

우리나라의 기후변화 대응방안에 관한 정책 제언

신임철^{1,*} · 김영신²

¹기상청 자료관리서비스팀

²기상청 기획재정담당관실

(2009년 3월 5일 접수; 2009년 3월 11일 승인)

A Policy Suggestion for the Adaptation of Climate Change in Korea

Im Chul Shin^{1,*} and Yeongsin Kim²

¹Data Management and Services Team, Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720

²Planning and Budget Office Division, Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720

(Manuscript received 5 March 2009; in final form 11 March 2009)

Abstract

The purpose of this study is to describe the roles of carbon dioxide in the climate change, and carbon dioxide reduction policies in some countries. In addition, ways to cope with climate change in Korea are also discussed. Currently, global temperatures are rising due to the carbon dioxide produced by human beings. Global temperatures will rise approximately 6 °C until 2100 if we emit carbon dioxide at a present rate. Temperature rise will affect the terrestrial and oceanic resources, and ultimately influence the socio-economic structures including political stability. Most of the carbon dioxide comes from fossil fuels. Therefore, it is urgent to reduce the use of energy, which comes from fossil fuels. Solving the climate change due to the increases in carbon dioxide is a global problem. Korea should participate in the international community and cooperate with each other in order to reduce the carbon dioxide concentration. No policy was announced for the reduction of carbon dioxide so far. Korea should make a policy for the reduction of carbon dioxide in a specific year compared to that of certain standard year such as 1990 or 2005. Making policy should be based on the scientific result of the amount of carbon dioxide emitted and absorbed. Germanwatch announced the Climate Change Performance Index (CCPI) in order to evaluate an effort to reduce the carbon dioxide for 56 countries which emits 90 % of global carbon dioxide. Ranking for Korea is 51 among 56 countries. This clearly indicates that the appropriate carbon dioxide reduction has not been exercised yet in Korea. Researchers have a moral responsibility to provide updated new ideas and knowledges regarding climate change. Politicians should have a sharp insight to judge the ideas provided by researchers. People need an ethics to reduce the carbon dioxide in every day's life. Scientific research should not be influenced by stress caused by external budget and negative impact of capitalism. Science should be based on the pure curiosity.

Key words: climate change policy, climate change adaptation, climate change science, carbon dioxide, climate change performance index

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

현재 기후가 변하고 있음을 우리는 실감하고 있다.

기후변화의 대표적인 강력한 증거가 대륙 빙하와 산악 빙하의 녹음이다. 이러한 빙하의 녹음은 지구상 물의 분포에 영향을 미쳐 인간을 포함한 생태계에 가장 필수적인 수자원의 안정성에 영향을 미친다. 기후변화의 심각성은 이외에도 질병, 홍수, 가뭄, 식량부족, 생물다양성의 감소를 초래하며 이는 곧 사회·정치·경제의 불안정을 초래하기 때문에 우리 인류에게 커다란 위협이 된다.

2004년 코펜하겐에서 개최된 워크숍에서 3명의 노벨 수상자를 포함한 많은 경제학자와 자연과학자들이 모여 앞으로 우리 인류가 전 지구 문제에 투자

*Corresponding Author: Im Chul Shin, Data Management and Services Team, Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720.
Phone: +82-2-2181-0885, fax: +82-2-842-3677
E-mail: icshin@kma.go.kr

하고 도전해야 할 10가지의 중요한 영역을 발표하였다 (Bohannon, 2004). 이들 10가지 영역은 무장대립, 기후변화, 전염병, 교육, 경제 불안정, 통치 및 부패, 영양실조, 인구 증가 및 이동, 공중위생 및 물, 경기 침체 및 무역장애 등이다. 이렇듯 기후변화에 관련된 영역은 앞으로 국가의 장래를 결정할 중요한 문제로 대두되고 있다.

과거의 여러 문명들의 흥망과 성쇠 및 붕괴의 원인은 최근 10년전 까지만 해도 원인이 잘 알려지지 않았다. 하지만 이제는 많은 문명들의 붕괴원인이 기후변화 때문이라는 과학적인 연구결과들이 발표되고 있다 (Hodell, Curtis, and Brenner, 1995; Pasotti, 2007; Zhang and Lu, 2007; Kerr, 2008). 과거의 연구 결과에 의하면 기후변화 및 이에 따른 환경변화에 정책적으로 잘 대처했던 문명은 살아남았다.

기후변화에 잘 대처하며 국제사회에서 살아남기 위하여 기후변화의 과학적인 연구결과에 근거를 둔 잘 고안된 정책이 필요하다. 잘 고안된 정책의 도출은 다음과 같은 과정을 밟는다. 즉 관측 → 자료수집 → 자료 분석 → 자료해석 → 문제점 도출 → 결론 → 정책결정자에게 정보 제공 → 정책 결정. 여기서 과학자는 전문분야의 최신지식을 항상 업데이트하며 연구하여야 한다. 또한 정책결정자는 과학자가 제공하는 정보를 예리하게 볼 수 있는 통찰력을 가지고 있어야 한다.

본 연구의 목적은 우리나라의 정책결정자에게 기후변화 중 특히 이산화탄소의 역할에 대해서 (1) 현재까지 세계적으로 연구된 과학적 결과와 저감방안, (2) 이산화탄소를 저감하기 위해서 앞으로 무엇을 연구해야 하며, (3) 기후변화 대응 및 적응방안에 관한 정책적 대안을 제시 하고자 한다.

1.2 연구의 내용 및 방법

이산화탄소 저감을 포함한 기후변화의 과학적인 연구내용과 결과, 기후변화의 대응전략 및 정책 등은 최근에 출판된 Science 와 Nature 및 기상·기후관련 학술지를 주로 참고하였다. 또한 각 국가들의 이산화탄소 배출을 줄이기 위한 정책적인 접근과 우리나라를 포함한 국제사회에서 이행계획에 대해 부여받은 평가결과를 Germanwatch에서 출판된 내용을 참고하였다(Burck et al., 2007).

2. 기후변화 과학 연구현황

2.1 이산화탄소 농도 변화

기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)의 3차(2001) 및 4차(2007년) 보고서에 의하면 2100년까지 온실기체의 방출을 줄이지 않으면 지구의 온도는 최대 약 6 °C의 상승을 예측하였다(Fig. 1). Fig. 1에서 보듯이 지난 1000년간 대기의 온도는 약 0.5 °C 범위 내에서 변하였다. 하지만 산업혁명이후 빠른 증가 추세를 보인다. 또한 현재 일어나고 있는 이산화탄소와 메탄의 증가를 포함한 기후변화는 인간의 화석연료 사용, 농경지사용 등에 의해 일어나고 있다고 하였다.

IPCC 3차(2001년) 보고서는 만약 이산화탄소가 2배 증가한다면 온도는 1.5~4.5 °C 상승을 예측 했지만 추측의 수준이었다. 하지만 4차 보고서(2007년)에서는 만약 이산화탄소가 2배 증가하면 2.0~4.5 °C 상승을 확신을 가지고 예측하였다(Giles, 2007). IPCC에서 예측한 이러한 온도 상승은 과거에 일어났던 온도의 상승에 비해 매우 급격한 변화이다. 고기후의 연구결과에 의하면 인간이 농사를 짓기 시작한 시기인 10,000년 전부터 지구의 온도는 1 °C 범위 내에서 상승과 하강을 반복하였다. 그러다가 산업혁명의 시작인 약 1850년대부터 지구의 온도가 꾸준히 상승하기 시작하였다. 빙하코아에 보존된 공기의 연구에 의하면 인간의 영향을 받기 전인 산업혁명 이전의 이산화탄소 농도는 260~280 ppm(Raynaud and Barnola, 1985; Kurschner, 2001)이었다. 하지만 산업혁명 이후 인간의 활동 및 산업화

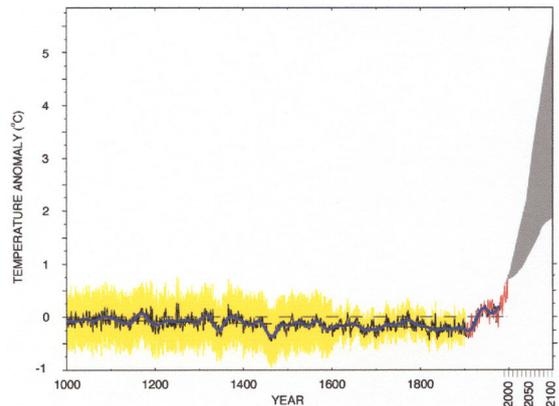


Fig. 1. Predicted temperature change until 2100 (IPCC, 2001)

로 인하여 이산화탄소의 농도가 증가하기 시작하였다.

남극 빙하코아의 기포에 보존된 과거 공기의 분석에 의하면 지난 420,000년간 대기의 온도는 약 10 °C 범위 내에서 변했으며, 이산화탄소의 농도는 180~300 ppm, 메탄의 농도는 400~700 ppb 사이에서 변했다(Fig. 2)(Petit *et al.*, 1999). 하지만 현재 이산화탄소의 농도는 385 ppm(parts per million) 정도이며 메탄의 농도는 1850 ppb(parts per billion) 정도이다. 이는 과거에 비해 매우 높은 값이다. 대기 중의 이산화탄소와 메탄의 농도는 온도와 평행한 관계를 보인다(Lorius *et al.*, 1990; Kurschner, 2001; Retallack, 2001). 특히 최근 50년간 기후변화의 원인은 온실기체와 인간의 활동에 의한 에어러슬 때문이며(Tett *et al.*, 1999) 이로 인하여 온난화 또한 가속화되고 있다.

2.2 대기 중의 이산화탄소 농도

이산화탄소의 관측에 관한 가장 긴 기록은 하와이의 마우나로아(Mauna Loa) 관측소에서 1958년 관측한 이산화탄소 농도이며 이는 처음으로 대기의 이산화탄소 농도가 증가하고 있다고 밝혔다(Nefel *et al.*, 1985; Keeling and Stephens, 2008). 1958년 대기 중의 이산화탄소 농도는 315 ppm, 1985년은 345 ppm,

2007년 3월은 384 ppm 이었다(Nisbet, 2007). 즉 지난 50년간 70 ppm 이 증가하였으며 이는 상당히 빠른 증가이다. 고기후의 연구 결과에 의하면 이산화탄소의 농도는 지난 1000년간 최대 약 15 ppm 의 범위 내에서 상승과 하강을 반복하였다.

현재 대기 중의 이산화탄소 농도는 약 385 ppm 이다(Marquis *et al.*, 2008). 산업혁명 이전의 이산화탄소 농도는 280 ppm 이었다. 즉 인간의 영향에 의해 현재 까지 약 105 ppm 이 증가하였으며 이는 빙하기와 간빙기 때의 이산화탄소 농도 차이인 80~100 ppm 보다 크다(Fischer *et al.*, 1999). 참고로 과거 2,000만년동안 현재보다 이산화탄소의 농도가 높았던 적이 없었다(Pearson *et al.*, 2000).

2.3 육상에서의 이산화탄소 흡수 및 배출

이산화탄소는 산림이나 토양에 저장되어있다(Schlesinger and Lichter, 2001). 산림은 이산화탄소의 흡수원이며 매년 육상의 식물에 의해 흡수되는 이산화탄소는 $0.5\sim 2.0 \times 10^{15}$ g 정도이며 이는 매년 화석연료에 의해 방출되는 이산화탄소의 8~33%에 해당된다(Davidson and Hirsch, 2001). 하지만 이에 대한 반론도 있다. 즉 이산화탄소가 토양에 저장되어 있는데 온난화로 인하

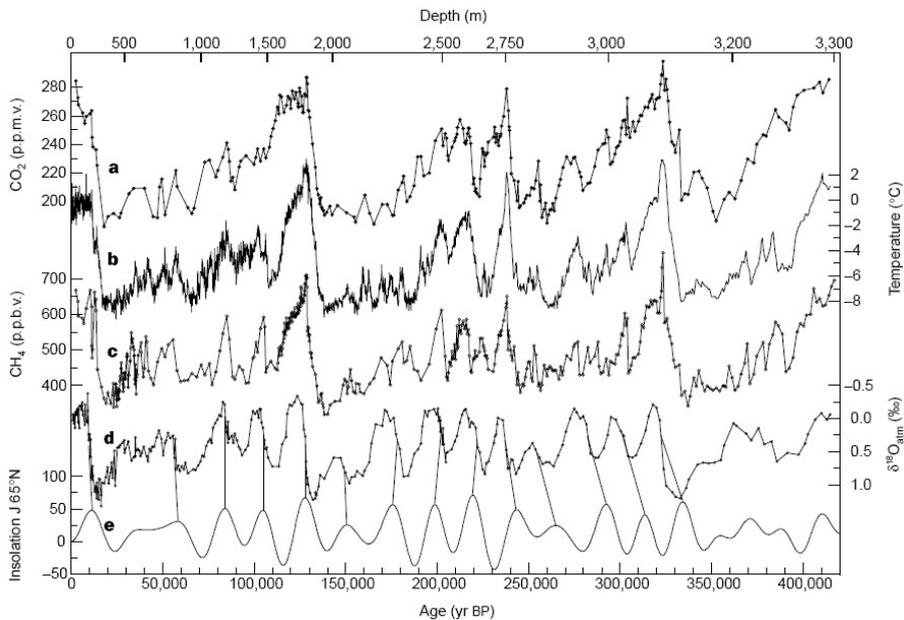


Fig. 2. Atmospheric temperature, carbon dioxide and methane concentrations during the past 420,000 years (Petit *et al.*, 1999).

여 영양분과 물이 부족하게 되면 나무가 이산화탄소를 흡수하는데 많은 장애를 받는다. 즉 나무를 심으면 이산화탄소를 흡수하기 때문에 지구 온난화 문제를 해결할 수 있다는 생각에 대한 부정적인 견해도 있다 (Davidson and Hirsch, 2001). 또한 이산화탄소의 농도가 증가한다고 육상생태계의 풀등이 잘 자라 반듯이 이산화탄소를 잘 흡수 한다고 이야기 할 수는 없다 (Oechel *et al.*, 1994). 이러한 문제점이 있음에도 불구하고 실험의 결과에 의하면 산림이 이산화탄소를 제거하는 데는 상당히 효과적으로 알려져 있다 (Oren *et al.*, 2001).

북반구의 온대지역의 산림에서 전 지구에서 사용하는 화석연료로부터 방출되는 이산화탄소의 50%에 해당되는 양을 흡수 할 수 있다는 연구결과가 있다 (Ciais *et al.*, 1995). 현재 육상의 식물과 토양은 인간의 활동에 의해 배출되는 이산화탄소의 40% 만 흡수한다 (Adam, 2001). 즉 나무를 심어 이산화탄소를 줄이려는 계획은 단기간의 계획이지 장기간의 계획은 아니다 (Adam, 2001).

현재 온난화로 인하여 전 지구 대기의 온도가 상승하고 있으며 미래에도 상승할 것이다. 이러한 대기온도의 변화는 육상 생태계와 해양의 이산화탄소 흡수에 영향을 미친다 (Keeling *et al.*, 1995). 예를 들어 만약 가뭄이 지속되면 토탄(peat) 층의 이산화탄소가 대기 로 방출되는 효과를 상승시킨다 (Freeman, Ostle, and Kang, 2001). 해양의 온도가 상승하면 이산화탄소는 차가운 물에 잘 녹기 때문에 이산화탄소를 흡수하는 능력이 떨어진다.

현재 영구동토가 녹고 있으며 이로 인하여 많은 양의 이산화탄소와 메탄이 대기 중에 방출된다 (Nelson, 2003). 이는 미래에 전 지구 온난화를 가속시킨다. 북극의 툰드라는 이산화탄소를 저장하는 역할을 해왔다. 많은 양의 탄소가 북극의 토양에 저장되어 있다. 하지만 현재 북극이 과거보다 따뜻하며 이로 인하여 토양이 녹아 토양 속에 함유된 이산화탄소가 대기 중으로 방출하게 되어 대기 중의 이산화탄소 농도를 높인다 (Oechel *et al.*, 1993). 현재 알라스카의 툰드라 또한 이산화탄소를 방출하는 곳이 되고 있다 (Oechel *et al.*, 1993). 즉 극지방의 토양은 이산화탄소를 흡수하기도 하지만 방출하는 역할도 하고 있다 (Wardle *et al.*, 2003).

산림은 인간에 의해 방출된 이산화탄소의 상당부분을 흡수한다 (Chambers *et al.*, 2001). 열대우림(rainforest)

에 의해 흡수되는 이산화탄소의 양은 열대지역의 산림 벌채에 의해 방출되는 이산화탄소와 비슷하거나 약간 많다 (Richey *et al.*, 2002). 산림벌채가 전 지구 이산화탄소 배출량의 약 20%를 차지한다 (Tollefson, 2007). 산림벌채를 줄이는 일은 교토의정서상의 이산화탄소 방출을 줄이는 의무를 수행 하는데 도움을 준다 (Chambers *et al.*, 2001). 현재 산림벌채와 화석연료의 사용에 의해 매년 100억 톤의 이산화탄소가 대기 중에 배출된다. 이중 45억 톤은 대기에 축적되며 나머지는 해양이나 육상생태계에 흡수된다 (Friedlingstein, 2008).

2.4 해양에서의 이산화탄소 흡수

해양은 이산화탄소의 흡수원으로 작용한다. 해양에 의해 흡수 되는 이산화탄소의 양은 총 화석연료에서 방출되는 이산화탄소의 48%에 해당된다 (Sabine *et al.*, 2004). 만약 전 지구온난화가 오면 해양의 이산화탄소 흡수는 감소된다. 이에 대한 이유는 심층수 순환이 약해지거나 혹은 붕괴되기 때문이다. 이로 인해 해양의 이산화탄소 흡수력이 떨어져 미래 대기의 이산화탄소 증가에 중요한 영향을 미칠 것이다 (Sarmiento and Le Quere, 1996).

정확히 알려지지는 않았지만 현재까지의 연구 결과에 의하면 북대서양이 대기 중의 이산화탄소 흡수원으로 가장 큰 역할을 한다 (Gruber, Keeling, and Bates, 2002). 북해(North Sea)의 경우 해안가와 주변 해역에서 흡수할 수 있는 이산화탄소의 양은 전 세계 해양이 인간의 영향에 의해 배출된 이산화탄소량의 약 20%를 흡수할 수 있다 (Thomas *et al.*, 2004).

해양생물체의 생산성이 감소하면 대기 중의 이산화탄소 농도는 증가한다 (Ganeshram, 2002). 지구 온난화로 인한 해수의 온도상승 및 심층수 순환의 붕괴는 해양의 생산성을 감소시켜 해양의 이산화탄소 흡수력을 떨어트린다. 미국과 캐나다 에서는 이러한 이산화탄소 흡수원의 존재로 인하여 이산화탄소의 배출을 억제할 필요가 없다는 게 초창기의 생각이었다. 하지만 흡수원의 존재가 중요한 게 아니라 온난화로 인하여 흡수원이 변한다는 사실이다 (Kaiser, 1998).

2.5 미래의 예상되는 이산화탄소 농도

1896년에 Arrhenius 는 만약 이산화탄소의 농도가 두 배가 되면 지구의 온도는 5~6 °C 상승한다는 예측을

하였다(Crowley, 2004). 전 지구 기후모델에 의하면 이산화탄소가 두 배로 증가할 경우 전 지구 평균 온도는 1.5~4.5 °C 상승하며 특히 고위도 지방이 적도 지방보다 온도의 상승이 높다(Pastor and Poster, 1988; Osborn and Briffa, 2004; Kerr, 2004). 또한 현재 이산화탄소 배출을 완전히 중지한다 하여도 적어도 2050년까지는 온도가 상승하는데 이에 대한 이유는 이미 대기에 배출된 이산화탄소와 에어러솔 때문이다(Mitchell *et al.*, 1995). 만약 약 3 °C의 온도상승이 있을 경우 이는 위험을 초래한다고 하였다(Kerr, 2004).

만약 이산화탄소가 두 배로 증가하면 북반구의 중위도와 고위도 지역은 여름 동안에 비가 적게 올 수 있으며 이는 농업에 심각한 영향을 미친다(Mitchell and Warrilow, 1987). 또한 해양의 경우 만약 이산화탄소가 두 배가 되면 육상의 빙하가 녹아 민물이 유입되어 해수 순환이 붕괴되어 해양의 산소가 부족해 해양 생물체에 치명적인 영향을 미칠 것이다. 이는 해양 식물플랑크톤에 의한 대기 중의 이산화탄소 흡수력을 감소시켜 대기 중의 이산화탄소 농도를 높이는 역할을 한다(Manabe and Stouffer, 1995).

3. 이산화탄소 저감 정책 현황

3.1 현 황

IPCC 4차 보고서(IPCC 2007)는 기후변화에 대해 회의적인 생각이 없어지도록 기여하였으며 정책결정자에게 많은 영향을 주었다. 또한 IPCC 4차 보고서는 90%의 확신을 가지고 현재 온도의 상승은 인간의 활동 때문이라 했다. 이러한 사실은 현재 과학계와 정치계에 잘 알려져 있다.

IPCC는 세계기상기구(WMO)와 UN 환경프로그램(UNEP)의 산하에 1988년 설립되었다. IPCC의 목적은 올바른 정책을 입안하고 결정하기 위하여 이미 출판된 과학적인 결과를 종합하여 정책입안자에게 정보를 제공하며 국제 협력을 유지하기 위함이다. 또한 IPCC 보고서는 교토의정서의 협상을 위한 과학적인 정보제공을 주목적으로 하고 있다(Schrope, 2001). 교토의정서는 규칙에 의해 통제(regulatory)하는 규약이다(Kaiser, 2001).

1997년 교토의정서는 온실기체의 방출을 2008~2012년 기간동안 1990년 대비 5.3%의 감축을 요구하고 있다(De Leo *et al.*, 2001; Nature, 2007). 교토의정서를 지키려면 각 나라가 경비가 많이 들것이라 생각

한다. 하지만 De Leo(2001) 등의 연구에 의하면 그렇지 않다. 즉 온실기체 방출이 건강, 상품, 농업환경에 미친 영향을 고려하면 결코 교토의정서를 지킨다고 해서 경제적인 부담이 큰 것은 아니다(De Leo *et al.*, 2001).

전 지구 이산화탄소 배출량은 1990년대에 비해 2006년에 35% 증가하였다. 이산화탄소 농도가 서서히 증가하면 우리가 적응할 시간이 있다. 하지만 현재 이산화탄소 농도는 매우 빠르게 증가하고 있다. 그러므로 정책을 만들 때 이산화탄소 배출을 줄이도록 하는 정책이 시급히 필요하다(Rahmstorf, 1997). 2007년 기후변화의 심각성을 세계에 알려 IPCC와 함께 노벨평화상을 수상한 미국의 전 부통령이었던 Al Gore는 지금 당장 이산화탄소의 배출을 중지해야하며 2050년까지 90%를 감축시켜야 한다고 주장하고 있다(Nature, 2007).

기후변화에 대해 국제적으로 온도가 2 °C 이상 상승하지 않도록 하거나 이산화탄소의 농도를 450 ppm 이하로 유지해야한다. 이를 달성하기 위하여 미국을 포함한 여러 산업화된 국가들은 2050년까지 이산화탄소의 배출을 현재의 배출량보다 60~80% 줄여야한다(Doniger, Herzog, and Kashof, 2006).

2008년 7월 말에 아시아, 유럽, 미국 등에서 약 40명의 기후변화에 관한 협상자들이 워싱턴에 모여 전 지구온난화 대응방환의 일환으로 이산화탄소 방출 감축법을 만드는 것에 대한 토의를 하였다. 토의의 주 내용은 앞으로 온실기체 배출은 증가하며 이러한 증가는 가뭄, 폭풍우, 홍수의 증가를 야기한다고 하였다. 유엔은 온실기체 배출감소, 재해감소, 자연자원의 부족(음식, 물)에 대해 국제간에 협력해 주길 요구하였다. 미국과 유럽연합은 2025년까지 온실기체 배출의 30% 감소에 동의하였다. 이들은 또한 개발도상국에 감소분에 대한 경제적인 지원을 동의하였다. 중국은 2025까지 얼마 감축하겠다고 밝히지 않았으며 감축에 동의하지는 않았다. 인도는 감축은 약속했으나 구체적인 방안은 제시하지 않았다. 모든 참석자가 이산화탄소 감축에 동의하지 못하고 회의는 끝났다. 다음에 있을 유엔 회의에서 인도는 감축 제안에 쉽게 동의하지 않을 것 같으며 중국은 협상 테이블에 빈손으로 오지는 않을 것 같다(Tollefson, 2008).

3.2 미 국

미국은 Bush 대통령이 1989년에 기후변화에 대응하기 위하여 전 지구변화 연구프로그램(GCRP: Global

Change Research Program)을 설립하였으며 2008년 현재까지 기후변화 과학의 연구에만 약 30 billion dollars 의 연구비를 지원하였다. GCRP는 과학적인 연구 결과에 기반을 둔 올바른 정책결정을 위하여 설립되었다(Kerr, 2003).

미국은 2020년까지 이산화탄소 배출을 2005년 기준 10% 이하, 2050년까지 63% 이하로 줄이는 법안을 현재 추진 중이다(Goldston, 2007). 미국은 2050년까지 이산화탄소의 배출을 2005년 수준보다 태양광발전 건설 등을 통하여 낮출 수 있다(Zweibel *et al.*, 2008). 미국의 태양광발전소 설립 계획에 의하면 2007년 이산화탄소 배출량은 61억 톤 인데 2050년에는 만약 태양광발전이 없다면 94억 톤이 되나 태양광발전소 건립을 통하여 23억 톤이 될 것이다(Zweibel *et al.*, 2008). 또한 미국은 2100년까지 태양광발전, 풍력발전, 생물연료 등으로 인하여 이산화탄소 배출을 2005년 수준의 92%까지 줄일 계획을 가지고 있다(Zweibel *et al.*, 2008). 캘리포니아의 경우 2020년까지 온실기체의 배출을 1990년 대비 25% 줄이려하며 2050년까지 80% 줄일 계획을 가지고 있다(Service, 2007).

비록 Bush 대통령은 2008년 7월 일본서 열린 G8 정상회담에서 이산화탄소 배출을 줄이자는데 분명한 의사를 밝히지는 않았지만(Malakoff, 2008), 공장에서 나오는 이산화탄소를 포획하여 땅에 저장 하도록 향후 10년 내로 수행할 예정이다. 이의 일환으로 미국은 2008년 1월부터 22개의 지역을 선정해 이미 이산화탄소를 저장하는 실험연구를 수행하고 있다(Schiermeier, 2008). 이산화탄소를 포획하여 저장하는 기술은 2050년까지 전 지구 이산화탄소의 1/3을 줄일 수 있다(Schiermeier, 2008).

3.3 유럽

유럽연합(27개 국가)은 온실기체의 배출을 2020년까지 1990년 대비 20~30%를 의무적으로 줄일 계획이며(Nature, 2007), 2050년까지 이산화탄소의 배출을 50% 줄이려한다(Tollefson, 2007). 유럽은 공장에서 나오는 이산화탄소를 포획하여 땅에 묻는 기술을 개발하여 2년 내로 실행할 예정이다(Schiermeier, 2008).

유럽연합의 경우 2013년부터 발전소는 이산화탄소를 배출하는 만큼 돈을 내야한다. 이는 유럽연합 위원회에서 2007년 1월 결정되었다(Schiermeier, 2008). 유럽연합의 경우 2011년까지 약 10,000개 공장들은

매년 탄소세를 지불하지 않고 방출할 양을 할당 받는다. 하지만 만약 할당받은 양에서 1톤 초과 시 \$31를 지불해야 한다. 유럽연합의 “2020 계획”에 의하면 2020년까지 이산화탄소의 배출을 20% 줄이며 20%의 에너지는 신 재생 에너지로부터 충당할 계획이다.

영국은 1990년에 비해 이산화탄소를 60% 줄이기로 하였다(Goldstein, 2008). 영국은 핵발전소에 의존하지 않고 이산화탄소의 배출을 줄이기로 하였으며(Bachtold, 2003) 영국의 핵발전소는 곧 사라질 것이다(Bachtold, 2003). 영국은 대기 중의 이산화탄소를 줄이기 위하여 풍력, 조력 등의 신 재생 에너지에 투자하는 회사들에게 자금을 투자하며 인센티브를 줌으로서 이산화탄소 배출을 낮추고 있다(Bachtold, 2003). 영국은 앞으로 50년간 현재 배출하는 이산화탄소의 60%를 저감할 계획이다. 이는 교토의정서의 요구보다 많은 양이다.

독일은 1990년에 비해 이산화탄소를 50% 줄이기로 하였다(Goldstein, 2008). 2006년 독일 월드컵 때 수백만의 방문객이 배출한 이산화탄소의 양은 100,000톤 정도였으며 지역 주최자들은 스폰서로부터 이의 대가로 160만 달러를 받아 신 재생에너지 프로젝트를 개발하는데 사용하였다. 즉 앞으로 개인이 이산화탄소를 방출한 만큼 돈을 내야 될 때가 올 가능성도 있다(Schiermeier, 2007).

러시아는 교토의정서에 2004년 비준하였으며 협정에 의하면 2012년까지 1990년보다 이산화탄소 배출을 낮게 유지해야 한다(Allakhverdiv and Pokrovsky, 2004).

3.4 중국

현재 중국이 미국을 제치고 세계에서 이산화탄소를 가장 많이 배출한다. 2006년 중국은 총 이산화탄소 배출량이 62억 톤이며 미국은 58억 톤 이었다(Nature, 2007). 중국은 미국처럼 공장에서 나오는 이산화탄소를 포획하여 땅에 저장 하도록 향후 10년 내로 수행할 예정이다. 중국은 벌목을 금지하는 정책을 지키기 위하여 산림을 지키는 60,000명의 경찰이 있다(Wang *et al.*, 2007). 중국은 2020년까지 신 재생에너지에서 15%의 에너지를 충당할 계획을 가지고 있다(Cyranoski, 2008).

3.5 한국

우리나라는 발전소에서 배출하는 이산화탄소의 양이 매년 168,000,000 톤이며 세계 10위이다(Tollefson, 2007). 우리나라의 경우 이산화탄소 감축목표에 대한

정책은 현재로서는 발표되지 않은 상태이다.

4. 우리나라의 이산화탄소 저감 대응 방안

4.1 무엇을 연구해야 되나?

전 지구적으로 에너지와 관련된 이산화탄소의 배출은 2005년 27 gigatonnes에서 2030년에는 56% 증가한 42 gigatonnes이 될 것이라 한다(Nature, 2007). 이런 의미에서 이산화탄소 배출을 줄이는 문제는 우리 인류에게 매우 심각한 당면 과제이다. 이산화탄소의 농도는 인간의 활동, 해양에 의한 이산화탄소 흡수, 육상의 동식물의 총 양, 산불, 영구동토의 녹음 등에 주로 달려있다(Indermuhle *et al.*, 1999; Schimel and Baker, 2002).

IPCC 보고서는 기후변화가 생태계, 사회에 영향을 미친다고 이야기한다. 하지만 실제로 무엇을 어떻게 해야 하는 지는 제공하지 못하고 있다. 본 논문에서 기후변화에 대응하며 이산화탄 농도를 저감하기 위해서 무엇을 연구해야 되는지 간단하게 논의하고자 한다.

첫째로 지역기후변화가 연구되어야 한다. 유엔 기후변화협약(UNFCCC)이 1992년 설립되었으며 현재 약 160개국에 가입되어있다. 기후변화협약을 지키기 위하여 지역기후변화 연구가 필요하다(Hulme, Zhao, and Jiang, 1994). 기후변화의 적응을 위해서 우선 기후변화의 위험이 있을 지역선정이 필요하다. 지역기후 변화의 연구를 위하여 우리나라의 지역별 기온(평균, 평균 최고, 평균 최저)의 장기 변화경향이 필요하다. 이러한 지역별 기온 및 강수량의 시공간적인 분포자료에 근거하여 온도가 크게 상승 혹은 하강하는 지역으로 구분하여 그 원인을 찾고 대처 방안을 강구하여야 한다.

온난상태의 지구가 기후변동성이 심하다(Shin, 1998; 신임철 등, 2005). 온난화의 영향을 받고 있는 우리나라도 온도와 강수량에 커다란 변화가 일어나고 있다(신임철 등, 2007). 우리나라 주변 해역의 생태계 또한 인간의 영향과 기후변화의 영향을 받고 있다(신임철과 이희일, 1998; 신임철 등, 1998; 신임철과 이희일, 1998). 기후변화의 영향을 평가하므로써 정책적 대안이 가능하다(De Leo *et al.*, 2001).

강수량의 경우 우리나라의 강수가 증가하는 지역은 어디이며, 감소하는 지역은 어디인지 혹은 크게 변화가 없는 지역은 어디인지 등의 기본 자료가 필요하다. 또한 이상기상(집중호우, 열파, 한파 등)발생빈도의 시공간적인 분포 또한 기후변화의 대응 및 적응을 위하

여 반듯이 연구 되어야 할 요소이다. 이러한 연구는 보건, 식량자원 확보 및 수자원 확보에도 필수적인 사항이다(Lobell *et al.*, 2008). 기상정보는 또한 국가경제 발전의 성장엔진 으로서도 매우 중요하다(김영신, 이기봉, 김희철, 2005).

두 번째로 이산화탄소 흡수원의 흡수가능한 양에 대한 연구가 필요하다. 동해, 황해, 및 남해에서의 이산화탄소 흡수 능력 및 흡수 가능한 양의 연구가 선행되어야 한다. 해양의 이산화탄소 흡수 가능 양 및 능력은 해수의 온도, 염도, 해수 순환, 및 생물체의 생산성에 달려있다. 이중 가장 중요한 해수순환은 인간의 활동에 의해 방출되는 온실기체의 양과 해양에서 대기로 교환되는 이산화탄소의 양에 달려있다(Rahmstorf, 1997). 산림의 경우 고도, 산림의 면적, 식생 등을 고려한 흡수 가능량 산출 또한 연구 되어야 할 분야이다.

매일 광합성에 의해 식물플랑크톤이 1억 톤의 이산화탄소를 사용한다. 식물플랑크톤의 분포는 영양염(질소, 인산, 철) 및 해수의 순환에 의해 통제된다. 현재 기후변동성으로 인하여 해수순환의 변화와 식물플랑크톤의 양이 줄어들고 있다. 이로 인하여 해양의 이산화탄소 흡수력이 떨어진다(Behrenfeld *et al.*, 2006). 대기 중의 이산화탄소의 증가는 해수나 토양 등을 산성화시켜 생물체의 생산성을 감소시키며 이로 인하여 해양의 이산화탄소의 흡수 능력은 떨어져서 전 지구 온난화를 더욱 더 가속화 시킨다(Lane, 2007). IPCC 4차(2007) 보고서는 해양의 산성화를 처음으로 명시한바 있다.

세 번째로 산업 분야별, 농경지 개간, 토지이용, 화석연료 사용 등에 따른 이산화탄소 배출량의 자료가 필요하다. 석탄, 석유, 가스 등에 의한 이산화탄소 배출량 통계는 일부 발표되어 있다(International Energy Agency, 2007).

네 번째로 30~50년 정도의 기후예측을 하여 정책입안자, 비즈니스, 및 대중에게 제공해야한다. 현재 기후시나리오가 어떻게 사용되며 이가 정책입안자들에게 어떻게 기여할 수 있는지는 현재 커다란 갭이 있다. 모델의 연구에 의하면 만약 이산화탄소가 현재의 2배가 되면 해양 심층수 순환은 15~50% 약해진다(Rahmstorf, 1997). 만약 이산화탄소가 2배 증가하면 전 지구 평균 온도는 3.5 °C 상승하며 해수면은 1m 상승한다. 이는 열팽창의 경우만 생각했기 때문에 빙하의 녹음까지 생각하면 더 상승할 것이다(Manabe *et al.*, 1993). 만약 이산화탄소가 4배 증가하면 심층수 순환은 완전히 정지한다(Rahmstorf, 1997). 이러한 현상이 일어나면 해

양은 산소의 교환이 되지 않아 생태계에 심각한 영향을 미친다. 만약 이산화탄소가 4배 증가하면 전 지구 평균 대기의 온도는 약 7 °C 증가하며 해수면은 열팽창만 고려할 경우 2 m 상승한다(Manabe *et al.*, 1993). 이러한 미래 기후변화 시나리오가 육상 및 대기를 포함한 우리의 사회·경제·정치에 미칠 영향에 관한 구체적인 시나리오가 연구 되어야 한다.

특히 이산화탄소의 증가에 따라 (1) 해수면 상승의 취약지역 선정 및 1m 상승 시 얼마나 물에 잠기는지를 고려해야 하며, (2) 미래 기후변화 시나리오에 의한 수자원은 충분한지를 평가할 필요가 있으며, (3) 가뭄, 홍수 등 이상기후에 따른 우리나라의 댐 및 터널의 안정성 여부, (4) 가뭄이나 홍수로 인한 농산물 수확량의 변화는 어느 정도 줄어드나? (5) 기후변화로 인한 생태계(산림 및 해양자원) 및 산불의 취약지역은 어디인가? 등은 당장 시급히 고려해야 될 사항이다.

앞으로 5~6년 후에 출판될 IPCC 5차 보고서가 할 일은 전 지구 데이터베이스를 만들어 육상과 해양의 자료를 포함한 전 지구 생태계의 복합적 해석 쪽에 중점을 둘 것이며 육상과 해양을 종합하여 해석할 수 있는 능력과 지식이 앞으로 필요할 것이다. (Poloczanska *et al.*, 2008).

4.2 정책적 접근 방안

4.2.1 왜 이산화탄소를 줄여야 하나?

정책적 접근방향을 논하기 전에 우선 왜 이산화탄

소를 줄여야 하는지에 대한 과학적인 연구결과를 살펴 보자. 앞서서도 언급했듯이 현재 전 지구적인 이산화탄소의 증가는 주로 화석연료의 사용과 농경지의 사용 때문이다. 산업화가 이미 이산화탄소의 농도를 280 ppm에서 385 ppm 으로 증가시켰다. 이는 지난 세기동안 약 0.7 °C 의 온도 상승의 상당부분에 기여를 하였다.

우리나라도 이산화탄소 농도가 빠르게 증가하고 있다(Fig. 3). 1999년 370 ppm이던 이산화탄소 농도가 2007년은 390 ppm으로 증가하였다. 이는 8년 동안에 20 ppm이 증가하였으며 매년 2.5 ppm이 증가하는 추세이다.

이산화탄소의 농도는 조금만 변해도 민감한 기후변화를 일으킨다(Campbell *et al.*, 2000). 하와이의 마우나로아, 남극에서 관측된 이산화탄소의 농도 증가는 산업화에 의해서 배출된 이산화탄소의 양과 비례 관계를 보인다(Keeling *et al.*, 1995).

이산화탄소는 대기에 의해서 빠르게 섞이기 때문에 전 지구적으로 2~3 ppm 정도밖에 차이가 나지 않는다(Neftel *et al.*, 1982). 유엔 기후변화협약(UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change의 궁극적인 목적은 온실기체를 안정화시키는 것이다(Wigley *et al.*, 1996).

현재 세계적으로 기후변화에 대응하기 위하여 이산화탄소의 배출을 경제발전에 방해를 받지 않고 감축하고자 하는 정책을 펴고 있다. IPCC 4차(2007) 보고서는 기후변화 대처방안으로 청정에너지 개발(핵, 생물연료, 풍력, 수력), 이산화탄소를 포획해서 저장할

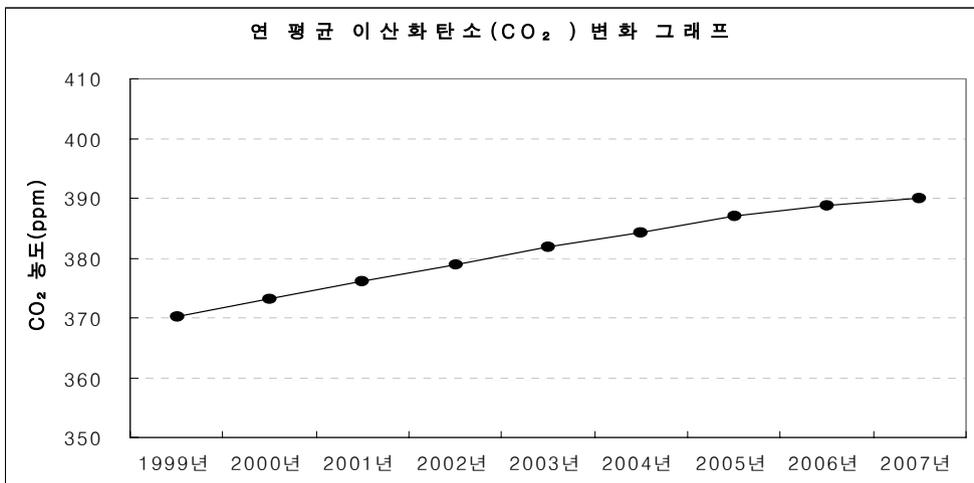


Fig. 3. Carbon dioxide concentrations of Korea (data from Korea Meteorological Administration).

수 있는 시스템 개발, 에너지 사용의 효율성 증대를 제시하고 있다(Nature, 2007).

2006년 11월에 발표된 Stern 의 보고서에 의하면 온실기체 배출을 줄이는 것은 매우 시급한 상황이며, 예리한 판단력을 가지고 즉시 줄여야 한다고 했다(Nordhaus, 2007). 이산화탄소 감축을 포함한 기후변화에 관한 정책을 수립할 때 과학적, 경제적, 정치적인 이슈들을 고려해야 하며 개개인이 마음속에 윤리의식을 가지고 있어야 성공 할 수 있다(Stern and Taylor, 2007). 만약 다음 100년간 화석연료를 계속 사용하면 이산화탄소 농도는 1000 ppm 까지 상승할 수 있다(IPCC, 2001).

4.2.2 이산화탄소 저감 정책 사례

대기 중의 이산화탄소 농도를 통제하기 위해서는 우선 시급히 실행할 수 있는 방안은 화석연료의 사용을 줄이는 것이다(Chambers *et al.*, 2001). 매년 7.1 petagrams (peta = 10^{15})의 이산화탄소가 인간의 활동에 의해 방출되는데 이중 50% 정도가 대기에 머물게 된다(Kaiser, 1998).

2007년 발리(Bali)회의에서 대부분의 국가 대표들은 산업화된 국가들은 이산화탄소 배출을 2020년까지 1990년 대비 25~40 % 줄이는데 동의했다(Nature, 2007). 2008년 7월 G8 정상들이 일본에서 기후변화에 대해 의논하였으며 적어도 2050년까지는 전 지구 이산화탄소 배출을 UN의 기준인 1990년 대신에 2005년 대비 50% 줄이자고 하였다(Heffernan, 2008).

일본과 미국의 이산화탄소 저감 방안에 대해서 살펴보자. 일본의 경우 역사적으로 에너지를 효율적으로 사용하는 나라였으며 이산화탄소 배출은 2008년 기준 1990년 대비 6% 상승은 하였지만 2005년 기준을 적용할 경우 그렇게 절박한 상황은 아니다(Heffernan, 2008).

중국의 경우 1980년부터 이산화탄소 배출량은 2007년으로 향할수록 증가하나 탄소농도(carbon intensity; carbon emission per unit of GDP)는 1980년부터 2007년으로 향할수록 감소한다(Zeng *et al.*, 2008). 이는 중국이 이산화탄소 배출을 줄이려고 신경을 많이 썼음을 의미한다. 중국은 또한 2006~2010 계획에 에너지 농도(energy intensity; energy consumption per unit GDP)를 20 % 감소시키는 계획을 가지고 있다. 이산화탄소의 배출을 줄이기 위해 가장 시급히 해야 할 일은 에너지를 절약하는 것이기 때문이다.

우리나라의 경우 IEA(2007) 보고서에 의하면 에너지 사용에 의한 이산화탄소 농도는 1980~2005년 기간 동안 증가하는 경향을 보이며 탄소농도는 증가와 감소를 반복하고 있다. 이는 앞으로 우리나라가 이산화탄소의 배출을 줄이고자 많은 신경을 써야함을 의미한다.

4.2.3 이산화탄소 저감을 위한 방안

우리나라가 이산화탄소 농도를 줄이기 위하여 가장 시급히 해야 할 일을 논해보자. 첫 번째로 이산화탄소를 몇 년도 대비(예를 들어 1990년 혹은 2005년) 몇 %를 줄여야 할지 감축목표를 내어 놓아야 한다. 이를 위해 앞에서도 언급하였지만 우리나라 주변 해양 및 산림의 이산화탄소 흡수량과 배출량에 대한 과학적인 연구가 있어야 한다. 또한 산업 부분별, 농경지 사용, 토지이용 등에 따른 이산화탄소의 배출량에 관한 과학적인 결과가 있어야 한다. 즉 우리나라는 총 이산화탄소 배출량은 얼마이며 이중 흡수원에 의해 흡수될 수 있는 이산화탄소의 양이 얼마인지를 알아야 감축목표를 설정할 수 있다. 또한 설정된 감축 목표의 과학적인 논리와 근거를 국제 사회에 제시해 공감대를 얻어야 한다.

두 번째로 이산화탄소 감축을 위한 신 재생에너지(풍력, 태양력, 지열, 수력 등)의 개발에 신경을 써야한다. 신 재생에너지를 활용해서 어느 정도의 이산화탄소를 저감할지에 대한 과학적인 자료와 정책적 결정도 필요하다.

세 번째로 기후변화가 사회·경제·정치에 미치는 영향에 미칠 영향에 관한 연구가 필요하다. 현재 이에 대한 연구는 세계적으로 거의 되어있지 않다. 하지만 과거의 기후변화가 환경에 미친 영향 등에 관한 연구결과를 통하여 간접적으로 유추할 수 있는 직관이 필요하다. 기후변화가 과거 문명의 붕괴에 미친 영향에 관한 연구를 참조하여 이산화탄소 저감의 시급성과 국제사회에서의 동참 및 협력의 중요성을 가슴속 깊이 깨달을 필요가 있다.

마지막으로 이산화탄소 감축을 위한 구체적인 실천 방안 및 이행가능 계획의 설정이 필요하다. 석탄의 사용은 이산화탄소를 가장 많이 배출 하며(De Leo *et al.*, 2001) 석탄의 사용을 줄여야 한다. 또한 이산화탄소 배출의 많은 부분은 자동차로부터 온다. 예를 들어 미국의 경우 자동차로부터 배출되는 이산화탄소의 양이 20%를 차지한다. (Claussen, 2004). 이산화탄소의 저감과 기후변화의 극복을 위하여 생활이 불편하더라도 소형차를 몰며 에너지 사용을 줄여야한다. 우리의 가

정을 포함한 빌딩에서 사용하고 있는 에너지의 사용도 줄여야한다. 미국 이산화탄소 배출의 1/3은 빌딩에서 사용하는 에너지 사용에서 온다(Claussen, 2004). 우리나라도 조금 춥거나 덥게 지나더라도 가정 및 건물에서 사용하는 에너지의 사용을 줄여야만 한다. 이외에도 시골지역의 개발을 가능하면 피하며, 나무를 심어 산림의 분포를 넓히며, 에너지 절약을 위하여 자전거, 대중교통수단을 활용해야만 한다.

5. 우리나라 기후변화대응 이산화탄소 저감 잘 하고 있나?

독일의 환경단체인 Germanwatch는 각국이 이산화탄소 배출을 줄이고자 하는 노력의 정도를 평가하기 위하여 “기후변화대응 성과지수”(CCPI: Climate Change Performance Index)를 개발하였다. “기후변화대응 성과지수”에 의한 평가는 에너지와 관련되어 이산화탄소를 90 %이상 배출하는 56개 국가를 대상으로 하였다. 기후변화대응 성과지수를 산정하기 위한 각 부분별 이산화탄소 배출 자료는 국제에너지기구(IEA: International Energy Agency)에서 제공받은 자료를 사용하였다. “기후변화대응 성과지수”에 의해 각국의 이산화탄소 저감노력의 정도에 따라 순위를 매긴 이유는 이산화탄소를 가장 많이 배출하는 국가들에게 정치적, 사회적

압박을 가하기 위함이다. “기후변화대응 성과지수”는 매년 평가를 하며 유엔 정상에 제출된다.

“기후변화대응 성과지수”에 의하면 스웨덴, 독일, 아이슬란드 등이 기후변화를 억제하기 위하여 가장 많이 노력하고 있는 국가로 나타났다. 부분별 배출량 증가율을 볼 때 우리나라는 56개국 중 54위를, 중국과 인도는 30위, 일본은 22위를 차지하였다. 1990년 이후 배출량 증가율을 기준으로 순위를 매긴 결과 우리나라는 56개국 중 53위, 중국은 20위, 인도는 4위, 일본은 43위를 차지하였다(Table 1).

배출량 증가율, 배출 수준, 기후정책 등을 모두 고려한 종합성적은 온실가스 최대 배출국인 중국 과 미국은 각각 40위, 55위를 차지하였다. 일본은 42위를 차지하였으며 인도는 5위를 차지하였다. 우리나라는 56개국 중 매우 낮은 성적인 51위를 차지하였다.

IPCC의 미래 계획은 기후변화의 영향은 무엇이며 온실기체의 배출을 세계의 각국들에게 어떻게 구속할 것인가를 연구하는 것이다(Kintisch, 2008). 미래 기후변화의 정책은 중국, 인도, 일본, 미국 등이 이끌 것이며 캐나다와 호주가 지지 할 것이다(Prins and Rayer, 2008).

미국의 대통령인 Barack Obama의 기후변화 정책은 증거와 사실에 근거를 둔 정책이다(Bhattacharje, 2008). John McCain의 경우는 전문가의 말을 믿는 정

Table 1. Climate Change Performance Index of Korea, China, India, and Japan. (K, C, I, J denote for Korea, China, India, and Japan, respectively).

	Index	Score				Rank				Weight	Rank				
		K	C	I	J	K	C	I	J		K	C	I	J	
Sectoral Emissions Trends	Energy	Electricity	37	23.2	55.1	64.5	52	55	42	19	8.0%	56	53	4	35
		Renewables	24.1	13.4	12.2	9	14	30	34	45	8.0%				
	Trans-port	International Aviation	0	31.5	55.2	63.9	56	50	39	29	4.0%				
		Road Traffic	30.6	11.4	66.1	71.4	46	50	12	7	4.0%				
	Reside-ntial	Private Households	26.8	51.9	56.1	59.2	54	30	30	22	4.0%				
	Indu-stry	Manufacturing and Construction	66	34.5	67.7	64.3	27	52	24	29	7.0%				
	Target Performance Comparison since 1990		13.9	55.6	78.4	31.9	53	20	4	43	15.0%				
Emission Level	CO ₂ per Primary Energy Unit	41	13.2	42.2	35.7	21	50	17	30	15.0%	32	41	8	27	
	Primary Energy Unit per GDP	70.2	74.0	84.8	87.6	38	35	19	14	7.5%					
	Primary Energy Unit per Capita	65.4	93.1	99.4	67.8	42	7	2	38	7.5%					
Climate Policy	International climate policy	57.6	66.7	47.7	48.5	27	18	41	40	10.0%	26	7	14	50	
	National Climate Policy	53.6	85.1	85.1	21.3	29	8	8	53	10.0%					
Total		41.3	47.0	62.4	46.9	46.9					51	40	5	42	

책을 펴며 전문가들이 지구 온난화 문제는 가장 긴급히 대책을 강구해야 될 문제라고 조언했다(Holden, 2008).

6. 결 론

우리나라는 이산화탄소를 몇 년도까지 몇 년도에 비해 몇% 줄이겠다는 정책이 발표되지 않았다. 국제 사회에서의 신뢰와 동참을 위해서 이산화탄소 배출을 줄이고자하는 정책을 발표하며 지키고자하는 의지와 윤리의식 등의 사회자본이 요구된다. 과학자들은 기후 변화가 야기할 수 있는 여러 가지 문제점들의 최신지식을 제공하며 해결책을 제시해야할 도덕적인 책임이 있다. 또한 정책결정자들은 과학자가 제공하는 기후변화의 심각성에 관한 여러 가지 정보를 판단할 수 있는 예리한 통찰력을 가지고 있어야 한다. 과학은 순수한 호기심에서 연구가 행하여져야지 외부의 예산에 의한 스트레스나 자본주의의 부정적인 영향을 받아서는 안 된다. 투명성과 전문성에 기반을 둔 성과관리시스템의 실행 또한 필요하다.

감사의 글

본 논문을 심사하여 주신 익명의 심사위원님들께 감사를 드립니다.

참고문헌

김영신, 이기봉, 김희철, 2005: 국민소득 2만 달러 달성의 성장 엔진으로서 기상정보의 역할. *대기*, **15**, 27-34.
 신임철, 이희일, 1998: Spatial and temporal variations of foraminifers as an indicator of marine pollution. *Korean J. Geophysical Research*, **26**, 59-73.
 _____, _____, 1998: 유공충을 이용한 동해의 환경안정성 연구. *한국해양학회지*, **3**, 234-248.
 _____, 박병권, 이희일, 1998: Species diversity of planktonic foraminifera in the East Sea (Japan Sea). *Journal Paleont. Soc. Korea*, **14**, 137-146.
 _____, 이희일, 권원태, 정효상, 2005: 고기후학의 관점에서 바라본 현재의 기후변화. *한국기상학회지*, **41**, 229-237.
 _____, 김태룡, 이은정, 김은희, 김은숙, 박연옥, 배선희, 이희일, 2007: 한반도의 2007년 8월과 2007년 여름의 기후특성 및 8월과 여름의 장기 기후변화. *대기*, **17(4)**, 471-481.
 Adam, D., 2001: Royal Society disputes value of carbon sinks. *Nature*, **412**, 108.
 Allakhverdiv, A., and V. Pokrovsky, 2004: Russia, reluctantly,

backs Kyoto. *Science*, **306**, 209.
 Bachtold, D., 2003: Britain to cut CO₂ without relying on nuclear power. *Science*, **299**, 1291.
 Behrenfeld, M. J., R. T. O'Malley, D. A. Siegel & C. R. McClain, J. L. Sarmiento, G. C. Feldman, A. J. Milligan, P. G. Falkowski, R. M. Metelier, and E. S. Boss, 2006: Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature* **444**, 752-755.
 Berner, R. A., 1997: The rise of plants and their effect on weathering and atmospheric CO₂. *Science*, **276**, 544-546.
 Bhattacharje, Y., 2008: Barack Obama. *Science*, **319**, 28-29.
 Bohannon, J., 2004: Economists rate greenhouse gas curbs a poor investment. *Science*, **304**, 1429.
 Burck, J., C. Bals, M. Beck, & E. Ruthlein, 2007: The climate change performance index 2008. www.germanwatch.org.
 Campbell, I. D., C. Campbell, Z. Yu, D. H. Vitt, and M. J. Apps, 2000: Millennial-scale rhythms in peatlands in the western interior of Canada and in the global carbon cycle. *Quaternary Research*, **54**, 155-158.
 Chambers, J. Q., N. Higuchi, E. S. Tribuzy, and S. E. Trumbore, 2001: Carbon sink for a century. *Nature*, **410**, 429.
 Ciais, P., P. P. Tans, M. Trolier, J. W. C. White, and R. J. Francey, 1995: A large Northern Hemisphere terrestrial CO₂ sink indicated by the 13C/12C ratio of atmospheric CO₂. *Science*, **269**, 1098-1102.
 Claussen, E., 2004: An effective approach to climate change. *Science*, **306**, 816.
 Crowley, T. J., and R. A. Berner, 2004: Something warm, something new. *Science*, **304**, 685-686.
 Cyranoski, D., and E. Check, 2005: Antarctic ice puts climate predictions to the past. *Nature*, **438**, 536.
 _____, 2008: Visions of China. *Nature*, **454**, 384-387.
 Davidson, E. A., and A. I. Hirsch, 2001: Fertile forest experiments. *Nature* **411**, 431-433.
 De Leo, G. A., L. Rizzi, A. Caizzi, and M. Gatto, 2001: The economic benefits of the Kyoto Protocol. *Nature*, **413**, 478-479.
 Doniger, D. D., A. V. Herzog, A. V. and D. A. Kashof, 2006: An ambitious, centrist approach to global warming legislation. *Science*, **314**, 764-765.
 Fischer, H., M. Wahlen, J. Smith, D. Mastroianni, and B. Deck, 1999: Ice core records of atmospheric CO₂ around the last three glacial terminations. *Science*, **283**, 1712-1714.
 Freeman, C., N. Ostle, and H. Kang, 2001: An enzymic 'latch' on a global carbon store. *Nature*, **409**, 149.
 Friedlingstein, P., 2008: A steep road to climate stabilization. *Nature*, **451**, 297-300.
 Ganeshram, R. S., T. F. Pedersen, S. E. Calvert, and R. Francois, 2002: Oceanic action at a distance. *Nature*, **419**,

- 123-125.
- Giles, J., 2007: US posts sensitive climate report for public comment. *Nature*, **441**, 6-7.
- Goldstein, B. D., 2008: Climate change goals: Where to begin? *Science*, **319**, 33.
- Goldston, D., 2007: Political climate. *Nature*, **450**, 333.
- Gruber, N., C. D. Keeling, C.D. and N. R. Bates, 2002: Interannual variability in the North Atlantic Ocean carbon sink. *Science*, **298**, 2374-2378.
- Heffernan, O., 2008: Leaders still vague on emissions targets. *Nature*, **454**, 142.
- Hodell, D. A., J. H. Curtis, and M. Brenner, 1995: Possible role of climate in the collapse of Classic Maya civilization. *Nature*, **375**, 391-394.
- Holden, C., 2008: John McCain. *Science*, **319**, 26-27.
- Hulme, M., Z. C. Zhao, Z.-C. and T. Jiang, 1994: Recent and future climate change in East Asia. *International Journal of Climatology*, **14**, 637-658.
- Indermuhle, A., T. F. Stocker, F. Joos, H. Fischer, H. J. Smith, M. Wahlen, B. Deck, D. Mastroianni, J. Tschumi, T. Blunier, R. Meyer, and B. Stauffer, 1999: Holocene carbon-cycle dynamics based on CO₂ trapped in ice at Taylor Dome, Antarctica. *Nature*, **398**, 121-126.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001: Climate Change 2001. The Scientific Basis, Cambridge University Press. 881 pp.
- _____, 2007: Climate Change 2007. The Physical Basis. Summary for Policymakers. 18 pp.
- International Energy Agency(IEA), 2007: CO₂ emissions from fuel combustion, 2007 edition. 274 pp.
- Kaiser, J., 1998: Possibly vast greenhouse gas sponge ignites controversy. *Science*, **282**, 386-387.
- _____, 2001: Climate Change: 17 National Academies endorse Kyoto. *Science*, **292**, 1275-1277.
- Keeling, R. F. and B. B. Stephens, 2008: Recording Earth's vital signs. *Science*, **319**, 1771-1772.
- _____, C. D., T. P. Whorf, M. Wahlen, and J. van der Plicht, 1995: Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, **375**, 666-670.
- Kerr, R. A., 2003: Right direction, but long way to go for Bush's plan. *Science*, **299**, 1494.
- _____, 2004: Three degrees of consensus. *Science* **305**, 932-934.
- _____, 2008: Experts find no evidence for a mammoth-kill impact. *Science*, **319**, 1331-1332.
- Kintisch, E., 2008: IPCC tunes up for its next report aiming for better, timely results. *Science*, **320**, 300.
- Knutson, T. R., R. E. Tuleya, W. Shen, W. and I. Ginis, 2001: Impact of CO₂-induced warming on hurricane intensities as simulated in a hurricane model with ocean coupling. *Journal of Climate*, **14**, 2458-2468.
- Kurschner, W. M., 2001: Leaf sensor for CO₂ in deep time. *Nature*, **411**, 247-248.
- Lane, N., 2007: Reading the book of death. *Nature*, **448**, 122-125.
- LOBELL, D. B., M. B. BURKE, C. TEBALDI, C. M. D. MASTRANDREA, W. P. FALCON, and R. L. NAYLOR, 2008: Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science*, **319**, 607-610.
- Lorius, C., J. Jouzel, D. Raynaud, J. Hansen, and H. L. Treut, 1990: The ice-core record: climate sensitivity and future greenhouse warming. *Nature*, **347**, 139-145.
- Malakoff, D., 2008: Bush takes a final swipe, and salute, at CO₂ emission curbs. *Science*, **321**, 324-325.
- Manabe, S., and R. J. Stouffer, 1990: Simulation of abrupt climate change induced by freshwater input to the North Atlantic Ocean. *Nature*, **378**, 165-167.
- _____, and _____, 1993: Century-scale effects of increased atmospheric CO₂ on the ocean-atmosphere system. *Nature*, **364**, 215-218.
- _____, and _____, 1995: Simulation of abrupt climate change induced by freshwater input to the North Atlantic Ocean. *Nature*, **378**, 165-167.
- Marquis, M. and P. Tans, 2008: Carbon crucible. *Science*, **320**, 460-461.
- Milly, P. C. D., J. Betancourt, M. Falkenmark, R. M. Hirsch, Z. W. Kundzewicz, D. P. Lettenmaier, and R. J. Stouffer, 2008: Stationarity is dead: Whither water management?. *Science*, **319**, 573-574.
- Mitchell, J. F. B., and D. A. Warrilow, 1987: Summer dryness in northern mid-latitudes due to increased CO₂. *Nature*, **330**, 238-240.
- _____, T. C. Johns, J. M. Gregory, and S. F. B. Tett, 1995: Climate response to increasing levels of greenhouse gases and sulphate aerosols. *Nature*, **376**, 501-504.
- Nature, 2007: Light at the end of the tunnel. *Nature*, **445**, 567.
- _____, 2007: No more hot air. *Nature*, **446**, 109.
- _____, 2007: No more hot air. *Nature*, **447**, 507.
- _____, 2007: The heat is on. *Nature*, **450**, 319.
- _____, 2007: Climate deal agreed in Bali showdown. *Nature*, **450**, 1136.
- _____, 2007: Cut the climate antics. *Nature*, **446**, 470.
- Nefel, A., E. Moor, H. Oeschger, H., and B. Stauffer, 1985: Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO₂ in the past two centuries. *Nature*, **315**, 45-47.
- _____, H. Oeschger, J. Schwander, B. Stauffer, and R. Zumbunn, 1982: Ice core sample measurements give atmospheric CO₂ content during the past 40,000 yr. *Nature*, **295**, 220-223.
- Nelson, F. E., 2003: (Un)frozen in time. *Science*, **299**, 1673-1675.
- Nisbet, E., 2007: Cinderella science. *Nature*, **450**, 789-790.
- Nordhaus, W., 2007: Critical assumptions in the Stern

- review on climate change. *Science*, **317**, 201-202.
- Oechel, W. C., S. J. Hastings, G. Vourlitis, M. Jenkins, G. Riechers, and N. Grulke, 1993: Recent change of Arctic tundra ecosystems from a net carbon dioxide sink to a source. *Nature*, **361**, 520-523.
- _____, S. Cowles, N. Grulke, S. J. Hastings, B. Lawrence, T. Prudhomme, G. Riechers, B. Strain, D. Tissue, and G. Vourlitis, G., 1994: Transient nature of CO₂ fertilization in Arctic tundra. *Nature*, **371**, 500-503.
- O'Neill, B. C. and M. Oppenheimer, 2002: Dangerous climate impacts and the Kyoto Protocol. *Science*, **296**, 1971-1972.
- Oren, R., D. S. Ellsworth, K. H. Johnsen, N. Phillips, B. E. Ewers, C. Maier, K. V. R. Schafer, H. McCarthy, G. Hendrey, S. G. McNulty, S.G., and G. G. Katul, 2001: Soil fertility limits carbon sequestration by forest ecosystems in a CO₂-enriched atmosphere. *Nature*, **411**, 469-472.
- Osborn, T. J., and K. R. Briffa, 2004: The real color of climate change?. *Science*, **306**, 621-622.
- Pascotti, J., 2007: Deciphering ancient weather reports, drip by drip. *Science* **317**, 448.
- Pastor, J., and W. M. Post, 1988: Response of northern forests CO₂-induced climate change. *Nature*, **334**, 55-58.
- Pearson, P. N., and M. R. Palmer, 2000: Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years. *Nature*, **406**, 695-699.
- Petit, J. R., J. Jouzel, D. Raynaud, N. I. Barkov, J. M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. C. M. Davis, G. Delaygue, M. Delmotte, V. M. Kotlyakov, M. Legrand, V. Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pepin, C. Ritz, E. Saltzman, and M. Stievenard, 1999: Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, **399**, 429-436.
- Pierrehumbert, R. T., 2002: The hydrologic cycle in deep-time climate problems. *Nature*, **419**, 191-198.
- Poloczanska, E., A. J. Hobday, and A. J. Richardson, 2008: Global database is needed to support adaptation science. *Nature*, **453**, 720.
- Prins, G., and S. Rayner, 2008: Radical rethink is needed on climate-change policy. *Nature*, **452**, 530.
- Rahmstorf, S., 1997: Risk of sea-change in the Atlantic. *Nature*, **388**, 825-826.
- Raynaud, D., and J. M. Barnola, 1985: An Antarctic ice core reveals atmospheric CO₂ variations over the past few centuries. *Nature*, **315**, 309-311.
- Retallack, G. J., 2001: A 300-million-year record of atmospheric carbon dioxide from fossil plant cuticles. *Nature*, **411**, 287-290.
- Richey, J. E., J. M. Melack, A. K. Aufdenkampe, V. M. Ballester, and L. L. Hess, 2002: Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂. *Nature*, **416**, 617-620.
- Sabine, C. L., R. A. Feely, N. Gruber, R. M. Key, K. Lee, J. L. Bullister, R. Wanninkhof, C. S. Wong, D. W. R. Wallace, B. Tilbrook, F. J. Millero, T. H. Peng, A. Kozyr, T. Ono, T. and A. F. Rios, 2004: The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*, **305**, 367-371.
- Sarmiento, J. L. and C. Le Quere, 1996: Oceanic carbon dioxide uptake in a model of century-scale global warming. *Science*, **274**, 1346-1350.
- Schiermeier, Q., 2007: Climate credits. *Nature*, **444**, 976-977.
- _____, 2008: Purification with a pinch of salt. *Nature*, **452**, 260-261.
- _____, 2008: Europe to capture carbon. *Nature*, **451**, 232.
- _____, 2008: Europe spells out action plan for emissions targets. *Nature*, **451**, 504-505.
- Schimel, D. and D. Baker, 2002: The wildfire factor. *Nature*, **420**, 29-30.
- Schlesinger, W. H. and J. Lichter, 2001: Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO₂. *Nature*, **411**, 466-469.
- Schrope, M., 2001: Consensus science, or consensus politics ?. *Nature*, **412**, 112-114.
- Service, R. F., 2004: The carbon conundrum. *Science*, **305**, 962-963.
- _____, 2007: California a \$600 million pot of solutions. *Science*, **318**, 730.
- Shin, I. C., 1998: Pliocene-Pleistocene paleoclimatic and paleoceanographic history of the Site 959 of Leg 159, eastern equatorial Atlantic Ocean. *ODP(Ocean Drilling Program)*, *Scientific Result*, **159**, 575-583.
- Smith, K., 2007: Carbon sinks threatened by increasing ozone. *Nature*, **448**, 396-397.
- Stern, N. and C. Taylor, 2007: Climate change: risk, ethics, and the Stern review. *Science*, **317**, 203-204.
- Tett, S. F. B., P. A. Stott, M. R. Allen, W. J. Ingram, and J. F. B. Mitchell, 1999: Causes of twentieth-century temperature change near the Earth's surface. *Nature*, **399**, 569-572.
- Thomas, H., Y. Bozec, K. Elkalay, and H. J. W. D. Baar, 2004: Enhanced open ocean storage of CO₂ from shelf sea pumping. *Science*, **304**, 1005-1008.
- Tollefson, J., 2007: Graphic detail Countries with highest CO₂ emitting power sectors (tonnes per year). *Nature*, **450**, 327.
- _____, 2007: Deforestation on the agenda at climate meeting. *Nature*, **450**, 590-591.
- _____, 2007: Cool reaction to Bush's climate summit. *Nature*, **449**, 519.
- _____, 2007: Graphic detail Countries with highest CO₂ emitting power sectors (tonnes per year). *Nature*, **450**, 327.
- _____, 2008: Climate war games. *Nature*, **454**, 673.

- _____, 2008: Top climate-impacts programme shut. *Nature*, **454**, 808-809.
- _____, 2008: Carbon-trading market has uncertain future. *Nature*, **452**, 508-509.
- Wang, G., J. L. Innes, J. Lei, S. Dai, and S. W. Wu, 2007: China's forestry reforms. *Science*, **318**, 1556-1557.
- Wardle, D. A., G. Hornberg, O. Zackrisson, M. Kalela-Brundin, and D. A. Coomes, 2003: Long-term effects of wildfire on ecosystem property across an Island area gradient. *Science*, **300**, 972-975.
- Wigley, T. M. L., R. Richels, and J. A., Edmonds, 1996: Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentrations. *Nature*, **379**, 240-243.
- Zeng, N., Y. Ding, J. Pan, H. Wang, and J. Gregg, 2008: Climate change -the Chinese challenge. *Science*, **319**, 730-731.
- Zhang, D., and L. Lu, 2007: Anti-correlation of summer/winter monsoons? *Nature*, **450**, E7.
- Zweibel, K., J. Mason, and V. Fthenakis, 2008: Solar Grand Plan, *Scientific American*, **298**, 64-73.