

탄소 배출 시나리오를 통한 고등학생들의 탄소 순환에 대한 질량 보존의 개념 분석

서정욱¹ · 김형범^{2,*} · Patrice Potvin²

¹한국교육원대학교 지구과학교육과, 363-791, 충청북도 청원군 강내면 태성탑연로 250

²퀘벡대학교 몬트리올 캠퍼스 교육학과, H3C 3P8, 캐나다 퀘벡주 몬트리올시 센트레빌

An Analysis of High School Students' Conceptions of Conservation of Mass on Carbon Cycle through Carbon Emission Scenario

Jeong-Wook Seo¹, Hyoungbum Kim^{2,*}, and Patrice Potvin²

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

²Department of Education, University of Quebec in Montreal (UQAM), Quebec H3C 3P8, Canada

Abstract: The purpose of this study was to investigate high school students' conception of conservation of mass through the scenario of carbon emission in terms of carbon cycle. Seventy six high school students of 11th grade were participated in this study. Participants were provided with two scenarios that showed a gradual increase and decrease of atmospheric CO₂ amount from the level recorded in 2013 up to 450 ppm and to 340 ppm by 2110, which is the changes of around 15%. We asked participants to explain the reason after having them draw the emissions trajectory of CO₂ according to scenario. Most participants thought that carbon emission would continue to increase despite the two scenarios of carbon emission making sense in terms of conservation of mass between emissions and the natural removal of carbon dioxide. This implies that participants came to think of pattern matching that carbon emission would continue to increase as they used correlation graphs of carbon emission: that is, the graphs of the evolution of anthropogenic emissions, of atmospheric CO₂, and of global mean temperature, from the beginning of the Industrial Revolution up to date, all of which are shown in high school earth science textbooks.

Keywords: carbon cycle, conservation of mass, pattern matching, textbook

요약: 이 연구의 목적은 탄소 순환 관련 탄소 배출 시나리오를 통해 고등학교 학생들의 질량 보존의 개념을 확인하는 것이다. 이 연구를 위해 총 76명의 고등학교 2학년 학생들이 참여하였다. 연구 참여자들에게 2013년의 대기 중 이산화탄소 값이 2110년까지 ±15%의 변화로 450 ppm와 340 ppm으로 점진적으로 증가 또는 감소되는 두 개의 시나리오를 제시하였다. 시나리오에 따라 연구 참여자들에게 이산화탄소의 배출량 궤적을 그리게 한 후, 이를 설명하게 하였다. 그 결과는 다음과 같다. 대부분의 연구 참여자들은 탄소 배출 시나리오에 따른 이산화탄소 배출량과 자연적 순수 제거량에 대한 질량 보존의 추론보다는 이산화탄소 배출량은 앞으로도 계속해서 증가할 것이라는 결과를 나타내었다. 이는 연구 참여자들이 고등학교 지구과학 교과서의 탄소 배출과 관련된 그래프들 즉, 산업혁명 이후 최근까지의 인위적 이산화탄

*Corresponding author: kim.hyoungbum@courrier.uqam.ca

Tel: +1-514-571-9051

Fax: +1-613-562-5144

소 배출량 그래프, 대기 중 이산화탄소 농도 그래프, 평균 지구의 온도에 대한 그래프를 통해 이산화탄소 배출량이 계속해서 증가할 것이라는 패턴 매칭(pattern matching)을 생각하게 되었다는 것을 의미한다.

주요어: 탄소 순환, 질량 보존, 패턴 매칭, 교과서

서론

지질, 해양, 대기, 생물권에서의 물질과 에너지의 순환은 매우 복잡한 시스템과 피드백을 가진다(Houghton, 2004). 지구시스템의 관점에서 탄소가 어떻게 순환을 하는지와 탄소 배출에 관한 과학적 이해를 바탕으로 하는 학습 주제는 학생들에게 학습될 필요가 있으며, 이는 최근의 기후변화 교육에 매우 큰 의미를 가진다(Clark et al., 2012). 특히 Fortner (2001)는 기후변화는 다양한 원인에 의해 복합적으로 나타나며, 이 중 탄소 순환은 기권, 수권, 암석권, 생물권의 지구시스템과 상호 복잡한 관련성을 가지고 있으므로, 지구시스템 교육은 지구에 대한 과학적 사고와 종합적 판단능력이 필요하다고 주장하였다. 최근 미국에서도 기후변화뿐만 아니라 탄소 배출과 관련된 학습주제가 초·중등 과학교육의 중요한 교육목표로 제시되어 있으며 기권, 수권, 지권, 생물권을 포함한 지구시스템의 관점에서 이를 학습하고 이해할 것을 학생들에게 강조하고 있다(National Research Council, 2012). 특히 지구에서 복잡한 시스템의 특성을 갖는 탄소 순환은 시·공간적 측면에서 서로 관련되는 요인들과 그 연계과정이 매우 복잡하며, Serman and Sweeney (2002)는 지구의 탄소 순환을 복잡한 시스템으로 인식하였다. 이러한 시스템 사고는 다양한 개념들의 상호작용과 이들의 피드백 효과를 고려하여 전체의 시스템을 단일 개체로 인식하고 그 특성을 파악하는 사고이며(McNamara, 1998), 이를 통해 탄소의 질량 보존과 관련하여 탄소 배출량 및 자연적 순수 제거량에 따른 구성요소들 간 상호맥락의 인과관계를 파악해야 할 필요가 있다. 특히 Ossimtz (2002)는 시스템 사고에 대한 핵심모델 중 하나로 저장과 흐름 다이어그램(stock-flow diagram)을 강조하였는데 이는 탄소 순환과 관련하여 탄소의 질량 보존을 이해하는 데 유용한 사고임을 제안한 바 있다(Moxnes and Saysel, 2009). 따라서 학생들의 탄소에 대한 질량 보존의 개념은 학생들의 탄소 순환에 대한 시스템 사고를 알아보는 데 중요한 의미를 가진다고 볼 수 있다.

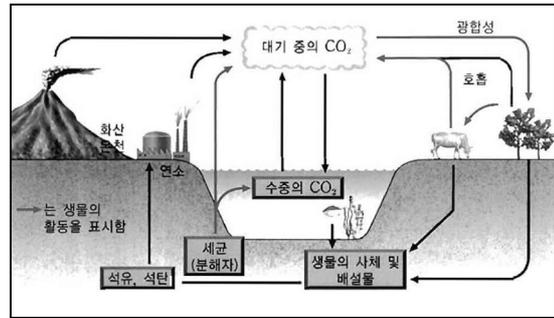


Fig. 1. Examples of Carbon cycle of Earth Science I (Lee et al., 2011).

일반적으로 탄소 관련 학습주제에 대해 학생들은 초·중등 과학교과서에서 물질 순환에 대한 일부 내용으로 탄소 순환을 배우게 된다(Fig. 1). 즉 교과서의 그림에서는 화살표를 사용하여 탄소가 순환하는 과정을 표시한다. 이에 대해 Clark et al. (2012)는 학생들이 순환(cycle)의 개념을 탄소 분자가 계속 반복적으로 순환하는 것으로 이해함으로써 탄소가 지권, 수권, 기권, 생물권에서 저장되는 비율과 빈도에 대해 이해하지 못하는 오개념을 가지게 된다고 하였다. 또한 Driver et al. (1994)는 학생들이 이러한 화살표를 통해 연속적인 순환의 개념을 이해하기보다 물질의 생성과 소멸이 반복되는 즉, 원인과 결과로만 이해하게 된다는 연구결과를 발표하였다.

이에 대해 Clark et al. (2012)은 탄소 순환 게임 학습을 통해 지구 시스템 관점에서 탄소 순환 개념을 학생들이 잘 이해하지 못하고 있음을 지적하였으며, 탄소 순환 관련 질량 보존(conservation of mass)에 대한 개념 연구의 필요성을 제안하였다. 또한 Serman (2008)은 고학력 졸업자들을 대상으로 2100년에 지구의 탄소농도가 400 ppm에서 안정화된다는 가정 하에 탄소 배출량의 값과 자연적 순수 제거량의 값은 어떻게 변화될 것인지에 대한 탄소 배출 시나리오를 통해 연구 참여자들의 정신모형(mental model)을 알아보았다. 그리고 그는 실험결과에서 연구 참여자들은 탄소의 질량 균형(mass balance)에 대해 오개념을 가지고 있다는 연구결과를 발표하였다.

그러나 일부 시나리오에 따른 정량적 분석을 통해 탄소의 질량 보존에 대한 개념 연구를 알아보는 데는 한계가 있으며, 고학력 졸업자들의 질량 보존에 대한 오개념의 원인과 이에 대한 해결방안에 대한 연구는 아직 이루어지지 않았다(Moxnes and Saysel, 2009). 특히 기후변화 교육의 중심에 있는 고등학교 학생들을 대상으로 한 탄소의 질량 보존에 대한 개념 연구를 통해 오개념의 원인과 해결방안 등을 모색하는 연구가 필요할 것이다. 그러므로 탄소 순환에 따른 고등학생들의 질량 보존의 개념적 특징을 확인해 보는 것은 지구시스템 교육과 관련하여 학생들에게 올바른 기후변화 교육을 제공할 수 있다는 점에서 중요한 의미를 둘 수 있다.

그러나 기후변화와 관련된 논문 중에서 중·고등학생들을 대상으로 한 논문들을 살펴보면, 대부분 온실 효과 및 지구 온난화 그리고 기후변화의 원인과 결과에 대한 기본적인 개념에 대한 학생들의 오개념 연구에 한정되어 있으며(Choi et al., 2010), 최근까지의 중·고등학생들을 대상으로 한 탄소 순환과 관련된 탄소의 질량 보존에 대한 학생들의 개념연구는 이루어지지 않은 상태이다. 국내의 탄소 순환에 대한 연구들을 살펴보면, Moon et al. (2004)은 지구과학 예비교사들을 대상으로 한 탄소 순환 개념과 시스템에 대한 연구에서 탄소 순환에 대한 이해가 낮고 시스템사고는 이루어지지 않거나 그 수준이 매우 낮았다는 연구 결과를 발표하였고, Lee et al. (2013)은 고등학생들의 탄소 순환 개념분석을 위해 탄소 순환과 관련된 단어 연상과 그림 그리기 등을 통한 연구에서 탄소 순환의 개념이 매우 낮았다는 연구 결과를 보고한 바 있다. 따라서 탄소 순환과 관련한 연구는 매우 부족한 상태이며, 지금까지의 연구들은 면담과 그리기 등의 설문 형태의 연구방법을 사용한 결과이므로, 탄소 순환과 관련하여 질량 보존에 대한 개념 연구를 위해서는 이에 맞는 연구방법이 필요할 것이다. 그러므로 이 연구의 목적은 아직 연구되지 않았던 고등학교 학생들을 대상으로 탄소의 질량 보존에 대한 정성적·정량적 연구 방법에 의한 개념 연구를 통해, 올바른 기후변화 교육을 모색한다는 점에서 의의가 있을 것이다.

연구방법

연구 대상

서울에 소재한 인문계 고등학교 2학년 76명의 학

생을 대상으로 이산화탄소 배출에 따른 시나리오 검사지를 이용하여 학생들의 질량 보존에 대한 탄소 순환의 개념을 확인하였다. 연구 참여자들은 2013년 지구과학 I의 기후변화 단원에 대해 수업을 받았으며, 이 연구를 위해 자발적으로 참여하였다.

연구 절차

2012년부터 시행되는 기후변화 단원은 기후변화의 원인을 이해하고 미래 지구환경변화를 예측하고 해결책을 논의하는 것이 목적이다. 이 중에서 대기 중의 탄소는 지구의 온실효과와 관련하여 시·공간적 측면에서 서로 관련되는 요인들과 그 연계과정이 매우 복잡하다고 볼 수 있다. 따라서 수업은 탄소 순환에 대한 개념과 질량 보존에 대한 관련 개념들을 포함하여 총 9차시 450분에 걸쳐 기후변화 단원을 학습하였다. 또한 고등학교 지구과학 I 교과서에서 다루고 있는 탄소 순환에 대한 개념을 이산화탄소 배출 시나리오 검사지를 통해 탄소의 질량 보존 관점에서 학생들의 개념을 분석하고자 하였다.

자료 수집

이 연구에서는 먼저 연구 참여자들에게 1880년부터 2010년 사이의 탄소 배출에 따른 지구의 온도변화 그래프를 보여주고 이에 대해 설명을 하였다(Appendix 1). 본 연구에서 사용된 Appendix 1에 관한 읽기 자료는 Sterman (2008)이 이전 연구에서 고학력 졸업자들을 대상으로 탄소 배출 시나리오 검사지를 연구 참여자들에게 제시하기 전 사용하였던 IPCC 세 번째 보고서(Houghton et al., 2001)의 내용을 수정하여 사용하였다. 따라서 산업혁명 이후 최근까지의 탄소 배출에 따른 지구의 기후변화 그래프를 CDIAC (carbon dioxide information analysis center)로부터 2010년까지의 데이터를 새롭게 추가하여 수정하였다. 두 번째로 연구 참여자들에게 2110년 지구의 탄소농도가 450 ppm과 340 ppm의 두 개의 값에서 안정화된다는 탄소 배출 시나리오 검사지를 제시하고 30분 동안 이를 작성하도록 하였다. 마지막으로 검사지 작성 후 개별 면담을 통해 연구 참여자들이 작성한 검사지의 그래프에 대해 그 이유를 설명하게 하였다. 이 연구에서 사용된 검사지는 Sterman (2008)이 고학력 졸업자들을 대상으로 질량 균형(mass balance)에 대한 정신모형(mental model)을 알아보기 위해 사용한 검사지를 수정·보완하여 사용하였다. 즉

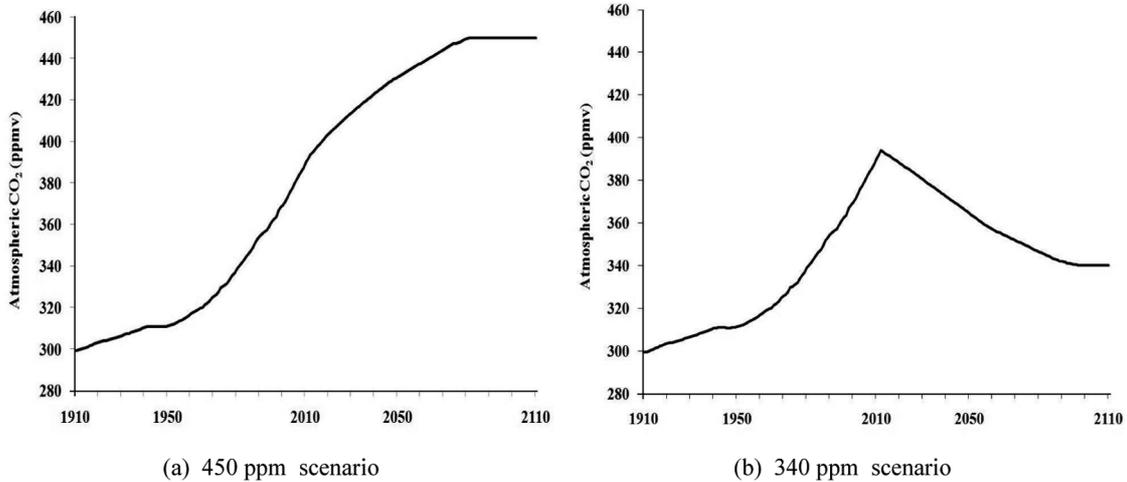


Fig. 2. Scenarios of Carbon dioxide emission.

2100년에 지구의 탄소농도가 400 ppm에서 안정화된다는 가정 하에 탄소 배출량의 값과 자연적 순수 제거량의 값은 어떻게 변화될 것인지에 대한 Sterman (2008)의 탄소 배출 시나리오를 2110년 지구의 탄소 농도가 450 ppm과 340 ppm 두 개의 값에서 안정화된다는 시나리오로 수정하여 사용하였다. 이는 학생들이 탄소의 질량 보존과 관련하여 최근의 이산화탄소 농도를 기준으로 100년 후 450 ppm (최댓값)과 340 ppm (최솟값)의 다양한 구성요소들의 상호맥락을 전체적이면서도 함축적으로 이해하고 있는지를 알아보는데 적합하다고 판단되었다. 이처럼 수정된 내용에 대해서는 과학교육 전문가 2인의 내용타당도를 통해 검사의 문항, 질문, 목적 측정을 위하여 규정된 내용 영역이나 전체를 얼마나 잘 대표하느냐의 정도와 관련된 내용을 살펴보았다. 따라서 Sterman (2008)의 시나리오에 근거하여 지구의 대기 중 이산화탄소 농도가 2013년 약 393 ppm에서 점진적으로 증가 또는 감소하여 2110년까지 약 ±15%의 변화로 450 ppm 또는 340 ppm에서 안정화된다는 두 개의 시나리오를 사용하였다. 특히 2000년을 기준으로 100년 후인 2100년의 이산화탄소 농도 400 ppm의 시나리오 (Sterman, 2008)는 최근의 이산화탄소 농도를 기준으로 450 ppm으로 수정하였다. 그 이유는 최근의 이산화탄소 농도가 390 ppm을 상회하고 있으므로 100년 후의 400 ppm의 시나리오와는 맞지 않기 때문이다.

따라서 연구 참여자들은 대기 중 이산화탄소 농도에 대한 100년 후의 450 ppm 시나리오(Fig. 2a)와 340 ppm 시나리오(Fig. 2b)를 받고, 이를 실현하는

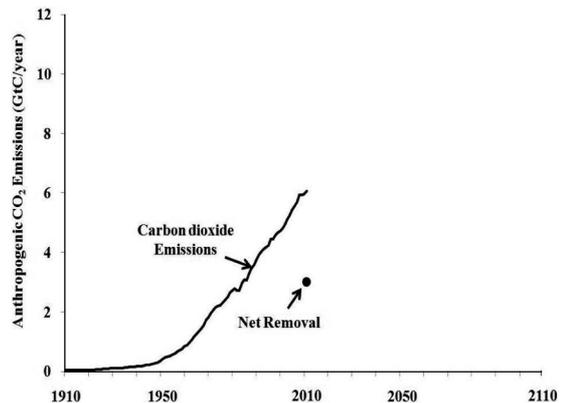


Fig. 3. Anthropogenic CO₂ emissions.

데 필요한 인류에 의한 이산화탄소 배출량 및 자연에 의한 순수 제거량의 궤적을 Fig. 3에 표시하게 하고 면담을 통해 이를 설명하게 하였다.

자료 분석

이 연구에서 시행된 연구 참여자들이 그린 그래프와 이에 대한 설명에 대한 면담 내용은 연구자 2인에 의해 분석되었다. 먼저 연구 참여자들이 그린 그래프는 2110년에 이산화탄소 배출량의 값이 450 ppm 또는 340 ppm으로 안정화되어야 하지만 이산화탄소 배출량 값에서 자연적 순수 제거량 값을 뺀 값이 허용오차를 크게 벗어나는 경우와 허용오차 범위에 있는 경우, 허용오차인 경우 등의 기준을 설정하여 분석하였다. 그래프에 대한 연구자간 이견이 있는 경우 즉, 이산화탄소 배출량 값과 순수 제거량 값을 정확

히 알아내기 어려운 그래프에 대해서는 허용오차(δ)의 범위를 $\pm 0.5 \text{ GtC yr}^{-1}$ 로 설정하여 그래프 값을 측정하였다. 학생이 작성한 그래프의 값이 연구자에 의해 정확히 해석되기 어려운 경우에는 검사일 이후 재차 면담을 통해 학생의 의견을 청취하여 검사지를 보완하였다. 또한 이 연구에서는 Sterman (2008)의 정량적 연구 방법 이외에 연구 참여자들의 그래프에 대한 설명의 면담 내용을 주제별로 항목 표를 만들어 코딩의 기준과 예를 마련한 정성적 방법을 추가하였다. 따라서 연구 참여자들의 그래프에 대한 설명의 면담내용을 전사하여 문장단위로 나누었으며, 주요 문장들을 중심으로 항목 표를 마련한 후 이에 따라 코딩하였다(Table 3). 과학교육 전문가 2인에 의한 충분한 논의를 통해, 주제별 항목 표의 세부 코딩 항목에 대한 정의를 명확히 하였다. 그리고 코딩 과정에서 서로 의견이 다른 항목에 대해서는 다시 논의하여 항목 표의 세부 내용을 명확히 했다. 이런 과정을 통해 연구자는 일관된 코딩 체계를 익힌 후, 자료를 분석하였으며, 분석 과정에서 불분명한 것은 다시 논의를 한 후, 합의를 통해 코딩하였으며, 최종 일치도를 확인하였다. Cohen (1960)의 Kappa 계수에 의한 평가자 사이에 신뢰도는 $K=0.85$ 로 Landis and Koch (1977)의 자료 분석 신뢰도 0.81 보다 높게 나타났다.

결과 및 논의

탄소 배출 시나리오에 따른 학생들의 반응

고등학교 2학년 76명의 학생들을 대상으로 이산화탄소 농도 450 ppm과 340 ppm에 따른 시나리오의 검사지 결과는 다음과 같다. Table 1에서 보는 바와 같이 연구 참여자 중 59.2%는 450 ppm의 시나리오를 40.8%는 340 ppm의 시나리오를 선택하였다. 연구

Table 1. Distribution of respondents among Carbon dioxide scenarios

| | Carbon dioxide scenarios | | | | | |
|-------------|--------------------------|------|----------|------|----------|-------|
| | 450 ppm | | 340 ppm | | Total | |
| | <i>N</i> | % | <i>N</i> | % | <i>N</i> | % |
| Respondents | 45 | 59.2 | 31 | 40.8 | 76 | 100.0 |

참여자들의 다수는 2110년에는 이산화탄소 농도가 340 ppm의 값 보다는 450 ppm의 값을 나타내며 안정화 될 것으로 전망하였다.

이 연구에서는 이산화탄소 농도가 2010년부터 약 100년 후인 2110년에 이산화탄소 배출량이 450 ppm과 340 ppm에서 안정화될 것이라는 시나리오를 통해 학생들의 탄소의 질량 보존에 대한 개념을 분석하고자 하였다. 따라서 450 ppm의 경우, 2010년 이후 자연에 의한 순수 제거량이 적어도 두 배가 될 것이라고 연구 참여자들이 생각하지 않는 한, 2110년 450 ppm에서 안정화를 이루기 위해서는 이산화탄소의 배출량 값과 자연에 의한 순수 제거량의 값은 서로 일치하여야 한다. 또한 2110년 340 ppm에서 안정화를 이루기 위해서는 대기 중 이산화탄소 배출량의 값은 현재 시점에서 가장 높고, 그 후 점차 감소하다가 이후 이산화탄소의 배출량 값과 자연적 순수 제거량의 값은 서로 일치하여야 한다. 그러나 Table 2에서 나타난 정량적 방법에 의한 결과 값들을 살펴보면, 대부분의 학생들이 탄소 배출 시나리오에 따라 일관성 (consistency) 있는 결과 값을 나타내지 못하였다.

이 연구에서 사용된 탄소 배출 시나리오에 따라 2110년에는 450 ppm과 340 ppm에서 안정화되어야 하므로 이산화탄소 배출량 값과 자연적 순수 제거량 값이 같아져야 한다. 허용오차 범위($\pm\delta=0.5 \text{ GtC yr}^{-1}$)를 포함하여 이산화탄소 배출량 값과 자연적 순수 제거량 값이 $E_{total}=\pm\delta$ 에 해당하는 연구 참여자들은

Table 2. Final net emissions and consistency of respondents

| CO ₂ (ppm) in 2110 | <i>N</i> | Mean absolute value of final E_{total} E-R (GtCyr ⁻¹) | Final E_{total} emissions $E_{total}=E-R$ | | | | | | Consistency | |
|-------------------------------|----------|--|--|------|-------------------------|-----|----------------------|------|-------------|-----|
| | | | $E_{total} > \delta$ | | $E_{total} = \pm\delta$ | | $E_{total} < \delta$ | | <i>N</i> | % |
| | | | <i>N</i> | % | <i>N</i> | % | <i>N</i> | % | | |
| 450 | 45 | 2.83 | 25 | 55.5 | 4 | 8.9 | 16 | 35.6 | 4 | 8.9 |
| 340 | 31 | 2.52 | 17 | 54.8 | 3 | 9.7 | 11 | 35.5 | 2 | 6.5 |
| Total | 76 | 2.43 | 42 | 55.3 | 7 | 9.2 | 27 | 35.5 | 6 | 7.9 |

*Tolerance $\pm\delta= \text{GtC yr}^{-1}$

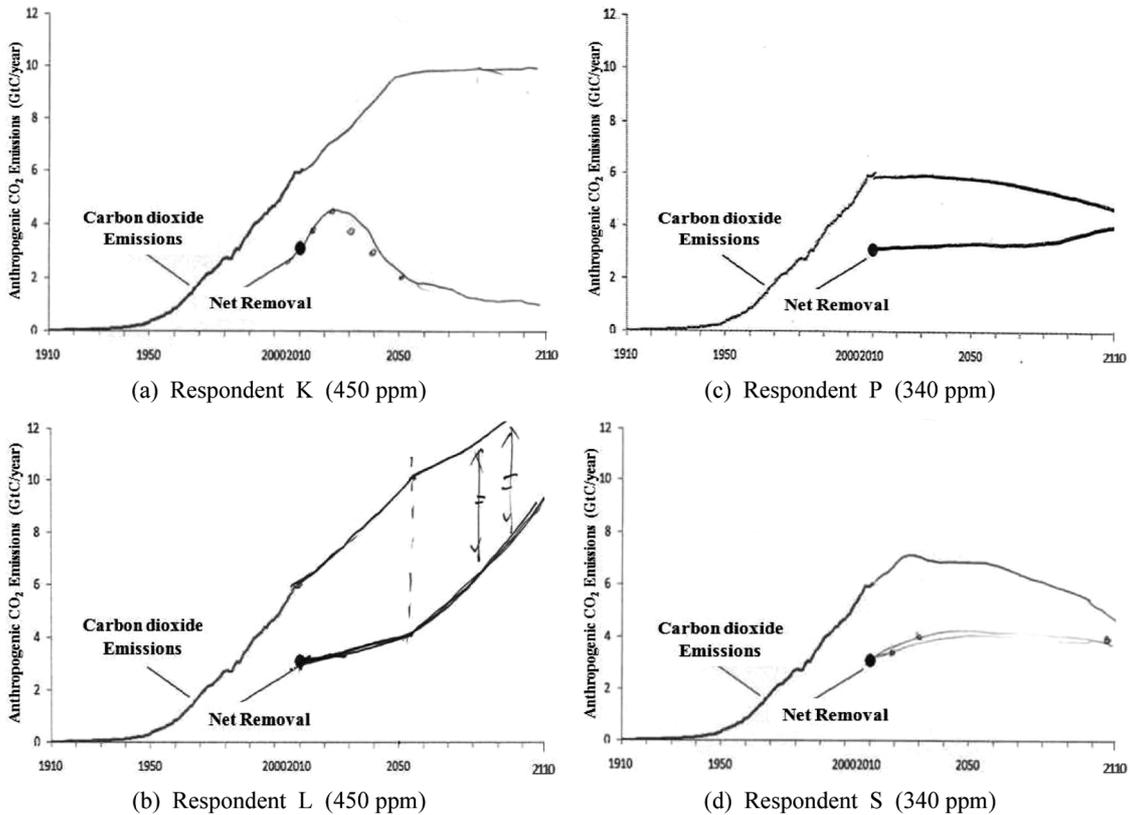


Fig. 4. Students' responses about scenario of both 450 ppm and 340 ppm.

450 ppm에서 4명과 340 ppm에서 3명으로 총 7명에 불과하였다. 이 중에서 올바르게 그래프를 표시하고 450 ppm과 340 ppm에서 이산화탄소 배출량 값과 자연적 순수 제거량 값이 같아져야 하는 이유를 일관성(consistency) 있게 논리적으로 설명한 연구 참여자들은 450 ppm의 4명과 340 ppm의 2명으로 전체 76명 중 7.9%에 해당하는 6명에 불과하였다. 특히 이산화탄소 배출량 값과 자연적 순수 제거량 값의 절댓값의 차($E-R$)에 해당하는 수치는 450 ppm의 2.83 GtC yr^{-1} 과 340 ppm의 2.52 GtC yr^{-1} 로 큰 값을 나타내었다. 이는 연구 참여자들이 이산화탄소 배출량 값은 자연적 순수 제거량 값보다 항상 큰 값을 갖게 될 것이라는 개념을 가지고 있다는 것을 의미한다. 또한 이러한 결과는 고학력 졸업자들을 대상으로 탄소의 질량 균형에 대한 정신모형을 알아본 결과 연구 참여자들이 탄소의 배출 및 자연적 순수 제거량에 따른 구성요소들 간 상호맥락의 인과관계를 정확히 파악하지 못하고 있다는 연구결과(Sterman, 2008)와 일치한다.

특히 Fig. 4의 결과들을 살펴보면, 450 ppm의 시나리오와 340 ppm의 시나리오를 선택한 4명의 학생들은 2110년에는 이산화탄소 배출량 값과 자연적 순수 제거량의 값이 같아져야 하지만 이산화탄소 배출량 값은 자연적 순수 제거량 값보다는 커져야 한다는 생각을 하고 있었다.

즉, 연구 참여자 K는 450 ppm 시나리오에서 2110년까지 이산화탄소 배출량은 계속 증가해야 한다고 생각했으며, 자연적 순수 제거량은 계속 낮아져야 450 ppm에서 안정화될 수 있다고 생각하였다(Fig. 4a). 연구 참여자 L은 450 ppm 시나리오에서 이산화탄소 배출량은 계속 증가하고 자연적 제거량 역시 증가해야 2110년에는 안정화된다고 하였다(Fig. 4b). 즉 450 ppm의 시나리오에 대한 고등학생의 검사지 결과에서 의미하듯 이산화탄소는 계속 증가해야 한다는 생각을 하고 있으며 2110년에 안정화되기 위해서는 이산화탄소의 배출량 값과 자연적 순수 제거량 값이 같아져야 한다는 것을 인지하지 못하였다. 특히 탄소 배출이 증가하여 토양과 해양의 탄소 저장소가 모두

채워지고 또한 해양 혼합층의 이산화탄소 부분압력이 높아지면 탄소의 자연적 제거량은 감소하게 되는데 (Houghton et al., 2001), 연구 참여자 L은 탄소 배출량과 자연적 순수 제거량의 그래프 값을 계속 증가하도록 나타내어 질량 보존에 대한 제한된 지식을 가지고 있음을 나타내었다. 그리고 340 ppm 시나리오 결과에서 연구 참여자 P는 이산화탄소 배출량 값을 자연적 순수 제거량 값보다 크게 나타내도록 표시하였으며, 2110년이 되어서도 이산화탄소 배출량 값이 자연적 순수 제거량 값보다 크게 나타내도록 표시하였다(Fig. 4c). 연구 참여자 S는 이산화탄소 배출량 값이 줄어든다고 표시하였으나 결국 2110년에 가서는 이산화탄소 배출량 값이 자연적 순수 제거량 값보다 크게 나타내도록 결과 값을 표시하였다(Fig. 4d). 이처럼 연구 참여자들은 450 ppm이나 340 ppm 모두에서 이산화탄소 배출량 값을 자연적 순수 제거량 값보다 크게 나타내었음을 알 수 있었다. 따라서 연구 참여자들은 이산화탄소 배출량과 관련하여 물질의 보존과 같은 질량 보존의 법칙을 적용하지 못하고 있는 것으로 나타났다. 특히 학생 K와 학생 S의 면담 내용에서 알 수 있듯이 학생들은 각각 450 ppm이나 340 ppm 시나리오에 있어 2110년에는 이산화탄소 배출량 값과 자연적 순수 제거량 값이 같아지도록 표시하여야 하지만 이산화탄소는 계속 증가할 것이라는 오개념을 가지고 있는 것으로 파악되었다. 학생 K와 학생 S의 면담 내용은 다음과 같다.

학생 K: 대기의 이산화탄소 농도가 증가하다가 100년 후 450 ppm에서 안정화되려면 이산화탄소 배출량은 계속 증가하다가 일정하게 그래프 곡선을 그려야 안정화되지 않을까요? 그리고 자연적 순수 제거량도 어느 정도 감소해야 안정화될 것 같은데요.

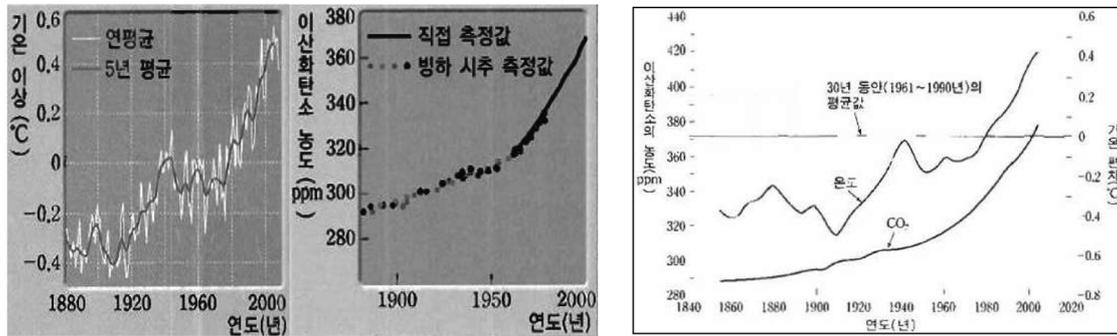
학생 S: 100년 후 340 ppm에서 안정화 되려면 이산화탄소 배출량은 계속 감소해야 될 것 같은데요. 또한 자연적 순수 제거량은 줄어들지 않고 계속 일정해야 할 것 같고, 이산화탄소 배출량은 제시된 그래프와 마찬가지로 자연적 순수 제거량 보다는 큰 값을 나타내다가 서서히 감소해야 할 것 같아요.

위의 면담내용에서 알 수 있듯이, 학생들은 450 ppm에서 이산화탄소 배출량 값이 증가함에(stock) 따라 자연적 순수 제거량 값 역시 증가하다가(flow) 두 개의 값이 일치하여야 지구의 탄소 농도 값이 450 ppm에서 안정화된다는 저장과 흐름(stock-flow)의 개념을 이해하지 못하고 있음을 의미한다(Moxnes and Sagsel, 2009). 따라서 이러한 연구 결과들은 학생들이 탄소의 배출 및 자연적 순수 제거량에 따른 구성요소들 간 상호맥락의 인과관계를 정확히 이해하지 못하고 있다는 것을 의미하며, 이는 저장과 흐름(stock-flow)의 시스템 사고(Ossimitz, 2002)의 부족에서 나타난 결과로 볼 수 있다.

탄소 순환에 대한 학생들의 질량 보존의 개념
이산화탄소 배출량 450 ppm과 340 ppm 시나리오

Table 3. Coding of written explanations of respondents

| Coding criteria (concept) and example | N | % |
|--|----|------|
| 1. Pattern matching The atmospheric CO ₂ is likely to be fairly proportional to the anthropogenic CO ₂ emissions. In other words, since the atmospheric levels seem to level off, it is likely to imply that the emissions do the same. | 21 | 27.6 |
| 2. Increasing use of Carbon The emission of CO ₂ will continue upward because dependence on fossil fuel is increasing. | 17 | 22.4 |
| 3. Technological development Technological development will try to reduce CO ₂ emissions | 13 | 17.1 |
| 4. Inertia The rise in atmospheric CO ₂ concentration seems to lag somewhat the increase in anthropogenic CO ₂ emissions. Therefore in order to stabilize CO ₂ concentration by 2110, I think the level of emissions has to stabilize before then. | 9 | 11.8 |
| 5. Mass balance There is a relationship between emissions and removal of atmospheric CO ₂ like mass balance. | 6 | 7.9 |
| 6. Increasing of seawater The volume of seawater increases due to increase of global temperature, therefore increases natural removal of CO ₂ by dissolution. | 5 | 6.6 |
| 7. Nonresponse | 5 | 6.6 |



(a) Earth Science I (Lee et al., 2011)

(b) Earth Science I (Choi et al., 2011)

Fig. 5. Average global temperatures and Atmospheric CO₂ concentrations.

에 따른 연구 참여자들의 그래프에 대한 설명의 면담결과는 Table 3과 같다.

27.6%의 연구 참여자는 지금까지 이산화탄소 배출량이 증가해 왔고 앞으로도 계속 증가할 것이라고 답하였다. 특히 학생 O와 학생 C의 면담내용과 같이, 학생들은 이산화탄소 배출량과 자연적 순수 제거량에 대한 질량 보존의 추론보다는 이산화탄소 배출량은 지금까지도 증가해 왔고 앞으로도 계속해서 증가할 것이라는 “패턴 매칭(pattern matching) (Uttal and Cohen, 2012)”을 가지고 있는 것으로 파악되었다. 이에 대한 학생 O와 학생 C의 면담 내용은 다음과 같다.

학생 O: 대기오염이 갈수록 심해지잖아요. 전에 교과서에서 배웠었는데 앞으로도 계속 인간에 의한 이산화탄소 배출량은 증가할 것 같아요.

학생 C: 산업 혁명 이후 도시의 발달로 인해 인류의 탄소 배출량은 급속히 증가하니까...(중략). 인간에 의한 탄소 배출량은 바다에 용해되거나 자연에 흡수되는 양보다 많은 것으로 책의 그래프에 나와 있는 것 같아요.

특히 이 연구에서 사용된 Appendix 1에는 1850년부터 2010년까지 인위적 이산화탄소 배출량 그래프, 대기 중 이산화탄소 농도 그래프, 평균 지구의 온도에 대한 그래프가 포함되어 있다. 이러한 세 가지 값들은 모두 시간이 지남에 따라 증가하였고, 이에 대해 연구 참여자들은 질량 보존에 대한 추론보다는 계속해서 증가할 것이라는 패턴 매칭을 생각하게끔 유도하였다고 볼 수 있다. 특히 학생 O와 학생 C의 면담 내용에서와 같이, 고등학교 지구과학 I 교과서의 지구의 평균 기온변화와 이산화탄소의 농도 변화

가 계속 상승하고 있는 그래프(Fig. 5)의 내용은 탄소 배출 시나리오와 관련하여 어떤 조건에서도 이산화탄소 배출은 앞으로도 계속 증가할 것이라는 오개념을 가지게 한다고 볼 수 있다.

이는 연구 참여자들이 일반적으로 시나리오에 대한 추론 없이 산업혁명 이후 이산화탄소 배출량 그래프의 일정한 패턴에 따라 검사지의 그래프를 작성했다고 보고한 Sterman (2008)의 연구결과와 같은 맥락으로 해석할 수 있다. 특히 Uttal and Cohen (2012)은 주로 패턴 매칭은 지질학 수업의 절리(fold) 구조나 화학 수업의 분자 구조 등의 교과서 그림 등을 통해 학생들이 패턴 매칭을 익히며, 이는 과학 지식의 분절화라는 부정적 사고를 일으킬 수 있으므로 프로젝트(project) 중심의 학문 간 융합교육을 통해 지식의 유용성과 의미를 높여야 한다고 주장하였다. 그리고 22.4%의 연구 참여자들은 2110년까지 탄소 배출량은 계속 증가할 것이라고 응답하였다(Table 3). 즉 인간에 의한 화석연료 사용의 의존도가 매우 높으므로 이산화탄소 배출량은 계속 증가할 것이라고 응답하였다. 이는 학생들이 기후 변화에 관한 미디어와 다른 정보 매체 등을 통해 앞으로도 인간에 의한 화석연료 의존도는 매우 높아질 것이라는 선개념을 가지게 된다는 선행연구의 결과(Boon, 2010)처럼, 학생들은 이산화탄소 배출 시나리오와 관련된 맥락에서 미디어를 통해 더 쉽게 정보를 얻었다고 볼 수 있다. 또한 Table 3에서 연구 참여자의 17.1%는 기술의 발달로 이산화탄소 배출량은 감소할 것이라고 답하였으며, 연구 참여자의 11.8%는 이산화탄소 배출에 의한 지구의 대기 중 농도는 쉽게 감소하거나 증가하지 않는다는 관성(inertia)을 언급하였다. 7.9%의 연구 참

여자들만이 이산화탄소 배출량과 자연적 순수 제거량에 대한 질량 보존의 개념을 응답하였다. 연구 참여자의 6.6%는 지구 온도가 증가하여 바닷물의 양이 많아지고 따라서 대기 중 이산화탄소가 바닷물에 용해되어 대기 중 이산화탄소의 농도가 줄어든다고 응답하였다. 그리고 연구 참여자의 6.6%는 검사지의 그래프에 대한 설명에 응답하지 않았다.

그러므로 학생들의 패턴 매칭에 대한 오개념을 해소하기 위해서는 탄소의 배출 및 자연적 순수 제거량에 따른 구성요소들 간 상호맥락의 인과관계를 파악해야 할 필요가 있으며(McNamara, 1998), 저장과 흐름(stock-flow)의 개념(Moxnes and Sagsel, 2009; Ossimitz, 2002)을 고려한 교수-학습 설계가 필요할 것이다. 또한 탄소 순환과 관련한 이전 연구에서 과학적 추론 학습에 의한 학문 간 융합교육의 필요성을 주장한 Vongalis-Macrow (2010)과 같이, 인식론적 측면에서 학문 간 융합교육은 다른 지식의 영역을 서로 밀접하게 관련지어 지식의 유용성과 의미를 높일 수 있고, 인지과정을 통해 지식의 상호 관련과 전체성을 증대시킬 수 있다(Maes, 2010). 따라서 탄소의 질량 보존 개념과 관련하여 프로젝트 중심의 학문 간 융합교육을 통해 탄소에 대한 각 요소 간 상호작용과 이 작용들이 탄소 순환에 미치는 피드백 효과를 고려한 사고의 적용이 필요할 것이다.

결론

이 연구에서는 기후변화와 관련된 탄소 배출 시나리오를 통해 고등학생의 지구시스템 관점에서의 탄소 순환 관련 질량 보존의 개념을 확인하고자 하였다. 대부분의 연구 참여자는 단순히 화석연료 사용의 증가로 앞으로도 계속 이산화탄소 배출량은 증가할 것이며, 탄소 배출 시나리오에 맞는 이산화탄소 배출량과 자연적 순수 제거량에 대한 질량 보존의 추론보다는 이산화탄소 배출량은 지금까지도 증가해 왔고 앞으로도 계속해서 증가할 것이라는 패턴 매칭을 주로 사용하였다. 이러한 특징들은 현재 고등학교 지구 과학 교과서의 탄소 배출에 관련된 그래프에서 말해 주듯 산업혁명 이후 최근까지의 자료들 즉, 인위적 이산화탄소 배출량 그래프, 대기 중 이산화탄소 농도 그래프와 평균 지구의 온도에 대한 그래프의 결과들을 통해 연구 참여자들은 질량 보존에 대한 추론보다는 계속해서 증가할 것이라는 패턴 매칭을 생각하

게끔 유도하였다고 볼 수 있다. 그러므로 탄소의 질량 보존과 관련한 학습에서는 탄소의 배출 및 자연적 순수 제거량에 따른 구성요소들 간 상호맥락의 인과관계를 파악해야 할 필요가 있다. 특히 지구과학 수업에서 이산화탄소 배출량, 대기 중 이산화탄소 농도와 평균 지구의 온도에 대한 그래프를 제시할 때에는 추론 등의 상호작용을 높일 수 있는 질문, 시나리오 형태의 패널 제시 등을 통해 그래프 간 인과관계를 파악할 수 있도록 학습활동을 전개할 수 있을 것이다.

이 연구의 제언으로 탄소의 질량 보존에 관한 학생들의 올바른 기후변화 교육을 위해서는 프로젝트 중심의 학문 간 융합교육을 통해 탄소에 대한 각 요소 간 상호작용과 이 작용들이 탄소 순환에 미치는 피드백 효과를 고려한 사고의 적용이 필요할 것으로 보인다. 또한 탄소와 관련된 기후변화 단원의 수업을 계획할 때, 탄소의 질량 보존에 대한 탄소 순환 사고를 염두에 둔 교수-학습전략을 세우는 것이 필요할 것으로 보이며, 나아가 탄소의 질량 보존에 대한 사고에 대해 연구 대상과 방법을 달리한 구체적인 연구들이 더 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구의 질적 향상을 위해 많은 조언을 해주신 익명의 심사위원님께 깊이 감사드립니다. 그리고 본 연구의 완성도를 높이기 위해 공동으로 연구를 수행한 퀘백대학교 몬트리올 캠퍼스 과학기술교육연구팀장을 맡고 계신 Patrice Potvin 교수님께도 깊이 감사드립니다.

References

- Boon, H.J., 2010, Climate change? who knows? a comparison of secondary students and pre-service teachers. *Australian Journal of Teacher Education*, 35, 104-120.
- Choi, B.G., Lee, H.S., Chu, B.S., Moon, B.K., So, Y.M., Lee, J.E., Lee, J.E., and Jo, M.A., 2011, *Earth Science I*. Chunjae Education, Seoul, Korea, 320 p. (in Korean)
- Choi, S., Niyogi, D., Shepardson, D.P., and Charusombat, U., 2010, Do earth and environmental science textbooks promote middle and high school students' conceptual development about climate change?: Textbooks' consideration of students' misconceptions. *Bulletin of*

- American Meteorological Society, 91, 889-898.
- Clark, J., Marks, J., Haden C., Bell, M., and Hungate B., 2012, The Carbon cycle game: A regionally relevant activity to introduce climate change. *Journal of National Earth Science Teachers Association*, 28, 9-13.
- Cohen, J., 1960, A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 37-46.
- Driver, R., Squires, A., Rushworth, P., and Wood-Robinson, V., 1994, *Making sense of secondary science: Research into children's ideas*. Routledge, London, UK, 224 p.
- Fortner, R., 2001, Climate change in school: Where does it fit and how ready are we? *Canadian Journal of Environmental Education*, 9, 82-98.
- Houghton, J., 2004, *Global warming: The complete briefing*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 382 p.
- Houghton, J., Ding, Y., Griggs, D., Noguera, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., and Johnson, C.A., 2001, *Climate change 2001: The scientific basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 83 p.
- Landis, J.R. and Koch, G.G., 1977, The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33, 159-174.
- Lee, D.Y., Oh, E.S., Kim, H.B., and Jeong, J.W., 2013, Analysis of Carbon cycle concepts based on earth systems perspective of high school students. *Journal of the Science Education*, 37, 157-169. (in Korean)
- Lee, T.W., Park, S.I., Gwon, S.M., Kim, W.S., Lee, Y.J., Lee, H.K., Jang, H.Y., and Kim, B.N., 2011, *Earth Science I*. Kyohak, Seoul, Korea, 304 p. (in Korean)
- Maes, B., 2010, Stop talking about "STEM" education! "TEAMS" is way cooler. <http://bertmaes.wordpress.com/2010/10/21/teams/> (March 6th 2014)
- McNamara, C., 1998, *Applied systems thinking*. Proceedings of the 42nd annual conference on systems sciences. In Allen, J.K. et al. (eds.), *International Society for the Systems Sciences*, Atlanta, Georgia, USA, 1-26.
- Moon, B.C., Jeong, J.W., Kyung, J.B., Koh, Y.K., Youn, S.T., Kim, H.G., and Oh, K.H., 2004, Related conceptions to earth system and applying of systems thinking about Carbon cycle of the pre-service teachers. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 25, 684-696. (in Korean)
- Moxnes, E. and Sagsel, A.K., 2009, Misperceptions of global climate change: Information policies. *Climate Change*, 93, 15-37.
- National Research Council, 2012, *A framework for K-12 Science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. The National Academies Press, Washington, DC, USA, 386 p.
- Ossimitz, G. 2002, Stock-flow-thinking and reading stock-flow-related graphs: An empirical investigation in dynamic thinking abilities. Proceedings of the 20th International Conference of the System Dynamics Society. System Dynamics Society, Albany, NY, USA, 1-26.
- Sterman, J.D., 2008, Risk communication on climate: Mental models and mass balance. *Science*, 322, 532-533.
- Sterman, J.D. and Sweeney, L.B., 2002, Cloudy skies: Assessing public understanding of global warming. *System Dynamics Review*, 18, 207-240.
- Uttal, D.H. and Cohen, C.A., 2012, Spatial thinking and STEM education: When, why, and how? *Psychology of Learning and Motivation*, 57, 147-181.
- Vongalis-Macrow, A., 2010, Developing pedagogies for teaching about climate change. *The International Journal of Learning*, 17, 237-247.

Manuscript received: February 25, 2014

Revised manuscript received: March 14, 2014

Manuscript accepted: June 1, 2014

Appendix 1. Global temperature change according to CO₂ emissions

IPCC는 2001년 보고서에서 지난 50년에 걸쳐 관측된 지구온난화의 대부분은 인간 활동에 기인하며, 이산화탄소를 포함한 다른 온실 가스배출이 지구온난화에 기여한다고 결론을 내렸다. 그 이후에 10 여년이 지난 지금, 지구온난화의 현상은 더욱 더 빨라지고 있다. 대기 중 이산화탄소의 양은 자연적 과정과 인간 활동에 의해 영향을 받는다. 인간의 활동으로 인한 이산화탄소 배출은 산업 혁명이 시작된 이래에 증가하고 있다(Fig. 1). 물론 자연적 과정에 의한 대기 중 이산화탄소는 식물의 생명활동이나 바다에 의한 용해에 의해 서서히 감소하고 있다. 현재 자연적인 과정에 의한 대기 중 이산화탄소의 자연적 순수 제거량은 인간의 활동으로 인한 이산화탄소 배출의 1/2 정도이다. 대기 중 이산화탄소 농도는 산업혁명 이후 1880년의 약 290 ppm에서 2010년에는 약 400 ppm에 가까워졌다(Fig. 2). 특히 지구의 평균 표면 온도는 산업 혁명 이후 증가해 왔다(Fig. 3).

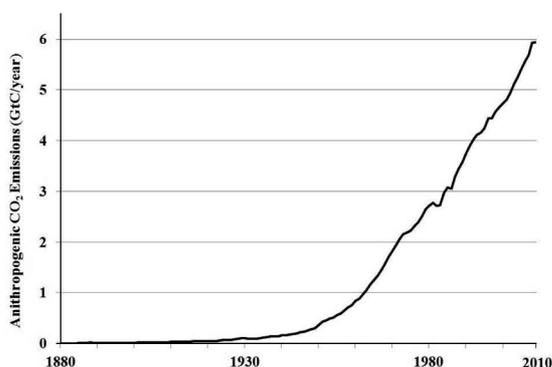


Fig. 1. Global CO₂ emissions resulting from human activity (billion tons of carbon per year).

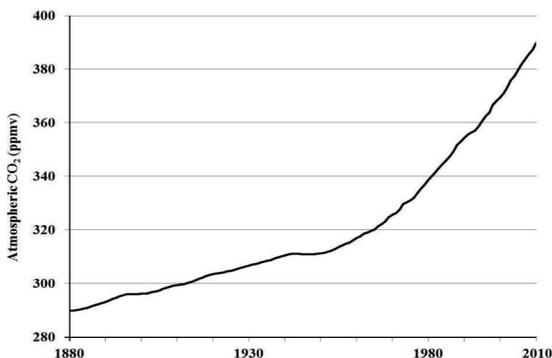


Fig. 2. Atmospheric CO₂ concentrations, parts per million.

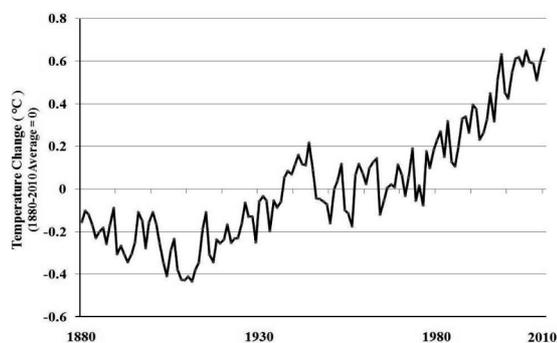


Fig. 3. Average global surface temperatures, °C. The zero line is set to the average for the period 1880-2010.