

# 순산소 연소 현황 및 전망

## 대규모 CO<sub>2</sub> 배출원에 대한 CCS기술 적용 시급한 과제

### 1. 서론

지구온난화의 피해를 방지하기 위한 국제적인 논의는 1972년 유엔 환경회의에서 처음으로 논의되었고, 1988년 유엔총회 결의로 “기후변화에 관한 정

부간 위원회”(IPCC)가 설치되었으며 1992년 6월 브라질 리우데자네이루의 “유엔 기후변화협약 (UNFCCC)”이 체결된 후 1997년 12월 일본교토에서 열렸던 제3차 유엔기후변화협약 당사국 총회 때 “교토의정서”가 채택되었다. 2005년 2월 16일부터 발효된 교토의정서는 산업화를 주도한 선진국(37개

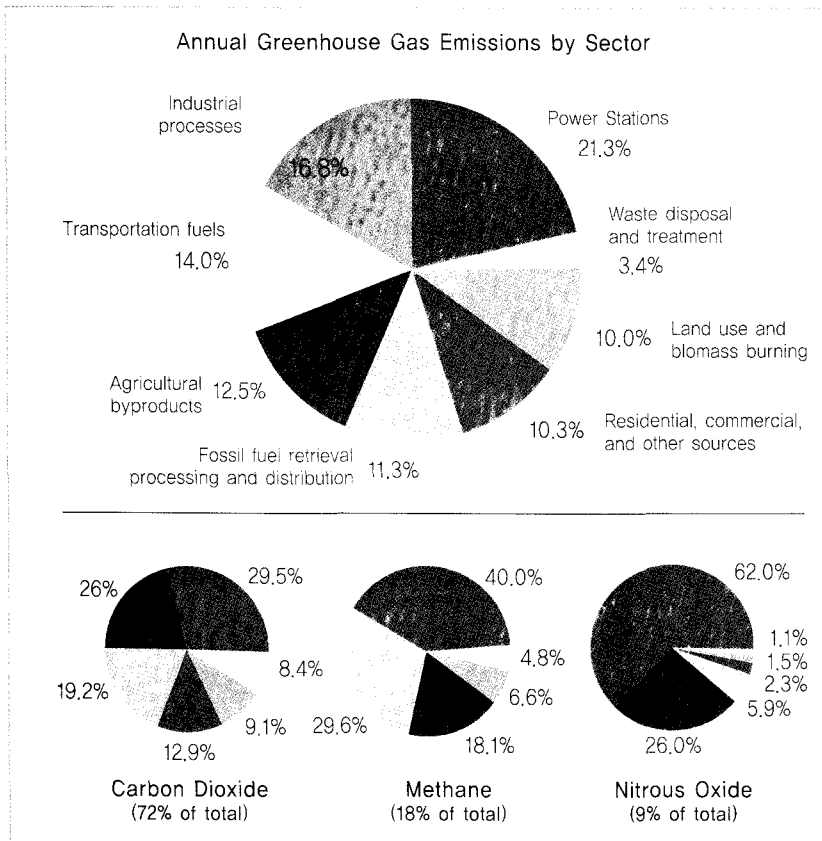


김성철  
한전 전력연구원 책임연구원

국+ EU)에 기후변화 책임을 지우는 국제협약으로서 2008년부터 2012년까지 온실가스 배출량을 1990년 대비 평균 5.2%를 감축한다는 내용이다.

우리나라는 교토의정서 체결 당시에는 아시아 금융위기로 감축의무국에서 제외되었으나, 정부는 2020년 온실가스 감축목표치를 금년 8월에 3가지 감축목표 시나리오를 발표한바 있고, 지난 11월 17일 BAU(별도의 감축노력 없을 경우의 온실가스 배출량) 대비 30% 감축한다는 안을 확정하였으며 이것은 2005년과 대비하여 4%의 온실가스를 감축하는 수준이다. 이와 같은 목표달성을 위한 감축수단으로 정부는 전기차, 연료전지차 등 그린카 보급과 최첨단 고효율제품 확대보급 및 CCS(Carbon Capture & Storage)기술 도입을 강화하는 감축수단을 제시한 바 있다.

온실가스 중에서 화석연료의 사용에 기인하는 CO<sub>2</sub>는 배출원에서 적용하기 유리한 CO<sub>2</sub>의 회수, 저장(CO<sub>2</sub> Capture and Storage, CCS)기술은 CCS 비용에 대한 부담이 걸림돌로 작용함에도 불구하고 비교적 짧은 기간에 대량의 CO<sub>2</sub> 배출을 저감하기 위해서는 대규모 CO<sub>2</sub> 배출원에 대한 CCS 기술의 적용은 시급한 과제로 인식되고 있다. 구체적이고, 효과적인 온실가스 배출을 저감하기 위해서는 온실가스의 배출량을 검토해 볼 필요가 있는데, 그림 1은 전세계의 온실가스 배출량의 구성을 보여주고 있으며, 온실가스별로는 CO<sub>2</sub>(72%), CH<sub>4</sub>(18%) 및 N<sub>2</sub>O(9%)의 구성 <모두 CO<sub>2</sub> 상당량으로 전환> 및 각 온실가스의 산업별 배출량 구성을 보여주고 있다. 현재 전 세계적으로는 약 260억톤의 온실가스가 배출되고 있다. 이 가운데 약 110억톤 정도만이 자연적으로 재순환되고 있고, 배출되는 온실가스의 50% 이상이 대기에 축적되고 있어 지구온난화를 가중시키고 있다.



[그림 1] 온실가스의 범지구적 배출량 구성

## 2. 전력분야의 CO<sub>2</sub> 배출 현황 및 CO<sub>2</sub> 포집 기술

전력부문은 온실가스인 CO<sub>2</sub>의 최대 배출원이며, 우리나라에서는 2004년 기준으로 연간 5.9억톤에 상당하는 온실가스를 배출하였으며, 이 가운데 5.1억톤 가량이 CO<sub>2</sub>로 배출되었다. 전력분야에서 배출되는 CO<sub>2</sub>는 연간 1.5억톤 수준으로 석탄, 경유 (또는 BC유) 및 천연가스를 연료로 사용하는 화력발전소에

서 배출되고 있으며, 이는 전체 온실가스 배출량의 약 25%를 점하는 양으로서, 5개 발전회사 CO<sub>2</sub> 배출량의 약 77%를 차지하는 약 1.15억톤이 약 50여기의 석탄화력 발전소에서 배출되고 있는 실정이다.

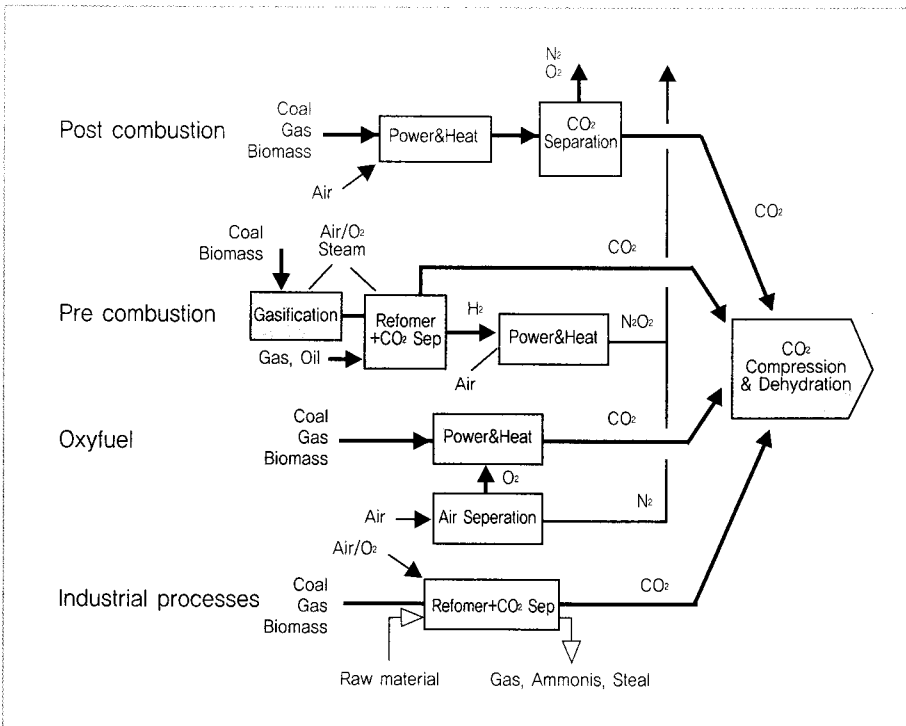
전력분야의 CO<sub>2</sub> 회수기술은 [그림 2]와 같이 습식 흡수제나 흡착에 의한 연소 후 포집(Post-Combustion Capture), 연소 중 포집 기술인 순산소연소(Oxy-Fuel Combustion) 및 연소 전 포집 기술(Pre-Combustion)로 구분할 수 있으며, 순산소 연소기술은 대부분의 화력발전에서 적용 가능한 기술이며 2020년 상용화 가능성이 높은 순산소 연소기술에 관한 기술특성과 기술 개발현황 및 향후 지속적으로 기술개발이 요구되는 신개념의 순산소 CO<sub>2</sub> 포집기술을 간략히 소개한다.

### 3. 순산소 연소기술 원리

공기 중에 함유되어 있는 질소 및 다른 성분을 제

거하지 않고 연소실에 주입하는 기존의 공기연소 방식과는 달리, 공기 중에 약 79%를 점하는 질소분을 제거한 순산소를 기존의 연소용 공기 대신에 주입하여 연소시킨 후 CO<sub>2</sub>의 포집을 쉽게 하는 기술이 순산소 연소기술이다. 순산소 연소기술이 석탄화력 발전에 적용되는 개념은 [그림 3]에 제시되어 있다.

[그림 3]에서와 같이 순산소 연소기술에서는 석탄화력 발전설비에서 산화제를 공기 대신에 순도 95% 이상의 고농도 산소를 이용하여 미분탄을 연소시켜 열을 발생시킨다. 순산소 연소에 의해 발생하는 배가스의 대부분은 CO<sub>2</sub>와 수증기로 구성되며 발생된 배가스의 약 70~80%를 다시 보일러로 재순환시켜 기존의 공기 연소시의 보일러와 유사한 열적 특성과 온도분포가 되도록 함과 동시에 배출되는 배가스의 주성분인 수증기를 응축시키면 배가스의 CO<sub>2</sub> 농도를 90% 이상으로 농축시킬 수 있으므로, 거의 전량의 CO<sub>2</sub> 회수가 가능하게 되며 회수된 CO<sub>2</sub>는 저장시켜서 CO<sub>2</sub>를 포집하는 기술이다.



[그림 2] 발전 및 산업분야에서의 CO<sub>2</sub> 회수기술 개념

### 4. 순산소 연소 기술 개발 동향

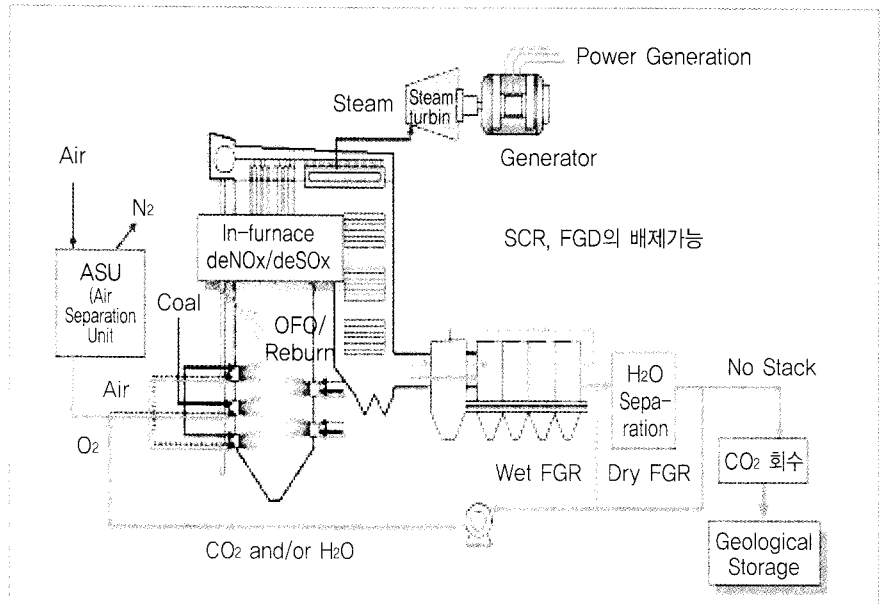
#### 가. 국외 기술개발 동향

석탄 화력발전에서 순산소 연소기술 개발은 미국, 유럽 및 일본을 중심으로 이루어지고 있으며, 이들 나라를 중심으로 현재까지 알려진 순산소 연소 석탄화력 발전기술과 관련된 연구개발 및 실증 동향은 연도 및 용량별로 그림 4에 요약하였다. 순산소 연소기술의 연구는 1980년대 말 미국의

Argonne National Laboratories에서 최초로 이루어졌으며, 1990년대에 들어서 네덜란드의 IFRF(International Flame Research Foundation) 와 MBEL이 주축이 된 EU 컨소시엄, 캐나다의 CANMET 및 NEDO의 지원을 받은 일본의 J-Power, IHI 컨소시엄이 연구개발을 수행한 바가 있다. 주로 0.3MW에서 3MW 규모의 석탄보일러에서 순산소 연소에 의한 화염 및 보일러의 열적, 환경적 특성 등에 대한 연구가 수행되었다.

2000년대 들어서면서 순산소 연소 석탄화력 발전 기술은 연구개발의 수준을 넘어서 30MW급 파일럿 규모의 실증사업이 착수되기 시작하였고, 가장 대표적인 파일럿 규모 순산소 연소 실증사업은 독일 Vattenfall사가 기존 발전소의 개조(Retrofit)가 상대적으로 효율이 낮을 뿐 만 아니라 설비개조에 소요되는 비용이 비싸므로 신규 발전설비를 대상으로 순산소 연소기술을 도입하는 접근방법을 시도하고 있다. 독일의 Vattenfall사는 2020년 상용화를 목표로 순산소 연소 석탄화력 발전 기술을 실증할 목표를 세우고, 관련된 연구가 2011년에 종료되면 2015년까지 300~600MWth급의 실증 플랜트를 건설할 예정이다. 이와 같은 2단계의 실증사업을 통해서 2020년까지는 1000MWth급의 순산소연소 석탄화력발전소를 건설하여 CCS기술의 상용화에 진입하는 것을 목표로 하고 있다.

일본은 J-Power, IHI와 호주의 CS-Energy로 구성된 일본-호주 컨소시엄은 호주 Queensland에 위치한 CS-Energy사의 Callide A, 4호기

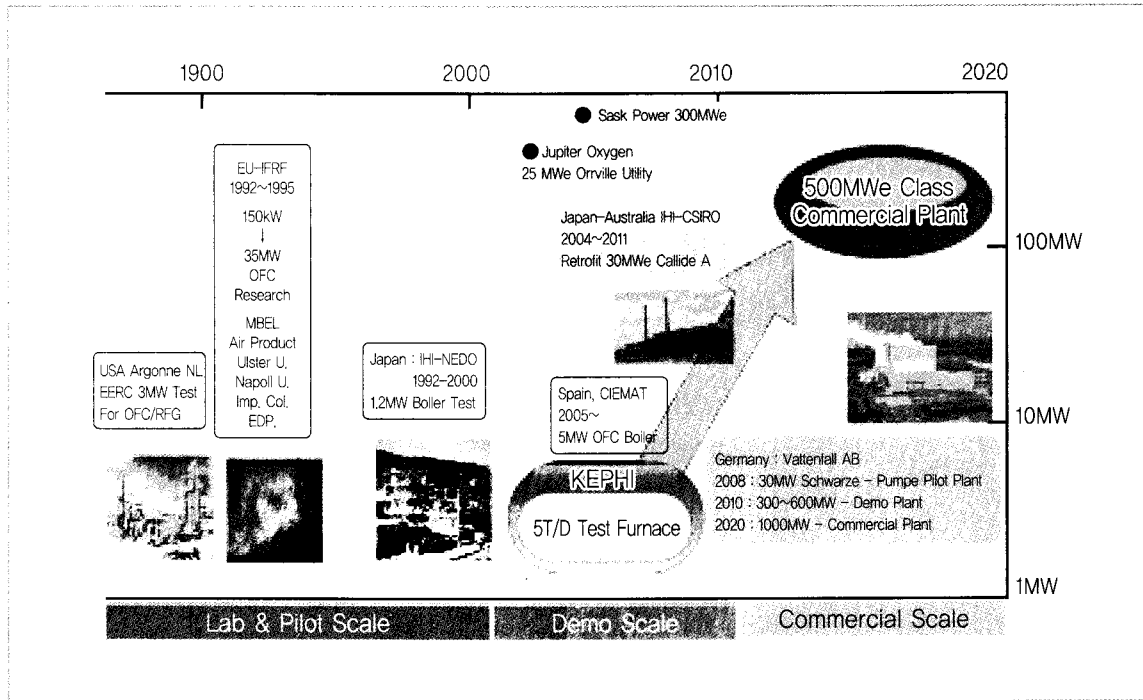


[그림 3] 순산소 연소기술에 의한 CO<sub>2</sub> 포집기술 개편

(30MWe)를 순산소 연소보일러로 개조(Retrofit)하고 있으며 2011년부터 시운전을 계획하고 있다.

#### 나. 국내 기술개발 현황

순산소 연소기술은 가열로 등 산업용 연소로 분야에 적용될 수 있는 고전적인 고온 순산소 연소기술과 이산화탄소 회수를 목적으로 하는 석탄화력 발전에 적용될 수 있는 배가스 재순환 순산소 연소기술로 구분할 수 있으며, 가열로를 포함한 산업용 연소로에 적용하여 에너지 이용효율과 생산성을 높이기 위해서 수행되는 고온 순산소 연소 기술의 연구개발은 크게 두개의 연구체계를 중심으로 연구개발이 진행되고 있다. 먼저 한국과학재단의 ERC 프로그램에 의해서 지원되고 있는 CERC(연소공학연구센터)에서 산소 부화연소기술에 대한 연구를 2001년부터 수행해오고 있으나, 기초연구에 국한된 연구를 수행하는 특성상 순산소연소와 관련된 화염의 기본적인 연소특성과 복사특성 같은 기초연구에 국한되고 있어 아직 실용적인 분야에 적용되기에는 상당한 규모의 차이가 있다.



[그림 4] 순산소 연소기술의 기술개발 동향

고온 순산소 연소기술과 관련된 중요한 연구개발 동향은 과학기술부에서 지원하는 21세기 Frontier 연구개발사업단인 “이산화탄소 저감 및 처리기술 개발사업단” (Carbon Dioxide Reduction and Sequestration R&D Center, CDRS)에서 고온 순산소 가열로 기술과제가 진행 중이며, 철강업계 등에 적용하기 위한 목적으로 100톤/일 연속식 가열로를 개발하기 위한 연구개발사업이 수행되었으며, 이를 위해서 저 NOx 순산소 연소기술, PSA(Pressure Swing Adsorption)기술기반 소규모 산소 생산기술 및 순산소 연소 철강 가열로 개발에 대한 R&D연구가 2002년부터 수행된 바 있다.

한편 발전소 적용을 위한 대규모의 실증연구는 한국전력공사 전력연구원에서 순산소 연소 석탄화력 발전소의 개념 설계 및 시스템 최적화를 위해 2007년 10월부터 지식경제부의 에너지·자원 기술개발 사업으로 ‘청정화력 발전기술과 연계한 온실가스

처리시스템 구축’ 연구개발 프로젝트를 수행 중에 있다. 다음 [표 1]과 같이 총 8년간 3단계에 걸쳐 수행될 프로젝트에서는 순산소 발전플랜트의 설계 평가 및 최적 운용기술을 개발하여 국내 최초로 대용량 순산소 연소 발전시스템을 실증화 할 계획이다.

### 5. 결론

현재 순산소 연소 기술로 석탄화력 발전에 CO<sub>2</sub> 포집기술을 적용할 경우 다른 CCS 기술과 유사하게 전력생산의 약 1/4~1/5 정도의 손실이 발생할 것으로 예측되고 있다. 따라서 CO<sub>2</sub> 회수비용 및 전력 소비를 최소화하기 위한 신기술의 순산소 CO<sub>2</sub> 포집기술이 요구되고 있다. 즉 현재의 CO<sub>2</sub> 포집기술이 약 10% 이상의 발전효율 감소를 유발하는 기술수준인 반면, 향후 신기술의 CO<sub>2</sub>회수기술은 약 2~4%의 발전효율 감소를 목표로 하고 있다.

이와 같은 새로운 CO<sub>2</sub> 포집기술이 고효율 석탄화

1단계 (2007~2010)	2단계 (2010~2012)	3단계 (2013~2015)	향후 (2015~)
순산소 발전시스템 개념설계	순산소 발전시스템 기본설계	순산소 발전시스템 상세설계 및 건설	순산소 발전시스템 운영 및 실증

[표 1] 한전 전력연구원의 순산소 발전시스템 단계별 사업추진 계획

력 발전설비와 통합될 경우 송전단의 발전효율 40% 이상을 구현할 수 있을 것으로 예측할 수 있다.

차세대 순산소 CO<sub>2</sub> 포집기술에서 가장 중요한 기술중의 하나는 분리막 기술로서, CO<sub>2</sub>회수기술에 적용될 수 있는 분리막 기술로는 산소생산을 위한 Oxygen Ion Transfer Membrane (ITM 또는 OTM), 석탄가스화발전의 Water-Gas Shift 반응 및 CO<sub>2</sub> 분리에 적용될 수 있는 Membrane Reactor 등도 포함될 수 있을 것이다.

CO<sub>2</sub> 회수용 Membrane 기술 가운데에서 상용화에 가장 근접한 기술이 OTM 산소생산기술이며, OTM 산소생산은 기존의 심냉식 공기분리기술을 이용한 ASU (Air Separation Unit)보다 설비비 및 생산비를 약 50%로 줄일 수 있을 것으로 예측되고 있고, 순산소 연소시 석탄화력 및 IGCC에 모두 적용될 수 있다. 그러나 현재의 OTM 산소생산기술 수준은 약 5톤/일의 생산수준에 머물고 있어서 100MW급의 발전설비 적용을 위해서는 최소한 2000 톤/일 규모의 스케일업이 필요하다. 일반적으로 Membrane 기술은 파급효과가 매우 크지만 기술적 난이도도 그에 상응하게 높아서 가까운 미래에 실제의 CO<sub>2</sub> 회수공정에 적용될 수 있을지의 여

부는 아직 불투명하다고 할 수 있다.

한편 순산소 기술에 의한 CO<sub>2</sub>회수에 적용될 수 있는 또 다른 차세대 CO<sub>2</sub> 회수기술이 매체순환 연소기술 (Chemical Looping Combustion, CLC)이다. ASU 또는 OTM을 통한 산소생산이 아니라, 산화금속내 산소를 석탄의 연소에 활용하는 한편 부분적으로 환원된 산화금속은 다른 환원로에서 공기에 의해서 산화시켜서 순환식 산소 운반매체로 활용하는 방법이다. 현재 한국의 에너지기술연구원, 스웨덴의 Chalmers 대학 등에서 연구가 수행되고 있지만 규모면에서 100kW급 이하의 소규모이며 또한 석탄 대신 가스를 연소시키는 수준에 머물고 있어 실용화를 앞당기기 위해서는 상용화 연구개발을 가속화시킬 필요성이 크다.

정부에서는 2020년까지 지금까지 2005년과 대비하여 4%의 온실가스를 감축하는 목표를 제시하였으므로 순산소 연소 기술을 포함한 CCS 실증화 기술개발에는 막대한 초기 투자비가 소요되므로 CO<sub>2</sub> 회수기술의 실용화를 앞당기기 위해서는 정부 차원의 적극적인 지원이 요구된다. KEA

[참고문헌]

1. IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Cambridge Univ. Press, 2007.
2. IPCC, Climate Change 2007: Mitigation (Pre-Copy), Cambridge Univ. Press, 2007.
3. IPCC, Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge Univ. Press, 2005.
4. Ansolabehere, S., et al., The Future of Coal, MIT, 2007.
5. Stromberg, L., "Technology choice and benchmarking studies," 1st Workshop on Oxy-Fuel Combustion Research Network, Nov. 2005, Cottbus, Germany.
6. 김종수의 21, 청정화력발전 기술과 연계한 온실가스처리시스템 구축 기획보고서, 한국과학기술원, 2007
7. Fogash, K., "Oxygen production technologies: Cryogenic and ITM," 2nd Workshop on Oxy-Fuel Combustion Research Network, Jan. 2007, Windsor, CT, USA.