

기후변화와 탄소격리 기술

김 종 수 · 한국과학기술연구원 에너지환경연구본부, 책임연구원

_e-mail : kimjs@kist.re.kr

이 글에서는 먼저 기후변화현상의 본질을 들여다보고 그에 대한 타당한 대응 전략을 알아보고자 한다. 특히 대용량 CO₂ 감축에 유리할 것으로 예상되는 이산화탄소 격리 기술이라는 생소한 기술분야에 대해서 알아보고 이러한 기술이 온실가스 배출 감축에 기여할 수 있는 구체적 기술적 경제적 체계의 문제점을 짚어보도록 하겠다. 더불어 이명박 정부의 저탄소 녹색성장 정책을 재검토함과 동시에 이산화탄소 배출감축기술개발과 관련된 기계공학의 역할을 재조명한다.

2007년 12월에 인도네시아의 발리에서 개최된 제13차 UN 기후변화협약 당사국회의는 2012년에 만료되는 교토의정서 1차 공약에 대한 후속조치를 2009년 코펜하겐에서 개최되는 15차 당사국회의까지 도출하기로 합의하고 폐회하였다. 따라서 지금까지 기후변화에 대한 대응을 주도하였던 교토의정서보다 강화된 국제협약이 등장할 것이다. 또한 우리나라는 세계 10위의 온실가스 배출국으로서 온실가스배출의 의무감축에서 유예될 수 있는 가능성이 매우 약하다고 예측되고 있다.

이러한 국제적 정세의 변화에 대처하기 위해서 2007년 말 정부는 기후변화 제4차 종합대책(5개년 계획)을 발리 회의 이후 즉

시 발표하였으며, 2008년에 들어와서는 63주년 광복절 기념사에서 '저탄소 녹색성장' 정책을 이명박 정부의 새로운 경제정책의 기조로 삼겠다고 선언하기에 이르렀다. 그럼에도 불구하고, 4차 종합대책 및 '저탄소 녹색성장'의 실질적인 정책안은 에너지 절약, 신재생 에너지 보급 및 원자력 발전의 확대 등 효과가 제한적인 기존 정책의 반복이라는 비판에 직면하고 있다.

이 글에서는 먼저 기후변화현상의 본질을 들여다보고 그에 대한 타당한 대응 전략을 알아보고자 한다. 특히 대용량 CO₂ 감축에 유리할 것으로 예상되는 이산화탄소 격리 기술이라는 생소한 기술분야에 대해서 알아보고 이러한 기술이 온실가스 배출감축

에 기여할 수 있는 구체적 기술적 경제적 체계의 문제점을 짚어보도록 하겠다. 그리고 이 글의 끝에 여기에서 제시된 기술적 검토에 바탕을 두고 이명박 정부의 '저탄소 녹색성장' 정책을 간단하게 재검토함과 동시에 이산화탄소 배출감축기술개발과 관련된 기계공학의 역할을 재조명하겠다.

지구온난화 아니면 기후변화?

기후를 조절하는 여러 가지 물리적 변수가 존재하지만, 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O)와 같은 온실가스가 대기 중에 축적됨에 따라서 지구의 온도가 상승한다는 점은 작년에 발간된 IPCC 4차 영향평가보고서에

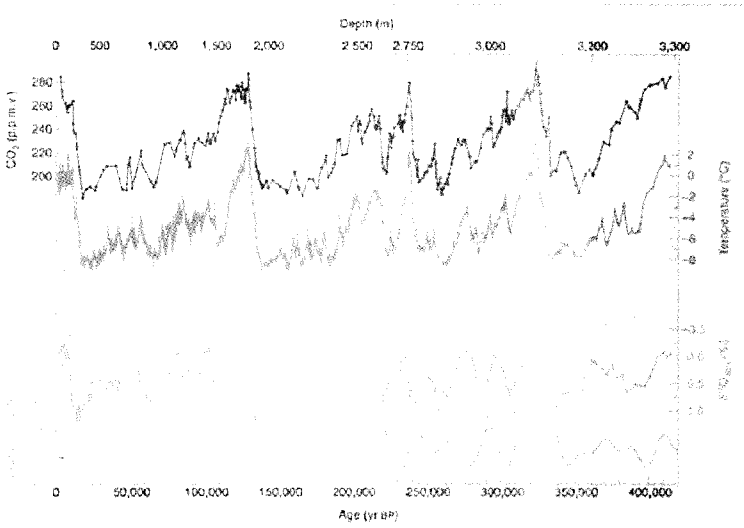


그림 1 Ice Core 자료에서 추출된 극지방의 온실가스 농도와 온도의 변화

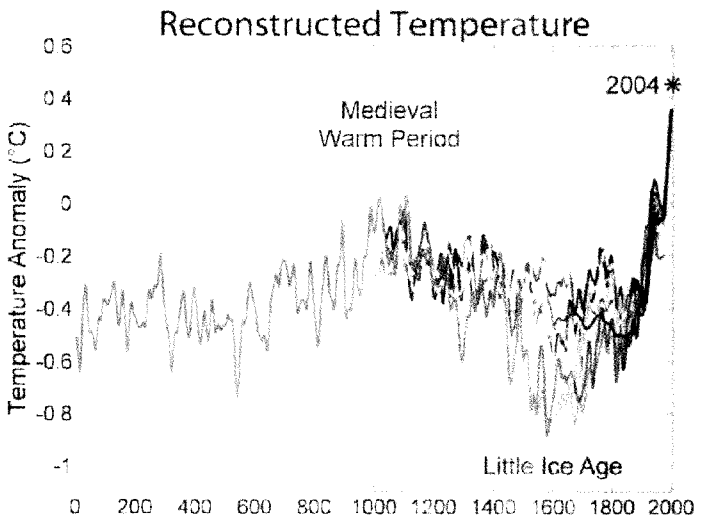


그림 2 지난 2000년간의 지구온도 변화

까지 올라왔으며, 또한 매년 약 2ppm 정도씩 증가하여 2015년 경에는 400ppm 수준을 돌파할 수 있을 것으로 예측되고 있다. 한편 대기 중의 온도는 온실가스의 농도가 100ppm 정도 증가할 때마다 저위도 지역에서는 약 1°C 정도 증가하지만, 극지방에서는 온도의 변화가 훨씬 민감해서 약 10°C씩 증가하는 특성을 보인다.

지구온도가 약 1°C 정도 상승하는 것은 지구의 역사에서 커다란 현상이 아닐 수도 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이 지난 2000년간 지구온도의 변화를 보더라도 인류는 12세기경 중세온난기와 산업혁명 이전의 소빙기를 거쳤으며, 현재는 온실가스 축적에 의한 인위적 온난기에 접어들었다고 볼 수 있다. 또한 지금까지 ±1°C 정도의 온도변화를 견뎌낸 인류가 비교적 작은 폭의 온도상승을 동반하는 지구온난화에는 무난히 적응할 수 있을 가능성이 상당히 높다고 할 수 있다.

그러나 여기에서 간과할 수 없는 사실은 현재의 지구온도 상승이 산업사회 유지의 필수 요소인 화석연료 사용에 의한 인위적 온도상승이며 이러한 온도상승이 자연적 변화보다 매우 빠르게 진행되고 있으며 또한 앞으로 더욱 가속화될 것이라는 점이다. 이보다 더욱 경계해야 되는 사실은 지구온난화는 온실가스 축적에

서도 다시 확인된 사실이다. 이러한 사실은 남극에서 굴착된 Vostok Ice Core 및 EPICA Ice Core의 분석결과에서 보여주는 지난 50만 년 동안 온실가스의 농도와 대기 온도의 상관관계에서도 잘 드러나고 있다.

여기에서 주목할 사항은 약 10만 년 정도의 주기를 갖고 빙하기에 약 200ppm 그리고 온난기에 280ppm 정도를 반복하던 CO₂ 상당 온실가스의 농도가 산업혁명 이후 급격히 증가하기 시작하여 현재는 약 380ppm 수준

의해서 야기되는 기후변화의 초기 선형적 전개에 불과하다는 점이며, 앞으로 지구온난화가 더 심화될 경우 기후시스템의 비가역적 천이가 발생할 수 있고 이러한 변화에 대한 인류의 적응 가능성은 극히 불확실하다.

최근에 들어 비가역적 기후변화의 가능성을 경고하는 자연적 현상이 급격히 증가하고 있다. 극지방의 빙하가 급격히 감소하고 있으며, 빙하의 감소는 빙하로부터 노출된 지표 및 해양의 복사 흡수율을 증가시켜 기후변화를 가속화시킬 것으로 예측되고 있다. 또한 지속적인 에너지의 축적으로 인해서 극지방 및 심해에 존재하는 이른바 불타는 어름으로 알려진 메탄 하이드레이트가 불안정해질 경우 이산화탄소보다 강력한 온실가스인 메탄의 대량 유출에 의한 기후의 급격한 변화 가능성도 논의되기 시작하였다. 보다 근본적으로 기후시스템의 중요한 추진력의 하나인 극지방과 적도지방의 온도차가 온실가스 증가에 따라서 점차 감소되기 때문에, 지구 대기/해양 순환체계의 변화도 예상할 수 있다.

위와 같은 기후변화 가능성은 우리가 예상하고 있는 비가역적 기후변화 시나리오의 극히 일부 분이지만, 대기 중에 온실가스 축적이 가속화됨에 따라서 현실화될 가능성이 점차 증가하고 있다는 점에서 인류의 시급한 대응책 마련이 필요하다고 하겠다.

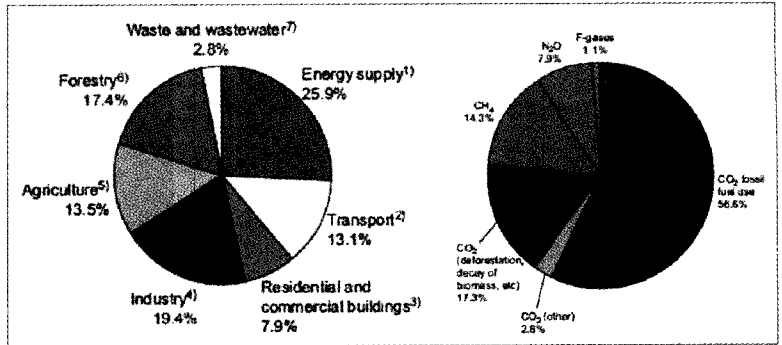


그림 3 IPCC 4차 영향평가보고서에 실린 지구 온실가스 배출량 자료(2004년 기준)

온실가스, 얼마나 줄여야 하는가?

그럼 기후시스템의 비가역적 천이가 발생하기 전에 대기 중 온실가스 농도를 안정화시키기 위한 방안을 알아보기 위해서 전 세계적인 온실가스 배출량을 먼저 고려해볼 필요가 있다.

그림 3은 IPCC 4차 기후변화 평가보고서에 실린 2004년도 전 지구적 온실가스 배출원의 현황을 각 부문 및 온실가스의 종류에 따라서 나타내고 있는 그림으로서 다음과 같이 요약될 수 있다. 전체적인 온실가스의 배출량은 연간 490억 톤(CO₂ 상당량으로 환산)이며, 이 가운데 약 77%인 370억 톤이 CO₂로 배출되고 있으며, 배출되는 CO₂ 가운데 약 280억 톤이 화석연료의 연소에 의해서 배출되는 CO₂이다. 또한 다른 온실가스로는 메탄 및 아산화질소(N₂O)가 각각 연간 CO₂ 상당량으로 70억 톤 및 40억 톤 정도가 배출되고 있다.

한편 온실가스의 배출량을 부

분별로 살펴보면 ① 에너지 및 산업과 같은 동력 및 산업재의 생산과 연관된 배출원 ② 농업 및 산림과 연계된 분산배출원 및 ③ 수송 및 가정/상업시설과 연관된 소규모 고정 또는 이동 배출원으로 구분될 수 있다. 특히 에너지 및 산업과 같은 공급진영의 온실가스 배출원이 수송 및 가정/상업과 같은 소비진영의 온실가스 배출보다 월등히 우세하다는 점에서 소비감축 및 효율개선에 초점을 맞춘 소극적 온실가스 감축전략의 한계성을 쉽게 짐작할 수 있을 것이다.

특히 현재 지구가 보유하고 있는 CO₂의 자연순환 능력이 연간 120억 톤 이하로 예측되고 있어서 배출되는 CO₂의 약 2/3 정도가 감축되어야 하며, 또한 농업, 임업, 폐기물 및 에너지개발분야에서 분산되어 배출되는 메탄 및 N₂O와 같은 비CO₂ 온실가스의 배출량이 매우 크다는 점도 유념할 필요성이 크다. 결론적으로 CO₂ 농도의 안정화를 넘어서 메탄을 포함하는 전반적인 탄소순

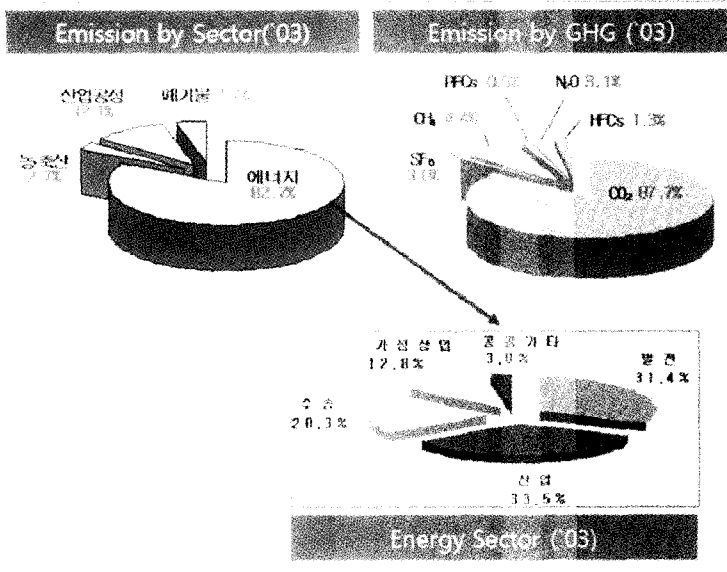


Figure 4. 우리나라의 온실가스 배출량 자료(2003년)

환체계 및 N₂O를 포함하는 질소 순환체계의 안정화가 동시에 확보되지 않을 경우 인위적 기후변화 가능성의 압박은 지속적으로 증대될 것이다.

온실가스의 국가별 배출 특성은 그 나라의 경제적 상황에 따라서 매우 큰 차이를 보이고 있다. 연간 1인당 CO₂의 배출이 가장 큰 나라들은 중동의 산유국이지만 비교적 인구가 작아서 전체적인 기여도도 낮은 편이다. 그 다음으로 미국, 캐나다, 호주와 같이 에너지자원이 풍부한 산업국가로서 약 20톤/년/인의 배출량을 가지고 있으며, 우리나라를 포함한 대부분의 산업화된 국가는 약 10톤/년/인의 배출량을 보이고 있다. 그러나 세계 평균 배출량은 약 5톤/년/인의 배출량을 보이고 있으며, CO₂의 자연순환

이 가능한 수준의 전 세계적 평균 배출량은 약 2톤/년/인 정도이다. 따라서 산업화된 국가에서는 약 80~90%의 CO₂ 배출감축이 이루어져야 하며, 전 세계적으로도 약 60%의 CO₂ 배출감축이 이루어져야 CO₂ 농도의 안정화가 가능하다. 즉, 에너지, 산업, 수송, 상업관련 경제활동에서 배출되는 모든 CO₂를 제거해야만 CO₂ 농도를 안정화시킬 수 있다는 점에서 현재의 CO₂ 배출감축 노력이 얼마나 보잘 것 없다는 점을 명심할 필요성이 크다. 또한 2006년 중국은 미국을 제치고 세계 1위의 CO₂ 배출국가가 되었지만, 1인당 배출량은 약 4톤/년/인의 수준을 보이고 있다. 그러나 만약 중국이 우리나라 수준의 산업화를 이룩할 경우 전세계적인 CO₂ 배출량이 약 70억 톤

정도 추가로 증가할 수 있을 것이다.

우리나라의 온실가스 배출특성을 보다 자세하게 파악한 자료가 그림 4에 제시되어 있다. 우리나라의 경우 대부분의 온실가스 배출이 화석연료의 이용에 의해(즉, Energy Sector의) CO₂로 배출되는 것을 알 수 있다. 이는 상대적으로 우리나라의 경제구조에서 농업생산이 차지하는 비율이 매우 낮기 때문이다. 에너지 영역에서는 화력발전이 30% 이상을 차지해서 가장 중요한 대규모 고정배출원으로 자리잡고 있다. 그러나 수송분야에서 배출되는 CO₂는 약 20% 정도로서 연료전지차량을 포함한 1,000만 대의 차세대 자동차 보급이 온실가스 배출감축에 미치는 영향이 약 40기의 석탄화력발전소에 적용하여 얻을 수 있는 감축보다 효과적이지 못하다는 것을 알 수 있다. 위의 그림 4에 주어진 에너지 영역의 온실가스 배출 특성은 대부분의 산업화된 국가에서 보여주고 있는 특성과 유사해서 EU 및 일본에서 채택하는 온실가스 배출감축 정책의 상당 부분이 우리나라에도 적용이 가능할 것으로 예상된다.

기후변화의 대응 방안

앞에서 간단하게 설명된 바와 같이 기후변화는 탄소기반 산업 사회를 사는 현 인류가 직면한

근본적 도전이다. 즉 우리는 화석 연료를 1차 에너지원으로 사용하여 생산된 동력으로 운영되는 산업사회에 살고 있다. 화석연료는 대기오염, 기후변화 등 다양한 부작용을 초래하고 있지만, 화석연료가 지니고 있는 높은 에너지밀도 및 안정성(meta-stability)으로 인해서 산업사회의 높은 에너지요구를 효과적으로 충족시켜주고 있다. 즉, 높은 에너지밀도는 동력생산설비의 건설을 위해서 보다 작은 경제적 비용이 투입되는 것을 의미하며, 화석연료의 안정성은 필요한 시기에 언제든지 동력으로 전환될 수 있어서 발전소와 같은 대규모 동력시설에서 자동차와 같은 소규모 이동동력원까지 다양하게 이용될 수 있음을 보여주고 있다. 또한 화석연료는 산업생산 및 교역부문뿐만 아니라 식량생산 등 모든 경제활동의 원동력으로 역할을 수행하고 있다. 따라서 산업사회의 후퇴를 방지하면서 기후변화에 대한 대응하기 위해서는 화석연료 기반 에너지시스템의 포괄적 개혁을 동반하는 새로운 경제구조를 구축하는 방안으로 추진되어야 하며, 기후변화 대응방안이 마련되는 과정에서 다음의 관점에서 검토될 필요성이 매우 크다.

- 산업사회를 유지할 수 있는 충분한 에너지량의 확보 가능성
- 산업사회가 요구하는 에너지 특성에 부합되는 에너지의

공급

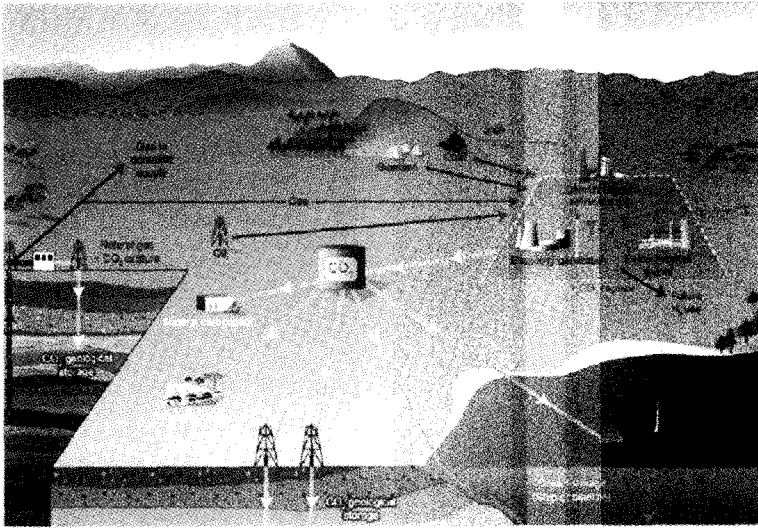
- 새로운 에너지와 산업 체계에 적합한 경제 체제
 산업사회의 지속가능성을 확보한 상태에서 온실가스배출 저감을 구현하기 위한 전략을 알아보기 위해서 여기에서는 화석연료와 연계된 CO₂의 배출로 우리의 관심을 먼저 한정하고자 한다. 앞에서 언급되었듯이 CO₂의 배출은 동력 및 산업재의 생산과 연계된 공급측면과 수송 및 가정/상업영역의 소비측면에서 다음과 같은 기본 전략을 통해서 저감될 수 있을 것이다.

공급측면의 CO₂ 배출은 일반적으로 대규모 고정배출원의 특성을 보이고 있어서 신속한 배출저감이 가능하다. 공급측면에서 적용될 수 있는 CO₂ 배출저감기술로는 ① 원자력 및 신재생 에너지와 같은 비탄소화에너지의 생산 ② 천연가스 및 바이오연료와 같은 저탄소화 에너지의 생산, 그리고 ③ 탄소격리기술로 구분될 수 있으며, 이러한 기술을 활용하여 전력 및 수송과 같은 비탄소 에너지 및 CO₂의 배출을 동반하지 않는 산업재를 소비진영에 공급하는 전략이 구사될 수 있다.

한편 소비측면에서는 에너지절약, 소비감축을 위한 에너지 이용 시스템을 개선함과 동시에 사용되는 에너지에서 탄소가 배출되는 것을 방지하도록 전력 및 수송과 같은 비탄소화 에너지를 사

용할 수 있는 체계가 구축되어야 한다. 특히 가정 및 상업부문과 같은 소규모 고정배출원에서는 전력을 중심으로 하는 에너지공급시스템이 구축되어야 하며, 수송과 같은 소규모 이동배출원에서 수소에너지와 같은 비탄소화 화학에너지가 이용될 수 있는 기술 및 시스템이 조속히 개발되어야 한다. 이와 같이 에너지의 공급 및 소비진영에서 상호 보완할 수 있는 완벽한 새로운 동력의 생산 및 공급체계가 구축되어야 기후변화에 대응할 수 있는 기반이 확보될 수 있다.

기후변화에 대응할 수 있는 에너지시스템의 구축을 위해서 신재생에너지를 비롯한 여러 가지 대체에너지가 개발되고 있지만, 산업사회가 요구하고 있는 높은 에너지밀도 및 필요에 따라서 유연하게 전환될 수 있는 안정성이 확보되지 않은 한 기존의 화석연료에 대한 부분적 대체기술 이상의 역할을 수행하기 힘든 것이 현실이다. 또한 현재의 기술 수준에서 핵융합에너지와 같은 대규모 에너지 공급이 가능한 새로운 청정에너지원이 향후 50년 이내에 확보될 가능성이 매우 낮으므로, 비교적 짧은 시기에 이산화탄소의 배출저감을 실현하기 위해서는 탄소격리기술과 같은 대용량 CO₂ 배출저감기술이 개발되어 활용될 필요성이 본격적으로 대두되고 있다.



CO₂ 회수저장기술의 개념도(From IPCC 특별보고서 'Carbon Dioxide Capture and Storage')

탄소격리기술이란 무엇인가?

탄소격리기술은 언어적 의미대로 온실가스 가운데에서 가장 큰 비율을 차지하고 있는 이산화탄소를 배출원에서 회수하여 반영구적으로 저장시켜서 대기로부터 격리시키는 기술로서 보다 정확한 표현으로는 CO₂ 회수저장기술(Carbon Dioxide Capture and Storage Technology)이라 불리며, 통상적으로 간단하게 줄여서 CCS기술로 불리기도 한다. 그러나 CCS 기술은 이산화탄소의 회수 및 저장을 구현할 수 있는 방대한 하부구조가 구축되어야 하므로 경제적으로 현실성이 있기 위해서는 CO₂의 대규모 고정 배출원에 대해서 회수기술을 적용하여 반영구적으로 안전하게 저장할 수 있는 방법으로

처리하는 것이 타당할 것이다. 따라서 CO₂의 회수가 적용될 수 있는 가장 유력한 대규모의 고정 배출원으로 ① 화력발전소 ② 제철공장 ③ 시멘트공장 및 ④ 석유화학공장(이 경우에는 화석연료 기반 수소생산도 포함될 수 있음) 등을 들 수 있으며, 많은 산업화된 국가에서는 이러한 시설에서 배출되는 CO₂의 양이 국가 CO₂ 배출량의 약 50% 이상을 차지하고 있다. 따라서 소수의 대규모 배출원에 대한 CO₂ 배출저감을 구현하여 비교적 짧은 기간에 대기 중 CO₂ 농도의 안정화를 위한 기반을 구축하는 것이 탄소격리기술의 궁극적인 목표이다.

탄소격리기술이 기후변화에 대한 핵심적 대응기술로 고려되기 시작한 것은 1970년대로 거슬러 올라가지만, 대규모 실증기술개발을 포함한 본격적인 기술개발은

1990년 중반부터 시작된 Norway의 Statoil에 의한 천연가스의 채굴과정에서 회수된 CO₂의 염대수층저장사업에서 시작되었다고 보는 것이 타당할 것이다. 또한 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)는 'Carbon Dioxide Capture and Storage' 라는 특별보고서를 2005년 작성한 바 있으며, 이 보고서는 인터넷에서 무료로 다운로드 받을 수 있다.

그림 5는 IPCC의 CCS 특별보고서에 실린 CCS기술의 개념도로서, 화석연료의 채굴과정에서부터 화석연료를 이용한 동력 및 산업재의 생산과정에서 CO₂의 회수, 그리고 회수된 CO₂가 수송되어 저장되는 일련의 화석연료 이용 전 과정에 대한 CCS기술이 적용되는 방법을 보여주고 있다. 위의 그림에서 보여준 바와 같이 탄소격리기술은 ① 이산화탄소가 배출되는 공정의 배가스에서 이산화탄소를 분리하는 기술, ② 분리된 이산화탄소를 저장에 적합한 형태로 정제하고 압축하는 기술, ③ 정제, 압축된 이산화탄소를 저장소로 수송하는 기술 및 ④ 수송된 이산화탄소를 반영구적으로 안전하게 저장하는 기술로 구분될 수 있다. 여기에서 이산화탄소의 분리, 정제 및 압축이 배출원에서 이루어지고, 수송 및 저장이 자원개발과 관련된 회사에 의해서 이루어지기 때문에 분리, 정제 및 압축과정을 통칭하여

이산화탄소회수기술(CO₂ Capture Technology)로, 수송 및 저장기술을 통칭하여 이산화탄소 저장기술(CO₂ Storage Technology)로 구분하기도 한다.

다양한 이산화탄소의 회수 및 저장기술이 존재하고 있지만, 기술이 적용될 수 있는 CO₂ 배출량 및 경제성을 고려하여 세 가지의 회수기술과 지중저장기술이 대용량 배출저감의 구현에 적합한 기술로 거론되고 있다. 특히 회수기술은 화석연료의 연소에 의해서 이산화탄소가 생성되는 과정을 전후로 ① 연소 후 포집(Post-Combustion Capture), ② 연소 전 탈탄소화(Pre-Combustion De-Carbonization) 및 ③ 연소과정에서 이산화탄소를 농축하는 순산소연소(Oxy-Fuel Combustion)로 구분되고 있다. 한편 CO₂의 저장기술은 저장소의 종류에 따라서 ① 고갈된 유전 및 가스전을 이용하는 방법, ② 격리 가능한 석탄층을 이용하는 방법 및 ③ 심층 염대수층을 이용하는 방법이 있다. 특히, 유가스전에 CO₂를 저장할 경우 잔류 석유 및 가스를 증산하는 EOR(Enhanced Oil Recovery)와 EGR(Enhanced Gas Recovery) 및 석탄층 저장 시 석탄층에 포함되어 있던 메탄을 추출하는 ECBM(Enhanced Coal Bed Methane) 등의 부가 가치를 향상할 수 있는 저장 방법은 우수한 경제성 때문

에 자원이 풍부한 국가에서 우선적 저장사업으로 개발되고 있는 실정이다. 그럼에도 불구하고 가장 광범위한 저장자원이 심층 염대수층에 존재하고 있으며, 자원 빈국에서도 개발될 수 있으므로 저장자원 개발의 핵심은 심층 염대수층을 CO₂의 저장소로 개발하여 활용하는 것이다.

이 글에서는 이산화탄소의 배출원 중에 최대규모의 배출원인 석탄화력발전분야에 대한 회수 및 저장기술을 중심으로 알아보고자 한다. 국내의 석탄화력발전분야는 연간 약 6억 톤 규모의 온실가스배출량 가운데 40기의 석탄화력발전소가 전제의 19% 이상을 차지하는 1억 1,500만 톤을 배출하는 최대의 배출원으로서 이산화탄소 배출감축을 위한 최우선 CCS기술 적용 대상 분야이다. 따라서 우리나라를 포함한 대부분의 국가에서 석탄화력발전을 CCS기술의 중점적용분야로 선정하여 다양한 회수 및 저장기술이 개발되고 있다. 구체적인 회수 및 저장의 기술적 방법론 및 추진체계에 대한 설명은 다음의 원고에서 CO₂ 회수분야와 저장분야를 나눠서 별도로 소개한다.

대규모 동력 및 산업설비인 발전소, 제철소 및 석유화학공장의 수명은 대체로 30~50년 정도인 것을 고려할 때, 2050년 온실가스 농도의 안정화에 결정적으로 기여하기 위해서는 늦어도 2020년에 상용화 단계의 기술이 보급

될 준비가 되어야 하며, 따라서 향후 10년 정도가 탄소격리기술이 대규모로 구현될 수 있음을 실증할 수 있는 중요한 시기일 것이다. 그럼에도 불구하고 온실가스 배출감축의 가장 핵심적인 기술인 탄소격리기술이 근본적으로 핵융합기술의 도래시기까지 산업사회를 지탱해줄 한시적 기술이라는 점에 유념할 필요가 있다.

탄소격리기술을 상용화 수준에서 보급하는 데 가장 큰 걸림돌은 기술적 문제점의 해결보다는 탄소격리기술을 적용함으로써 발생하는 에너지비용의 증가를 누가 어떻게 감당하느냐는 문제이다. 이러한 문제점을 알아보기 위해서 탄소격리기술을 적용하는데 필요한 비용 및 격리된 탄소에 대한 보상체계를 간단히 알아보고자 하겠다.

탄소격리기술의 비용 및 탄소 보상체계

석탄화력발전의 경우, 탄소격리기술을 적용함에 따른 발전효율의 감소폭은 약 8~12%로 알려져 있다. 전 세계적인 석탄화력발전설비의 평균 발전효율을 40%로 가정하고 평균적인 탄소격리를 위한 에너지소비가 10%의 발전효율 손실을 초래한다면, 탄소격리를 위해서 생산되는 전력의 약 1/4이 이미 손실될 것이다. 결론적으로 줄어든 발전량을 보상하기 위해서 약 1/3의 발전설비

가 확충되고 1/3의 연료가 추가적으로 사용되어야 한다. 따라서 탄소격리를 위해서는 기본적으로 전력생산단가가 약 1/3 인상될 것이고, 거기에서 탄소격리를 위한 추가 설비투자에 대한 기회비용을 추가할 경우 전력생산단가가 약 50% 정도 인상될 것으로 예상되고 있다. 이러한 추정치는 현재 대부분의 화력발전방식에 대해서 약 50원/kWh 정도의 도매가를 보이는 전력단가를 약 70~80원/kWh로 인상시킬 것이다.

CCS과정에서 발생하는 에너지 생산비용의 증가를 보상하기 위해서 격리된 탄소에 대한 다양한 보상체계가 제안되고 있으며, 그러한 제도의 가장 대표적인 예가 탄소세와 배출권 거래제도이다. 탄소세는 배출되는 탄소에 대한 가격을 설정하여 부과하는 제도로서, 탄소가격의 투명성이 제고될 수 있으며 또한 저감을 원하는 화석연료사용자가 투자비용을 예측하기 쉽다. 그러나 이를 통해서 화석연료의 사용비용이 바로 생산자에서 소비자로 전가되며 또한 저감목표 달성의 가능성이 확실하지 않다는 단점이 있다. 한편 탄소배출권거래제는 일정한 배출허용치를 부여한 이후, 허용치에 대한 배출량에 따라서 배출권을 거래할 수 있는 제도이다. 배출권 거래제는 배출허용치의 설정을 통해서 목표달성이 쉬운 측면이 있지만, 배출량 오류에 의

한 시장구조의 왜곡을 가져올 수도 있다.

그러나 탄소보상체계의 보다 근본적인 문제는 각 국가별로 다른 산업화 및 배출량을 보이는데 따른 문제점을 해결할 수 있는 마땅한 방법론이 없다는 사실이다. 일례로서 2006년 중국은 모든 사람의 예상보다 훨씬 빨리 미국을 제치고 세계 1위의 이산화탄소 배출국이 되었다. 그럼에도 불구하고, 많은 사람은 중국의 급속한 이산화탄소 배출량 증가가 중국이 미국 등 선진국의 생산기지로 활용되었기 때문에 실질적인 이산화탄소 배출의 근본적 원인이 다른 나라에 있음을 지적하였다. 따라서 탄소세 또는 탄소배출권에 대한 부과가 국제적인 수준에서 공평한 방안으로 자리매김하기 전에는(물론 공평하다는 것이 모든 국가에 대해서 동일한 탄소세 및 배출권 거래제도를 의미하지는 않는다) 많은 기업이 생산기지 이전을 통해서 탄소세의 회피를 시도할 가능성이 매우 크다. 이러한 행위가 세계 경제의 확산작용에는 도움이 될지는 모르지만 시급히 해결해야 될 기후변화의 문제 해결을 더욱 지연시킬 것은 명백하다. 따라서 단지 온실가스저감이 화석연료의 사용에 의한 이산화탄소를 배출하는 생산자에게만 탄소배출비용이 부과되어서는 문제가 해결될 수 없으며, 화석연료의 공급자 및 궁극적으로 이산화탄소를 배출하

면서 생산된 재화를 소비하는 소비자들도 비용분담에 적극적으로 참여할 수 있는 제도가 마련되어야 될 것이다.

탄소격리기술의 실증사업

탄소격리기술의 실증에 가장 앞서가는 나라들은 독일, 스웨덴, 노르웨이 등 북유럽 국가를 중심으로 하는 EU 국가들이다. 이들 국가에서 진행되고 있는 실증사업들은 탄소격리기술의 각 요소 기술에서 이미 다루어지기 때문에 여기에서는 미국과 호주의 매우 특이한 사항을 중심으로 기술하고자 한다.

미국은 특히 George Bush 행정부는 미국 에너지산업의 이익을 대변하여, 아직 교토의정서를 비준하지 않고 있으며 또한 탄소격리기술의 개발에 비교적 소극적이기도 하다. 그럼에도 불구하고 Bush 행정부에서 수행한 중요한 CCS 및 청정대체에너지 개발사업이 바로 FutureGen사업이다. FutureGen은 석탄을 가스화시켜서 생산된 합성가스를 개질하여 수소에너지를 수송용 또는 발전용으로 공급하는 것으로 목표로 한다. 또한 수소생산과정에서 이산화탄소는 분리되어 지중에 격리될 수 있다. 따라서 FutureGen은 비교적 풍부한 석탄자원을 이용하여 이산화탄소를 배출하지 않고 탈탄소화에너지를 공급한다는 면에서 매우 혁신적

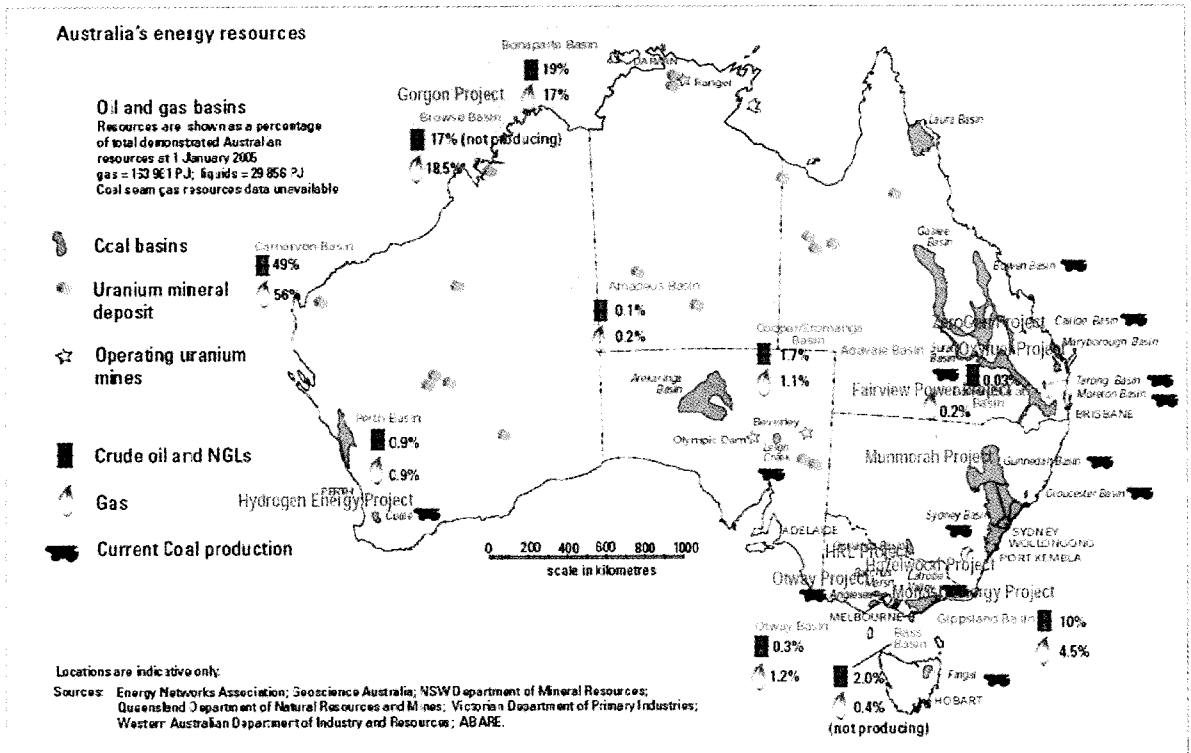


그림 7 COAL21 프로그램의 실증사업 사이트

인 제안이었지만 기술적으로 높은 위험성을 동반한 대규모 에너지기술개발사업이라고 할 수 있다.

FutureGen 사업의 수행을 위해서 미국의 에너지부(DOE)는 약 6억 2,000만 달러를 투자하고, 참여기업과 CSLF(Carbon Sequestration Leader's Forum) 회원국을 통해서 약 3억 3,000만 달러를 조달하여, 총 9억 8,000만 달러로 2015년까지 275MWe급 FutureGen 발전소 및 수소생산설비를 건설하는 것으로 목표로 하고 있다. 또한 우리나라도 2006년부터 국제 컨소시엄에 참가하여 참가비 1,000

만 달러의 2차분까지 지불한 바 있다. 공개경쟁에 의해서 선정되게 되어있는 FutureGen 발전소의 건설사업은 미국 전역에서 12개의 제안서를 제출받았으며, 2007년 12월 Illinois 주의 Mattoon에서 제출한 제안서가 다른 일리노이주의 제안서 및 텍사스주의 다른 두 제안서를 물리치고 최종적으로 선정되기에 이르렀다. 그러나 미국 DOE는 2008년 1월 전격적으로 FutureGen 사업에 대한 정부의 지원을 취소하기에 이르렀다. DOE의 전격적인 지원 취소는 크게 두 가지의 원인으로 추측되고 있다. 아직 수소경제의 구체적 실현

성이 가시화되지 않은 상태에서 수소생산을 목표로 하는 FutureGen 사업 추진의 타당성에 대한 기술적 문제점이 그 하나이고, 다른 하나는 텍사스 출신 Bush 대통령 행정부의 부적절한 정책 수행에 대한 의구심도 배제할 수 없다는 문제점이다. 이와 같은 FutureGen 사태를 통해서 현재 미국을 중심으로 이루어지고 있는 수소경제의 적절성에 대한 의문이 증폭되었으며, 특히 미국 행정부 및 에너지정책의 신뢰성이 상당한 타격을 입었다.

미국과 같이 교토의정서를 비준하지 않았던 호주는 미국과 매우 다른 방향으로 기후변화에 대

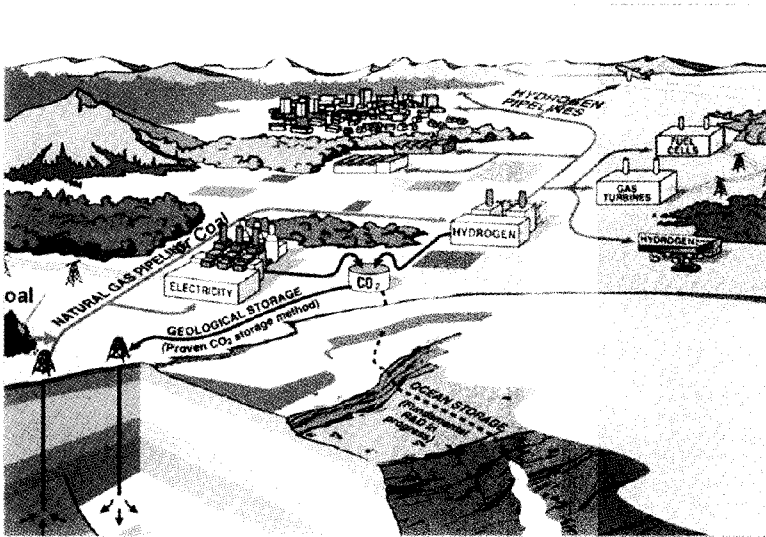


그림 8 탈탄소화 에너지 사회의 개념도(From Statoil의 Karstad)

응하는 실증사업을 운영하고 있다는 점을 주목할 필요가 있다. 호주는 호주 경제의 중요한 부분을 차지하는 석탄산업이 기후변화에 대응할 수 있는 역할을 확보하기 위해서 COAL21이라는 대규모 탄소격리실증사업을 기획하여 운영하고 있다. 1999년부터 2005년까지 호주의 Chief Scientist였던 Robin Batterham은 호주석탄산업의 지속가능성을 위해서 일정규모 이상의 대규모 이산화탄소 감축이 가능한 기술의 실증을 지원할 수 있는 COAL21 프로그램의 설립을 추진하였으며, 현재 호주연방정부, 주정부 및 호주석탄협회가 공동으로 약 2조 원의 기금을 마련하여 그림 7에 표시된 핵심 탄소격리기술에 대한 실증사업을 지원하고 있다.

특히 호주는 COAL21과 같은

적극적인 이산화탄소감축기술개발사업을 등에 업고 2007년 교토의정서를 비준하여 발리에서 개최된 제13차 기후변화당사국회의에서 많은 국가들의 지지를 이끌어 낸 바 있다.

우리나라에서의 탄소격리기술의 발전 방향

COAL21과 같은 정부와 민간에 의해서 조성된 대규모 실증사업지원기금을 통한 기술 실증의 가속방안은 우리도 조속히 본받아 실행되어야 될 사업이다. 특히 미국의 FutureGen 사업의 실패의 원인인 기술적 방향성의 상실 및 부적절한 정책수행에 의한 국제적 신뢰성의 상실을 타산지석으로 삼고, 호주의 준비된 행동을 따를 경우 우리도 경쟁력이 있는 탄소격리기술을 확보할 수 있는

기회는 충분히 있다고 사료된다.

우리 나라가 탄소격리기술에서 국제적 경쟁력을 확보할 가능성은 매우 높은 실정이다. 중공업분야의 높은 기술력을 바탕으로 다양한 회수기술과 접목된 발전설비 및 제철설비기술을 개발할 경우, 에너지공급 및 기후변화의 위기에서 국가경제를 지탱할 수 있는 차세대 성장동력기술로 개발될 수 있을 것이다. 그럼에도 불구하고 우리가 직면한 약점도 직시할 필요가 있다. 아직 확인되지 않은 CO₂ 저장자원의 확보는 매우 시급한 문제이다. 많은 기업들이 저장가능성이 확인되지 않은 상태에서 회수기술의 개발 및 적용에 소극적인 것이 당연하지만 이러한 이유 때문에 기술개발을 지연하는 것은 보다 심각한 부정적 결과를 초래할 수 있다는 점에 유념할 필요가 있다.

마지막으로 탄소격리기술의 궁극적인 목표는 핵융합에너지 도래시기까지 탈탄소화에너지사회를 구축하는 핵심기술로서 기여하는 데 있다. 탈탄소화에너지사회를 형상화한 개념도가 그림 8에 나타나 있으며, 거기에는 CO₂ 저장기술, CO₂ 회수기술, 수소생산기술 및 연료전지를 포함한 수소이용기술이 포함되어 있음을 알 수 있다. 선진국에서는 탈탄소화사회를 구축하기 위해서, CO₂ 저장기술, CO₂ 회수기술, 수소생산기술 및 수소이용기술의 순서로 기술개발이 수행되어 왔지만,

우리나라의 경우에는 이와 정반대로 기술개발이 수행되고 있어서 최악의 경우에는 도로에 수소연료 자동차가 질주하더라도 온실가스 배출감축에는 전혀 기여를 할 수 없는 상황이 발생할 수 있다.

저탄소 녹색성장의 미래 및 기계공학의 역할

온실가스 감축과 관련하여 우리나라는 국제적으로 매우 특별한 입장에 처해있다. 먼저 기후변화협약 도출의 중심에 서있는 UN의 사무총장을 배출한 국가이며 또한 3명의 UN 기후변화특사 중 한 명이 한승수 국무총리이다. 한편 우리나라는 세계 10위의 온실가스 배출국이지만 아직 의무감축대상에 포함되지 않았으며, 또한 OECD 국가라는 점에서 전 세계적으로 온실가스 감축에 실질적인 기여를 하라는 국제적 압력이 가중되고 있는 실정이다.

기후변화의 시급성에 대처하기 위해서 발표된 '저탄소 녹색성장' 정책을 구체화시킨 후속 방안으로 정부는 9대 그린에너지 사업분야를 선정하여 추진하겠다고 발표하였다. 그럼에도 불구하고 9대 그린에너지 사업이 각 사업분야에 대한 구체적 추진전략이 수립되지 않고 단지 이전 정부부터 산발적으로 추진되어왔던 기술개발 프로그램의 재포장이라

는 비판도 엄연히 존재하고 있다. 또한 '저탄소 녹색성장' 정책과 9대 그린에너지 사업이 발표된 지 한 달 정도 만에 전국 500만 호 주택건설 및 대규모 그린벨트와 군사보호지역 해제와 같은 건설경기 부양을 통한 중단기적 경제운영 정책도 발표되고 있다. 즉 국제적 상황이 결코 우호적이지 않은 조건에서 정부의 단기적 경제운영 정책이 건설경기부양을 통한 '회색성장'을 추구하는 반면 장기적으로는 전략적 구체성이 결여된 '저탄소 녹색성장'을 추구한다는 점에서 기후변화 대응을 위한 정부 정책의 진정성이 국내외적으로 의심받고 있다는 점은 우려할 사항이다.

따라서 이러한 의구심을 떨쳐 버리기 위해서는 산업사회의 지속가능성, 국가적 자원 및 산업구조, 온실가스 배출량 등이 종합적으로 고려된 포괄적 온실가스 감축전략의 수립이 선행되어야 하는 한편, 온실가스 감축에 기여할 수 있는 모든 기술의 마구잡이식 병렬적 개발을 지양하는 대신 정교한 전략에 기초한 단기적, 중기적 그리고 장기적 기술개발의 조화를 통한 경제적 기회와 리스크를 효과적으로 관리할 수 있는 정책이 수립될 필요성이 크다.

그러면 기후변화 대응기술의 개발과정에서 기계공학과의 입지는 어떠한가? 앞에서 설명되었다

시피, 우리나라의 탈탄소화사회 개발 방향이 역전된 것과 마찬가지로, 기계공학과와 기술개발 노력도 에너지 이용기술의 개발에 치중되어 있지, 에너지기술의 방향을 설정하는 1차 에너지원과 관련된 연구에서 전략적 결정에 참여할 수 있는 통로가 확보되지 못한 상태이다. 기계공학은 화석연료에서 동력을 생산할 수 있는 열기관을 개발하여 산업사회의 문명을 연 학문이다. 그럼에도 불구하고 화석연료의 사용에 기인하여 발생한 기후변화가 산업사회의 존재자체를 위협하는 사안에 대해서 기술적 전략을 마련하지 못하고 있다는 것은 기계공학계에 오랫동안 내재되었던 철학의 빈곤에 원인이 있을 것이다. 특히 단기적 성과를 중시하는 연구개발 풍토에 수동적으로 대응하는 과정에서 굳어진 생산기술적 연구에 대한 무절제한 추종은 앞으로 추진될 에너지시스템의 재구성과정에서 적절한 역할을 할 수 있는 전문 지식 및 인력의 수요에 대응할 수 없을 가능성을 높이고 있다. 기후변화에 대한 대응 기술은 기계공학의 중흥을 이끌 수 있는 드문 기회라는 점을 인식하고 기계공학자들의 철학적 깊이를 느낄 수 있는 역할을 기대해보기로 하면서 이 글을 마치고자 한다.