어진다.

판의 밀도는 연약권보다 크기 때문에 침강하려는 경향이 있다. 따라서, 침강한 판은 그림 (나)와 같이 가라앉은 판의 무게에 의하여 판을 잡아당기려는 성질이 있다(A7II: p. 57).

섭입판 인력만이 아니라, 교과서 A7II는 해령 발산력에 대한 설명도 추가하고 있다.

또한, 해령은 높기 때문에 중력에 의하여 평탄해지려는 작용이 발생하며, 이 힘은 그림 (다)와 같이 해령에서 멀어지는 방향으로 판을 밀어 내리는 힘이 작용하기 때문에 판이 이동한다(A7II: p. 57).

이와 같은 서술은 앞선 단락에서 언급한 능동적 판 모델의 설명과 일치하는 것으로, 이를 보아 교과서 A7II는 현재의 학설을 반영하여 집필되었다는 것을 확인할 수 있다. 비록 단원 요약에서는 판 이동 원동력에 대한 명시적 서술이 포함되지는 않았으나,

분석된 교과서 중 A7II는 능동적 판 모델에 입각한 설명을 본문에서 주된 흐름으로 설명하고 있는 유일한 교과서였다.

2015년 현재 고등학교 지구과학 교과과정은 2009년 개정시기에 집필된 교과서들로 진행되고 있다. 이 중 지구과학 I 교과서인 A9I, B9I 교과서는 모두 맨틀 대류에 의해 판이 이동한다고 명시함으로써 학계에 널리 알려진 사실이 여전히 교과서 내용에 반영되지 못하고 있다는 것을 확인할 수 있다.

이들 판은 맨틀 대류에 의해 이동하면서 판의 경계부에서 지진과 화산 활동, 조산 운동 등의 지각 변동이 일어난다는 이론이다(A9I: p. 98).

지구의 온도는 중심부로 갈수록 높아지고 판 아래의 연약권은 아주 느린 속도로 대류하고 있으므로, 연약권 위에 있는 판도 서서히 움직이게 된다(B9I: p. 105).

특히 두 교과서는 모두 단원 요약에 해당하는 중단원 마무리의 요점 정리에서는 원동력을 서술하고 있지 않으나, 문제 형식으로 배운 내용을 재확인하는 문제 중에서 대륙이 이동하는 원동력을 묻고 있다. 단원 내에서 이에 해당하는 설명이 맨틀 대류 외에는 없으므로 이는 판 이동의 원동력이 맨틀 대류를 재확인하기 위한 의도로 보인다.

한편 같은 개정시기의 지구과학 II 교과서는 이전 7차 교육과정 시기에 서술 방향이 상이했던 것과 달리 두 종의 교과서에서 서술 방향이 다소 비슷해졌다. 우선 교과서 A9II는 이전 교육과정 교과서인 A7II에서와 같이 능동적 판 모델에 대한 서술이 본문에 등장한다.

발산 경계에서 해구 쪽으로 이동하는 해양판은 냉각되어 밀도가 증가하면서 중력에 의해 섭입대에서 맨틀 속으로 빠르게 섭입되기 때문이다(A9II: p. 75).

최근 연구에 의하면 상승하는 맨틀이 밀어주는 힘보다 섭입대에서 중력에 의해 침강하는 판의 힘이 더 강해 판이 이동하는 것으로 밝혀졌다(A9II: p. 76).

이와 동시에, 같은 단원에서 수동적 판 모델에 대한 서술도 함께 나타난다.

이들 판은 암석권 아래 100-400 km 사이에 있는 연약권의 맨틀 대류에 의해 이동하면서 판의 경계부에서 여러 가지 지각 변동을 일으킨다(A9II: p. 76).

본문 중에서는 이처럼 두 모델의 설명이 모두 등장하지만, 전체적인 서술의 흐름은 수동적 판 모델에

조금 더 비중이 맞추어져 있고 능동적 판 모델은 최신의 학설로서 부가적인 서술에 그치고 있다. 특히 단원의 핵심을 정리하는 중단원 마무리에서는 다음과 같이 수동적 판 모델의 설명만을 명시하고 있다.

지구의 암석권은 여러 개의 판으로 이루어져 있으며, 이들 판은 맨틀 대류에 의해 이동하며 판의 경계부에서 다양한 지각 변동을 일으킨다(A9II: p. 87).

이와 같이 본문에서는 두 학설을 모두 언급하고 있으나 전체적인 흐름에 비추어 보면 주된 관점은 이전 교과과정의 교과서인 A7II에 비해 맨틀의 대류를 판 이동의 원동력으로 보는 수동적 판 모델로 회귀한 것을 확인할 수 있다.

한편 교과서 B9II는 맨틀 대류설을 소개하고는 있으나 판 이동의 원동력이라는 직접적인 서술은 피하고 있다. 하지만 판의 경계를 설명하는 다음의 서술에서, 수동적 판 모델을 설명하고 있다는 것을 확인할 수 있다.

열곡대 아래에서 계속 맨틀의 상승류가 올라오면 맨틀의 대류로 말미암아 판이 갈라져 양측으로 확장되며(B9II: p. 79).

이와 같은 판 이동 원동력에 관한 교과서의 서술 방향을 종합하여 보면, 분석 대상인 지구과학 교과서 14종은 거의 대부분이 수동적 판 모델만을 비중 있게 언급하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 단 한 개의 교과서 A7II만이 섭입판 인력을 중심으로 한 능동적 판 모델을 비중 있게 설명하고 있었고, A9II는 둘 다 언급되고는 있었으나 서술의 중심이 수동적 판 모델에 조금 더 맞추어져 있었다(Table 3).

5차부터 2009년 개정시기까지의 지구과학 교육과정을 보면, 판 구조론의 내용과 그 발전 과정은 필수 내용으로 포함되어 있으나 그 원동력에 대한 서술은 명시적 진술을 찾아볼 수 없다. 시기별로 약간의 차이는 있으나 지구과학 교육과정의 요점은 변동대에서 지질 활동을 판 구조론과 연결시키는 것과, 판 구조론의 발전 과정을 과학사적 관점에서 서술하는 것을 공통적으로 언급해 왔다(Ministry of Education, 1988, 1992, 1997; Ministry of Education, Science and Technology, 2009). 대표적으로 6차 교육과정의 지구과학 II 해설은 후자의 교육 목표를 다음과 같이 명확하게 밝히고 있다(Ministry of Education, 1992).

특히, 대륙 이동설에서 판 구조론이 나오기까지의 과정은 과학 지식이 어떻게 축적되고 발전되는지를 잘 보여주는 과학사적으

로 중요한 주제이므로 이를 통해서 학생들에게 과학 지식은 계속 발전되고 변화함을 인식시키도록 한다(p. 184).

이에 따르면 최신의 학설을 소개하는 것은 교육과정과 상반되는 일이 아니며, 오히려 더욱 권장되어야 할 당위성을 갖게 된다. 그럼에도 대부분의 교과서들은 수동적 판 모델까지의 설명만을 5차 교육과정 이래로 거의 큰 변화 없이 계속 반복해 왔다는 것을 확인할 수 있었다.

수동적 판 모델에 대한 설명이 우리나라 지구과학 교과서의 대다수에서 여전히 비중 있게 다루어지는 추세는 곧 도입될 2015 개정시기 교육과정의 내용 체계에서도 여전히 유지되거나 더욱 심화될 것으로 보인다. 이전 교육과정은 판 이동의 원동력에 관한 서술을 포함하지는 않았는데, 2015 개정시기 교육과정은 지구과학 I에 포함될 핵심적 지식으로 “지구 내부 에너지의 순환이 판을 움직이는 원동력”이라고 명시하고 있다(Ministry of Education, 2015). 맨틀 대류와 플룸 구조론을 필수적으로 포함시키도록 교육과정 자체가 명시함으로써, 지구과학 I에서는 수동적 판 모델에 대한 서술 비중이 더욱 높아질 것으로 보인다. 지구과학 II의 경우는 원동력에 대한 명시적 서술이 내용 체계에 포함되어 있지는 않지만, 교과서들의 집필 추세를 보아 이전까지의 흐름을 유지할 가능성이 높아 보인다.

### 대학교 교재 내용 분석

고등학교 교과서의 서술 흐름과 대조해 보기 위하여, 대학교에서 지구과학 관련 수업에 널리 사용되고 있는 교재들 또한 추가적으로 살펴보았다. 이 교재들은 학부생을 대상으로 한 개론서에 해당하는 것들로 선정하였다. 이는 고등학교를 졸업한 학생들이 대학교에서 지구과학 관련 수업을 듣게 될 때에 곧장 접하게 될 교재일 뿐만 아니라 난이도 면에서도 고등학교 내용에 비해 크게 어렵지 않으므로, 교과수준의 연속성과 유사성이 높다고 판단했기 때문이다. 즉 인접한 교육과정의 내용 전개를 비교해 봄으로써 고등학교 지구과학 교과서에 대한 시사점을 찾을 수 있을 것이다.

분석된 대학 교재 3종 중에서 교재 D는 가장 이른 시기에 번역된 교재로, 고등학교 7차 교육과정 중에 출판된 대학 교재이다. 이 교재는 ‘판 구조 운동의 원인’이라는 소단락 내에서 “판의 운동이 전적으로 대류현상에 기인한다고 보기는 어렵다”는 말과 함께

**Table 4.** A summary of primary driving force of plate tectonics in analyzed textbooks for undergraduates. A capital “C” indicates the passive plate model fully driven by thermal convection of mantle, and “S” represents the active plate model mainly driven by slab pull

Textbook*	Main Driving Force
D	S
E	S
F	S

\*D: Park et al. (2003), E: Cho et al. (2007), F: Kim et al. (2009)

판을 움직이는 데에 작용하는 여러 가지 힘들을 소개하고 있다.

무거운 하강판은 자체의 하중으로 인해서 하강하는 것이며, 그 결과 전체 판을 끌어당기게 된다. 이것은 침대이불에 연결된 무거운 추를 달아놓은 것과 유사하다. (중략) 암석권과 연약권의 경계면은 확장경계로부터 멀어지면서 경사면을 이룬다. 사면의 경사도는 1/1000에 지나지 않으나 자체 하중으로 인해서 미끄러져 내려갈 수가 있다(D: p. 499).

이 묘사는 각각 섭입판 인력과 해령 발산력에 관한 설명임을 알 수 있다. 교재 C는 이들의 기여도에 대해 명확하게 밝히지는 못했지만 이들이 복합적으로 작용하여 판이 움직인다고 설명하는 한편, 이 분야의 연구가 지속적으로 이루어진다는 점을 강조하였다.

교재 E는 최근까지 진행되었던 과학자들의 가설과 반박, 보완을 상세하게 짚어가며 설명하고 있다는 특징이 있다. 교재 E는 본문 중에서 ‘판이 수동적인 모습으로 떠다니기만 하는가’라는 질문에 ‘아닌 것 같다’는 말로 자답한다.

이 답의 주요 증거는 이 장에서 이미 토의된 판운동의 속도이다. (중략) 빠르게 움직이는 판들은 대부분의 판 경계부를 따라 섭입되는 것을 알 수 있다. 반면 느리게 움직이는 판은 상당한 부분이 맨틀로 섭입되지 않는다(E: p. 48).

이 논의는 본 연구에서도 재현하였던 Forsyth and Uyeda (1975)의 연구 결과와도 같은 결론이다. 이 교재는 이어지는 단락에서 섭입판 인력을 포함한 판의 원동력을 설명한 다음, 후속 연구들로 더욱 확실한 증거가 수집될 수 있을 것이라는 여지를 남겼다.

교재 F 또한 판 구조론 단원을 이론의 발전 과정에 비추어 설명하여 교재 E와 유사한 구조를 취하고 있다. 이 교재는 섭입판 인력이 판을 움직이는 주된 추진력이라는 사실에 과학자들이 일반적으로 동의하

고 있다고 소개하면서 능동적 판 모델을 현재까지 가장 타당한 가설로 제시하고 있다. 이 교재는 맨틀의 대류가 판을 견인하는 것이 아니라는 점을 다음과 같이 분명하게 진술하고 있다.

대양저 산맥으로부터 멀어지는 암석권판의 수평이동이 맨틀의 상승을 유발하며, 반대의 경우는 성립하지 않는다. (중략) 판이 이동하면서 주변의 물질을 잡아끌어서 맨틀 대류를 유도한다 (F: p. 205).

이처럼 대학교 개론서들은 2000년대 초, 중반부터 이미 상당수가 능동적 판 모델을 받아들여 그에 대한 설명을 비중 있게 다루고 있음을 확인하였다. 또한 저자들은 판 구조론 분야의 발전이 빠르다는 점을 언급하면서, 최신의 결과를 소개하는 것에 적극적인 모습을 보였다. 이러한 대학 교재들은 대부분 외국의 원서를 번역한 것으로서, 새로운 사실을 추가한 개정판이 나올 때마다 번역도 빠른 시간 내에 이루어지므로 고등학교 교과서에 비해 새로운 정보들이 더욱 빠르고 유연하게 반영된 것으로 보인다.

## 결론 및 논의

판 구조론의 발전 과정은 초기의 직관적인 통찰부터 현재까지, 계속되는 반례와 증거 수집, 반박과 보완 등에 의해 기존의 패러다임을 깨뜨리고 새로운 패러다임을 제시하는 과학 발전의 전형적인 예시와 같았다(Martin et al., 2008). 하지만 역설적이게도, 맨틀 대류설과 같은 수동적 판 모델에 대한 개념이 그 자체로서 교과서 안의 또 다른 견고한 패러다임이 되어 현재까지도 사람들의 인식 속에 깊이 자리잡고 있는 상황이 되었다. 1960년대부터 시작된 끊임없는 논란과 검증의 결과, 맨틀 대류만으로 판의 움직임을 설명하기에는 무리가 있다는 결론이 학계에 널리 받아들여졌고, 덕분에 현재는 주변 연약권보다 밀도가 큰 해양판이 섭입대에서 가라앉는 힘인 섭입판 인력에 의해 판 이동이 일어나고 있다는 사실이 학계의 새로운 패러다임이 되었다. 이러한 설명은 초기의 가설이었던 ‘뜨거운 지구’에 얽혀서 떠다니는 ‘수동적인 판’의 모델을 완전히 뒤집는 과학적 결과물로서, 그 핵심은 ‘식어가는 지구’에서 높아진 밀도에 의해 가라앉는 ‘능동적인 판’인 것이다.

본 연구에서 확인하였듯이, 우리나라 고등학교 지구과학 I, II 교과서들은 아직도 수동적인 판 모델을

기반으로 판의 이동을 설명하고 있어서 교과서의 내용 수정이 필요함을 확인하였다. 비단 우리나라만이 아니라 외국의 관련 교재에서도 기존의 수동적 판 모델에 기반한 설명이 종종 등장하여 이를 바로잡기 위한 지적이 지금까지도 이어지고 있다. 소위 ‘교과서 안의 패러다임’으로 불리는 수동적 판 모델의 설명은 교사와 학생 모두에게 쉽게 다가갈 수는 있겠으나 현재의 발전된 이론을 전혀 반영하지 못하고 있는 상태임은 분명하다(Stern, 1998). 더욱이 우리나라 고등학교 교과서는 국가 공통교육과정에 기반하여 서술되기 때문에 과급력이 더욱 크다. 따라서 새로운 정보의 갱신과 내용의 정정 또한 그만큼 시급하다고 할 수 있다.

이에 비해 대학교에서 사용되는 개론서 수준의 지구과학 교재들은 개정판을 통해 내용을 지속적으로 갱신하는 모습을 보였다. 대학 교재들의 서술은 맨틀 대류에 관련된 오류들을 적절하게 해결하고 의미를 명확히 하는 한편, 기존까지의 연구 방향을 최신의 연구 결과와 함께 서술하여 학생들로 하여금 정확하고도 거시적인 연구 흐름을 파악하는 데에 좋은 길잡이가 되고 있다.

한정된 분량에서 폭넓은 내용을 다루어야 하는 고등학교 교과서는 분명 대학 교재만큼 자세한 설명을 신기에는 여러 가지 현실적 제약들이 많다. 하지만 현재 잘못되거나 반박된 사실들이 여전히 사실인 것처럼 학생들에게 전달되는 것은 정확한 과학적 사실을 포함해야 한다는 교과서의 본질을 벗어나는 일이다. 이를 바로잡기 위한 구체적인 내용 체계에 대한 연구는 물론, 교육과정의 개정을 위한 폭넓은 노력 또한 필요할 것이다. 학생들의 과학적 탐구 능력을 위한 기본적인 전제인 정확한 과학적 사실이 새로운 지구과학 교과서에 제시될 수 있기를 기대한다.

## References

- Angus, C.H., 2004, Is textbook obsolete in new education? A critical analysis on the value of textbook in an inquiry curriculum, with special reference to the new Primary General Studies Curriculum in Hong Kong. ERIC No. ED490764.
- Ault, C.A.Jr., 1998, Criteria of excellence for geological inquiry: The necessity of ambiguity. *Journal of Research in Science Teaching*, 35, 189-212.
- Bird, P., 2003, An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 4(3),

- 1027.
- Buffett, B.A., and Rowley, D.B., 2006, Plate bending at subduction zones: Consequences for the direction of plate motions. *Earth Planet Science Letters*, 245, 359-364.
- Carlson, R.L., Hilde, T.W.C., and Uyeda, S., 1983, The driving mechanism of plate tectonics: Relation to age of the lithosphere at trench. *Geophysical Research Letters*, 10, 297-300.
- Chase, G.C., 1978, Asthenospheric counterflow: A kinematic model. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 56, 1-18.
- Cho, S.J., Kwon, S.T., Kim, D.J., Kim, H.S., Do, S.J., Yoon, S.T., Lee, M.H., Lee, Y.J., Lee, J.H., and Cho, H.Y. (co-translated), 2009, *Understanding of the earth*. Sigma Press, Seoul, Korea, 710 p., Grotzinger, J., Jordan, T.H., Press, F., and Siever, R., 2007, *Understanding Earth*. W.H. Freeman, New York, 670 p. (in Korean)
- Conrad, C.P., and Lithgow-Bertelloni, C., 2002, How mantle slabs drive plate tectonics. *Science*, 298(5591), 207-209.
- Cox, A., and Hart, R.B., 1986, *Plate tectonics: How it works*. Blackwell Scientific Publications, 392 p.
- Davies, G.F., and Richards, M.A., 1992, Mantle convection. *Journal of Geology*, 100, 151-206.
- Davies, G.F., 1999, *Dynamic Earth: Plates, plumes and mantle convection*. Cambridge University Press, 472 p.
- Dietz, R.S., 1961, Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea floor. *Nature*, 190(4779), 854-857.
- Duschl, R.A., and Smith, M.J., 2001, Earth science. Subject-specific instructional methods and activities, 8, 267-288.
- Elsasser, W.M., 1969, Convection and stress propagation in the upper mantle. The application of modern physics to the earth and planetary interiors, 223-246, ed. Runcorn, S.K., Wiley-Interscience, New York.
- Forsyth, D., and Uyeda, S., 1975, On the relative importance of the driving forces of plate motion. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 43, 163-200.
- Gordon, R.G., Allan, C., and Harter, C.E., 1978, Absolute motion of an individual plate estimated from its ridge and trench boundaries. *Nature*, 274, 752-755.
- Hacker, B.R., 2008, H<sub>2</sub>O subduction beyond arcs. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9, Q03001, doi: 10.1029/2007GC001707.
- Harper, J.F., 1975, On the driving forces of plate tectonics. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 40, 465-474.
- Harper, J.F., 1978, Asthenosphere flow and plate motions. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 55, 87-110.
- Heirzler, J.R., Le Pichon, X., and Baron, J.G., 1966, Magnetic anomalies over the Reykjanes ridge. *Deep Sea Research*, 13, 427.
- Hess, H.H., 1960, Evolution of ocean basin. Report to Office of Naval Research, Contract No. 1858(10).
- Holmes, A., 1929, Radioactivity and earth movements. *Transactions Geological Society of Glasgow*, 18, 559-606.
- Hynes, A., 2005, Buoyancy of the oceanic lithosphere and subduction initiation. *International Geology Review*, 47, 938-951.
- Kim, K.R., Kim, D.H., Park, C.B., Jeon, J.G., and Cho, M.S. (co-translated), 2009, *Understanding of the earth system*. Pakhaksa, Seoul, Korea, 647 p., Lutgens, F.K., and Tarbuck, E.J., 2008, *Foundations of earth science*, 5th ed. Pearson/Prentice Hall, Upper Saddle River, U.S., 476 p. (in Korean)
- Kreemer, C., 2009, Absolute plate motions constrained by shear wave splitting orientations with implications for hot spot motions and mantle flow. *Journal of Geophysical Research*, 114, B10405, doi: 10.1029/2009JB006416.
- Lithgow-Bertelloni, C., and Richards, M.A., 1998, The dynamics of Cenozoic and Mesozoic plate motions. *Review of Geophysics*, 36, 27-78.
- Lonsdale, P., 2005, Creation of the Cocos and Nazca plates by fission of the Farallon plate. *Tectonophysics*, 404, 237-264.
- Martin, P., van Hunen, J., Parman, S., and Davidson, J., 2008, Why does plate tectonics occur only on Earth? *Physics Education*, 43(2), 144-150.
- McKenzie, D.P., 1967, Some remarks on heat flow and gravity anomalies. *Journal of Geophysical Research*, 72, 6261-6273.
- Ministry of Education, 1988, *High school curriculum*. Ministry of Education, Seoul, Korea, 350 p. (in Korean)
- Ministry of Education, 1992, *National curriculum guide of science*. Ministry of Education, Seoul, Korea, 194 p. (in Korean)
- Ministry of Education, 1997, *National curriculum guide of science*. Ministry of Education, Seoul, Korea, 244 p. (in Korean)
- Ministry of Education, 2015, *Science curriculum*. Ministry of Education, Seoul, Korea, 273 p. (in Korean)
- Ministry of Education, Science and Technology, 2009, *National curriculum guide of science*. Ministry of Education, Science and Technology, Seoul, Korea, 302 p. (in Korean)
- Oxburgh, E.R., and Parmentier, E.M., 1977, Compositional and density stratification in oceanic lithosphere-Causes and Consequences. *Journal of the Geological Society*, 133, 343-355.
- Park, J.-S., and Cho, H.-H., 1986, Identification of

- misconception of genetic concepts held by high school students and suggestions for teaching genetics. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*, 6, 35-42. (in Korean)
- Park, S.I., Son, Y.K., Ahn, J.H., Lee, D.J., Chang, T.W., Jeon, S.S., Jung, K.S., Cho, B.G., and Hwang, J. (co-translated), 2003, *The dynamic earth*. Sigma Press, Seoul, Korea, 646 p., Skinner, B.J., and Porter, S.C., 2000, *The dynamic earth: An introduction to physical geology*, 4th ed. Wiley, New York, 640 p. (in Korean)
- Parsons, B., 1982, Causes and consequences of the relation between area and age of the sea floor. *Journal of Geophysics Research*, 87, 289-302.
- Solomon, S.C., Sleep, N.H., and Richardson, R.M., 1975, On the forces driving plate tectonics: Inferences from absolute plate velocities and intraplate stress. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 42, 769-801.
- Stern, R.J., 1998, A subduction primer for instructors of introductory-Geology courses and authors of introductory-Geology textbooks. *Journal of Geoscience Education*, 46, 221-228.
- Stern, R.J., 2007, When and how did plate tectonics begin? Theoretical and empirical considerations. *Chinese Science Bulletin*, 52(3), 578-591.
- Vacquier, V., and Affleck, J., 1941, Computation of the depth of the bottom of the earth's magnetic crust. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 22, 446-450.
- Wegener, A., 1912, Die Herausbildung der Grossformen der Erdrinde (Kontinente und Ozeane), auf geophysikalischer Grundlage. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 63, 185-195, 253-256, 305-309.

---

Manuscript received: January 28, 2016

Revised manuscript received: February 24, 2016

Manuscript accepted: February 24, 2016