

ORIGINAL ARTICLE

대륙이동설을 통해 살펴본 새로운 과학이론의 제안전략과 확립과정

오준영^{1,2} · 이은주^{3*}

(¹서울대학교 교육연구소 교수, ²단국대학교 통합과학교육연구소 교수, ³단국대학교 과학교육과 강사)

Proposal Strategy and Establishment Process of a New Scientific Theory Examined through the Theory of Continental Drift

Jun-Young Oh^{1,2} · Eun-Ju Lee^{3*}

(¹Educational Research Institute of Seoul National University,

²Institute for Integrated Science Education of Dankook University, ³Dankook University)

ABSTRACT

The purpose of this study is to examine the scientific activities of scientists justifying Wegener's continental drift in the 20th century, which is explained as a revolutionary process in earth science, and methodologically analyze the strategy of proposing new scientific theories and how the process of theory selection is carried out. Previously, the Earth was a static model and only the vertical movement of the crust was considered. However, the theory of continental drift proposed horizontal movement of the crust as a dynamic model of the Earth, eliminating numerous problems. Therefore, this study seeks to explore the rational activities of numerous scientists until the current plate tectonics theory was formed. Additionally, the theory of continental drift is in conflict with the theory of Earth shrinkage, which is an existing static model. In other words, it deviates from the existing mechanistic world view by presenting a dynamic model in which the Earth is created and changes, as opposed to a static model in which the Earth is already completed, fixed, and unchanged. As a result, old geology was weakened and new geophysics was born. The theory of continental drift and continued exploration by subsequent generations of scholars brought about a revolution in earth science. This can be said to be a good subject of investigation as educational material for various methodologies for students in earth science education, and as educational material for changing students' worldview.

Key words : earth science revolution, Wegener's continental drift, land bridge theory, plate tectonics, geophysics, transition

I. 서론

미래 사회가 당면하게 될 문제들은 한 가지 방식으로 해결되는 경우는 적고 여러 학문적 요소들이 복합적으

로 섞여 있는 특징으로 볼 수 있다(성열관 외, 2017). 코로나19와 같은 전세계적인 팬데믹, 기후변화, 기후위기의 복잡성의 문제들을 해결하기 위해서 미래세대에게 융·복합적이고 창의적인 사고는 반드시 필요하다(교육

Received 30 November, 2023; Revised 24 December, 2023; Accepted 11 April, 2024

*Corresponding author: Eun-Ju Lee, Dankook University, 152, Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 16890, Korea

E-mail : ejlee145@dankook.ac.kr

This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea(NRF-2017S1A5A2A01023529).

© The Korean Society of Earth Sciences Education. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

부, 2022). 따라서 학생들은 이러한 융복합의 사고, 창의적인 사고의 예시를 명시적으로 접하고 배울 필요성이 있다.

학생들이 지구과학을 공부하게 되면서 가장 중요하게 학습하는 것 중 하나는 판구조론이다. 이때 학생들은 판구조론의 모태가 된 베게너(Alfred Wegener)의 대륙이동설 역시 함께 배우게 된다. 이에 대해 흔히 듣는 설명은, 베게너의 대륙이동설은 당시 대륙이동의 원동력을 제시하지 못해 받아들여지지 못했다는 것이다. 그러나 베게너의 대륙이동설은 베게너 당시에 새로운 과학이론의 제안전략으로서 창의성과 융복합적 사고가 사용된 좋은 예시이다. 따라서 과학교육에서는 베게너의 대륙이동설의 확립과정을 살펴볼 필요가 있다.

대륙이동설에서 시작하여 40년 후 판구조론의 성립에 이르기까지 지구과학 혁명 과정은 다른 과학혁명만큼 적지 않은 수의 학자에 의해 분석되어 왔다. 지질학 혁명 과정에서 초창기 과학자 사회가 보여준 격렬한 반대와 또 그에 대비되는 판구조론의 수용은 많은 과학철학자들과 과학사학자들에게 흥미로운 모습이다.

1920년도 그린란드를 연구하던 베게너는 “대륙과 해양의 기원”에서 하나의 개념을 발표했다. 이 개념은 베게너가 1912년에 처음 제안하였지만, 그때까지 누구도 주목하지 않았다. 지표면이 움직여서 새롭게 자리 잡을 수 있는 판들로 구성되어 있다는 것이다. 대륙이동설이라는 이름을 얻은 이 생각은 지구 내부의 역동적인 생성을 다루며, ‘판구조론’이라는 형태로 많은 현상을 설명할 수 있어 오늘날 큰 호응을 얻고 있다.

베게너의 생각은 아프리카와 남아메리카의 해안선이 눈에 띄게 서로 맞닿는다는 관찰에서 출발하였다. 하지만, 어떤 지질학자도 심지어 베게너 자신조차도 대륙의 일부를 움직이게 하는 원동력인 힘이 무엇인지는 상상하기 어려웠다. 오늘날에는 100여 년 전보다 더 많은 문제를 던지지만, 베게너의 개념이 근본적으로 타당하다는 데 누구도 의문을 제기하지 않는다. 1960년대 이래로 대륙이동은 모든 지질학자에게 정설이 되었으며 과학의 일반상식이 되었다. 무엇보다도 판구조론은 모든 역사적인 반증을 견디어냈고 이제는 흔들리지 않는 지구과학의 혁명으로 간주한다. 이러한 베게너의 대륙이동설은 논리적으로 그 답을 스스로 찾아나가기 위한 시도라고 할 수 있다. 베게너의 대륙이동설의 확립과정은 귀추법(Oh, 2014), 그리고 다양한 방법

론(Paixão, *et al.*, 2004)을 사용한다. 단순한 귀납이 아니라 창의성에 따른 가설제안의 과정이라는 것이다.

또한 대륙이동설은 기존의 정적모형인 뉴턴(Issac Newton)이 제안한 지구 수축설과 같음을 가진다. 즉 지구가 이미 완성되었으며 고정되고 변화가 없다고 생각하는 정적인 모형과는 반대적인, 생성되고 변화된다는 동적인 모형을 제시함으로써 뉴턴의 기계론적 세계관에서 벗어난다. 이러한 결과, 옛 지질학은 약화되고 새로운 지구물리학의 탄생을 가져왔다. 그 결과 베게너가 사용한 유비추리과정과 이론의 단순성은 지구과학의 혁명을 가져왔다. 따라서 이 연구에서는 이러한 과정을 살펴보고 지구과학교육에 시사점을 얻고자 한다.

구체적인 연구목적은 다음과 같다.

- 첫째, 대륙이동설의 확립과정은 세계관의 변화인가?
- 둘째, 대륙이동설의 확립과정은 과학 혁명적 인가?
- 셋째, 베게너의 대륙이동설의 제안과정에서 사용된 전략은 무엇인가?

II. 대륙이동설의 과학 철학적 위치 -고대그리스와 근대의 본질주의 및 현대의 비본질주의

전통적으로 서구의 과학적 이성 은 변화에서 불변을 찾으며, 다수에서 하나의 원형을 찾는다. 불완전한 것에서 완전을 찾으며, 구체적인 것에서 추상적인 것을 찾아내려 한다. 그리고 상대적인 것, 일시적인 것, 유한한 것에서부터 절대성, 영원성, 무한성을 찾고자 한다. 이는 현상적인 것에서 그 현상을 지배하는 원리적인 것을 찾으려는 형이상학적 작업이며 추상화 작업이다(오준영과 이은주, 2022).

마이어(Ernst Mayr)는 다윈이 자연에 관한 한 가지 사고방식을 다른 것으로 대치했다고 주장한다(Mayer, 1975). 그것은 ‘유형론적 사고(typological thinking)’로부터 ‘개체군적 사고(population thinking)’로의 전환이다. 마이어는 플라톤의 형상개념과 관련하여 유형론적 사고를 설명한다. 플라톤의 형상 혹은 이데아는 모든 사물의 본질을 말한다. 개별적인 대상보다는 영원한 형상, 혹은 원형이 있다는 것이다. 이러한 형상과 원형이 우리 지식의 대상이 되어야하며 그 대상은 실재하

고 불변하는 것이어야 한다. 이러한 지식의 모델이 바로 기하학이다. 기하학이 추구하는 대상은 바로 플라톤이 말하는 원형, 형상, 본질에 가깝기 때문이다.

르네상스를 거쳐 그리스의 고대 문헌이 재발견된 이후 코페르니쿠스, 갈릴레오, 데카르트, 뉴턴 등의 근대 과학자들은 각자 자신만의 방식으로 천문현상 또는 물리현상들을 설명했으나 공통적으로는 플라톤적 사고로서 현상 배후의 불변의 본질을 추구하는 사고를 추구했다. 폴란드의 코페르니쿠스(Nicolaus Copernicus)는 논의에만 몰두하던 스킨라학과와 학풍을 따르지 않고 천체관측과 궤도 계산을 위주로 천체를 회전을 연구했다. 독일의 케플러(Johannes Kepler) 역시 행성의 타원궤도, 면적 속도 보존, 행성의 태양으로부터의 거리와 그 주기의 관계 등의 천문 현상을 수학으로 설명했다. 이탈리아의 갈릴레오(Galileo Galilei)도 과학적 연구 방법으로서 보편적 수학 법칙과 경험적 사실의 수량적 분석을 확립했다. 또한 영국의 뉴턴(Issac Newton) 역시 질량을 가진 물체사이의 중력 끌림을 수식을 이용하여 기술하였고, 이 수식을 이용하여 행성 궤도의 타원형, 달의 세차운동, 혜성의 운동, 행성의 진로, 은하수의 생성 및 빛의 굴절까지 설명했다. 근대 과학자들은 그 본질적 원인을 수학적 법칙으로 표현할 수 있다고 믿은 것이다.

생물학에서 각 생물학적 종의 형상 혹은 이상적인 원형이 있다고 믿는 사람들은 우리는 “유형론자”라고 부른다. 이 유형이 바로 사물들의 자연종(natural kind)이다. 따라서 종이 점진적으로 진화한다는 생각은 유형론자들에게서는 논리적으로 불가능하다(정병훈, 2017, p.229).

이러한 이데아, 즉 형상 및 원형의 실재성을 거부하고 개별적 실재성을 인정한 철학자는 아리스토텔레스이다. 플라톤이 개별자의 현실세계와 이데아의 세계를 구별하여 두 세계를 주장한 데 비하여, 아리스토텔레스에게는 오직 우리 눈에 보이는 현실세계만 존재한다. 그에게는 오직 개별적인 사물들이 있을 뿐이다. 또 자연세계의 모든 사건들의 원인은 오직 다른 자연적 사건일 뿐이다. 플라톤적 학문의 이상화, 추상화, 법칙화, 정량화를 추구한다면, 아리스토텔레스적 학문은, 구체화, 다양화, 개성화, 정성화를 존중한다.

하지만 본질주의적 형상인 종의 불변이라는 고대그리스의 형상론적인 목적론적 사고 대신에 우연적인 요

소를 강조하는 다윈적 사고를 받아들여지게 되면 첫째는, 종의 변화가 개체군 내의 어떤 형질의 비율 변화를 통해서 발생한다는 관점과 둘째는 유기체의 개체군 특징을 통계적 특징에 의해 포착하려는 관점이 생긴다(Mayer, 1975).

이러한 비 본질주의적 사고는 곧 존재론적으로 우리와 독립적인 객체인 우주가 아니며, 우주와 마찬가지로 우리는 진화된 산물이고 또한 인식론적으로 그러한 우주는 우리라는 주체가 하나의 생명체인 진화된 마음을 통하여 바라본 것이기에 우주도 생명체로 융합하여 탐색한다고 할 수 있다. 결국 우리라는 주체와 우주라는 객체를 따로 분리하여 생각할 수 없다는 것을 통해 우리는 모두 다 같이 진화된 산물이라는 관점을 말하게 된다.

이전의 본질주의적 사고는 생각하는 주체와 우주라는 객체를 분리하여 생각해온 것이다. “나는 생각한다. 고로 존재한다.”라는 데카르트의 심신이원론이 바로 이것이다. 하지만 진화론적 존재론과 진화론적 인식론의 비 본질주의적 사고는 “나는 진화론적 산물로 존재한다. 고로 나는 우주를 진화론적 생명체로 생각한다.”라는 일원론적으로 통합해서 생각하는 것이라 할 수 있다.

유아시기에 모든 사물을 의인화하여 파악하려는 경향이 나타나는 것은 극히 자연스러운 것이다. 그런데 흥미로운 것은 인류의 집합적 지성이 성장해가는 과정에서도 비슷한 경향이 나타난다는 것이다. 초기의 인류는 종족이나 지역에 불문하고 거의 예외 없이 사물을 의인화해서 파악하려는 경향을 보여주고 있으며, 이것이 결국 초기 인류가 공통적으로 가졌던 신화적 세계관으로 이어져왔다.

아리스토텔레스는 존재를 두 가지 기본적 종류로 구분하였다(오준영, 2019). 그것은 (1) 변할 수 없는 존재, (2) 변할 수 있는 존재다. 첫 번째 존재 즉, 변할 수 없는 존재를 주제로 하는 연구가 신학이다. 왜냐하면 ‘영원하고 움직일 수 없는’ 존재는 오직 하나 있는데, 그것이 바로 신이기 때문이다. 반면에 두 번째 존재 변할 수 있는 존재에 관한 연구는 자연학, 즉 자연철학의 주제에 속한다. 아리스토텔레스는 우리 주변에서 볼 수 있는 것은 모두 일시적 존재뿐이라고 하였다.

변하지 않는 존재 양상이 있다는 신념은 고대 그리스의 형이상학에서 주류를 이루고 있는 전통의 특징이

다. 아리스토텔레스는 “참다운 존재”는 변화와 소멸의 지배를 받지 않는 것이라고 믿었던 스승 플라톤에게서 존재에 대한 이원론적 분류를 물려받았다. 플라톤에 따르면 이 세계는 모든 것이 생겨나고 또 없어져가고 어떤 것도 참으로 실재하지 않는다고 하였다. 영속(permanence)과 변화(change)라는 두 가지 기본적 존재양상에서 변화는 파생적이고 이차적이며 덜 실재적인 반면에 영속은 일차적이고 더 실재적이므로 변화보다 중요하다.

영속이 ‘보다 더 참답거나 더 좋은 존재 양상이고, 변화는 파생적이며 덜 참답다.’라는 고대 그리스 사람들의 생각은 최근의 형이상학이 보여주는 특징과는 전혀 다르다. 헤겔, 베르그송, 화이트헤드 같은 철학자들의 세계관에서는 변화, 과정, 전이가 일차적인 것으로 인정되고, 사물의 영속적이고 고정적인 면은 오히려 파생적이며 이차적이며 덜 근본적인 것으로 간주된다. 우리시대의 형이상학자들은 영속이 변화보다 우위에 있다는 일반적인 개념뿐만 아니라 실체라는 개별적 개념도 버리는 경향이 있다. 이 철학자들은 우주를 고정적이며 정적이며 지속적인 기본 단위들로 분해해서 보는 우주관은 실체라는 생각과 분리될 수 없다고 본다. 현대 과학은 근본적인 물리적 실체가 영구적인 물질의 정적인 조각이 아니라 전기적인 동요상태 즉 동적인 과정이라는 것을 발견하였다. 이 발견은 이 세계를 형성하고 있는 궁극적인 단위는 실체가 아니라 사건(event)이라고 보는 “과정 철학자들”의 확신을 강화시켰다. 그래서 이들은 사물이 아니라 사건이 참으로 실재한다고 주장한다.

고전적 형이상학으로부터 현대적 형이상학으로 넘어 오면서 영속의 우위에서 변화의 우위로 바뀌게 가장 큰 이유는, 생물학의 진화 개념은 이 과학자와 철학자로 하여금 성장과 발전의 개념에 입각하여 우주와 우주의 과정을 해석하도록 자극함으로써 유럽과 미국의 지적 구조를 흔들어 놓았기 때문이다. 따라서 진화개념은 변화의 흐름을 촉진시킨 커다란 요인이다(Brennan, 1967, p.226).

영원불변한 아리스토텔레스의 분류학, 근대의 뉴턴 과학 역시 변화하지 않는 진리를 말한다. 진화론은 이러한 이상 세계의 완전함과 영원함의 허구성을 밝히고자 한 매우 급진적인 사상이었다.

다윈의 관점은 기독교 신학, 특히 윌리엄 페일리

(William Paley)의 영향을 받았다. 페일리는 우리 주위에서 확인될 수 있는 명백한 질서와 목적은 시계의 정교한 작동이 시계의 제작자를 암시하듯이 창조자를 말해준다고 생각하였다. 하지만 다윈은 신의 목적이 아니라 자연선택과 관련하여 생물학적 세계의 질서를 설명하였다. 신의 의식적인 창조를 맹목적이고, 무의식적이며, 기계적인 과정으로 대신한다고 보았다. **목적이 우연으로 바뀌었다고 말할 수 있다(Trigg, 1988, p.181).**

다윈의 이론 중 두 개의 핵심요소는 실용주의적 자연주의자들의 자연개념과 인간생활이라는 개념에 중대한 영향을 끼쳤다. 그 첫 번째는 자연의 형태나 종은 변화한다는 것이었고, 그것은 자연 안에 절대 불변한다는 주장에 대한 부정이었다. 두 번째는 다양한 종의 생존과 관련이 있는 것이다. 어떤 종의 생존은 수백만의 자손을 산출함으로써 발생하는 것이지만 이렇게 번식된 자손들이 모두 살아남는 것이 아니다. 한 종은 다른 종을 먹이로 삼아 생존하고, 변종이 생겨나고, 환경조건이 변화하고, 또 어떤 종은 사멸한다. 따라서 다윈의 관점은 목적론적이라고 불리는 자연관, 즉 각각의 자연 종 또는 자연 전체는 어떤 목적을 갖고 있다는 관점에 회의를 불러왔다.

또한 양자역학 이론이 정비되면서 결정론적이고 고전 물리학적인 세계상이 그대로 성립하지 않음을 우리는 받아들여지게 되었다. 양자역학 이론에 따르면 미시적인 세계의 법칙에는 항상 확률이 관련되어 있다. 이는 고전물리학의 세계상에 ‘엄밀한 인과율이 지배하는 우주’라는 관념을 근본부터 변화시킨 것이다. 관찰자는 객관을 전제로 한 외부 관찰자가 아니라, 개입을 전제로 한 내부 관찰자일 수밖에 없다.

우리는 이제 자연에는 오로지 한 번에 확정된 질서가 있는 것이 아니라 변화의 역사가 있다는 사실을 알게 되었다. 그런데 누구도 다윈만큼 그렇게 철저하게 조화로운 세계라는 관념을 파괴한 사람은 없었다. 이제 자연은 책도 아니고 인간을 위해 만들어진 것도 아니다. 현미경으로 새롭게 열린 현실은 동시대인들의 마음을 어지럽혔고 인간중심의 세계관을 요동치게 했다.

20세기 초 베게너의 대륙이 이동한다는 가설은 아직 남아있는 조화로운 세계라는 관념의 잔재로 인해 비판자들의 감정을 자극했다.

하지만 1960년대에서 1980년대를 거치면서 학자들은 지구상에 떠다니는 일곱 개의 대륙판 및 그 외에 또

다른 이동을 일으키는 몇 개의 작은 판들을 마침내 확인하였다. 이러한 판구조론은 이 세상에는 결코 조화로운 세계인 고정된 땅이 아니라는 것을 알려주었다.

결정론에서 벗어나게 되면 ‘가능성’, ‘우연’과 같은 의인화 된 개념이 필요하다(오준영과 이은주, 2022). 이런 점에서 베게너의 대륙이동설은 지구과학분야에서 다윈의 진화론과 마찬가지로 고대 그리스와 근대의 본질주의를 벗어나 현대 과학적관점인 비본질주의의 장을 여는데 지대한 공헌을 했다고 생각할 수 있다.

Ⅲ. 대륙이동설의 확립과정 - 지구과학혁명 과정

1960년대 판구조론이 전반적으로 수용된 것은 지구 과학 분야에서 일어난 혁명이라고 한다. 지구물리학에서 혁명이 일어났다. 동시에 새로운 증거가 계속 발견되면서 이론적 혁명을 촉진하면서 새 이론을 수용하기를 반대하던 옛 지질학계 영향력은 비로소 약화되었다(Bowler, & Morus, 2005, p.251).

이러한 일련의 과학혁명 과정은, 대륙이동설 - 맨틀 대류설 - 해저확장설 - 판구조론 까지 여러 가지 학설들이 오고 가면서 현재의 지구물리학적 이론들이 기정사실화가 되었다고 할 수 있다. 따라서 이 연구는 이러한 과정을 Kuhn의 과학혁명 과정에 적용 탐색하는 것이다.

1. 베게너의 대륙이동설에 의한 지구과학혁명의 시작

가. 구운 사과이론 패러다임

대륙이 움직인다는 사실은 모두가 인정하였지만, 수평이 아니라 아래위로 움직인다는 것이었다. 그 중에서도 쥐스(Eduard Suess, 1831-1914)가 주장했던 구운 사과 이론에 따르면, 바다와 산은 지구가 냉각되면서 마치 구운 사과처럼 주름이 생겨서 만들어 졌다는 것이다. 지구가 냉각되고 수축됨에 따라 지구 내부에 생성된 공간으로 커다란 땅 덩어리가 가라앉으며 서로 연결되어 있던 땅덩어리 사이에 새로운 해저분지가 형성되었다는 것이다(Gribbin, 2003).

나. 변칙 증가의 문제점으로 구운 사과이론 패러다임의 위기

쥐스(Eduard Suess)의 이론이 옳다면, 산악지방은 지구상에 균일하게 분포하여야하고 그 생성연대도 대체로 동일해야한다. 물론 실제로 그렇지 않다. 이제 새로운 이론이 등장할 시기가 온 것이다. 그 당시 아인슈타인의 상대성이론에 의한, 기존의 뉴턴역학에서 제시한 것처럼 우주가 고정되어있지 않다는 새로운 패러다임의 변화가 다가오고 있었다.

다. 새로운 패러다임의 제안과 기존 패러다임의 위기고조

1920년대에 나온 자신의 책에서 베게너는 학문을 넘나드는 학제간의 연구자의 모습을 보여준다. 지구의 역사를 이해하기 위해서는 한 인물 안에 지질학자, 고고학자, 기상학자, 대기물리학자, 그밖에 더 많은 모습이 있어야 했던 것이다. 이 모든 압력 속에서도 판들의 운동은 너무 느려서 베게너는 그의 살아생전에 이를 측정 할 수 없었다.

코페르니쿠스의 사례에서 보듯이 우주의 새로운 그림을 확인하기 위해서는 과학 측량 기술이 충분히 발전하기까지는 시간이 필요하다는 것이다. 그 사이에 지구에 대한 새로운 그림은 늦어도 1957년부터 1958년까지 있었던 국제 지구 관측년이후에 실증적으로 확인되었다. 하지만 베게너는 이 부족한 증거 때문에 동료들로 부터 인정을 받는데 어려움을 겪었다.

무엇보다도 베게너의 학문적 배경도 어려움을 가중시켰다. 당시 지질학자들은 지형의 형태와 위치를 다루었지만, 물리학자인 베게너는 역학으로 논증하려했다. 베게너는 아프리카와 남아메리카의 해안선 사이의 명백한 “맞춤”이 마치 대서양이 대륙이 분리되면서 생성된 것처럼 보이게 한다는 사실에 주목하였다.

베게너는 1910년 세계지도를 조사하면서 본격적으로 대륙 이동을 생각했다. 그리고 그 아이디어를 공개적으로 제안하기에 충분한 데이터를 수집하는데 많은 시간이 걸렸다. 베게너의 증거는 대륙의 모양이 일치하는 것을 훨씬 뛰어넘었다. 그는 발견된 특이한 화석들 사이의 유사점을 제안했다. 남아메리카와 아프리카의 특정 지역에서는 이 두 대륙이 한 번에 연결되었음을 나타낸다(Fig. 1).

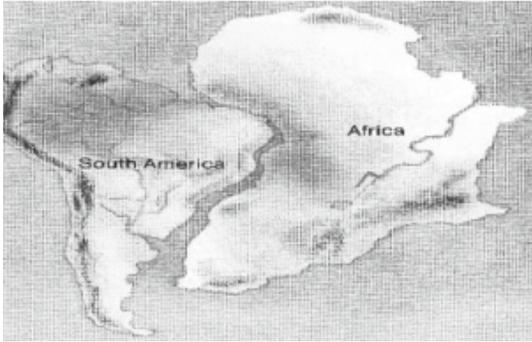


Fig. 1. An apparent ‘fit’ between the coastlines of Africa and South America (Oh, 2014)

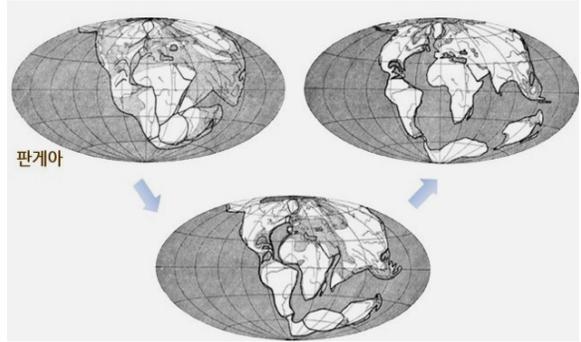


Fig. 2. The formation process of the current continent from the supercontinent Pangea (Edunet, 2015)

베게너는 ‘모든 대륙, 초대륙’이라는 의미의 판게아(Pangaea)를 제안하였다. 그리고 판게아가 갈라지기 시작하여 현재와 같은 모습의 대륙 분포에 이르는 과정을 시대별 고지리도로 보여주었다(Fig. 2). 5억 4천만 년 전에 시작된 고생대 말과 중생대 전기에는, 여러 개의 작은 대륙들이 또 다른 초대륙 판게아(Pangaea)를 형성한다. 초대륙 로디니아의 분리와 태평양의 확장은 필연적으로 대륙의 분포를 바꾸어 곤드와나 대륙이 형성된다. 곤드와나 대륙은 남아메리카, 아프리카, 마다가스카르, 인도, 오스트레일리아, 그리고 남극대륙을 합친 대륙을 말한다.

라. 동일한 사실이 어떻게 다른 가설(예: 대륙 이동설 및 육교설)로 설명: 단순성

1915년에 베게너의 가설이 아주 그럴듯하다고 생각

한 과학자는 거의 없었다. 아무도 대륙이 어떻게 대륙을 지구의 표면에서 이동할 수 있는지 설명할 적절한 물리적인 원동력을 제공할 수 없었기 때문이다.

그 당시 주도적인 수축설에 의하여 대부분의 과학자들은 초대륙의 일부가 함몰되거나 침강하면서 대서양과 인도양이 형성되었기 때문에 대륙이 분리되었다고 생각했다. 즉 베게너처럼 초대륙의 존재를 주장하는 과학자들도 있었지만, 그들은 초대륙의 일부가 함몰되거나 침강하면서 대서양과 인도양이 형성되었기 때문에 대륙이 분리되었다고 생각했다. 또한 일부 대륙을 연결하는 대륙 다리가 있어 식물과 동물이 한 장소에서 다른 장소로 쉽게 이동할 수 있었다. 이것은 동일한 사실이 어떻게 다른 가설(예: 대륙 이동설 및 육교설)로 이어질 수 있는지 보여준다(Fig. 3).

동등한 설명을 가진 가설의 개념적 복잡성 수준의 문

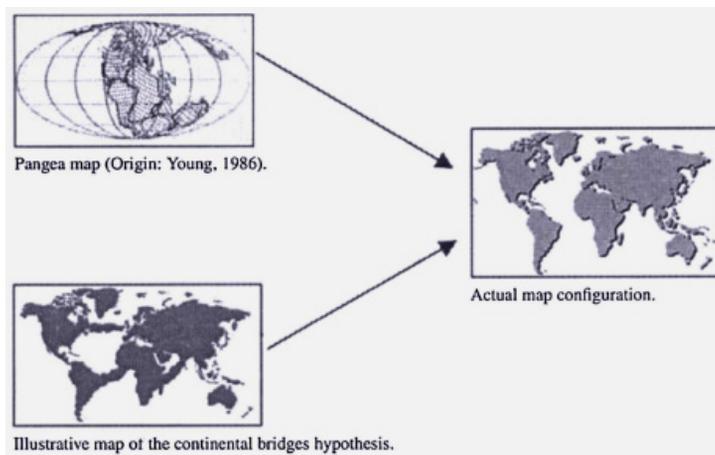


Fig. 3. Different hypotheses for the same facts (continental drift theory and land bridge theory) (Paixão et al. 2004, p. 206)

제를 단순성으로의 처리는 Ockham의 면도날에 의해 크게 영향을 받는다. 단순성은 경쟁 설명 가설을 구별할 때 매우 관련이 있을 수 있다"(Magnani 2001, p. 26).

이 두 경쟁 가설은 보조 가설에 추가하여 동일한 예측을 일으킬 수 있다. 그러나 이것이 두 가설의 근본적인 차이이다. 이 정도 규모의 대륙교는 존재하지 않았고 계속해서 추가되는 대륙교의 숫자가 있었으나, 베게너의 이동설(Mobilism)의 보조 가설은 육교설의 가설보다 간단하다. 따라서 이동설은 육교설보다 더 그럴듯한 설명이다(Oh, 2014). 과거의 동식물 분포를 설명하는 데 있어 베게너의 대륙이동설이 적어도 육교설보다는 보다 합리적이었고, 홈스(Holmes) 등과 같은 학문 후속세대에게는 베게너의 대륙이동설이 매력이었다.

마. 새로운 이론의 문제점으로 인해, 혁명의 과도기 단계 “대륙이 이동한다면 그럼 대륙이 이동하는 원동력은 무엇인가?”

베게너는 처음에 “달에 의한 조석의 영향에 의해 대륙들이 서쪽으로 움직일 수 있다”고 제안했지만, 이내 “조석이 대륙을 이동시킬 만큼 크다면 아마도 몇 년 뒤에는 지구의 자전이 멈출 것이다”라는 반론에 부딪혔다. 다시 베게너는 “쇄빙선이 얼음을 부수며 나아가는 것처럼, 크고 단단한 대륙이 해양지각을 부수며 움직일 수 있다”고 제안했지만, 또다시 “지구의 내부물질이 고체인데 어떻게 대륙이 움직일 수 있느냐”는 반론에 부딪혔다. 대륙의 움직임에 의해 시마층인 해양지각이 부서지거나 변형을 받은 증거들은 관찰되지 않았다. 그는 대륙이동에 알맞은 증거만을 수집한 인상이 짙으며, 대륙을 분리시키는 힘의 근원을 밝히는 데 어려움이 있었다.

베게너의 이론을 비판하는 이들은 해안선이 서로 들어맞는 조각 퍼즐처럼 보인다는 데에는 동의했으나, 우연의 일치일 뿐이라고 하였다. 대륙의 이동을 일으키는 힘에 대한 그의 가정은 믿기 어려웠다(Shubin, 2013). 베게너는 대륙이 대양의 시마층인 해저 지각을 헤치고 수평으로 이동한다고 설명하였으나 당시의 대부분의 학자들은 해저 지각이 단단하고 유연성이 없기 때문에 베게너의 이론이 역학적으로 옳지 않다고 반박했다.

베게너는 달이나 태양에 의한 조석력(潮汐力, tidal

force)을 제시했다. 간단하게 말해 조석력 때문에 지각도 이동력을 받는다는 것이다. 그런데 지각부분에 작용하는 조석력은 그 힘이 매우 작은 것은 물론 힘의 방향이 조석의 주기(週期)와 같은 주기로 변화하기 때문에 한 방향만의 힘이 되기 어렵다. 즉 조석운동으로 지각을 당기고 서쪽으로 움직이게 한다는 것은 있을 수 없다는 지적이다. 영국의 지구물리학자 제프리즈 경은 대륙을 움직일 정도의 조석력이라면 지구의 자전은 1년도 못되어 멈추게 된다고 주장했다.

2. 학문 후속 세대들의 지속적인 연구

대륙이동설은 처음에는 소수이지만 과학자들은 베게너의 대륙이동설, 자체 이론의 단순성에 매료되었기에 지속적인 연구자들이 출현하였다. 학문 후속세대들의 지속적인 연구에 의해 맨틀대류설, 해저확장설로 이어졌고 마침내 판구조론으로서 지구과학계에 혁명을 일으키며 받아들여지게 되었다.

가. 맨틀대류설(mantle convection hypothesis)

1927년 12월, 홈스(Holmes)는 Edinburgh Geologist Society에 보낸 논문에서 대륙이동의 원동력을 발표했다. 그것은 이례적인 발표였고 앞으로 일어날 일들을 많이 예상했다. 홈스는 “대륙이동”이 발생했다는 것을 받아들였을 뿐만 아니라 그 파악하기 어려운 원동력을 제안했다. Holmes는 방사성 원소에 대한 연구를 통해 그것이 열원이 될 수 있다는 가능성을 깨닫게 되었다. 무엇보다도 이동원인을 지구내부에서 얻은 점이 독창적이며 베게너의 대륙이동설이 판구조론으로 이어질 수 있도록 하는 선구적인 발상이었다.

나. 해저 확장설(Sea-Floor Spreading hypothesis)

그 당시 해결해야 할 문제가 있었다. 그 많은 해양 퇴적물이 어디로 간 것인가? 처음에는 단순히 무시하였다. 그렇지만 결국은 더 이상 무시할 수 없는 상황에 도달하였다(Bryson, 2004).

1962년 해리 헤스(Harry Hess, 1906-1969)는, 새로운 장비인 음파 탐지기를 이용하여 대양저의 지각이 대륙의 지각보다 더 젊고 대양의 중심에 일련의 해령이 있다는 사실을 이용하였다. 열 탐지 장비는 해령의 균열 양쪽에

서 강한 열흐름을 탐지했다. 중력계는 중력이 약해진 것을 탐지했는데, 이는 물질들이 지표 밑으로부터 해령의 표면으로 나와서 지각에 계속해서 첨가되고 있다는 것이다. 이러한 측정결과 헤스는 해저 산맥의 중심인 해령에서 고온의 맨틀 물질이 상승하여 분출하면서 새로운 해양 지각을 생성하고, 이렇게 만들어진 해양 지각이 해령을 중심으로 반대 방향으로 이동해 가면서 해저가 점차 넓어진다는 해저 확장설(해양저 확장설)을 주장해 대륙 이동설이 새롭게 조명받도록 엄청난 기여를 하게 된다.

다. 암석속의 나침반

암석이나 퇴적토는 과거의 지자기를 보존하고 있다. 이것을 고지자기(paleomagnetism)라고 하고 하며, 자연 상태의 암석이 자기를 보유하고 있는 자기를 자연 잔류자기라고 한다. 대부분의 퇴적암은 해저나 호수 밑에 쌓인 지층이 후에 수면 위로 출현한 것이다. 그런데 퇴적층 중에 강자성의 광물입자가 수중에 퇴적하는 동안에 각 입자의 자화방향이 당시의 지구 자기의 영향을 받아 평행하게 굳어진다. 이러한 퇴적 잔류자기를 측정함으로써 그 지층이 퇴적당시의 지구 자기의 방향을 측정 할 수 있다.

헤스의 해저확장설의 발표 직후 1963년 바인(Frederic Vine)과 매튜스(Drummond Mathews)에 의하여 암석이 생성될 당시의 자성을 분석해 대륙의 이동을 추적하는 고지자기학(paleomagnetism)의 등장은 그때까지도 대륙 이동에 대한 부정적 인식들을 급반전시켰다.

해저확장설을 주장하는 헤스는 해저를 컨베이어벨트(belt conveyer)로 보았으나, 바인과 매튜에 의하면, 해저의 해령은 녹음하는 레코더 테이프(Tape recorder)의 성질과 같은 것이다. 고지자기의 역전 줄무늬는 해령을 중심으로 대칭적이고, 해양지각의 연령은 해령에서 멀어질수록 증가한다. 이것은 해저 확장설을 뒷받침하는 강력한 증거이다. 자기장 역전이 일어날 때마다 새로운 대양지각은 마치 자기 테이프처럼 주도적인 극성을 기록해 놓았다. 대양지각이 확장 넓어진다는 것은 더 이상 의심할 여지가 없어졌다.

라. 판구조론(Plate Tectonics)과 베게너의 대륙이동설의 과학혁명 완성

1960년 후반에 이르러, 베게너의 대륙이동설은 헤

스의 해저확장설은 결합하여 더욱 완벽한 이론인 판구조론(Plate Tectonics)으로 발전했다. 제이슨 모건(Jason Morgan), 댄 메켄지(Dan Mckenzie)는 해저확장설을 더욱 발전시켜 현재 우리가 알고 있는 판구조론을 완성하게 된다. 판 구조론에서 다루지는 과정들은 시·공간적으로 규모가 매우크고, 관찰이 불가능한 지구 내부의 움직임을 표현한다(이미숙 외, 2014). 그들이 완성한 판구조론은 지구 표면은 수백km 정도의 두께를 가진 10여 개의 판으로 덮여있고 이들 판의 움직임이 각종 지질현상을 일으키는 원동력이 된다는 것이다.

특히 보존 경계인 변환단층을 설명하는데 해저확장설로는 문제가 있었으나, 윌슨의 '변환단층'의 개념은 판끼리의 상대운동의 경우의 수를 완성시켰으며 같은 해 1965년 이에 대한 심포지움이 열려 지질학회는 마침내 판구조론이라는 새로운 패러다임을 수용였다. 베게너의 대륙이동설이 학문후속세대들의 지속적인 연구에 의해 판구조론으로써 새로운 정상과학의 자리에 오른 것이다.

마. 베게너의 대륙이동설의 과학혁명 완성 후 결과

이러한 지구과학의 혁명의 결과는 옛 지질학은 약화되고 새로운 지구물리학이 새롭게 시작되었다(Bowler, & Morus, 2005, p.251). 하지만 이러한 혁명은, 논란이 되었던 지질학적 방법론의 원리가 부활되는 데도 일조하였다. 1830년 라이엘(Charles Lyell)의 동일과정설(uniformitarianism)이 바로 그것이다. 지질현상은 매우 긴 시간동안 천천히 일어나는데, 이러한 장대한 시간 척도를 가지고 자연현상을 설명하려고 한 라이엘의 동일과정설은 찰스 다윈의 종의 기원에도 깊은 영향을 준 것으로 추측되고 있다.

근대과학의 기계론적 패러다임에서는 관찰자나 지식을 획득하는 과정과 상관없는 객관적 관찰이 이루어진다고 믿었다. 그리고 이를 바탕으로 지구도 하나의 완성된 작품으로 본 정적인 지구 모형이었다. 그러나 베게너의 대륙이동설은 변화와 생성의 동적인 지구 모형을 제안했다. 즉 고정되었다는 기계론적 사상에 변화되고 있다는 진화론적인 사상으로 변화와 생성을 지구과학에 제안한 것이다.

현대과학에서는 지식이 어떤 과정을 거쳐 획득되는지를 연구하는 인식론도 자연현상을 기술하는데 명

시적으로 포함되어야 한다. 또한, 표상주의 관점에서 인간의 창의성이 먼저 고려되는 구성주의와 자연주의적 관점으로 전환하여 읽을 이해할 필요성이 있다(유권중, 2021). 따라서 베게너의 대륙이동설의 과학혁명의 완성은 기존의 지구과학을 현대과학의 방향에 함께 합류하게 하는 대 전환의 사건이라고 말할 수 있다.

IV. 대륙이동설의 제안과정에서 사용된 전략

‘유비추리(analogical inference)’란 ‘새로운 내용이나 문제를 이해하고 해결할 때 이미 알고 있는 내용을 이용하는 인지 과정’을 뜻한다. 물리 문제를 풀 때 전에 풀었던 비슷한 문제를 생각해내고 그 해법을 새 문제의 해결에 맞도록 바꾸어 문제를 해결하는 것이 유추의 좋은 예이다. 유추는 어떤 사실을 추측하거나 강조할 때에도 필요하며 새로운 개념을 발달시키거나 기존 지식을 이용하여 새로운 지식을 이해하는 창조적인 사고활동에도 이용된다(Gick & Holyoak, 1983). 따라서 유추는 과학개념의 학습은 물론 창의적인 문제 해결, 비유 등에 관여하는 핵심적인 인지 과정이라고 말할 수 있다.

인간은 항상 과거 경험과 새로운 상황의 유사성을 활용하여 나아갈 길을 찾는다. 대개 구체적인 단어 선택은 빠르게 잊힌다고 할 수 있다. 현실적인 구절로 현실적인 상황을 묘사하지만 그 구절을 초래한 개념이 문맥적으로 상황과 동떨어질 때 구체성이 추상성과 만난다. ‘그들의 연애는 물거품이 되었어.’ 같은 속어적인 표현에 깃든 생각은 고도로 추상적이기 때문에, 물거품이 싱크대나 욕조로 흘러들어가는 모습을 상상하지는 않는다.

우리가 온갖 주제에 대한 사고를 표현하려고 끊임 없이 사용하는 단어와 구절의 구체성은 사고방식이 지닌 뛰어난 구체성의 징표이자 표면적으로 완전히 무관한 대상을 가리키는 것처럼 보이는 단어들을 사용하여 상황을 설명하는 추상화를 실행하는 특별한 징표이다.

동일한 종류에 속하는 대상들을 전제로 하는 사례 논증과는 달리, 유비추론 논증은 서로 다른 대상이 특정한 점에서 서로 유사하다는 사실을 근거로 한쪽이 갖는 성질을 다른 쪽도 갖는다는 논증이다.

1. 유비를 통한 베게너의 대륙 이동설 제안

베게너는 인쇄된 신문이 조각으로 찢긴 것으로 비유하면서, 만일 인쇄된 조각들을 다시 붙여 인쇄된 단어들로 앞뒤가 통하는 문장들을 만들어 낼 수 있다면, 이는 조각들은 적어도 그 기사를 생성한 시기에는 하나였다는 주장을 제안하였다. 그리고 이에 대한 증거로 생물 화석의 분포 등을 감안하면 과거에 대륙이 붙어있었다는, 남극, 호주, 남아메리카에 똑같은 동물 화석뿐만 아니라 식물화석이 나타남을 제시하였다.

베게너가 지구물리학회에 대륙 이동설을 제안한 내용은 신문을 찢게 되면 그 간격이 발생하게 되며, 그것을 짜 맞추고자 하면, 신문을 발행한 시기의 글씨를 맞추어서 원래의 모습을 알 수 있게 되는 것처럼, 동식물의 화석의 일치함은 대륙이 하나였음을 보여주는 증거라고 제안한 것이다(Fig. 4,5).



Fig. 4. Wegener's proposal of continental drift through analogy (Oh, 2014; Fortey, 2004, p.138)

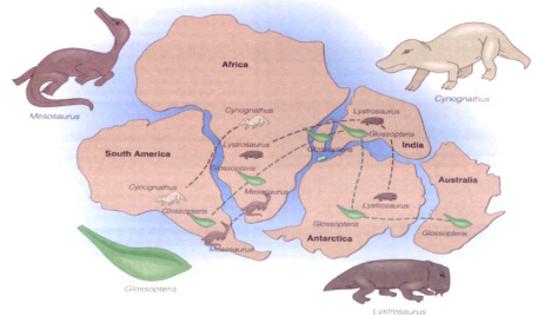


Fig. 5. By matching the newspapers, the text and pictures in the article at the time were shown to match (Wicander, & Monroe, 2006, p.32)

베게너는 인쇄된 신문이 조각으로 찢긴 것으로 비유하면서, 만일 인쇄된 조각들을 다시 붙여 인쇄된 단어들로 앞뒤가 통하는 문장들을 만들어 낼 수 있다면, 이 조각들은 적어도 그 기사를 생성한 시기에는 하나였다는 주장을 제안하였다. 또한 생물 화석의 분포 등

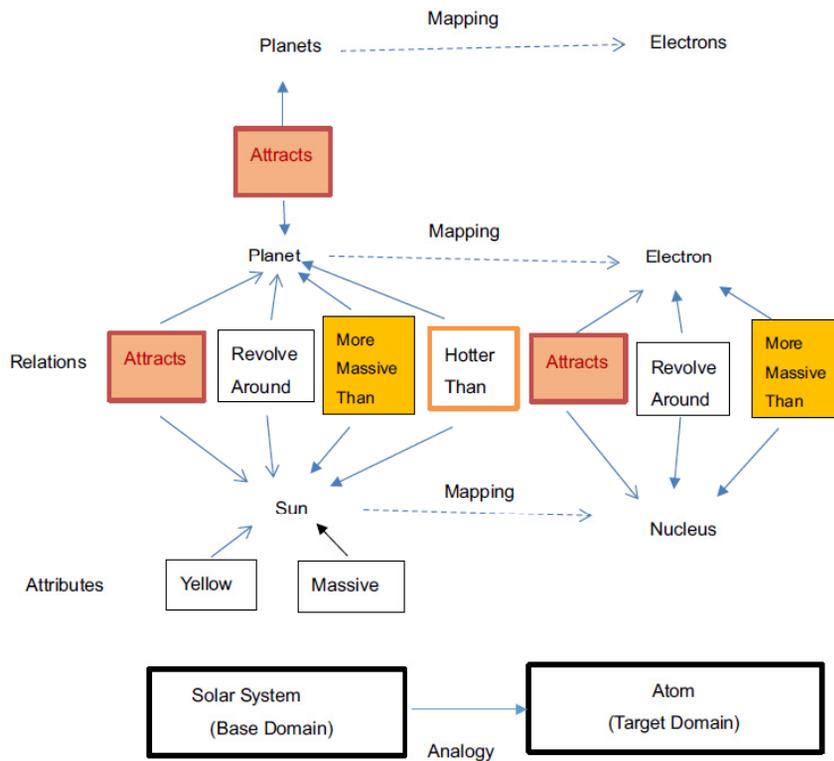


Fig. 6. Application of the structure-correspondence principle of the Rutherford atomic model: Atoms are similar to the solar system (from Oh, 2017)

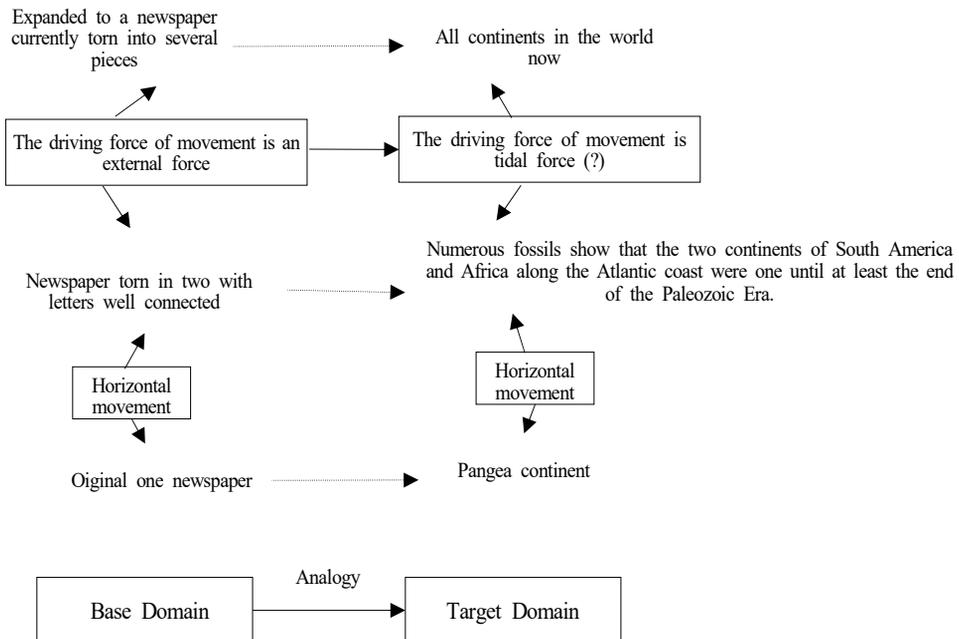


Fig. 7. Relational idea of Wegener's model of continental drift: The distribution of modern continents is similar to the state of a torn newspaper

을 감안하면 과거에 대륙이 붙어있었다는, 남극, 호주, 남아메리카에 똑같은 동물화석뿐만 아니라 식물화석이 나타났다. 따라서 현재 대륙들을 판게아 대륙으로 재조립할 때 그가 수집한 자료는 앞뒤가 맞는 지질학적 증거가 되었다.

베게너는 대서양 양쪽 대륙의 해안 굴곡이 서로 일치하는 점, 지금은 멀리 떨어져 있는 남아메리카-아프리카-오스트레일리아-인도-남극에서 동일한 화석이 발견된다는 점, 3억 년 전의 빙하에 의해서 생성된 빙퇴석이 지금은 열대나 온대지방인 남아메리카-아프리카-인도-오스트레일리아에서 발견된다는 점, 그리고 대서양 양쪽 대륙에서 나타나는 지질구조가 연속적이라는 점 등을 들어 대륙이동설을 주장했다.

이러한 베게너의 대륙이동설의 제안은 관계가 다수인 경우에서 관계를 사상하는 유비추리전략을 사용하였음을 알 수 있다. 구조-대응원리(Structure-mapping theory, SMT, Gentner, 1983, p.160)는 관계가 다수인 경우, 관계를 사상하는 유비추리로서 켄트너 등이 인지 과학에서 개발한 유비추리이다. 동질성을 강조하는 유비추리는 새로운 영역으로 전이하는 과학의 발견에는 한계가 있다. 그러나 구조-대응 원리로서 관계를 사상하는 유비추리전략을 사용할 경우 새로운 영역으로 전이하는 과학의 발견으로 나아갈 수 있다. 다음과 같이 간단하게 예를 볼 수 있다(Fig. 6).

이러한 구조-대응원리로서 베게너 대륙이동설의 추리전략을 도식화하면 다음과 같다(Fig. 7).

현재 베게너의 대륙 이동설은 판구조론으로 지구의 다양한 지질현상을 이해하기 위해서는 당연히 받아들여야 하는 이론이다. 따라서 베게너는 대륙이 움직인다는 주장을 내세워 지구과학계에서의 코페르니쿠스, 다윈과 같은 혁명적인 역할을 한 인물이라고 할 수 있다. 이러한 오래된 지구에 대한 베게너의 시각은 지평선 너머를 보기 위해 과학이 지속적으로 새로운 관찰을 감행해야하는 이유를 잘 보여준다(Fischer, 2020).

V. 과학교육에 대한 시사점

독창성은 동일한 사실을 보고 새로운 설명을 할 수 있는 능력일 수 있다. 이전에 사용되었던 동일한 증거의 대부분이 베게너에 의해 완전히 다른 지도를 그리고

다른 것으로 예측하기 위해 다시 진행되었다. 이러한 20세기 지구과학의 코페르니쿠스적 혁명이라는 대륙 이동설을 판구조론으로 정립하는 데 결정적인 기여를 한 것은 다양한 과학적 데이터, 즉 해양 지각의 잔류자기와 지구 내부에서 발생한 지진을 분석했기 때문이다.

무엇보다도 이전에는 지구를 완성된 작품으로 본 정적인 지구 모형이었지만, 변화와 생성의 동적인 지구 모형으로 변화되었다. 즉 진리는 고정되었다는 기계론적 사상에서 변화되고 있다는 변화와 생성의 진화론적인 사상으로 지구모형을 제안한 것이다. 그리고 오랜 시간 동안 지구의 역사를 통하여 이것을 보여준다.

우리는 현재 대전환의 시대에 있다. 4차산업혁명과 인공지능에 의한 산업, 과학기술, 교육 등 사회 모든 분야의 대전환에 이어 코로나19 이후 지구환경변화와 생태계위기의 심각성에 의한 생태전환도시, 생태전환 교육까지 전환의 필요성과 요구는 지금 우리시대의 동반자로 보여진다.

전환은 성장, 혁신, 진보를 말한다(Smil, 2021). 베게너의 대륙이동설의 판구조론으로의 확립과정을 통해 등장한 새로운 이론의 제안과정은 기존 지구과학의 성장, 혁신, 진보의 과정으로서 결과적으로는 고정된 지구에서 변화와 생성의 지구라는 페러다임의 혁명과 전환을 이끌어낸 것을 볼 수 있다.

과학적 성과는 고전 안에 그리고 다음세대의 과학자들이 배우는 교과서 안에 수록되어 있다. 그리고 교과서는 설득과 교육을 목적으로 하기 때문에 과학지식의 이해에만 초점을 맞추고 있다. 그리고 과학의 발전이란 과학기술과 지시의 지속적인 축적과정에 과학자들의 성공이 첨가되는 점진적인 과정인 것처럼 생각하게끔 내용이 구성되어 있다(Kuhn, 1962).

그러나 과학은 개별적인 발견 또는 발명의 누적에 의해 발달하지 않는 부분들이 있다(Kuhn, 1962). 또한 현대 양자과학의 발전에 따라 과거의 관찰과 믿음의 과학적 요소를 그 이전에 오류 또는 미신이라고 규정하는 것들과 구분하는데 어려움이 있음을 우리는 경험하고 있다. 따라서 새로운 이론의 등장은 이전과 다른 신념들을 포함하고, 새로운 방법론과 전략을 사용하였으며 그 과정에 혁명적인 과정으로서 성장, 혁신, 진보가 있었음을 과학교육에서 학생들에게 교육할 필요가 있다.

베게너의 대륙이동설이 현대의 판구조론으로 확립

되어가는 과정에서 과학교육에 대한 시사점은 다음과 같다.

첫째, 그 과정에서 세계관의 변화를 볼 수 있다. 진리는 고정되고 변화가 없다는 전통적인 기계론적 경험주의(지구 수축론)에서 변화되고 진화된다는 새로운 자연주의(대륙 이동설)로의 변화되는 혁명적인 과정을 볼 수 있다.

베게너의 대륙이동설은 지구는 이미 완성되었다는 정적 모형으로서 고정되고 변화가 없다는 뉴턴의 기계론적 세계관에서 벗어나 생성되고 변화된다는 세계관으로 변화한다.

세계관은 세상을 보고 생각하는 틀이다. 세계관은 역사적 문화적 경험을 공유한 사람들 사이에서 강력한 집단적 동질성을 가지고 있다(오준영, 2019). 그래서 변화하기 힘든 성질을 가지고 있으나, 유동성이 있다. 전환은 패러다임, 즉 세계관의 변화를 말한다. 따라서 이러한 세계관의 유동성을 대륙이동설의 확립과정에서 볼 수 있다는 점에서 패러다임 전환의 시대에 놓여 있는 과학교육에 중요한 시사점을 줄 수 있다.

둘째, 이러한 대륙이동의 원동력을 찾는 과정은 논리적이고 합리적이며 교육적이다. 먼저 대륙이 이동하는 증거를 찾았고, 그 다음으로 증거를 설명하는 원동력을 지속적으로 찾았다.

현재의 과학교육은 창의성을 중요하게 생각하고 있다. 베게너의 대륙이동설은 단순한 귀납이 아니라 창의성에 따른 가설의 제안이다. 그리고 베게너가 제안한 신문의 비유는 그 당시의 지구를 설명하는 대안보다 설명 방식이 단순하다는 점에서 또한 교육에서 중요하다. 신문을 찢게 되면 간격이 발생하게 되며, 신문을 찢는 힘이 대륙이 이동한 원동력인 것이다. 그리고 찢은 신문을 짜 맞추고자 하면, 신문을 발행한 시기의 글씨를 맞추어야 한다. 따라서 베게너의 대륙이동설이 현대의 판구조론으로 확립되어가는 과정을 학생들이 배우는 것은, 귀추법과 다양한 방법론을 함께 살펴볼 수 있다. 단편적인 자연현상의 내부에는 꼬리를 무는 과학 요소들의 인과 관계가 담겨져 있어 자연에서 관찰할 수 있는 현상에 내재된 과학적인 전체 과정을 파악하기가 쉽지 않다(Gilbert, 2004; 이미숙 외, 2014). 베게너의 대륙이동설은 현대의 판구조론으로 확립되어가는 과정에서 귀추법(Oh, 2014), 그리고 다양한 방법론(Paixão, et al., 2004)을 사용하였다. 따라서 대륙이동

설과 이를 뒷받침하는 후속연구들로 새로운 이론들의 제안과정은 과학교육에서 지구 내부 구조와 물리적 특성, 용융의 위치 및 원인, 판의 이동, 판의 경계, 판 운동의 원동력, 이러한 개념들이 어떻게 맞물려 있는지 전체적인 이해를 위한 좋은 수업 자료로서 과학교육에서 적절한 방법론을 제공한다고 할 수 있다.

셋째, 베게너의 대륙이동설이 현대의 판구조론으로 확립되어 가는 과정에서 나타난 학문후속세대에 의한 베게너의 대륙이동설의 원동력을 탐구하는 과정은, 에너지원이 적은 비용을 사용하는 방향으로 탐구되었다. 즉, 베게너의 대륙이동설은 지구자전에 의한 원심력과 조석 마찰력이었다. 그러나 맨틀 대류설에서 가장 중요한 원동력이 제안되었다. 그리고 해저확장설에서는 대륙지각이 생성된 해양지각에 의하여 실려 가고 확장되어가는 것으로 제안되었다. 따라서 현대의 판구조론은 베게너의 대륙이동설보다 상대적으로 적은 비용의 원동력이 사용된 것으로 대륙의 이동을 설명하였으며 이러한 점에서 지구의 에너지 효율성의 아름다움을 학생들에게 교육할 수 있다는 의의가 있다.

넷째, 베게너의 대륙이동설은 유비추리의 추론과정으로 일종의 과학적 사고 실험이었다. 그리고 베게너의 유비추리 결과물들은 고정된 지구가 아닌 끊임없이 변화하는 정적인 지구에서 동적인 지구라는 지구과학 혁명의 결정적인 시작이 되었다. 따라서 유비추리에 의한 사고실험의 방법을 과학교육에 적극적으로 도입해야 한다.

과학의 힘은 축적된 정보의 힘이다. 정보가 축적되지 않는다면, 후대의 과학자들은 계속 전지하기보다는 머물 수밖에 없다(이종필, 2021). 과학교육은 현재 4차 산업혁명이 시작된 시점에서 그 중요성이 더욱 부각되고 있으며 과학교육의 성패가 국가경쟁력을 결정지을 수 있으므로 정의적 영역의 향상을 도모하는 과학교육이 절실하다(박기락 외, 2017). 판구조론의 형성은 지구과학자들뿐만 아니라 모든 영역의 과학자들의 집단 지성이라고 할 수 있다. 과학에 대한 태도는 과학학습과 과학탐구능력에 영향을 미친다(박기락, 2023). 과학적 사고력, 창의적 문제해결력은 과학교육의 중요한 목표이다. 문제 해결, 실험과 관찰을 통해 새로운 발견을 이루기 위해서는 유비추리에 의한 사고력과 융·복합 능력 및 통찰력이 선행되어야 한다. 그러나 세계관의 변화를 받아들이기는 쉽지 않은 것이다. 따라서 과

학은 수많은 과학자들의 연구와 협력, 융합의 필요성을 대륙이동설의 확립과정을 통해 다시 한번 생각해 볼 수 있다. 앞으로 지구과학교육에서 이러한 대륙이동설의 확립과정에서 산출되는 다양한 방법론을 이용한 교육연구가 필요하다.

국문요약

이 연구의 목표는 지구과학의 혁명 과정으로 설명되는 20세기 베게너의 대륙이동을 정당화하는 과학자들의 과학 활동을 살펴보면서 새로운 과학 이론의 제안 전략과, 이론 선택의 과정이 어떻게 이루어지는지를 방법론적으로 분석하는데 있다. 베게너의 대륙이동설 이전에는 지구는 정적인 지구모형으로 지각의 상하 운동만을 고려하였다. 하지만 대륙이동설은 지구의 동적 모형으로 지각의 수평운동을 제안하여, 수많은 문제들을 제거하였다. 따라서 이 연구는 현재의 판구조론이 형성되기까지 수많은 과학자들의 합리적인 활동을 탐색하고자 한다. 또한, 대륙이동설은 기존의 정적모형인 지구수축설과 충돌한다. 즉, 지구가 이미 완성되고, 고정되고, 불변하는 정적인 모델이 아닌, 지구가 생성되고 변화하는 역동적인 모델을 제시함으로써 기존의 기계론적 세계관에서 벗어난다. 이러한 결과, 옛 지질학은 약화되고 새로운 지구물리학이 탄생하게 되었다. 그리고 대륙이동설과 학문후속세대에 의한 지속적인 탐구는 지구과학의 혁명을 가져왔다. 이는 지구과학교육에서 학생들을 위한 다양한 방법론의 교육 자료로서, 학생들의 세계관의 변화를 위한 교육 자료로서 좋은 탐구대상이라고 할 수 있다.

주제어: 지구과학의 혁명, 베게너의 대륙이동, 육교설, 판구조론, 지구물리, 전환

References

교육부(2022). 2022 개정 교육과정 총론. 교육부.
박기락(2023). 중학생의 자기조절학습 전략, 과학에 대한 태도, 과학적 자기효능감과 과학 핵심역량의 구조적

관계 분석. 대한지구과학교육학회지, 16(3), 351-362.
박기락, 최효식, 연은모(2017). 중학생이 지각한 부모의 긍정적 양육 태도 · 과학 태도 및 과학 탐구 능력과 과학 학업 성취도의 구조적 관계 분석. 한국과학교육학회지, 37(4), 669-677.
성열관, 김진수, 양도길, 엄태현, 김선명, 김성수(2017). 교육과정 통합, 어떻게 할 것인가: 수행평가를 중심으로 교육과정 통합하기. 서울: 살림터.
신재욱(1983). 지구과학 개론. 서울: 형설출판사.
오준영(2019). 서양 고대 그리스와 중세의 철학적 세계관, 그리고 근현대의 과학적 세계관의 영향. 서울: 연세대학교 대학출판문화원.
오준영, 이은주(2022). 과학교육을 위한 과학이론의 철학적 위치. 대한지구과학교육학회지, 15(3), 354-372.
유권중(2021). 얇과 진실에 관한 동양철학 연구와 현대과학의 상호 연관에 대한 모색. 한국철학회 위임, 현대과학과 철학의 대화(제9장). 서울: 한울 아카데미.
이기화(2015). 모든 사람을 위한 지진 이야기. 서울: ㈜사이언스북스.
이미숙, 정진우, 김형범(2014). 판 구조론 학습에 사용되는 시각적 표시가 판구조론 개념에 대한 고등학생들의 응답에 미치는 영향. 대한지구과학교육학회지, 7(2), 214-225.
이종필(2021). 우리의 태도가 과학적일 때. 서울: 사계절.
정병훈(2017). 과학기술과 철학-메타과학으로서의 철학. 경성대출판부.
조현국(2014). 근대 과학자와 예술가의 사례를 통해 살펴본 융복합교육으로서의 과학교육: 과학과 예술을 중심으로. 한국과학교육학회지, 34(8), 755-765.
한국지구과학회(2021). 지구과학개론. 서울: 교학연구사.
Bowler, P. J., & Morus, I. R. (2005). Making modern science: A historical survey. Chicago and London: The University of Chicago Press.
Brennan, J. G. (1967). The meaning of philosophy (2nd ed.). New York: Harper & Row.
Bryson, B. (2004). A short history of early everything. New York: Broadway Books.
Chalmers, A. F. (1999). What is this thing called science? (3rd Edition). Cambridge: Hackett Publishing Company.
Eames, S. M. (1977). Pragmatic natrualism: An introduction. Southern Illinois University.

- Fischer, E. P. (2020). *Das wichtigste Wissen*. München: Verlag C.H.Beck oHG.
- Fortey, R. (2004). *The earth: An intimate history*. London: David Godwin Associates.
- Gentner, D. (1983). Structure-mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Psychology*, 7, 155-170.
- Gick, M. L., & Holyoak, K. J. (1983). Schema induction and analogical transfer. *Cognitive Psychology*, 15(1), 1-38.
- Gilbert, J. K. (2004). Models and modelling: Routes to more authentic science education. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2(2), 115-130.
- Gribbin, J. (2003). *Science: A history 1534-2001* (reprint edition). New York: Penguin Books.
- Holmes, A., & Holmes D. L. (1980). *Geologia fisica*. Ediciones Omega, Barcelona.
- Kuhn, T. S. (1962). *The structure of scientific revolutions*. University of Chicago Press. 조형 옮김. (1980). *과학혁명의 구조*. 이화여자대학교출판부.
- Magnani, L. (2001) *Abduction, reason, and science: Processes of discovery and explanation*. New York: Kluwer Academic Plenum Publishers.
- Mayer, E. (1975). *Evolution and the diversity of life*. Harvard University Press, Cambridge.
- Oh, J.-Y. (2014). Understanding natural science based on abductive inference: Continental drift. *Foundations of Science*, 19(2), 153-174.
- Oh, J.-Y., & Jeon, E. C. (2017). Greenhouse effect in global warming based on analogical reasoning. *Foundations of Science*, 22(4), 827-847.
- Paixão, I., Calado, S., Ferreira, S., Alves, V., & Moras, A. M. (2004). Continental drift: A discussion strategy for secondary school. *Science & Education*, 13, 201-221.
- Peirce, C. S. (1931-1958). *Collected papers of Charles Sanders Peirce*, vols 1-6, Hartshorne, and P Weiss(des), vols 7-8, A W Burks, (eds), Cambridge Harvard University Press.
- Shubin, N. (2013). *The universe within: Discovering the common history of rocks, planets, and people*. New York: Pantheon Books.
- Smil, V. (2021). *Grand transitions : how the modern world was made*. Oxford University Press. 슝희 옮김. (2022). *대전환*. 처음박스.
- Trigg, L. (1985). *Ideas of human nature : historical introduction*. Blackwell. 최용철 옮김. (2003). *인간 본성에 대한 철학적 논쟁(개정판)*. 서울: 간디서원.
- Wicander, R., & Monroe, J. S. (2006). *Essentials of geology*. USA; Tomson Brooks/Cole.