

④ 순산소연소

# 단 한번에 CO<sub>2</sub>를 전량 회수한다

글 | 최상민 \_ 한국과학기술원 기계공학과 교수 smchoi@kaist.ac.kr

이산화탄소의 회수기술은 뒤집어 생각하면 화석연료를 산화하는 과정에서 공기 중의 산소와 같이 유입되는 질소를 배제하는 작업이라고 생각할 수도 있다. 즉 배가스에 이산화탄소보다 많이 들어있는 질소는 저장을 위한 압축비용을 감당할 수 없을 정도로 높일 수 있으며, 또한 한정된 저장자원을 낭비시키고 저장 이후 안정적 형태로 전환되기도 힘들어서 이산화탄소의 회수과정에서 제거되어야 한다. 따라서 화석연료의 산화과정에서 공기 중의 질소를 제거한 순수한 산소로 연료를 연소시켜 고농도의 이산화탄소를 직접 회수하는 기술이 순산소연소기술이다.

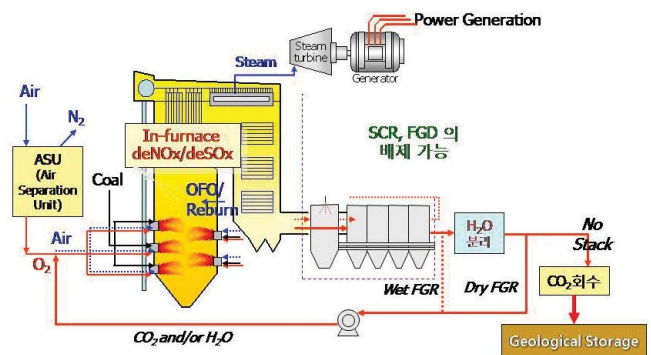
순산소연소기술의 시작은 CO<sub>2</sub>의 회수기술이 아닌 에너지절약 기술로 시작되었다. 유리 및 금속의 용해로와 같이 고온의 가열원이 필요한 공정에서 순산소연소를 이용할 경우 간혹 1천℃가 넘는 배가스에서 질소가 가지고 가는 현열 에너지를 절감할 수 있어 50%가 되지 않던 열효율을 70% 이상으로 끌어올릴 수 있기 때문에 산소생산에 필요한 에너지비용을 상쇄하고도 충분한 경제성을 확보할 수 있었다. 초기의 순산소연소기술은 미국의 산소회사인 프락스에어가 산소 소비의 촉진을 위해서 고온의 열원이 필요한 용해로 및 가열로를 중심으로 보급하였으며, 최근에 발전설비회사를 중심으로 석탄화력발전소의 CO<sub>2</sub> 회수를 위한 기술이 본격적으로 개발되고 있는 단계이다.

고온이 필요한 공업로와 달리 동력생산설비에서 배출되는 배가스의 온도는 배가스를 굴뚝으로 배출하기 적합한 150℃ 근처의 낮은 온도이므로 순산소연소를 통한 에너지절감이 산소생산비용을

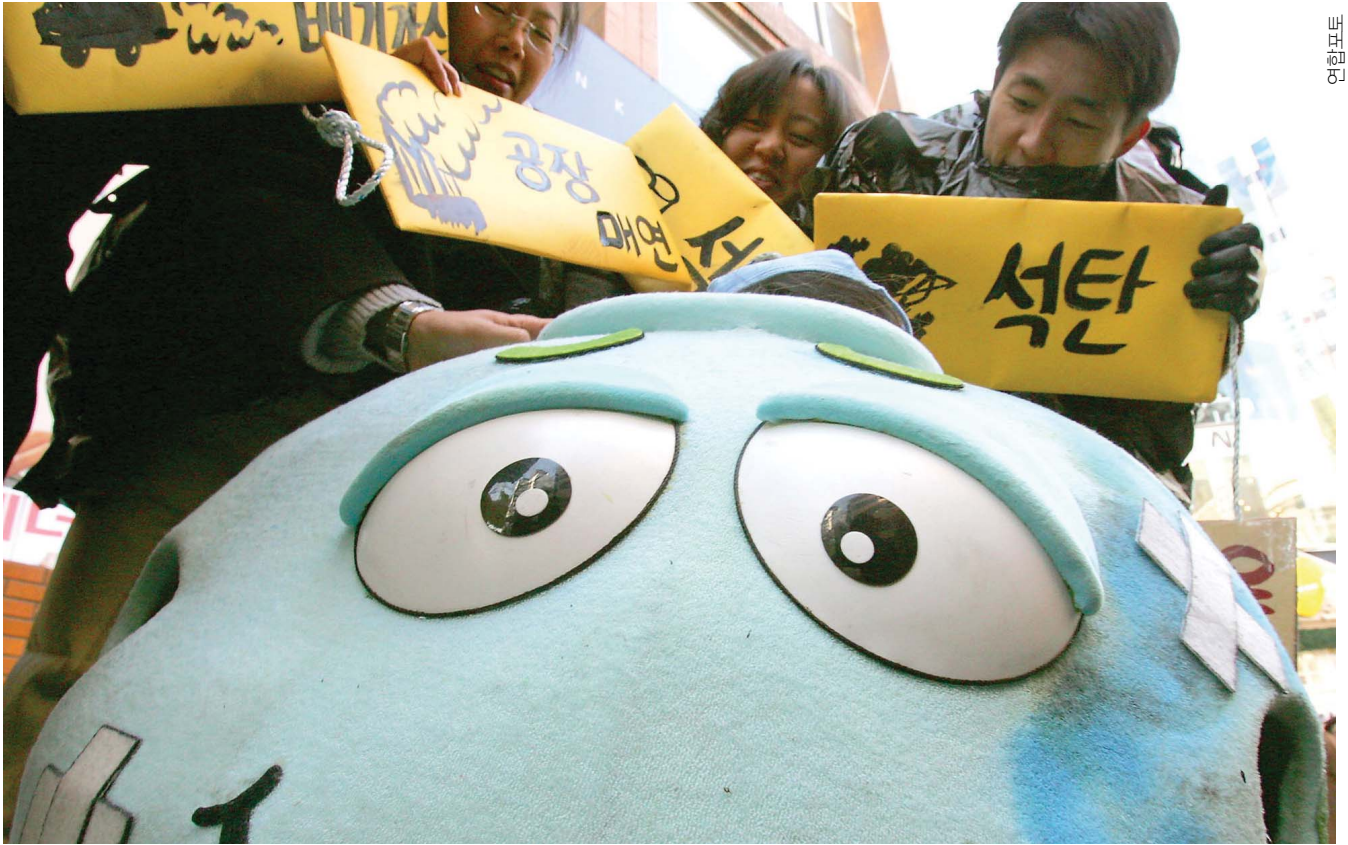
상쇄할 수 없다. 그러나 다른 CO<sub>2</sub> 회수기술과 비교하여 경쟁력이 있는 회수기술로서 많은 연구개발 및 실증사업이 진행되고 있다.

### CO<sub>2</sub> 회수시 증기속 등 불순물 섞이는 것이 문제

〈그림 1〉은 대표적인 CO<sub>2</sub> 배출원인 석탄화력에 적용될 수 있는 순산소연소기술의 개념도이다. 기존의 공기연소방식 대신 공기분리기술을 이용해서 생산된 순도 95% 이상의 고농도 산소를 이용하여 미분탄을 연소시켜 열을 발생시킨다. 발생된 열은 보일러의 열교환기에서 고온고압의 증기를 생산하게 되며, 이 증기로 증기터빈을 구동하여 전력을 생산하게 된다. 그러나 연소실에 순산소만 공급될 경우 보일러의 과열현상이 발생할 수 있으므로, 발생된 배가스의 약 70%를 다시 연소실로 재순환시켜 발전설비의 열적 특성에 적절한 연소가 가능하도록 통합시킴과 동시에 배가스의 CO<sub>2</sub> 농도



〈그림 1〉 순산소연소기술에 기반한 CO<sub>2</sub> 회수기술 개념도



2004년 12월 16일 서울 명동서 열린 '에너지 절약이 지구를 살린다' 캠페인에 참가한 에너지 절약연대 회원들이 지구 온난화의 원인인 매연, 화석연료들이 지구를 괴롭히는 퍼포먼스를 하고 있다.

를 80% 이상으로 농축시킨다. 마지막으로 배출되는 배가스의 주성분 가운데 수증기를 응축시킬 경우, 거의 전량의 CO<sub>2</sub>를 회수할 수 있으며, 회수된 CO<sub>2</sub>를 저장시켜서 CO<sub>2</sub>와 대기오염물질의 무배출을 구현하는 것이 순산소연소를 이용한 CO<sub>2</sub> 회수기술이다.

순산소연소기술은 다른 CO<sub>2</sub> 회수기술과 비교하여 다음과 같은 여러 가지 장단점이 있다. 먼저 CO<sub>2</sub>의 회수는 연소 후 배출되는 배가스 내 수증기를 응축시켜 물리적으로 분리하는 기술이므로 단 한번에 CO<sub>2</sub>의 전량회수가 가능한 유일한 CO<sub>2</sub> 회수기술이다. 또한 연소과정에서 공기에 포함된 질소가 공급되지 않으므로 저NO<sub>x</sub>연소에 유리한 조건이 형성되기 때문에 순산소연소 석탄화력발전에서 NO<sub>x</sub>를 제거하기 위한 탈질설비, 예를 들면 선택적 촉매환원(SCR) 설비가 사용되지 않는다. 또한 배연탈황설비(FGD) 대신 노내탈황기술의 적용 가능성도 거론되고 있어서, SCR와 FGD 두 가지의 핵심적인 환경제어설비를 위한 설비비 및 에너지비용의 절감이 가능한 장점이 있다.

한편 순산소연소를 실시할 경우, 연소로 내부의 가스 조성 및 온도의 변화에 따라 보일러의 열교환 특성이 달라질 수 있다. 특히 고온의 연소가스에 의한 복사열전달 특성이 매우 큰 차이를 보일 것으로 예측되고 있으며, 이에 따른 열교환기의 개조를 동반할 필요성이 있다. 특히 광범위한 열교환설비의 개조가 필요한 경우 순산소연소기술의 적용이 산소생산설비의 추가로 쉽게 이루어지지 않을 수 있음을 의미하며, 궁극적으로 현재 운영되고 있는 화력발전소를 개조하기 위한 엔지니어링의 부담이 가중될 수 있는 단점이 발생할 수 있다.

순산소연소의 또 다른 단점은 100% CO<sub>2</sub> 회수와 동반된 불순물의 존재이다. 비록 농도는 낮지만 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 및 다양한 중금속이 CO<sub>2</sub>와 동시에 포집될 것이다. 따라서 아직 확정되지 않았지만 국제적인 지중저장 규약에 맞추기 위한 추가적인 회수 후 CO<sub>2</sub>의 정제과정이 필요할 수 있다. 공기기술 관련 기업에서는 CO<sub>2</sub>가 다른 물질과 매우 다른 물성치를 보유하고 있어서 압축과정에서 비교적

저렴하게 CO<sub>2</sub>의 추가 정제를 할 수 있다고 주장하지만 아직 구체적인 비용 및 방법이 검증되지 않은 상태이다.

### CO<sub>2</sub> 1만톤 회수에 산소 8천톤 필요

국내에서 가장 일반적인 화력발전소 규모인 500MW 급 석탄화력 발전소에서 1년에 배출되는 CO<sub>2</sub>의 양은 약 320만톤으로 하루 평균 1만톤 정도의 CO<sub>2</sub>가 배출되며 이러한 발전소의 순산소연소를 구현하기 위해서는 하루 8천톤의 산소를 생산할 수 있는 시설 및 전력이 필요하다. 이런 대규모 산소생산설비의 건설비 및 구동에너지비용이 순산소연소기술을 이용한 CO<sub>2</sub> 회수비용에 미치는 영향이 지대하므로 산소생산기술의 개선도 순산소연소기술의 개발과 같이 매우 중요하다.

현재 이용할 수 있는 유일한 대용량 산소생산기술은 공기를 압축, 냉각 및 팽창시켜 액체산소를 생산하는 공기분리기술이다. 하루 8천톤의 산소를 생산하기 위해서는 약 200만kWh의 전력이 소모되는 것으로 알려져 있으며, 이를 발전효율이 40%를 상회하는 국내의 석탄발전에서 적용할 경우 생산된 전력의 약 15%를 산소생산에 소비하는 수준의 동력이 요구되고 있다. 또한 대규모의 산소생산설비는 미국의 프렉스에어, 에어프로덕트, 유럽의 에어리퀴드 및 린데 등 소수의 국제 메이저에 의해서 과점된 상태이며, 국내의 대성산업가스가 국내시장에서 이들 업체와 힘들게 경쟁하는 상태이다.

산소생산을 위한 에너지 비용을 줄이기 위한 기술로서 산소이온 전달분리막(OTM)을 이용한 차세대 산소생산기술이 개발되고 있다. 미국의 에어프로덕트는 OTM 모듈을 통한 별도의 산소생산설비를 구축하고 있으며 현재 5톤/일 규모의 설비를 실증하고 있는 단계이다. 한편 프렉스에어는 연소로에 OTM 튜브를 삽입하여 산소를 공급하는 신형 보일러 기술을 개발하고 있다. 그러나 이러한 두 가지 기술 모두 연소설비와 열적 통합에 대한 구체적인 방법이 아직 제시되지 못하고 있어서 시장에 보급되기 위해서는 많은 기술개발이 필요한 실정이다.

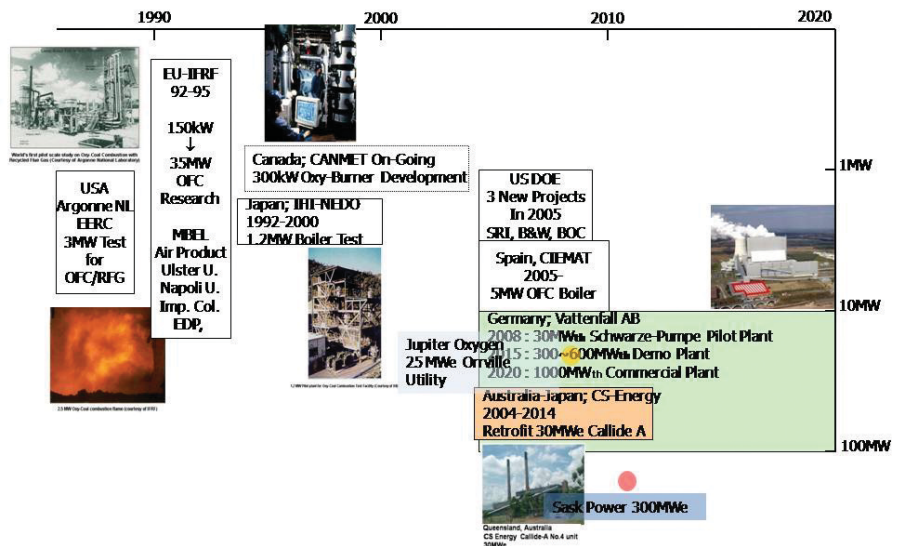
또 다른 산소공급방안이 매체순환연소 기술(CLC)이다. CLC 기술은 헤모글로빈

을 이용한 인체의 산소공급방식과 유사하게 공기와 접촉하여 산화된 금속이 생성되며, 연소로로 이동하여 산화금속의 환원과정에서 공급되는 산소로 연료를 연소시키는 방식이다. 여기에서 환원된 금속은 공기와의 산화를 위해서 금속산화물로 다시 돌아오게 된다. 매체순환연소기술은 기존의 연소 후 포집기술과 순산소연소기술의 중간적 형태를 띠는 기술로서 대규모 열설비에서 가장 낮은 비용으로 CO<sub>2</sub>를 회수할 수 있는 기술로 각광을 받아 우리 나라를 포함한 여러 나라에서 많은 연구개발이 진행되고 있다.

### 우리도 영동화력 1호기에서 2018년까지 실증

순산소연소를 이용한 CO<sub>2</sub> 회수기술은 대용량 산소생산기술, 순산소연소기술, 발전용 보일러 설비기술, 환경제어기술 등의 요소기술로 구성되어 있으며, 이들 요소기술 못지않게 중요한 기술이 이들 요소기술을 실증 또는 상용화 규모에서 효과적으로 통합하여 최적의 비용으로 대규모의 CO<sub>2</sub> 회수를 구현하는 시스템 통합기술이다. 이와 같은 시스템 통합을 포함한 종합적인 순산소연소 CO<sub>2</sub> 회수기술의 국외개발동향이 <그림 2>이다.

<그림 2>에서는 시기 및 규모기준으로 지금까지 수행되어 왔거나 수행되고 있는 핵심적인 순산소연소 CO<sub>2</sub> 회수기술개발사업을 제시하고 있으며, 이들 가운데에서도 스웨덴의 국영발전사인 바텐폴이 독일 슈바르체 폰페 발전소에서 수행하고 있는 프로젝트 및 호주 CS-에너지가 수행하고 있는 카라이드 프로젝트가 핵심적인 실증프로젝트이다. 바텐폴은 EU에서 4위 규모의 발전사로서



<그림 2> 순산소연소를 이용한 CO<sub>2</sub>회수기술의 국내외 개발동향




박관영

아프리카엔 기후변화로 인한 사막화와 기온상승으로 농경과 목축이 더욱 어려워졌다. 사진은 중부 말리 메마른 평원에서 소떼를 돌보고 있는 목동들의 모습

2008년 4월 30mwh급 순산소연소 석탄보일러 파일럿 설비를 준공하여 구동하기 시작하였으며, 궁극적으로는 2015~2020년 사이 상용화 규모에서 순산소연소 석탄발전을 구현할 예정이다. 이를 통해서 2030년까지 바텐폴이 배출하는 CO<sub>2</sub>의 50%를 감축할 예정이다.

한편 호주는 비록 2007년에 교토의정서를 비준하였을지언정 COAL21과 같은 대규모 CCS 실증지원 프로그램을 마련하여 호주 경제에 절대적으로 기여하고 있는 석탄산업의 지속가능성을 개선하고자 하고 있으며, COAL21 프로그램의 일부로서 호주 퀸즐랜드에 있는 발전사의 하나인 CS-에너지가 30mwe급의 석탄화력발전소에 순산소연소기술을 적용하는 실증사업을 수행하고 있다. 특히 CS-에너지의 프로젝트는 바텐폴의 실증사업과 달리 기존의 발전소에 적용하는 개조 방안을 실증하는 것을 목표로 하고 있다. 또한 이를 위해서 일본의 IHI는 CS-에너지 컨소시엄의 약 20% 지분으로 참가하면서 자국이 개발한 순산소-미분탄 연소기술을 시험하는 신속한 기술개발 대처능력을 보여주고 있다.

이러한 국제적인 기술개발수준을 따라잡기 위해서 우리나라도 2007년 순산소연소 석탄화력발전기술 개발사업을 한국전력 전력연구원에서 지식경제부의 지원을 통해서 발족하였다. 특히 이 연구사업은 궁극적으로 2013년 무연탄공급이 중단되는 남동발전 소유의 125mw 규모의 영동화력 1호기에 대한 아역청탄의 순산소연소를 실증하는 것을 목표로 수행되고 있는 연구개발사업이라는 점에서 매우 의미가 클 것이다. 만약 영동화력 1호기에 대한 실증사업이 당초의 계획대로 수행될 경우 2018년까지 순산소연소 CO<sub>2</sub> 회수기술에 대한 실증이 완료될 수 있을 것으로 예상되며, 이러한 기술은 규모 및 기술 수준면에서 세계 정상급 CO<sub>2</sub> 회수기술로 자리매김할 수 있을 것이다. 



글쓴이는 서울대학교 기계공학과 졸업 후 한국과학기술원에서 석사학위를, 스탠퍼드대학교에서 박사학위를 받았다. 슈투트가르트대학교 방문교수, UC버버인 방문교수 등을 지냈다.