

예비교사들의 탄소 순환에 대한 지구시스템의 관련개념과 시스템 사고의 적용

문병찬^{1,*} · 정진우¹ · 경재복¹ · 고영구² · 윤석태² · 김해경³ · 오강호²

¹한국교원대학교 지구과학교육과, 363-791 충북 청원군 강내면 다락리 산7

²전남대학교 과학교육학부, 500-757 광주광역시 북구 용봉동 300

³광주교육대학교 과학교육과, 500-703 광주광역시 북구 풍향동 1-1

Related Conceptions to Earth System and Applying of Systems Thinking about Carbon Cycle of the Preservice Teachers

Byoung-Chan Moon^{1,*}, Jin-Woo Jeong¹, Jai-Bok Kyung¹, Yeong-Koo Koh²,
Seok-Tai Youn², Hai-Gyoung Kim³, and Kang-Ho Oh²

¹Department of Earth Science Education, Korea National University of Education,
Cheongwon, Chungbuk 363-791, Korea

²Department of Science Education, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

³Department of Science Education, Gwangju National University of Education,
Gwangju 500-703, Korea

Abstract: Using six preservice teachers as subjects, this study was purposed to research about the concepts in understanding carbon cycle, which of these concepts were related to the conception of the earth system, and finally whether or not the systems thinking was applied sufficiently around carbon cycle. To achieve this study purpose, an instrument related to carbon cycle was developed and administered to the six teachers. The study found that a total of 42 conceptions within the earth system were concepts related to carbon cycle. The list consisted of 15 conceptions in atmosphere, 11 in biospheres, 9 in hydrosphere, and 7 in lithosphere. In aspect of applying the systems thinking, 4 subjects who couldn't compose the feedback loop in their causal map failed to apply this type of thinking. The other two who applied systems thinking had 2 and 1 feedback loop each, in their causal maps. But, one of the feedback loop from the subject who made two was based on unscientific reasoning. As a result, the subjects had lower understanding of concepts related to carbon cycle in lithosphere than those in atmosphere, biosphere, and hydrosphere. Furthermore, the subjects' application of the earth systems thinking on carbon cycle was at a low standard.

Keywords: systems thinking, carbon cycle, earth system

요약: 이 연구의 목적은 6명의 예비교사들을 대상으로, 탄소 순환을 이해하는데 적용되는 개념들을 조사하여 지구시스템에 관련된 개념은 무엇인가를 알아보고, 탄소 순환에 대해서 시스템 사고를 적절히 수행하고 있는지를 조사하는 것이었다. 연구방법은 고등학교 지구과학에서 다루고 있는 “지구의 구성” 단원 중 ‘탄소 순환과 관련된 질문을 통해, 예비교사들이 진술한 내용을 분석하여 개념의 특성을 조사하였다. 이를 근거로 지구시스템에 관련된 개념을 구성요소로 하여 인과지도를 작성한 후, 시스템 사고의 관점에서 분석하였다. 연구결과는 다음과 같다. 첫째, 탄소 순환을 이해하는데 적용된 개념들 중 지구시스템에 대한 관련개념은 모두 42개가 나타났다. 그 중 기권 관련개념은 15개, 생물권 관련개념은 11개, 수권 관련개념은 9개였으며, 암석권 관련개념은 7개였다. 둘째, 인과지도에서 피드백 순환고리는 A와 F 예비교사들에게서 2개와 1개가 완성되었으나, A예비교사에게서 완성된 2개의 피드백 순환고리 중 1개는 비과학적 개념연결

*Corresponding author: saltless_2000@hanmail.net

Tel: 82-62-530-2510

Fax: 82-62-530-2519

에 근거하였다. 결론적으로, 연구에 참가한 6명의 예비교사들은 탄소 순환과 관련하여 지구시스템에서 암석권에 대한 이해가 낮으며, 4명은 시스템 사고가 수행되지 않았고, 2명은 시스템 사고를 수행하였으나, 그 수준은 높지 않았다.

주요어: 시스템사고, 탄소순환, 지구시스템

서론

구성주의 관점에서 학생들의 사고활동이 중요하게 인식되어짐에 따라 학생들의 사고기술(thinking skill)에 대한 관심이 높아지고 있다(Dori, 2003). 전통적 교육에서는 단편적이고 제한된 원인과 결과의 맥락에서 과학현상을 해석하려는 분석적 사고가 강조되었다. 이는 학생들이 과학현상을 이해함에 있어서 원인-과정-결과로 인식하는 단선적 사고와 결과의 원인을 특정 부분에 한정시키는 집중적 사고에 익숙하다는 것이다. 따라서 많은 학생들은 주변의 과학적 현상에 대해 하나의 원인만을 생각하며, 다른 원인들과의 복잡한 상호관계를 고려하는 것이 부족한 것으로 보고된 바 있다(Resnick, 1996). 최근 과학의 복잡성에 대한 논의가 증가되면서, 매우 단편적이고 미약한 원인이 복잡한 시스템의 결과에 큰 영향을 미치는 과정을 과학적 해석을 통해 이해하려는 시도가 이루어지고 있다. 이는 대부분의 시스템이 단순하고 단편적인 부분들이 원인이 되어 작동되기 보다는 많은 원인과 복잡한 과정들이 조합되고 연계되어 하나의 시스템 특성이 나타남을 전제한다. 다시 말하면, 중요한 시스템인 자연현상을 과거 과학교육에서처럼 단편적이면서 집중적인 분석적 사고를 통해서만 시스템 자체의 특성을 빠르게 이해한다는 것이 매우 어렵다는 것이다. 시스템의 특성을 전체적 측면에서 이해하려면 보다 효과적이고 높은 수준의 사고기술이 요구된다. 높은 수준의 사고기술에는 시스템 사고, 합리적 사고, 비판적 사고 등이 포함되며 그 밖에도 용어의 정의기술과 같은 사고기술들이 해당되는 것으로 알려져 있다(Chen and Stroup, 1993; Hogan et al., 2000; Zeidler et al., 1992).

많은 연구들은 높은 수준의 사고기술 중에서도 시스템 사고(systems thinking)가 시스템의 특성을 통찰하는데 매우 효과적인 사고기술임을 제안하고 있다(Ison, 1999; Maani and Maharaj, 2004; Sweeney and Sterman, 2000). 시스템 사고는 다양한 요인들의 상호관계를 이해하여 전체적 시스템의 상황을 빠르게 이해하는데 매우 유용한 사고 틀로써 단편적인 부분

에 집착하지 않고 시스템 전체를 개관하고 상호관계를 파악하는 특성이 있다고 알려져 있다(Chen and Stroup, 1993; Zeidler et al., 1992). 이미 과학교육에서 널리 활용되고 있는 개념도는 시스템을 구성하는 각각의 개념요소 특성에 따른 개념들 간 상호연관성과 위계적 관계를 통해 학생들의 지식구조를 이해하는 특성(Moore, 1995; Novak, 1990)인 반면, 시스템 사고는 다양한 개념들의 상호작용과 이들의 피드백 효과를 고려하여 전체의 시스템을 단일 개체로 인식하고 그 특성을 파악하는 사고이다(McNamara, 1998). 또한, 합리적 사고가 많은 변수들을 고려하여 얼마나 많은 추론을 논리적으로 전개하는가에 초점을 둔 양적사고라면, 시스템 사고는 시스템 특성을 얼마나 잘 반영하여 개념들을 적용하고, 사고하는지를 강조하는 질적사고의 측면을 갖는다(김동환, 2000). 시스템 사고의 범위는 문자나 도표를 이해하고 표현하는 것으로부터 복잡한 시스템을 분석하고, 그 결과를 예측하는 높은 수준까지를 포함하는 것으로 알려져 있다(Sweeney and Sterman, 2000).

자연현상은 다양한 요인들이 상호 작용하여 하나의 현상으로 표현되는 복잡한 시스템의 특성을 가지고 있다. 지구과학을 지구시스템과학으로 이해하고자 하는 것도 기권, 수권, 암석권, 생물권 등이 상호 밀접한 관계를 이루고 있어, 자연 현상이 어느 한 부분에만 한정된 원인에서 나타나는 결과가 아니기 때문이다. 이런 맥락에서, 과거의 전통적 지구과학 교수-학습에 대한 재 고찰은 지구과학교육에서 시스템에 대해 학생들이 체계적으로 이해할 수 있는 교수-학습방법을 제안하고 있다(Mayer, 1997). 과거에는 학생들의 사고기술이 일반적인 교과수업을 통해 스스로 발전됨을 전제하고, 학생들의 사고기술향상을 위한 구체적인 방법에는 큰 관심을 두지 않았다. 그러나 최근에는 학생들의 사고기술이 구체적인 학습을 통해 향상되어진다는 결과와 함께, 이를 위한 구체적인 학습전략의 필요성이 강조되고 있다(Ossimitz, 1998; Perkins and Unger, 1999). 최근 시스템 사고와 관련된 연구들이 빠르게 증가하고 있으나(Bryan, 2003; Kali, 2003; Penner, 2000), 우리나라에서는 과학교육

연구에서 시스템 사고에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 이에, 암석권을 중심으로 대기권, 수권 그리고 생물권이 서로 연관되어 복잡한 계를 이루고 있는 지구환경 시스템을 이해하고 이 지구환경 시스템 내에 존재하는 여러 시스템들을 학습하는데 있어 학생들의 시스템 사고의 활용 정도와 시스템의 특성에 따른 관련개념들을 어떻게 이해하고 있는지를 알아보는 것은 나름대로 의미가 있을 것이다.

지구에서 복잡한 시스템의 특징을 갖는 것은 암석 순환, 물 순환, 질소 순환 등 매우 다양하지만, 특히 탄소 순환은 시 공간적 측면에서 서로 관련되는 요인들과 그 연계과정이 매우 복잡하다. 탄소 순환에서 암석권의 탄소들은 화석연료에 많은 부분을 의존하는 인간생활과 밀접한 관계를 맺고 있을 뿐만 아니라, 대기 중의 탄소는 지구의 온실효과, 그리고 식물들의 광합성에 관여하는 등 그 역할이 매우 크다고 볼 수 있다. 그러므로 탄소 순환과 같은 복잡한 시스템을 바르게 이해하는데 있어서는 각 요소 간 상호작용과 이 작용들이 시스템에 미치는 피드백 효과를 고려한 시스템 사고의 적용이 적절할 것으로 생각한다. 이에 고등학교 지구과학 I 교과서에서 다루고 있는 탄소 순환에 대해 학생들이 이미 학습한 개념들을 지구에서의 탄소 순환시스템에 대해 어떻게 적용하는지와 탄소 순환시스템을 이해함에 있어서 시스템 사고를 어떤 방법으로 활용하고 있는지를 살펴보고자 하였으며 이를 연구하기 위한 구체적인 문제는 다음과 같이 제안되었다.

1. 6명의 예비교사들이 탄소 순환을 이해하는데 적용하는 개념들과 지구시스템에 관련되는 개념들은 무엇인가?
2. 6명의 예비교사들은 탄소 순환에 대해 시스템 사고를 적절하게 수행하는가?

이론적 배경

Forrester(1961)가 시스템의 특성을 이해하고, 그 결과를 예측하는 도구로서 시스템 다이내믹스(system dynamics)를 소개한 이후, 시스템 사고는 시스템 다이내믹스와 함께 시스템의 특성을 분석하는 유용한 방법으로 활용되었다. 그러나 Senge(1990)에 의해, 시스템을 구성하는 요소들 간 상호작용에 대한 개념들만으로 인과지도를 작성하고, 인과지도의 분석을 통해 시스템의 특성을 파악하는 연구방법이 소개되면서, 시스템 사고는 인과지도를 통해 시스템의 특성을

이해하는 독립적인 분석도구로서의 위상을 갖추게 되었다(Richmond, 1993). Ossimitz(1998)는 시스템 사고에 대한 정의에서 사고모델의 핵심요소로 “인과적 다이어그램(causal loop diagram), 저장과 흐름 다이어그램(stock-flow diagram), 평형(equation)”을 제시하였다. 또한, 시스템 사고를 명백하게 시스템을 함축하여 이해하는 모형적 사고(thinking in model), 시스템 구조 내에서 서로 연계되는 연관된 사고(interrelated thinking), 지연, 피드백 순환고리, 변동 등 역동적인 과정들을 인식하는 역동적 사고(dynamic thinking), 그리고 실제적인 시스템운용과 조정을 할 수 있는 조정적 사고(steering system)등의 사고개념들로 정의하였다. 시스템 사고의 효용성에 대해서는, 분석적 사고가 구성요소들을 독립적인 개체로 이해하여 그 사이에서 나타나는 인과관계를 강조하는 사고인 반면, 시스템 사고는 구성요소들 간 상호협력의 인과관계를 파악하여 하나의 거시적 시스템으로 구성함으로써, 시스템의 전체구조와 특성을 보다 명확히 이해하는데 유용한 사고임이 제안된 바 있다(Richmond, 1993; Sheehy et al., 2000; Sterman, 1994; Wylie et al., 1996). 시스템 사고를 통해 단일 시스템을 이해하는 과정에서 첫 번째 단계는 전체 시스템에 대한 구성지도, 즉 인과지도를 작성하는 것이다(Wolstenholme and Stevenson, 1994). 인과지도는 시스템을 구성하는 각각의 개념들 간 인과관계 측면에서 연계된 상호관계를 설정하고, 단일 시스템의 외부와 내부적 구성의 경계를 분명히 하는 역할뿐 아니라, 개념들에서 나타나는 인과관계, 즉 강화(+)되거나, 안정(-)되는 것에 따라 전체 시스템의 특성을 결정한다.

시스템 사고에 관련된 선행연구에서, Kali(2003)는 중학교 2학년 학생들을 대상으로 ‘암석 순환’과 관련하여, 시스템을 구성하는 개념들의 인과관계의 논리성, 암석 순환시스템에서 역동적이고 순환적인 특성에 대한 이해를 중요한 평가관점으로 제시하였다. 반면, Dori(2003)는 과학을 전공하지 않은 학생들을 대상으로 “유전공학과 사회, 그리고 스포츠맨의 입장”에서 개념들 간 연결이, 전체 시스템을 구성하는 거시적 차원에서, 그 연계성과 다양성의 고려여부에 따라 시스템 사고의 적용여부를 평가하였다. 예를 들어, 김동환(2000)은 담화문과 연설문 등을 분석하여 이에 대한 시스템 사고의 적용여부를 평가함에 있어서, 피드백 순환고리의 완성을 시스템 사고적용의 필수적인 요건으로 설정하고, 인과지도의 구축에서 피드백 순

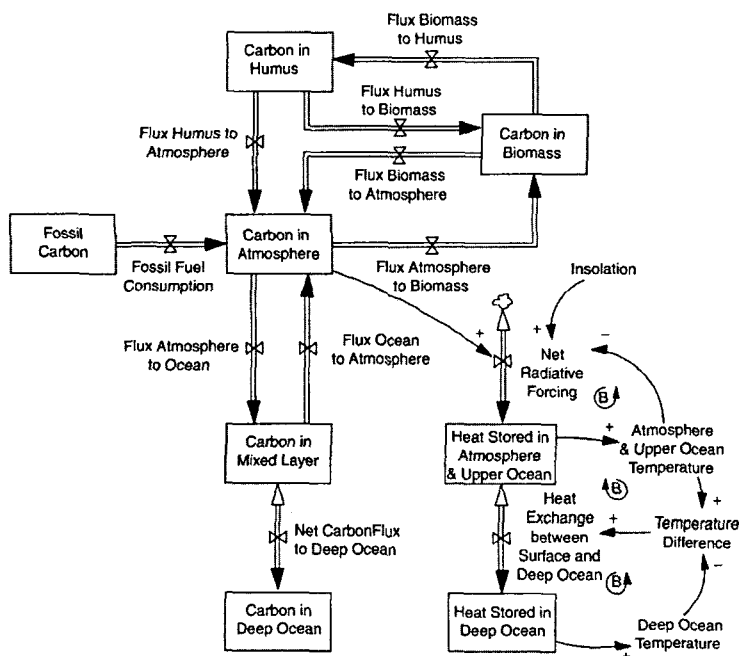


Fig. 1. More detailed representation of carbon cycle (by Sterman, 2002).

환고리가 얼마나 다양하고 적절하게 완성되고 있는지를 평가하였다. Sterman(2002)은 지구의 탄소 순환을 복잡한 시스템으로 인식하고, 시스템 사고적 관점에서 탄소 순환을 인과지도로 제시함으로써(Fig. 1), 탄소 순환시스템이 시스템 사고로써 이해될 수 있는 타당성을 제공한 바 있다.

연구의 제한점

이 연구는 다음과 같은 제한점을 갖는다.

1. 이 연구는 사범대학 지구과학교육과 1학년 예비교사 중, 고등학교에서 지구과학 I 을 학습한 경험이 있고, 본인이 연구에 참여할 의사가 있는 6명만을 대상으로 하였다. 그러므로 이 연구의 결과를 다른 학생들에게 확장·적용하기는 어렵다.
2. 예비교사들이 작성한 진술내용은 인과지도로 작성하는데 적합하도록 연구자에 의해 요약·정리되어 일부 용어는 예비교사의 서술과 다소 다를 수 있으며, 이 연구에서의 분석방법은 시스템 사고와 관련된 김동환(2000), Dori(2003) 그리고 Kali(2003)의 연구를 참조하였으므로, 다른 분석방법에서는 이 연구의 결과와 다를 수 있다.
3. 이 연구에서 사용된 질문지는 주로 시스템 사고를 분석하기 위한 목적으로 사용되었다. 그러므로 예

비교사들이 진술한 내용만으로, 이들의 탄소 순환에 대한 이해정도를 판단하기에는 다소 무리가 있다.

연구 방법 및 절차

연구 대상

연구 대상은 광주광역시에 소재한 C 대학교 사범대학 지구과학교육전공 1학년에 재학 중인 20명 중, 고등학교에서 지구과학 I 을 학습하고, 연구에 참여한사를 밝힌 6명의 예비교사들을 선정하였다.

연구 절차

연구의 목적이 연구에 참여한 예비교사들의 시스템 사고 적용여부와 동원된 관련개념에 대한 것을 살펴 보려는 것이었으므로, 예비교사들에게 먼저 시스템 사고에 대해 간략히 소개하였다. 또한 이 연구의 목적이 학생들의 탄소 순환에 대한 지식정도를 평가하기 위한 것이 아니라, 시스템 사고의 적용능력 정도를 판단하기 위한 것임을 이해시킨 후, 질문지를 투여하였다. 답변지는 B4 용지 1매 정도의 작성공간, 답변 작성 시간은 60분으로 제한하였으며, 학생들 간 답변지의 객관성을 높이기 위해 학생 각자 간의 거리를 적절히 유지하였다. 수집된 자료는 연구목적에

Table 1. The evaluation criterion of the systems thinking in this study

| 시스템 사고 | 분류 관점 |
|--------|---|
| 내용적 측면 | 개념과 개념의 연결에서 인과관계의 논리성과 타당성 |
| 외형적 측면 | 소단위 피드백 순환고리 완성도, 거시적 시스템의 피드백 순환고리 완성도 |

맞도록 정리되었으며, 다음에 제시된 기준에 의해 분석되었다.

조사 도구

이 연구에서 사용한 조사도구는 한국교육평가원에서 시행한 ‘2005학년도 대학수학능력시험 예비 평가’ 문제지의 과학탐구영역(지구과학 I)에서 출제된 문제를 수정하여 사용하였다(Appendix 1). 이 시험에서 출제된 문제는 ‘탄소 순환’과 관련하여 다양한 구성요소들 간 상호관계를 도표와 그림을 통해 제시하고, 요소들 간 맥락을 학생들이 어떻게 이해하고 있는지를 알아보는 문제로서, 문자나 도표를 이해하는 시스템 사고의 특성과 관련성이 높았고, 다양한 구성요소들의 상호맥락을 전체적이면서도 함축적으로 이해하고 있는지를 알아보는 시스템 사고의 관점에서 매우 적합하다고 판단되었다. 그러나, 이 연구의 목적은 6명의 예비교사들이 시스템 사고 능력을 보유하고 있는가를 알아보는데 있었으므로, 이를 위해서는 탄소 순환이 역동적으로 가동되어질 수 있는 상황설정이 필요하였으며, 이를 위해 대학수학능력시험의 문제에 포함되지 않는 화석연료 사용이 증가되는 상황을 가정으로 부가 설정하였다.

결과처리 및 분석

예비교사들이 서술한 진술내용은 인과지도로 작성하기에 적합한 형태로 요약·정리되었다. 정리된 내용을 분석하여, 적용된 개념이 인과관계 상, 적절하게 상호연결 되었는지에 따라 과학적 연결과 비과학적 연결로 구분하였으며, 지구시스템을 구성하는 기권, 암석권, 수권, 생물권들 중의 어느 곳에 해당되었는지에 따라 관련탄소개념으로 분류하였다. 분류된 관련탄소개념을 각각의 구성요소로 사용하여 인과지도를 작성한 후, 피드백 순환고리의 완성여부에 따라 시스템 사고의 외형적 구성에 대한 적절성을 판별하였다.

이 연구에서는 예비교사들의 진술을 시스템 사고의 측면에서 분석하기 위해 시스템 사고와 관련된 선행연

구들 중, 김동환(2000), Dori(2003), 그리고 Kali (2003)의 연구들을 참고하여 평가기준을 설정하였다(Table 1).

연구결과 및 논의

탄소 순환에 대한 예비교사들의 진술

지금보다 더 많은 화석연료를 사용하게 되면 지구 시스템에서 작동하는 탄소 순환에 어떤 변화가 발생하겠는가의 물음에 다양한 답변이 진술되었다. 그러나 예비교사들의 진술은 서술적인 형태로서, 진술된 내용 자체를 통해 인과지도로 작성하기에는 부적합하였다. 이와 같은 이유로, 예비교사들의 진술을 시스템 사고의 분석을 위해 필요한 인과지도로 작성하는데 적합한 형태로 요약·정리하였다(Table 2). 이 과정에서 예비교사들이 진술한 내용의 본질을 훼손하지 않는데 중점을 두었다. 수집된 진술 내용은 연구계획 과정에서 예측한 것에 비해 충분한 시간적 여유를 제공했음에도 불구하고, 진술한 분량과 사고의 다양성에 있어서 매우 미흡하였다. 이러한 결과는 연구에 참가한 예비교사들이 탄소 순환에 대한 이해가 부족할 뿐 만 아니라, 높은 수준의 사고 기술이 다양하게 수행되지 못하고 있음을 나타낸다.

예비교사들의 진술내용에서, 연구에 참가한 6명 모두는 화석연료의 사용이 증가되면 이산화탄소 배출이 증가하며, 대기 중으로 배출된 이산화탄소가 온실효과에 대한 상승효과를 나타내 대기의 온도를 높이는 결과를 보일 것이라고 예상하였다. 이를 통해, 탄소의 개념과 관련하여 대기 중의 이산화탄소가 지구의 온난화를 초래하는 원인 중의 하나로 작용하는 것에 대해서는 6명 모두가 이해하고 있었다. 그러나, 화석연료를 지금보다 더 많이 사용함으로써 현재 지구에서 작동되는 탄소 순환시스템이 결국에는 중단될 것으로 예상하는 예비교사가 있는 반면, 탄소 순환에 관련된 다른 요인들의 작용이나 새로운 과정이 탄소 순환에 참여하여 탄소 순환이 앞으로도 지속적인 작동을 할 것으로 예상함으로써, 탄소 순환 자체에 대해서는 서로 다른 견해를 나타내었다. 이는 시스템을 이해하는데 있어서 동원된 개념들에 따라 시스템의 특성이 달라질 수 있음을 의미한다.

개념들의 인과관계

탄소 순환과 관련하여 예비교사들의 진술에서 나타나고 있는 개념들의 연결을 인과관계의 측면에서 과

Table 2. A summary of responses for question

| 대상 | 진술 요약 |
|----|---|
| A | <ol style="list-style-type: none"> 1. 화석연료를 지금보다 더 많이 사용한다면 화석연료를 연소하면서 나오는 이산화탄소의 양은 대기 중 CO₂의 농도를 현재 보다 더 높일 것이다. 대기 중의 CO₂의 농도가 증가하면 대기의 온도를 높인다. 온도의 상승으로 해수에 용해될 수 있는 CO₂의 양이 감소하여 대기 중의 CO₂ 양은 많아질 것이다. 2. 지구는 평행을 지키려고 하기 때문에, 대기 중의 CO₂의 양이 증가하면, 수권에서의 CO₂의 순환은 점차 줄어들 것이고, 암석권에서의 탄소 순환도 줄어들 것이다. 3. 대기권에 많아진 CO₂의 농도를 낮추기 위해 탄소를 지금보다 더 활용할 수 있는 생물들이 탄생할 것이고, 지금의 생물들도 보다 많은 이산화탄소를 소비하는 쪽으로 변화 될 것이다. 이로 인해 대기권에 있는 CO₂의 농도는 오랜 시간에 걸쳐 낮아질 것이다. |
| B | <ol style="list-style-type: none"> 1. 화석연료를 지금보다 더 많이 사용해도 탄소 양의 보존 법칙 때문에 탄소의 순환에는 큰 변화가 없다. 2. 대기 중의 이산화탄소의 증가는 대기와 해수의 온도를 높인다. 온도가 높아지면 생물의 삶이 영향을 받게 될 것이고, 심한 경우에는 생명과도 관계한다. 이런 결과는 화석연료의 생성이 중단되어 탄소의 순환이 끊어질 것이다. 3. 순환과정에서 한 부분이 증가하면 다른 부분으로 전이될 때, 큰 영향을 받게 되어 순환고리가 끊어지는 결과로 이어질 것이다. |
| C | <ol style="list-style-type: none"> 1. 화석연료를 더 많이 사용한다면 대기 중 탄소의 양이 증가 될 것이다. 대기 중의 CO₂의 증가는 대기의 온도를 높이고, 이는 빙하를 녹게 하여 해수면의 높이를 상승시킨다. 해수면의 상승으로 육상생물의 생활공간이 축소되어 심각한 문제를 초래한다. 2. 대기 중의 CO₂ 증가는 지구의 온난화를 촉진시키고, 이는 석회암의 부식을 강화하여 암석권은 하강할 것이다. |
| D | <ol style="list-style-type: none"> 1. 화석연료를 더 많이 사용한다면 대기 중 탄소의 양이 증가 될 것이다. 대기 중의 CO₂ 증가는 지구의 온난화를 가속시키고, 이는 빙하를 녹게 하여 해수면이 상승한다. 2. 대기 중의 이산화탄소 증가는 지상 생물의 호흡곤란을 일으킨다. 3. 대기 중의 이산화탄소 증가는 해수 중의 더 많은 이산화탄소를 용해시킨다. 해수 중 탄소의 증가는 수중생물들의 호흡곤란으로 이어진다. 4. 탄소의 순환은 화석연료의 증가에 따라 대기, 해수에서 일방적인 이산화탄소 증가로 이어질 것이다. |
| E | <ol style="list-style-type: none"> 1. 화석연료를 더 많이 사용한다면 대기 중 탄소의 양이 증가 될 것이다. 대기 중의 CO₂의 증가는 대기의 온도를 높여 수권, 대기권, 생물권에 커다란 영향을 미친다. 그러나 이것은 예측 불가능하다. 2. 대기 중의 CO₂의 양은 해수에 용해되거나 식물의 광합성에 의해 그 양이 감소한다. 그러므로 식물자원의 활용증가는 대기 중의 CO₂를 감소시킨다. 3. 해수의 양은 일정하므로 해수에 녹는 CO₂의 양은 항상 일정할 것이다. 4. 생물의 호흡, 탄산수소나트륨의 양은 대기 중의 CO₂를 증가시킨다. 그러므로 인간의 평균수명의 연장은 대기 중의 이산화탄소의 양을 증가시킬 것이다. 5. 화석연료는 침엽수가 땅속에 묻혀 변해서 생긴 것이다. 그러므로 화석연료는 유한하다. |
| F | <ol style="list-style-type: none"> 1. 화석연료를 더 많이 사용한다면 대기 중 탄소의 양이 증가 될 것이다. 대기 중의 CO₂의 증가는 대기의 온도를 높여 해수에 녹는 CO₂의 양을 감소시킨다. 이는 석회암의 생성을 감소시키고, 결국 석회암의 용해과정 에서 생성되는 CO₂의 양이 감소하게 되어 대기 중으로 공급되는 CO₂ 양은 감소한다. 2. 화석연료를 더 많이 사용한다면 인간생활이 윤택해진다. 이는 인구의 증가를 초래하며, 호흡량이 증가한다. 또한 인간생활공간의 확보를 위해 벌목이 증가하고 이는 식물의 광합성에 의한 이산화탄소의 소비를 감소시킨다. |

학적인 연결과 비과학적인 연결로 구분하였다. 설정 기준은 과학의 기본법칙에서 인정되거나, 탄소 순환과 관련하여 이미 학자들의 연구를 통해 검증된 내용이나 관련서적에 제시된 것에 근거하였으며, 비과학적 연결은 과학의 기본법칙에 위배되거나, 일부 납득할 수 있는 부분이 있다 하더라도 추가로 확장된 개념(예를 들어, 상상의 산물 등) 이에 관련된 보다 상위의 과학적 관점에 비추어 분명한 과학적 근거를 갖지 못한 경우에 해당하였다.

분석결과 41개의 개념연결이 나타났으며 이 중, 과학적 개념연결에 29개, 그리고 비과학적 연결에 12개가 해당하였다(Table 3). 과학적 개념연결에서, “화석연료 사용증가 → 대기 중 CO₂양 증가 → 대기 온도 상승”의 개념들 간 상호관계는 6명 모두에게서 공통

적으로 나타났으나, 대기의 온도가 상승됨에 따라 지구시스템에 나타나는 변화와 관련하여서는 해양과 생물에 대한 개념 연결로 분리되었으며, 반면, 대기의 온도가 상승함으로써 지구의 대기 순환의 변화에 관련된 개념들 간 분명한 연결은 인지되지 않았다. 이러한 결과는 본 연구에서 사용된 문제에서 제시된 관련 자료 중, “대기 중의 CO₂ → 해수, CO₂ → 식물”로 표현되었기 때문인 것으로도 볼 수 있으나, 제시된 자료의 내용에서 대기 중의 CO₂가 해수에 “용해”되어지는 것을 나타내었고, 대기 중의 CO₂가 식물의 호흡과 광합성에 관계되는 것을 표현하고 있음에도, 예비교사들은 “대기 중의 CO₂ 증가 → 지구의 대기 온도 상승”을 공통적으로 언급하였고, 일부는 대기의 온도와 해수 중 용해되는 CO₂ 양 변화의 관계보다는

Table 3. Analysis of causal-result relationships of the conceptions on the carbon cycle

| 대상 | 과학적 개념 연결 | 비과학적 개념 연결 |
|----|---|--|
| A | 화석연료 연소 증가 → 대기 중 CO ₂ 양 증가 대기 중 CO ₂ 증가 → 대기온도 상승 대기온도 상승 → 해수 중 CO ₂ 용해도 감소 해수 중 탄소 감소 → 대기 중 CO ₂ 증가 식물의 광합성 활발 → 대기 중 CO ₂ 감소 | 대기 중 CO ₂ 증가 → 새로운 생물탄생 대기 중 CO ₂ 증가 → 수권 탄소 순환감소 수권 탄소 순환감소 → 암석권 탄소 순환감소 |
| B | 화석연료 연소 증가 → 대기 중 CO ₂ 양 증가 대기 중 CO ₂ 양 증가 → 대기 온도 상승 대기 온도 상승 → 동물들의 생활 환경악화 | 대기 중 CO ₂ 증가 → 식물들의 생활 환경악화 식물, 동물 죽음 → 화석연료 생성 중단 |
| C | 화석연료 연소 증가 → 대기 중 CO ₂ 양 증가 대기 중 CO ₂ 양 증가 → 대기온도 상승 대기온도 상승 → 해수면 상승 해수면 상승 → 동·식물의 생활공간 감소 | 지구의 온도 증가 → 석회암 부식 석회암 부식 → 암석권 하강 |
| D | 화석연료 연소 증가 → 대기 중 CO ₂ 양 증가 대기 중 CO ₂ 양 증가 → 대기온도 상승 대기온도 상승 → 해수면 상승 대기 중 CO ₂ 양 증가 → 지상생물의 호흡곤란 해수의 CO ₂ 용해 증가 → 수중생물의 호흡곤란 대기 중 CO ₂ 양 증가 → 해수의 탄소 증가 | |
| E | 화석연료 연소 증가 → 대기 중 CO ₂ 양 증가 대기 중 CO ₂ 양 증가 → 대기온도 상승 대기 중 CO ₂ 양 증가 → 지상생물의 호흡곤란 생물의 호흡 → 대기 중 CO ₂ 양 증가 식물의 광합성 → 대기 중 CO ₂ 양 감소 해수의 CO ₂ 용해 증가 → 대기 중 CO ₂ 양 감소 | 해수의 양 일정 → 해수 중 탄소 일정 인구의 수명연장 → 대기 중 CO ₂ 양 증가 침엽수감소 → 화석연료증가 |
| F | 화석연료 연소 증가 → 대기 중 CO ₂ 양 증가 대기 중 CO ₂ 양 증가 → 대기온도 상승 대기온도 상승 → 해수 중 CO ₂ 용해도 감소 해수 중 탄소 감소 → 석회암 감소 인구증가 → 대기 중 CO ₂ 양 증가 | 화석연료 사용 → 동물의 호흡량 증가 석회암 감소 → 대기 중 CO ₂ 감소 |

해수면의 상승과, 생물생활공간의 감소, 그리고 동물들의 생활환경악화 등을 언급한 것에 비추어 볼 때, 탄소 순환에 관련된 예비교사들의 진술은 문제에서 제시된 자료에만 의존하지 않았으며, 스스로 생각할 수 있는 관련개념들을 동원하고 있음을 충분히 예상할 수 있게 하였다. 이런 측면에서, 예비교사들은 대기 중의 CO₂ 양과 관련하여 우선적으로 지구의 온난화와의 관계를 등장시키고 있으며, 지구의 온난화로 인한 지구시스템의 변화 중, 대기 대순환이나, 암석과 관련된 부분보다는 생물이나 해양에 관련된 부분에 보다 많은 관심을 가지고 있음을 알 수 있다. 비과학적 개념연결로 분류된 12종의 답변들에 있어서의 설정은 “생물 죽음 → 화석연료 생성중단, 지구온도 증가 → 석회암 부식, 석회암 부식 → 암석권 하강, 석회암 감소 → 대기 중 CO₂ 양 감소, 침엽수 감소 → 화석연료 증가, 수권 탄소 순환감소 → 암석권

탄소 순환감소, 그리고 화석연료 → 동물의 호흡량” 등 지구시스템에서 암석권에 관계된 개념이 6개를 차지하여 다른 개념에 비해 상대적으로 높은 비중을 차지하였다. 이처럼 암석권에 대한 비과학적 개념연결이 많은 것은 탄소 순환에서 암석권에 대한 이해가 낮은 것에서 기인한다고 생각할 수 있다. 특히, “생물의 죽음 → 화석연료 생성중단” 등의 사고는 석회암의 생성기작과 관련된 기본적인 개념으로써 탄소 순환에서 암석권에 관련된 부분에 대한 이해정도가 저조하다고 볼 수 있다. “해수의 양 일정 → 해수 중 용해된 탄소 양 일정”의 사고는 온도에 따라 달라지는 ‘기체의 용해도’의 기본법칙에 대한 이해 부족으로 해석된다.

인과지도

예비교사들의 개념에서 나타난 탄소의 개념이 지구

시스템을 구성하는 기권, 수권, 생물권, 그리고 암석권 중, 어느 곳에 해당되는 탄소를 의미하는지에 관련탄소개념을 설정하여 인과지도를 작성하였다. 그러나 예비교사의 사고를 표현하는데 꼭 필요하다고 생각되는 개념이 탄소 순환과정에서 지구시스템의 탄소와 직접적인 관련성이 없는 경우에는 본래의 개념을 그대로 사용하여 인과지도의 구성요소로 사용하였다. 인과지도를 작성하는 과정에서 화석연료의 사용증가는 이미 문제에서 제시된 가정이었으므로, 이 과정에 대한 부분은 적용하지 않았고, 모두가 화석연료의 사용이 증가되면 대기 중의 CO₂ 양이 증가할 것으로 예상하였기 때문에 인과지도는 “기권 탄소”로부터 시작되었다(Fig. 2). 완성된 인과지도의 외형적 특징은 탄소 순환에 대해 순환성이 강조되어 지기보다는 분산적이고 단선적인 특징이 나타났다. 이는 예비교사들이 지구에서 탄소 순환이 다양한 구성요소들이 관여하여 복잡한 과정 속에서 이루어지고 있는 시스템의 순환적 특성에 대한 이해는 낮은 반면, 시간의 흐름에 따라 나타나는 상황진개에 따른 개념들 간 연결이 순차적으로 이루어짐으로서, 시스템의 역동적 특성에 대해서는 보다 높은 이해에 도달하고 있음이 확인되었다. 그러나 이러한 결과에 대한 이유가 지구 시스템에서 탄소 순환에 관련된 전반적인 과정에서 각각의 부분에 대한 내용적 이해의 부족에서 기인된 것인지, 또는 탄소 순환 자체의 특성에 대한 이해의 부족 때문인지는 확인할 수 없었다. 다만, 인과지도의 순환적 외형과 사용된 구성요소의 수와는 어떤 상관관계를 인식하기는 어려웠으며, 구성요소들이 의미하는 내용에 따라 상호 연결되는 구성요소들 간의 양상이 인과지도의 외형적 형태에 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다. 탄소 순환에 관련하여 완성된 예비교사들의 인과지도에서 사용된 구성요소들이 지구 시스템 중 기권, 수권, 암석권, 생물권 중 어느 곳에 더욱 집중되어지고 있는지를 알아보기 위해 지구 시스템과의 관련성에 따라 기권, 암석권, 수권, 생물권으로 분류하였다. 그리고 분류된 관련개념들의 연결에서 나타나는 특징과 인과지도에서 피드백 순환고리의 형성, 그리고 피드백 순환고리를 구성하는 관련개념들의 특징을 조사하였다(Table 4).

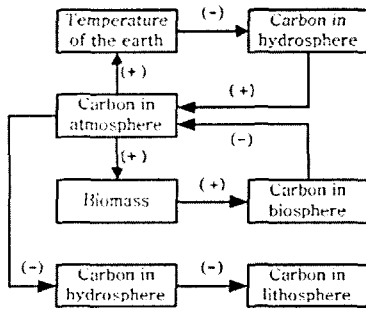
Table 4에서 나타난 바와 같이 탄소 순환에 대한 예비교사들의 인과지도에서 구성요소는 42개가 나타났으며, 이를 모두 지구시스템의 기권, 수권, 암석권, 생물권의 관련개념으로 구분하여 21개의 상호연결

Table 4. Analysis of causal maps and related conceptions to earth system

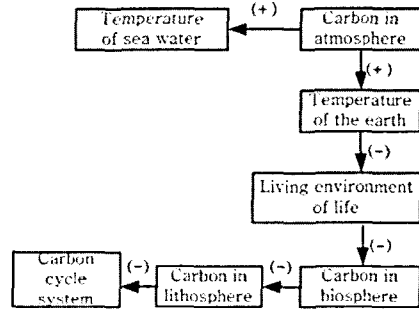
| 대상 | 구성요소 수 | 피드백 순환고리 | 관련개념연결 |
|----|--------|----------|--|
| A | 7 | 2 | 기권 ↔ 수권 기권 ↔ 생물권 수권 → 암석권 |
| B | 7 | 0 | 기권 → 생물권 생물권 → 암석권 |
| C | 6 | 0 | 기권 → 암석권 기권 → 생물권 |
| D | 7 | 0 | 기권 → 수권 기권 → 생물권 수권 → 생물권 |
| E | 7 | 0 | 기권 ↔ 수권 기권 ↔ 생물권 생물권 → 암석권 |
| F | 8 | 1 | 기권 → 수권 수권 → 암석권 암석권 → 기권 암석권 → 생물권 |

관계를 설정하였다. 42개의 관련개념 중, 기권이 15개로 가장 많았으며, 생물권 11개, 수권 9개, 그리고 암석권은 7개로 가장 적었다.

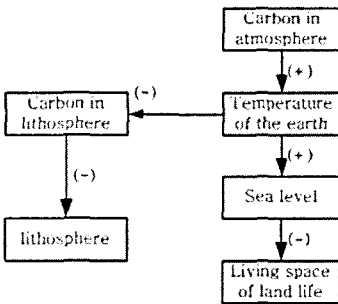
관련개념의 상호연결은 “기권 → 생물권”에 대한 설정이 5개로 가장 많았고, 다음으로 “기권 → 수권”이 4개, “생물권 → 암석권”, “수권 → 암석권”, “생물권 → 기권”, “수권 → 기권”이 각각 2개 그리고 “암석권 → 생물권”, “암석권 → 기권”, “기권 → 암석권”, “수권 → 생물권”이 각각 1개씩을 나타내었다. 이러한 결과는 6명의 모두가 탄소 순환을 이해함에 있어서 지구시스템의 기권에 대한 관심이 가장 높고, 반면 암석권에 대해서는 가장 낮다는 것을 나타낸다. 관련개념들 간 상호연결에서는 “기권 → 생물권”, “기권 → 수권”의 관계에 대해 높은 관심을 가지고 있는 반면, 암석권과 관련되어서는 낮은 관심을 보이고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 관련개념에 있어서 암석권으로 분류된 7개 중 6개는 비과학적 연결에 해당한다(Table 3). 이는 탄소 순환에서 암석권에 관련되는 부분에서의 과정에 대한 이해가 상당 부분 명확하지 못함을 보여준다. 최근 이산화탄소에 의한 지구의 온난화에 대해 사회적으로 많은 관심이 있고, 생물의 생존과 활동에 이산화탄소의 관련성이 높은 것을 생각해 볼 때, 예비교사들이 기권과 생물권에 대한 탄소 순환과정에 많은 관심을 갖고 있는 것은 당연한



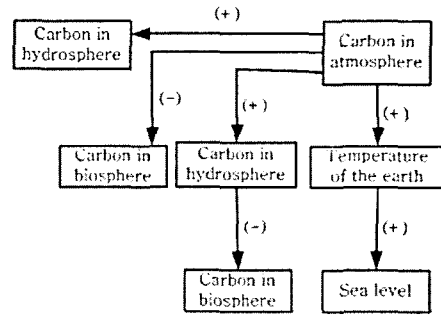
A preservice teacher's causal map



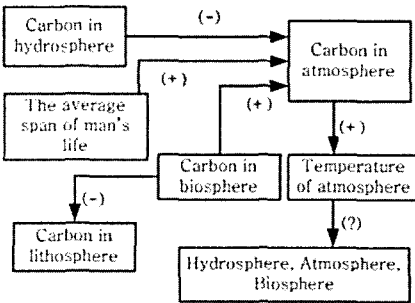
B preservice teacher's causal map



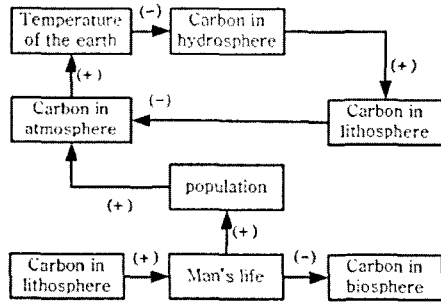
C preservice teacher's causal map



D preservice teacher's causal map



E preservice teacher's causal map



F preservice teacher's causal map

Fig. 2. Causal maps for question on the carbon cycle.

결과일 수 있다. 그러나 지구의 탄소 순환은 기권, 생물권뿐만 아니라, 암석권, 수권과의 밀접한 관계 속에서 작동되고 있는 시스템이라는 특성을 고려해 볼 때, 단편적인 부분이 강조됨으로써, 오히려 거시적인 시스템의 특성을 바르게 이해하는데 부정적인 요인으로 작용할 수 있다. 최근 우리나라의 해양생태계의 황폐화와 관련하여 사회적 문제로 대두되고 있는 동해 연안해역의 '백화현상'은 탄소 순환에서 암

석권, 수권, 그리고 기권, 생물권의 탄소와 상호 관계가 있으며, 그 중에서도 수권과 암석권 간 탄소 순환과 매우 밀접한 관계가 있다는 주장이 설득력을 얻고 있다. 이런 측면에서 탄소 순환은 지구시스템에서 보다 광범위하게 연관되어져 있고, 탄소 순환에 관련된 전반적인 부분에 대한 이해가 선행되어지지 않고서는 탄소 순환의 거시적 특성을 이해한다는 것이 어렵다는 것을 의미한다.

시스템 사고의 적용

탄소 순환의 개념을 분석하여 작성한 인과지도에서 6명 중 2명이 피드백 순환고리를 완성하였다(Fig. 1). 4명은 탄소 순환과 관련하여 다양한 개념을 동원하였지만, 이것을 근거로 작성한 인과지도에서 피드백 순환고리는 완성되지 못하였다. 인과지도에서 피드백 순환고리가 완성된 A와 F는 피드백 순환고리의 수가 2개와 1개로 매우 적었다. Maani and Maharaj(2004)는 시스템 사고에 관련된 연구에서, 인과지도에서 피드백 순환고리의 수가 많은 학생들의 경우, 다양한 사고의 수행능력과 시스템특성에 대한 이해 정도가 높았음을 제시하였다. 이러한 맥락에서 볼 때, 이 연구에 참가한 예비교사들이 완성한 인과지도에서 피드백 순환 고리가 거의 완성되지 못한 결과는 시사하는 바가 크다. 또한 인과지도에서 2개의 피드백 순환 고리가 완성된 A의 경우, 1개의 피드백 순환고리는 ‘대기 중 CO₂ 증가 → 새로운 생물탄생 → 광합성 증가 → 대기 중 CO₂ 감소’의 개념 연결이 설정되어, 대기 중에 이산화탄소가 증가하면 ‘이산화탄소를 더 많이 소비하는 새로운 생물이 탄생한다’는 검증되지 않은 전제를 하여 내용적 측면에서 비과학적 개념연결이 사용되었다. 이런 결과에 비추어 볼 때, 내용적 측면에서 개념들이 과학적 연결에 해당하고, 외형적인 측면에서 순환형태로 구성된 피드백 순환고리는 A와 F의 인과지도에서 각각 1개씩으로 나타났다. 김동환(2000)은 시스템 사고를 수행하기 위해서는 인과지도에서 피드백 순환고리가 완성되어야 한다는 것을 강조하였다. 이에, 인과지도에서 피드백 순환고리가 형성되지 않은 예비교사들은 시스템 사고를 거의 수행하지 못하고 있는 것으로 볼 수 있으며, A와 F는 어느 정도 시스템 사고를 수행하고 있다고 판단된다. 그러나 완성된 피드백 순환고리의 수에 비추어 볼 때, A와 F 모두 높은 수준의 시스템 사고는 수행되지 않고 있다. 인과지도에서 피드백 순환고리의 완성여부에 따라, 지구에서 작동하는 탄소 순환에 대한 상반된 결과를 보여주었다. 피드백 순환고리가 완성된 예비교사들의 경우 탄소 순환이 지속적으로 순환 시스템을 유지할 것으로 예측한 반면, 인과지도에서 피드백 순환고리가 완성되지 않은 예비교사들은 탄소 순환에 대해 예측이 불가능하거나 일방적인 방향으로의 전개를 예상하였다.

결론 및 제언

사범대학교 지구과학교육전공 1학년 6명의 예비교사들을 대상으로, 탄소 순환에 관련된 개념들을 조사하여 지구시스템에 대한 관련개념과 탄소 순환을 이해하는데 시스템 사고를 적절히 수행하고 있는지를 알아보기 위한 연구에서 다음과 같은 결론을 제시할 수 있다.

첫째, 연구에 참가한 6명의 예비교사들은 탄소 순환에 대해 기권, 암석권, 수권, 생물권에 관련하여 42개의 관련개념을 사용하였으며 그 중, 기권은 15개, 생물권은 11, 수권 9개, 그리고 암석권은 7개였다.

둘째, 예비교사들의 인과지도에서 피드백 순환고리가 완성된 학생은 2명으로, 피드백 순환고리의 수는 A의 인과지도에서 2개, F의 인과지도에서는 1개가 나타났으며, A의 경우, 완성된 1개의 피드백 순환고리는 비과학적 개념연결에 근거하였다. 이는 연구에 참여한 예비교사들이 탄소 순환에 대해 시스템 사고를 적용하지 못하였거나, 적용했더라도 낮은 수준의 시스템 사고를 수행하고 있음을 나타낸다.

지구에서 다루어지는 대부분의 자연현상은 단순한 법칙이나 원인만으로 해석되기보다는, 이에 관련되는 다양한 개념들과 요인들의 상호 작용을 통해 복잡한 과정 속에서 이루어진 결과로 볼 수 있다. 그러므로 복잡한 시스템을 해석하고 이해함에 있어서 단선적 사고나 단편적인 부분에 집중된 사고를 통해 시스템 전체의 특성을 이해하기는 매우 어려운 일이다. 시스템 사고는 이러한 한계를 극복하고, 보다 거시적이고 함축적인 이해를 돕는데 유용한 사고라는 점에서, 여러 차원과 관련 개념들이 다양하게 연관된 지구과학 영역의 교육에서 그 효율성이 높을 것으로 생각된다. 한편, Sweeney(2000)의 연구에서 많은 학생들은 높은 수준의 시스템 사고를 이해하고 적용하는데 매우 어려움을 느끼고 있는 것으로 나타나고 있다. 그러나 Ossimitz(1998)의 연구에서 지적된 것처럼, 일반적 교육 연구에서는 Forrester(1992) 등에 의한 연구에서 제안된 교사의 역할을 제거하거나 최소화시키는 ‘학습자중심 학습(learner-centered-learning)’이 효과적인 교육방법으로 선호되고 있다. Ossimitz (1998)는 이러한 학습자중심 학습의 형태는 수준 높은 시스템 사고를 이해하는 데는 한계가 있으며, 나아가서 교사의

역할이 시스템 사고를 전개시키는 중요한 요인적 역할(key role)을 할 수 있음을 주장하였다. 이와 같은 관점에서, 이 연구에서 대상으로 한 탄소 순환에 대한 시스템 사고의 전개를 살펴본 결과 역시, 학습자들이 시스템 사고를 적용하는 데에 상당한 어려움을 수반한다는 것을 인식할 수 있었다. 즉, 과거 학생들이 경험한 탄소 순환에 관련된 학습에서 교사가 학습활동을 전개할 때, 시스템 사고를 염두에 두고 교수-학습을 진행하였으면 결과는 달랐을 가능성이 높다고 할 수 있다. 이 연구에서는 제한점에서도 말한 것처럼 탄소 순환시스템에 대해 시스템 사고적인 사전 교육이 이루어지지 않는 것이다. 따라서 앞으로 시스템 사고를 염두에 둔 교수-학습전략에 따라 사전교육을 실시하고, 사전교육을 실시하지 않은 대상들과 그 결과를 비교한 연구가 이루어진다면 매우 다양한 시스템으로 구성된 지구과학 영역의 교육에 많은 시사점이 던져질 수 있을 것이며, 나아가 탄소 순환시스템 외에 지구과학분야의 다양한 시스템에 대해 연구 대상과 방법을 달리한 시스템 사고와 관련된 구체적인 연구들이 더 필요할 것으로 생각한다.

참고 문헌

- 김동환, 2000, 김대중 대통령의 인과지도: 1997년도 금융위기의 원인과 극복에 관한 김대중 대통령의 시스템 사고. 한국 시스템 다이내믹스 연구, 창간호, 5-28.
- Bryan, L.A., 2003, Nestedness of Belief: Examining a prospective elementary teacher's belief system about science teaching and learning. *Journal of Research in Science Teaching*, 40 (9), 835-868.
- Chen, D. and Stroup, W., 1993, General system theory: Toward a conceptual framework for science and technology education for all. *Journal of Science Education and Technology*, 2, 447-459.
- Dori, Y.J. and Tal, R.T., 2003, Teaching biotechnology through case studies-Can we improve higher order thinking skills of nonscience majors?. *Science Education*, 87 (6), 767-793.
- Forrester, J.W., 1961, *Industrial Dynamics*. Cambridge, M.I.T. Press, MA, 464.
- Forrester, J.W., 1992, *System Dynamics and Learner-Centered-Learning in Kindergarten through 12th Grade Education*. Cambridge, MA, 02139, USA, D-4337.
- Hogan, K.M., Nastasi, B.K., and Pressley, M., 2000, Discourse patterns and collaborative scientific reasoning in peer and teacher-guided discussions. *Cognition and Instruction*, 17, 379-432.
- Ison, R., 1999, *Applying Systems Thinking to Higher Education*. *Systems Research and Behavioral Science*, 16, 107-112.
- Kali, Y., Orion, N., and Eylon, S.B., 2003, Effect of knowledge Integration Activities on Students' Perception of the Earth's Crust as a Cyclic System. *Journal of Research in Science Teaching*, 40 (6), 545-565.
- Maani, K.E. and Maharaj, V., 2004, Links between systems thinking and complex decision making. *System Dynamic Review*, 20 (1), 21-48.
- McNamara, C., 1998, *Applied Systems Thinking*, <http://www.tc.umn.edu/~ahler002/tft~1.htm>, International Society for the Systems Sciences Conference, 1-20.
- Mayer, V.J., 1997, Global science literacy. An Earth System View, *Journal of Research in Science Teaching*, 34 (2), 101-105.
- Moore, J.A., 1995, Cultural and scientific literacy. *Molecular Biology of the Cell*, 6, 1-6.
- Novak, J.D., 1990, Concept mapping: A useful tool for science education. *Journal of Research in Science Teaching*, 27 (10), 937-949.
- Ossimitz, G., 1998, The Development of Systems Thinking Skills, In Maier E. et al. (eds.), *Selected Papers from the Annual Conference of Didactics of Mathematics*, Electronic Journal, Cohors-Fresenborg, 90-104.
- Penner, E.D., 2000, Explaining System: Investigating Middle School Students' Understanding of Emergent Phenomena. *Journal of Research in Science Teaching*, 37 (8), 784-806.
- Perkins, D.N. and Unger, C., 1999, Teaching and learning for understanding. In Reigeluth, C.M. (ed.), *Instructional design theories and models*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 91-144.
- Resnick, M., 1996, Beyond the Centralized Mindset. *The Journal of The Learning Science*, 5 (1), 1-22.
- Richmond, B., 1993, System Thinking: critical thinking skills for the 1990's and beyond. *System Dynamic Review*, 9 (2), 113-134.
- Senge, P. M., 1990, *The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization*. Currency Doubleday, New York, 423.
- Sheehy, N.P., Wylie, J.W., McGuinness, C., and Orchard, G., 2000, How children solve Environmental: using computer simulations to investigate system thinking. *Environmental Education Research*, 6 (2), 109-126.
- Sterman, J.D., 1994, Learning in and about complex systems. *System Dynamics Review*, 10 (2), 291-330.
- Sterman, J.D. and Sweeney, L.B., 2002, Cloudy skies: assessing public understanding of global warming. *System Dynamics Review*, 18 (2), 207-240.
- Sweeney, L.B. and Sterman, J.D., 2000, Bathtub dynamics: initial results of a systems thinkings inventory. *System Dynamics Review*, 16 (4), 249-286.
- Wolstenholme, E. and Stevenson, R., 1994, System think-

- ing & system modeling-New perspectives on business strategy & process design. *Management Services*, 38 (9), 22-25.
- Wylie, J., Sheehy, N., McGuinness, C., and Orchard, G., 1996, Children's cognitions: issues for global environmental education. *The Irish Journal of Psychology*, 17 (4), 310-326.
- Zeidler, D.L., Lederman, N.G., and Taylor, S.C., 1992, Fallacies and student discourse: Conceptualizing the role of critical thinking in science education. *Science Education*, 76, 437-450.

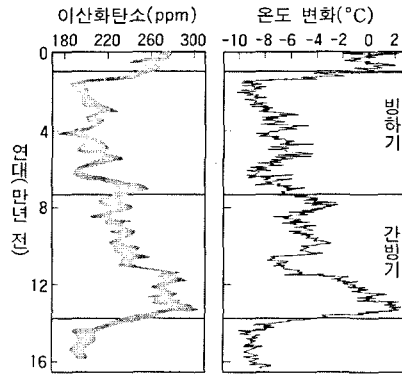
2004년 7월 26일 원고 접수
2004년 10월 31일 수정원고 접수
2004년 11월 13일 원고 채택

Appendix 1. 탄소 순환에 대한 질문지

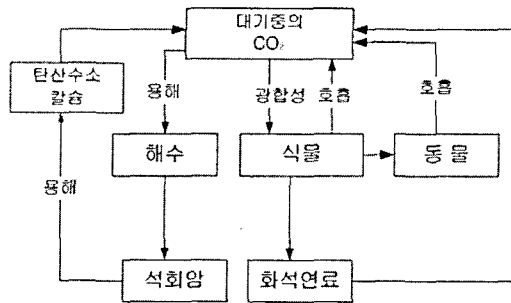
그림 (가)는 남극에서 시추한 얼음을 분석하여 얻은 과거 대기 중의 이산화탄소 농도와 지구의 평균 온도 변화를 나타낸 그래프이고, 그림 (나)는 지구에서 일어나는 탄소의 순환을 간략히 나타낸 모식도입니다.

문제

생물의 탄생과 진화에 가장 필수적인 탄소는 우리 지구의 대기권, 생물권, 암석권, 수권 등에 존재하면서 끊임없이 순환을 하고 있습니다. 지금보다 더 많은 화석연료를 사용한다면, 지구계의 대기권, 생물권, 암석권, 수권들에서 탄소의 순환은 어떻게 변화될까요? 자세히 적어주세요 (왜 그렇게 생각하는지 이유까지 적으세요).



(가)



(나)