



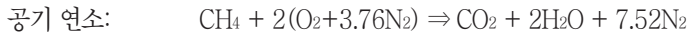
# 순산소 연소 기술의 연구 동향

김한석, 안국영, 이상민, 이영덕 | 한국기계연구원

## 1. 서론

연소기에 공기 대신 순산소를 공급하는 순산소 연소방법은 지구온난화 가스인 이산화탄소를 고농도로 회수할 수 있어 지구온난화 억제뿐만 아니라 열효율의 제고를 실현할 수 있는 획기적인 연소 방법으로 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 2005년 2월 교토의정서에 따른 기후변화협약이 발효됨으로써 국제적으로 본격적인 이산화탄소 배출규제가 시작되었으며 우리나라의 경우 1차 규제대상국에는 포함되지 않았으나 2013년부터 적용이 될 예정이다므로 이산화탄소 배출저감기술 개발은 시급한 당면과제이다<sup>[1]</sup>.

다음은 이론 당량비에서 메탄에 대한 공기연소와 순산소 연소의 화학반응식을 나타내었다.



위의 반응식을 통해서 알 수 있듯이 순산소 연소를 하게 되면 산화제로 산소만 공급되므로 공기 중에 포함된 질소의 가열로 인한 불필요한 열손실을 줄일 수 있으며 이로 인해 화염온도가 상승할 뿐만 아니라 에너지 효율도 크게 증가한다. 또한 생성가스 성분이 복사율이 비교적 높은 CO<sub>2</sub>와 수증기만으로 구성되기 때문에 기체복사량이 크게 증가하여 열전달 효율이 더욱 증가한다. 그리고 배가스를 응축시스템을 이용하여 수분을 제거하면 CO<sub>2</sub>만 남게 되므로 고농도의 CO<sub>2</sub> 회수가 용이하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 순산소 연소는 연료량을 절약하고 고농도 CO<sub>2</sub> 회수비용을 저감함으로써 기후변화협약에 따른 이산화탄소 규제에 대한 능동적이고 적극적인 대처방안이 된다. 또한 연소기로 질소가 공급되지 않기 때문에 공해성 가스 배출 차원에서 이론적으로는 NO<sub>x</sub> 배출을 완전하게 제어할 수 있다. 순산소 연소가 이렇게 많은 장점들이 있음에도 불구하고 산업에 활발히 적용되지 못했던 이유는 산소제조 비용이 고가이고, 화염의 온도가 너무 높아 노즐과 연소로 등이 손상되는 경우가 발생하기 때문이었다. 그러나 최근 들어 PSA (Pressure Swing Adsorption), ITM (Ion Transport Membrane) 기법 등 공기분리를 통한 산소제조기술의 발달로 인해 제조비용이 저감되고 있고 CO<sub>2</sub> 혹은 H<sub>2</sub>O의 재순환 기술에 의한 화염온도 저감 기술 등 신연소기술이 개발되어 기후변화협약의 발효와 더불어 순산소 연소기술의 적용이 확대 될 것으로 전망되고 있다.

## 2. 국내외 관련 기술 동향

순산소 연소기술은 유리 용해, 비철금속 용해 및 철강 가열 공정용과 같은 에너지 다소비형 고온 열설비에 적용할 목적으로 개발되어 왔다. 개발 초기에는 열설비 조업에 요구되는 고온 분위기 제공을 위하여 순산소 연소기술이 제한적으로 적용되어 왔으나 최근에는 저가 산소제조기술이 개발되면서 고온 열공정에서 순산소 연소의 활용이 증가되고 있다. 또한, 지구온난화로 인한 이산화탄소 배출 문제가 대두되면서 CO<sub>2</sub> 배출량이 가장 많은 발전분야에서도 순산소 연소 기술에 대한 연구가 확대되고 있다.

### 2.1 국내외 대형 연구개발 과제

이산화탄소 저감을 목적으로 국제적으로 IEA GHG (Greenhouse Gas R&D Programme), CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum) 등의 단체가 설립되었고, CCP (CO<sub>2</sub> Capture Project), CASTOR (CO<sub>2</sub> from Capture to Storage), ENCAP (Enhanced Capture of CO<sub>2</sub>) 등 유럽과 북미를 중심으로 대형과제가 진행되고 있다<sup>[2]</sup>. 국내에서는 과학기술부 21세기 프론티어사업의 일환으로 이산화탄소 저감 및 처리기술 개발사업단(CDRS)에서 10년간 연간 100억원 규모의 과제가 진행되고 있다. 표 1에 국내외 대형 연구 과제를 요약하였다.

표 1 현재 진행되고 있는 이산화탄소 회수관련 대형 연구과제

구 분	국 외			국 내
과제명	CCP	CASTOR	ENCAP	CDRS
기 간	'05 ~ '07	'04 ~ '08	'04 ~ '09	'03 ~ '12
지원액	\$24mil	€15.8mil	€22mil	1000억

## 2.2 순산소 연소 기술의 활용

### 2.2.1 철강 산업

철강재의 생산을 위한 다양한 처리 공정에 있어서, 특히, 고철 및 각종 원석을 용융하기 위한 가열 등에는 연소 기술의 최적화가 매우 중요하다. 즉, 연소 최적화를 통해 에너지 효율을 향상시킴으로써, 생산성 및 경제성 향상을 도모할 수 있고, 이는 전체 시스템 효율의 향상, 배출물 저감 등으로 연결된다. 더욱이 철강산업의 경우 에너지 소비 자체도 클 뿐 아니라 전체 플랜트의 에너지 소비 상당부분이 연소 기술과 직·간접으로 연결되기 때문에, 에너지 효율 증대 및 배출물 감소 등은 반드시 해결되어야 할 당면 과제이다.

철강산업에 있어서 순산소 연소기를 설치, 운용하는 주요 회사로는 Linde-AGA Gas, Air Liquide, Praxair 등의 가스제조회사가 주를 이루고 있으며, 주로 강제 가열로에 순산소 연소 기술을 적용하고 있다.

Linde-AGA Gas 사는 2001년 현재 37종의 다양한 가열로 설비에 순산소 연소기를 설치, 운용하고 있다. 순산소 연소 설비의 설치 결과에 따르면 강제 가열에 순산소 연소를 적용시 기존 공기 연소 설비 사용에 비해 열설비 생산 능력을 5~20% 향상시킬 수 있고, 가열시간을 25~50% 감소시킬 수 있으며, 연료 사용량 또한 45~50% 정도 감소시킬 수 있다. 이러한 에너지 효율에 대한 장점 이외에도, 순산소 연소 적용시에는 강제표면에 품질이 좋은 산화막(scale)이 형성되어 제련 강재의 품질 향상에도 기여할 수 있다. 그러나 이러한 산화막의 단점으로는 강재의 에너지 흡수 효율을 떨어뜨려 실제 에너지 효율 향상을 방해하기도 한다. 한편, 공기 침투에 의한 NO<sub>x</sub> 증가 문

제를 해결하기 위하여 배기가스 재순환, 저 과잉 공기비 하에서 연소, 다단연소 및 로 내부의 압력을 증가시켜 역류를 막는 방법들이 사용되고 있다.

순산소 연소에 비해 공기연소를 이용해 가열로의 강재를 가열하게 되면, 상대적으로 가열 시간이 길어지게 된다. 기존에는 이를 극복하고 피열물로의 전열 효율을 향상시키기 위해 노의 길이를 확장하여 전열 면적을 증가시키고, FGR 및 재생 버너 등을 이용해 전달되는 열량을 증가시키는 등의 방법을 적용하였다. 하지만, 이러한 전열 효율을 향상시키려는 노력들은 추가적인 장치를 설치하는데 따른 비용 부담이 크고, 공간적인 제약을 받을 경우 개선의 여지가 적다는 한계가 있다. 프랑스의 Air Liquide 사는 이러한 강재의 가열과정이 생산라인에서 장애요인이 되고 있다는 점을 개선하기 위한 방법으로 순산소 연소기술을 적용하여 가열 시간의 감소와 동시에 효율향상을 도모하였다<sup>[3]</sup>. Air Liquide사는 긴 화염을 발생시켜 온도를 균일하게 하는 산소버너를 개발하여 가열로의 입구 부분에서 사용되던 공기 버너대신 순산소 버너를 설치하여 가열 시간을 단축하였을 뿐 아니라, 강재가 고온에서 머무르는 시간을 효과적으로 줄였기 때문에 고온 산화에 의한 표면 부식 현상도 많이 감소하는 효과를 확인하였다.



그림 1. 순산소 연소의 강재 가열 이용

## 2.2.2 발전 분야

산업분야에서 배출되는 CO<sub>2</sub>는 발전부문에서 가장 많이 배출되고 있는데, 그 비율이 대략 60% 정도를 차지한다<sup>[4]</sup>. 따라서 발전분야에 적용 가능한 CO<sub>2</sub> 배출저감 기술을 개발하는 것이 파급효과가 가장 크다고 할 수 있으며, 이 부분에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다<sup>[1]</sup>. 순산소 연소의 경우 산소제조비용이나 고온연소 문제 등 해결해야 할 문제점이 있지만, 고농도의 CO<sub>2</sub> 회수가 가능하며 비용 상승효과가 상대적으로 적은 장점이 있기 때문에 가능성 있는 미래기술로서 각광받고 있다<sup>[5]</sup>.

### - 가스 터빈 발전

가스터빈 시스템에 순산소 연소와 CO<sub>2</sub> 회수기술을 적용한 기본 사이클의 예를 그림 2에 나타내었다<sup>[6]</sup>. 공기가 ASU(air separation unit)를 거쳐 산소로 분리되며, 가스터빈의 압축기를 통해 압축되어 연소기에 공급된다. 연소기에서 순산소 연소가 이루어지면 배기가스에는 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O의 혼합물이 존재하며, 응축과정을 통해 H<sub>2</sub>O를 분리하고 나면 고농도의 CO<sub>2</sub>를 회수할 수 있다.

그러나 이 사이클은 여러 기술적 이유로 인해 실현 가능성이 매우 낮다. 일반적으로 가스터빈에서는 터빈 블레이드 재료가 견딜 수 있는 온도로 연소가스의 온도를 낮추기 위하여 공기를 과급하게 된다. 순산소 연소의 경우 터빈입구온도를 맞추기 위하여 산소를 과잉으로 공급하게 되면 배가스에 포함된 산소때문에 고농도의 CO<sub>2</sub>를 회수할 수 없다<sup>[7]</sup>. 현재 1500℃까지 견딜 수 있는 터빈 제작기술이 개발되었으나, 산소 연소를 사용하는 경우 배가스 온도가 이 보다 훨씬 고온에 도달하기 때문에 이 조건에 맞는 가스 터빈 시스템 제작은 현재로서는 불가능하다.

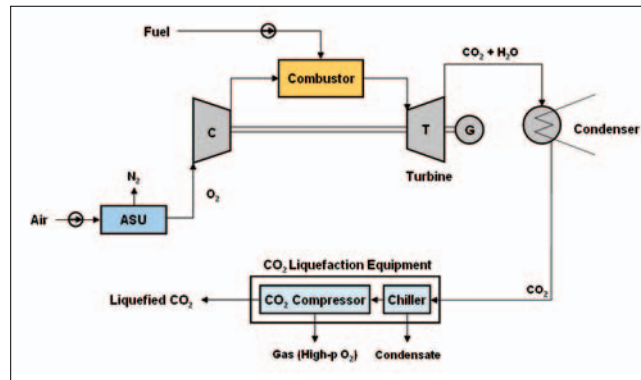
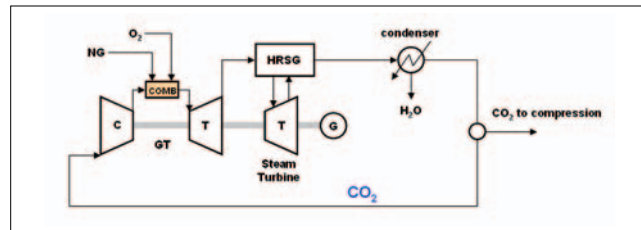
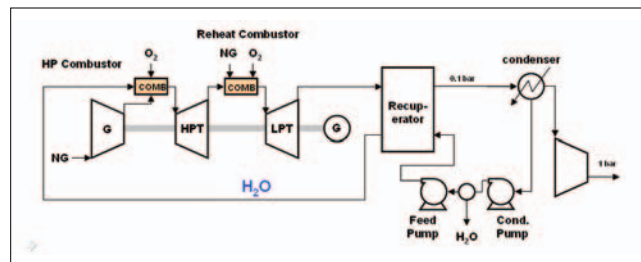


그림 2. 순산소 연소 이용 이산화탄소 회수 가스터빈 사이클



(a)



(b)

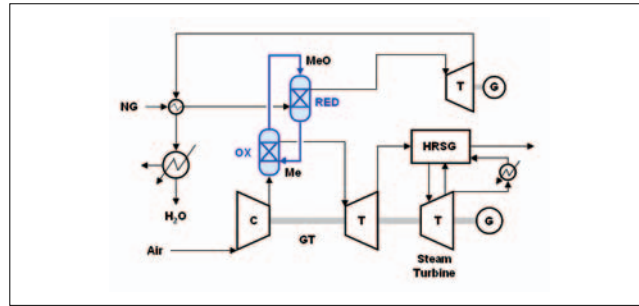
그림 3. (a) Semi-closed CO<sub>2</sub> 사이클<sup>[8]</sup>과 (b) 수증기 사이클<sup>[9]</sup>

이러한 터빈 고온문제를 해결하기 위해 다양한 방식의 순산소 연소 사이클이 제안되었는데, CO<sub>2</sub>나 H<sub>2</sub>O를 작동 유체로 추가 공급하여 연소기 배가스의 온도를 떨어뜨리는 방법(그림 3), 사이클 내에 산소제조과정이 포함되는 방법(그림 4), 고온형 연료전지에 적용하는 방법(그림 5) 등이다.

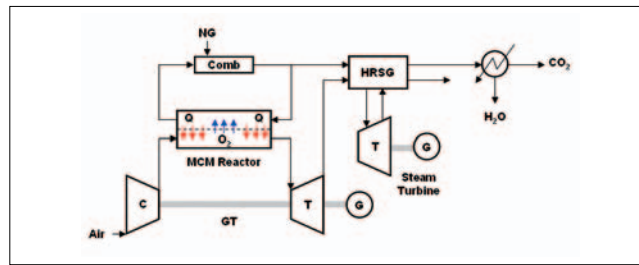
CO<sub>2</sub>나 H<sub>2</sub>O를 작동유체로 추가 공급하는 방법은 순산소 연소기 내에 CO<sub>2</sub>나 H<sub>2</sub>O를 추가로 공급하여 미반응 기체량을 증가시킴으로써 터빈의 재료문제가 발생하지 않는 온도까지 화염온도를 낮추는 방식이다. CO<sub>2</sub>나 H<sub>2</sub>O를 추가해도 출구가스에는 CO<sub>2</sub>나 H<sub>2</sub>O만 존재하므로 CO<sub>2</sub>의 회수가 가능하다.

위 방식 중 연소기에 CO<sub>2</sub>를 추가로 공급하는 방식은 semi-closed CO<sub>2</sub> 사이클이라 불리는데, 배가스에서 회수된 CO<sub>2</sub>를 재순환하여 연소기에 공급하는 방식이다<sup>[8]</sup>. semi-closed CO<sub>2</sub> 사이클의 개략도를 그림 3(a)에 나타내었다. 이 사이클에서는 CO<sub>2</sub>가 압축기를 통해 연소기로 공급되며, 터빈출구의 배가스에서 회수된 배열을 이용하여 스

터빈을 구동한다. 연소기로 재순환되는 CO<sub>2</sub>를 제외하고 생성된 CO<sub>2</sub>는 외부로 배출된다. 그림 3(b)에 나타난 사이클은 수증기 사이클로서 수증기를 연소기에 추가 공급하여 화염온도를 낮추게 된다<sup>[9]</sup>. 배가스의 주성분이 수증기이므로 고압터빈과 저압터빈의 2단 구조로 구성되며, 터빈의 효율을 향상시키기 위하여 저압터빈 전단에 연소기(재열기)가 추가로 설치된다. 이 사이클에서는 응축을 통해 CO<sub>2</sub>를 제거하고 남은 물을 회수열교환기(recuperator)로 가열하여 연소기로 공급되는 수증기를 만들게 된다.



(a)

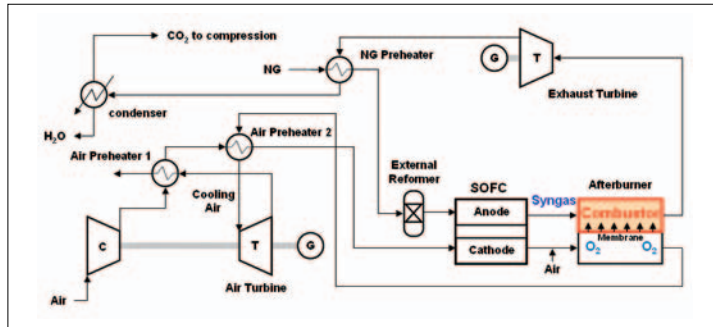


(b)

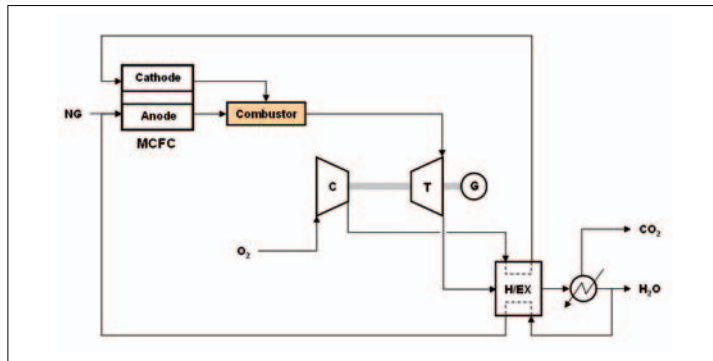
그림 4. (a) Chemical looping 사이클<sup>[10]</sup>과 (b) AZEP 사이클<sup>[11]</sup>

사이클 내에 산소제조과정이 포함되는 방법(그림 4)은 산소제조비용을 절감할 수 있어 시스템 효율을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 그림 4(a)에 나타난 방법은 금속물질(Me)을 매개체로 하여 산화/환원 반응기에서 산소를 분리하여 순산소 연소를 가능하게 하는 사이클이다<sup>[10]</sup>. 위의 사이클은 CLC(chemical looping cycle)라 불리며, 금속 매개체로는 니켈(Ni)등이 사용된다. 산화반응기(OX 표시)에서는 공기 중의 산소가 금속물질과 결합하여 금속산화물(MeO)가 되고, 환원반응기(REDUX)에서는 금속산화물이 연료와 반응하여 순산소 연소가 일어나게 된다. 이 때 산화반응기에서 산소가 분리된 고온의 공기와 환원반응기의 배가스는 터빈발전에 이용된다. 그림 4(b)에 나타난 사이클은 노르웨이의 Norsk Hydro 사에서 개발 중인 AZEP(Advanced Zero Emission Power) 사이클로서 멤브레인을 이용하여 산소를 제조하고 순산소 연소를 가능하게 하는 방식이다<sup>[11]</sup>. 압축기에서 압축 공급된 공기가 멤브레인을 지나면서 산소만 선택적으로 투과되어 순산소 연소기에 공급되며, 이 때 발생된 배가스의 열은 멤브레인에 공급되는 압축공기를 가열하고 가스터빈으로 공급된다. 상기 두 사이클은 순산소 연소 사이클의 효율을 향상시킬 수는 있으나, 아직까지 기술개발 초기단계로서 상용화를 위해서는 많은 연구개발이 필요하다.

상용화에는 근접하지 않았지만, 미래기술로서 순산소 연소를 연료전지 시스템에 적용하는 하이브리드 사이클



(a)



(b)

그림 5. (a) SOFC/GT 사이클<sup>[12]</sup>과 (b) MCFC/GT 사이클<sup>[13]</sup>

(hybrid cycle)도 소개되고 있다. 분산발전용으로 주로 사용되는 용융탄산염 연료전지나 고체산화물 연료전지는 고온의 배가스를 이용할 수 있기 때문에 하이브리드 시스템의 구성이 용이한데, 하이브리드 시스템 구성 시 순산소 연소를 적용하면 고농도의 CO<sub>2</sub> 회수가 가능한 고효율 사이클을 구성할 수 있다. 그림 5(a)는 고체산화물 연료전지 (solid oxide fuel cell: SOFC)와 가스 터빈을 결합시킨 SOFC/GT 하이브리드 발전시스템이며<sup>[12]</sup>, 그림 5(b)는 용융탄산염 연료전지(molten carbonate fuel cell: MCFC)와 가스터빈을 결합시킨 MCFC/GT 발전 시스템에 순산소 연소가 적용된 사이클이다<sup>[13]</sup>. 순산소 연소를 연료전지 하이브리드 시스템에 적용하는 경우, 60~70%까지 시스템 전기효율을 향상시킬 수 있으나, 연료전지의 기술 성숙이 먼저 달성되어야 하므로 아직까지는 개념해석 정도의 연구가 이루어지고 있다.

현재 미국의 Clean Energy Systems 사 (이하 CES)에서 순산소 연소 이용 가스터빈 발전 기술을 가장 활발하게 연구하고 있다<sup>[14]</sup>. CES사는 1999년부터 자체적으로 고안한 순산소 연소 이용 발전시스템을 개발하기 시작하였으며, 2006년 캘리포니아주에 위치한 Kimberlina 발전소에서 5MW 급 순산소 연소 발전시스템을 개발하는 데에 성공하였다. CES 사이클의 가장 큰 특징은 로켓 엔진용으로 개발한 가스발생기(gas generator) 기술을 사용한다는 것이며, 이 가스 발생기에서는 기체연료와 산소가 반응하기 때문에 순산소 연소기의 역할을 수행한다고 볼 수 있다. CES 사이클에서는 터빈 입구 온도 조절을 위하여 물을 재순환하여 가스 발생기에 스팀을 공급하는 방식을 사용하는 것이 특징이다. CES 사이클의 가장 큰 장점은 순산소 연소의 높은 가연성 때문에 천연가스뿐만 아니



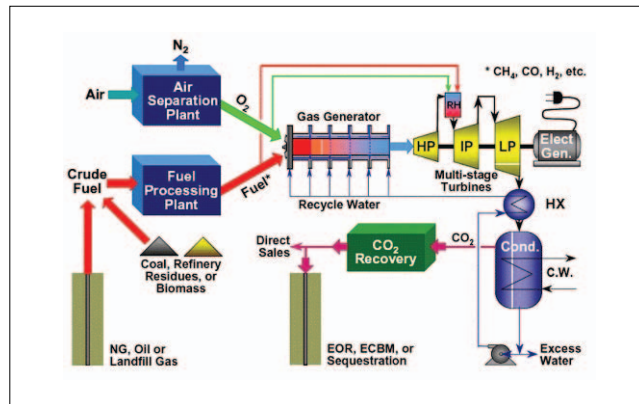


그림 6. 석탄이용 CES 사이클<sup>[14]</sup>

라 석탄, 매립지가스, 바이오매스 등 난연성 연료를 쉽게 연소시킬 수 있기 때문에 향후 자원고갈에 대비한 신재생 에너지 기술로의 적용이 가능하다는 점이다. CES사는 2005년부터 Siemens Power Generation사와 함께 석탄 합성가스를 연료로 하는 순산소 연소 발전시스템 과제를 시작하였다. 고효율 청정 연소기 기술은 CES 사에서 개발하고, 1760°C에도 견딜 수 있는 고온고압 터빈기술은 Siemens Power Generation 사에서 설계 기술을 개발하고 있다. CES 사는 이러한 기술개발을 통하여 2015년 효율 50% 달성이 가능한 석탄이용 400MW급 대형 가스 터빈 발전 시스템 개발을 계획 중이다<sup>[15]</sup>.

#### - 석탄 연소 발전

석탄은 가스연료나 고급 액체연료에 비하여 상대적으로 저렴하며 세계적인 매장량 역시 풍부하므로 대형 발전용 보일러와 산업용 열병합 발전용의 보일러 등에 널리 사용된다. 석탄은 앞으로 200년 이상 채굴이 가능한 것으로 알려져 있어 향후 석유를 대체할 연료로 다시 각광받고 있으며, 현재에도 발전분야에서 무연탄과 유연탄을 합한 석탄연료의 연료당 발전비율이 가장 높은 상황이다.

석탄의 가연성분 중에는 약 70% 정도의 탄소성분이 포함되어 있어서 다른 연료에 비하여 연소에 따른 CO<sub>2</sub>의 배출농도가 매우 높다. 또한 대규모 발전용 보일러의 특성상 한 장소에서 많은 양의 석탄이 연소되므로 하나의 석탄화력 발전소에서 막대한 양의 CO<sub>2</sub>가 집중적으로 배출되는 특징이 있다. 따라서 CO<sub>2</sub>의 저감과 발생하는 CO<sub>2</sub>의 효과적인 회수를 위하여 대규모 석탄화력 발전소를 대상으로 하는 연구개발의 효과가 가장 크다. 석탄이용 발전분야에서 CO<sub>2</sub> 저감을 위하여 연소전처리, 연소후처리, 순산소 연소기법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 경제성과 실현가능성을 고려하였을 때 순산소 연소의 적용이 가장 빠를 것으로 예상되고 있다. 한편, 대규모 보일러의 연소설비에서 석탄은 대부분 연소효율의 증대와 부하 조절의 용이성을 위하여 미분탄(pulverized coal)의 형태로 분쇄되어 연소되는데, 순산소 연소의 경우 난연성물질에 대한 연소특성이 우수하기 때문에 연소효율을 보다 높일 수 있는 장점도 있다.

그림 7에 석탄-순산소 연소 발전용 보일러 시스템의 개략도를 나타내었다<sup>[16]</sup>. 일반적인 공기 연소시스템에 비하여 산소공급을 위한 공기분리 장치(air separation unit)가 포함되는 것과 공기연소와 비슷한 온도조건을 맞추기 위하여 배가스를 재순환하여 연료에 공급하는 것이 가장 크게 다른 부분이다. 미분탄의 순산소/CO<sub>2</sub> 재순환 연소

시스템은 연소과정에서 최적의 연료와 산소농도 분포를 통하여 연소효율을 개선할 수 있으며 CO<sub>2</sub>가 농축된 배기가스를 많은 부분 재순환함으로써 공기 중에 79% 정도를 차지하는 질소성분을 배제할 수 있으므로 발생하는 배기가스의 절대량 감소에 의해 열효율을 극대화할 수 있다. 기존의 공기 연소방식에서 공기 중의 질소성분이 고온의 연소과정에서 산화됨으로써 필연적으로 발생하는 thermal NO<sub>x</sub>를 근본적으로 방지할 수 있다. 또한 미분탄의 연소에 필요한 산소의 공급과 배기가스의 재순환을 반복함으로써 배기가스 중의 CO<sub>2</sub>를 쉽게 농축할 수 있으므로 발생하는 CO<sub>2</sub>의 회수처리가 용이하다<sup>[17]</sup>.

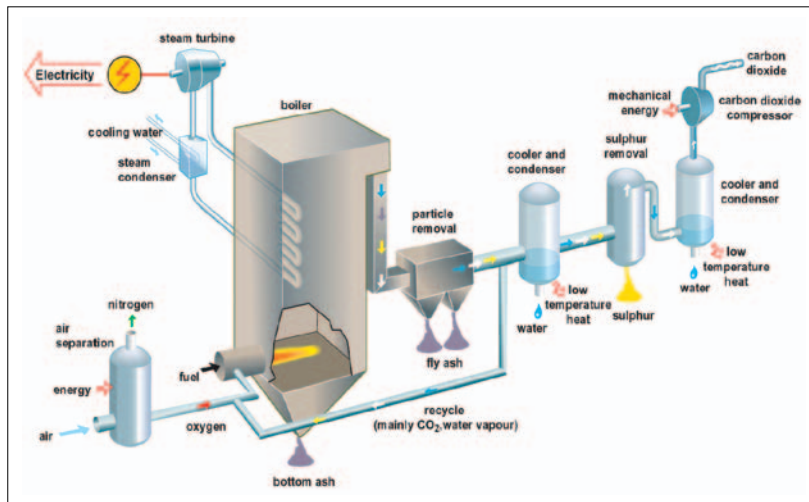


그림 7. 미분탄 순산소 연소시스템의 개략도(Vattenfall)<sup>[16]</sup>

### 2.2.3 기타 산업분야

#### - 유리 용해로

순산소 연소는 1980년대 초반 대표적인 유리 제조 회사인 Corning 사에 의해 고온을 필요로 하는 유리 용해로에 부분적으로 적용되기 시작하여 현재 널리 사용되고 있다. 최근 들어 Maxon과 Praxair 등에서는 유리 용해로용 저 NO<sub>x</sub> 순산소 연소기를 개발, 제작하고 있다. 일본에서는 1990년대 초 Nippon Sanso 사에서 순산소 연소를 이용한 최초의 유리 용해로를 개발한 이후, 에너지 절약과 NO<sub>x</sub> 저감이 가능하여 현재 70% 이상이 순산소 유리 용해로를 사용하고 있다.

순산소를 이용하는 버너는 대체로 다음과 같은 3 가지 방식을 이용하여 효율향상에 기여하였다: 1) 산소부하방식; 기존의 공기 연소 시와 유사하게 공기 측에 산소를 주입시켜 산소 농도를 증대시키는 방법, 2) 연료-공기 버너에 부가하여 별도의 산소를 주입하여 연료-공기 화염과 충돌 시키는 방법 및 3) 연료 중에 산소를 공급하는 방법 등이다.

#### - 산업용 보일러

보일러 효율을 증가시키는 방안으로 순산소 연소가 적용되고 있다. 캐나다의 CANMET 에서는 보일러 연소실



분위기 온도를 적정수준으로 유지하기 위하여 CO<sub>2</sub>를 재순환 시키는 시스템을 적용하였으며, Praxair에서도 BP, Alstom Power (USA) 사와 더불어 순산소 연소기술을 보일러 시스템에 적용하는 방안을 연구한 바 있다.

- 기타 분야

순산소 연소기술은 반도체 충전제로 사용하는 구형의 실리카 입자 제조에 사용되고 있다. 각이 진 천연 석영 파우더를 순산소 연소시키면 구형의 실리카 입자를 얻을 수 있다.

폐기물 소각 분야에서도 다이옥신의 제거, ash melting과 더불어 화염 안정성을 증가시키기 위해 순산소 연소기가 사용되고 있다. 특히 폐기물을 소각시켜 발생하는 CO 및 H<sub>2</sub> 가스는 연료전지, 가스터빈/보일러 등의 연료로 사용될 수 있다.

일본에서는 NSR (new scrap recycling process) 이라는 고철의 용해기술을 개발하여 고철의 재활용분야에 적용하기 시작했으며 40%의 에너지저감 효과를 나타내고 있다.

### 3. 한국기계연구원의 순산소 연소시스템 개발 현황

한국기계연구원에서는 21C 프론티어 연구개발사업 이산화탄소 저감 및 처리기술개발 사업단의 지원을 받아 순산소 연소에 관한 연구를 수행 중에 있으며 최종적으로 0.4MW급 순산소 연소 발전시스템을 발전소에 적용하는데 연구개발의 목표를 두고 있다.

#### 3.1 순산소 연소기 설계

여러 가지 타입(type)의 연소기를 테스트함으로써 배출물 특성 및 화염형상을 만족시키는 최적조건의 연소기를 선정하고자 하였다. 기본 3단 연소기를 기준으로 스윙 강도 테스트, 홀 인젝션, 저속 타입, 슬릿 버너에 해당하는 모델연소기를 설계, 제작한 후 성능시험을 수행하였다.

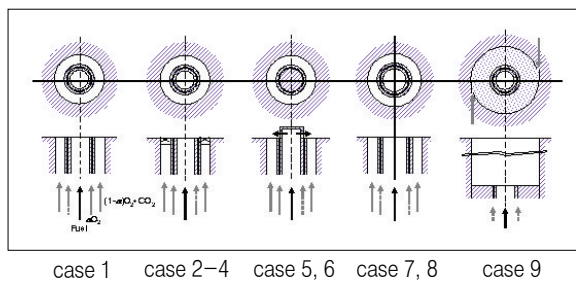


그림 8. 연소기 도면

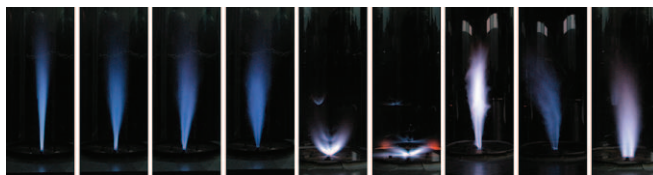


그림 9. 연소기 별 화염 이미지

### 3.2 순산소 연소 발전시스템 해석

본 과제에서 개발 중인 syngas-순산소 연소기를 적용할 수 있는 순산소 연소 발전시스템에 대한 해석을 수행하였으며, 그 결과 아래 그림 10에 나타난 폐열이용 순산소 연소 사이클을 적용 대상으로 선정하였다. 이 사이클은 발전소나 제철소에서 발생하는 폐열을 이용하여 증기를 발생시키고, 소량의 연료를 순산소 연소시킴으로써 발전량을 증가시키는 고효율 사이클로 증기사이클이나 ORC 등에 비하여 효율이 높은 장점이 있다. 그림 11은 그림 10에서 도출된 사이클을 발전소에 적용한 모형을 나타내었다.

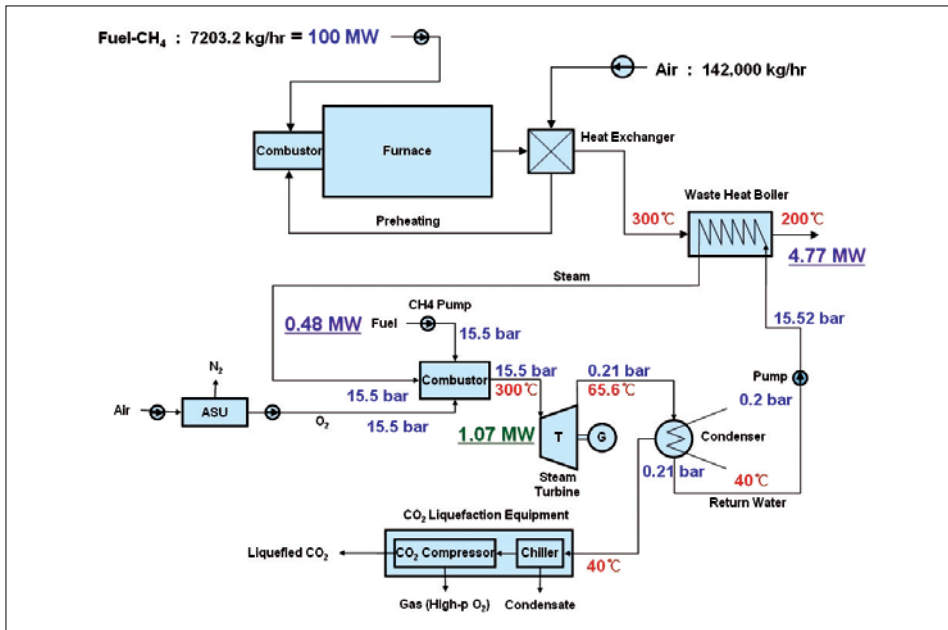


그림 10. 폐열이용 순산소 연소 발전시스템 사이클 해석결과

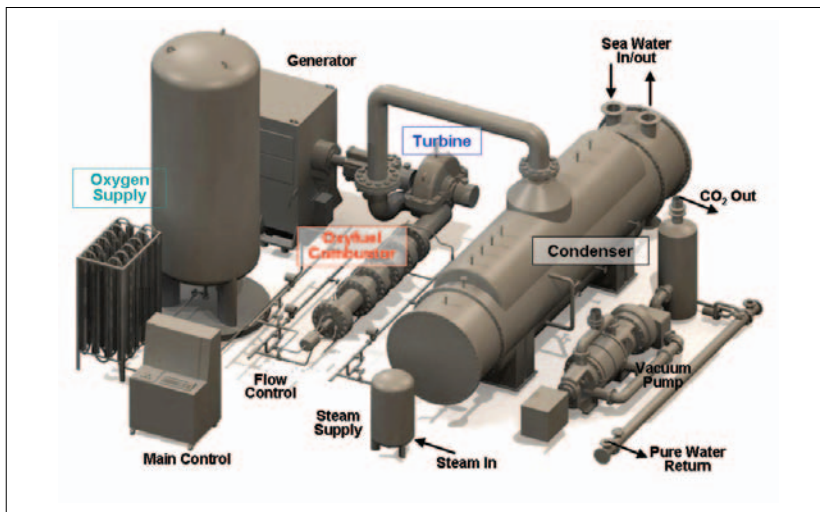


그림 11. 순산소 연소의 발전플랜트 적용 모형도

#### 4. 결론 및 향후 계획

공기연소 대신 순산소 연소를 사용하면 고농도 이산화탄소 회수가 가능할 뿐만 아니라 연소특성이 뛰어나 발열량이 낮은 난연성 연료의 연소가 용이한 장점이 있다. 따라서 기존의 강재 가열뿐만 아니라 석탄합성가스, 바이오매스 등 신재생에너지 분야에 적용이 가능한 기술이다. 그리고 높은 화염온도를 극복하기 위하여 CO<sub>2</sub> semi-closed cycle, water cycle, chemical looping cycle, CES cycle 등의 사이클이 제안되고 있다.

본 연구원에서는 수행중인 순산소 연소기의 설계기술 개발 결과와 사이클 해석 등을 이용, CO<sub>2</sub> 배출 저감을 위하여 순산소 연소 기술을 복합화력 발전 플랜트에 적용할 예정이다.

#### ❖ 참고 문헌

- [1] <http://www.ipcc.ch>
- [2] <http://www.ieagreen.org.uk>
- [3] Delabroy, O. et al., "Oxycombustion for Reheat Furnaces: Major Benefits Based on ALROLLTM, a Mature Technology," Joint International Combustion Symposium—Towards Efficient Zero Emission Combustion, Vol. 2, 2001
- [4] DOE, "Carbon Dioxide Emissions from the Generation of Electric Power in the United States," July, 2000
- [5] Dijkstra, J. W. et al., "Near Zero Emission Technology for CO<sub>2</sub> Capture from Power Plants," Proceedings of GHGT-8, Trondheim, Norway, 2006
- [6] Inoue, H. et al., Research and development of methane-oxygen combustor for carbon dioxide recovery closed-cycle gas turbine, CIMAC, Hamburg, Germany, 2001
- [7] 안국영 외, "순산소 연소기술의 발전시스템에의 적용," 2006년도 대한설비공학회 동계학술대회 논문집, 81, 2006
- [8] Kvamsdal, H. M. et al., "Benchmarking of Gas-Turbine Cycles with CO<sub>2</sub> Capture," Proceedings of GHGT-7, Vancouver, Canada, 2004
- [9] Anderson, R. et al., "A Power Plant Concept Which Minimizes the Cost of Carbon Dioxide Sequestration and Eliminates the Emission of Atmospheric Pollutants," Proceedings of GHGT-4, Interlaken, Switzerland, 1988
- [10] Naqvi, R. et al., "Chemical Looping Combustion Analysis of Natural Gas Fired Power Cycle with Inherent CO<sub>2</sub>-Capture," Proceedings of GHGT-7, Vancouver, Canada, 2004
- [11] Griffin, T. et al., "Advanced zero emission gas turbine power plant," Proceedings of ASME Turbo Expo 2003, Atlanta, USA, 2003
- [12] Campanari, S., "Thermodynamic Model and Parametric Analysis of a Tubular SOFC Module," J. Power Sources, vol. 92, pp. 26, 2001

- [13] Koda, E., "Hybrid System of Oxygen Burnt Semi-closed Gas Turbine and MCFC," Proceedings of 2004 Annual Conference on GTSJ, 2004
- [14] Marine, O. et al., "High Efficiency, Zero Emission Power Generation Based on a High-Temperature Steam Cycle," Proceedings of 28th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, Clearwater, USA, 2003
- [15] Pronske, K. et al., Proceedings ASME Turbo Expo 2006, Barcelona, Spain, 2006
- [16] Stromberg, L., "CO<sub>2</sub> Free Power Plant Project: Status Oxy-Fuel Pilot Plant", Proceedings of 2nd Workshop of IEA GHG International Oxy-Combustion Network, Windsor, USA, 2007
- [17] Buhre, B. J. P. et al., "Oxy-Fuel Combustion Technology for Coal-Fired Power Generation," Prog. Energy Combust. Sci., vol. 31, pp. 283, 2005



김 한 석

- 한국기계연구원 환경기계연구본부 연료전지시스템연구팀 책임연구원
- 관심분야 : 가스터빈 연소, 연료전지 하이브리드 시스템, 연료전지 시스템
- E-mail : haskim@kimm.re.kr



안 국 영

- 한국기계연구원 환경기계연구본부 연료전지시스템연구팀 팀장 책임연구원
- 관심분야 : 연료전지 시스템, 가스터빈 연소, 연료전지 하이브리드 시스템
- E-mail : kyahn@kimm.re.kr



이 상 민

- 한국기계연구원 환경기계연구본부 연료전지시스템연구팀 선임연구원
- 관심분야 : 연료전지 시스템, 촉매연소, 연료전지 하이브리드 시스템
- E-mail : victlee@kimm.re.kr



이 영 덕

- 한국기계연구원 청정환경기계연구센터 연료전지연구팀 선임연구원
- 관심분야 : 연료전지 시스템, 연료전지 하이브리드 시스템
- E-mail : ydlee@kimm.re.kr