철강산업에서의 고온순산소 연소기술

이 글에서는 에너지 절약 및 이산화탄소 배출 대책으로 최근 들어 철강산업에 적용되기 시작하고 있는 고온순산소 연소기술(oxyfuel combustion)에 대해 소개하고자 한다.

안 국 영 / 한국기계연구원 환경기계기술연구부, 부장 e-mail : kyahn@kimm.re.kr

순산소연소는 산화제로 공기 대신 산소를 사용하는 것으로 공기연소에 비해 열효율이 크게 증가하여 연료절감이 가능하고, 또한 배가스 중 수증기를 응축함으로써 고농도의 CO_2 가스를 쉽게 회수할 수 있어 올해 발효된 기후변화협약의 대책으로 큰 주목을 받고 있다. 최근 들어 공기분리를 통한 산소제조비용 저감과 함께 철강산업, 특히 강재가열로에 그 적용처가 확장되고 있다. 순산소 연소를 강재가열로에 적용하게 되면 생산성증가, 연료량 절감 및 강재 품질향상까지 동시에 달성할 수 있다. 한편, 순산소연소를 하게 되면 이론적으로는 NOx가 원천적으로 제거되지만, 화염온도가 고온인데다 산소제조과정에서의 질소불순물 포함 및 연소실 내 소량의 공기침투 등으로 인해 NOx 발생이 상당하여, 최근 순산소 연소기 설계 시 NOx 제어기술이 가장 중요시 되고 있다.

고온순산소 연소의 특징

순산소 연소(oxyfuel combustion) 기술은 일반적인 연소기에서 공기를 산화제로 사용하는 것과 달리 산소를 공급하여 연료와 산소를 직접 연소시키는 기술로 열효율의 제고 및 고농도 CO_2 가스 회수를 동시에 실현할 수 있는 신연소 기술이다.[1,2] 다음은 이론 당량비에서 공기연소와 순산소 연소의 화학반응식을 나타낸다.

공기연소:

$$CH_4+2(O_2+3.76N_2) \Rightarrow CO_2+2H_2O+7.52N_2$$

순산소연소:

$$CH_4+2O_2 \Rightarrow CO_2+2H_2O$$

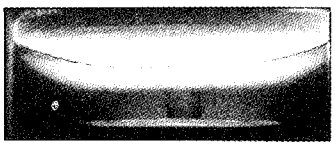
위의 반응식을 통해서 알 수 있듯이 순산소 연소를 하게 되면 산화제로 산소만 공급되므로 공기 중에 포함된 질소의 가열로 인한 불필요한 열손실을 줄일 수 있다. 이로 인해 순산소 연소 시 화염온도가 급격히 상승할 뿐만 아니라 에너지 효율도 크게 증가한다. 또한 배가스 성분이 상대적으로 복사율이 높은 CO_2와 수증기로만 구성되기 때문에 고온의 화염으로부터 기체복사량이 크게 증가하여 열전달 효율을 더욱 증가시킬 수도 있다. 순산소 연소인 경우 연소 배가스 중에서 CO_2 가스를 간단한 응축시스템을 이용하여 수분을 제거하면 고농도의 CO_2를 회수할 수 있게 되는 장점을 가지고 있다. 따라서 순산소연소는 에너지 효율의 증가에 따라 연료량을 절약하고 고농도 CO_2 회수비용을 저감함으로써 기후변화협약에 따른 이산화탄소 규제에 대한 능동적이고 적극적인 대처방안이 될 수 있다. 한편 연소기로 질소가 공급되지 않기 때문에 NOx 발생도 미연에 방지하여 이론적으로는 NOx 배출을 완전하게 제어할 수 있다.(실제로는 순산소연소를 하더라도 NOx가 발생하게 된다. 이 부분에 대해서는 추후 설명하도록 하겠다)

표 1은 연료로 메탄을 사용하는 경우 공기연소와 순산소연소 시 연소특성의 차이를 도표화 한 것이다.

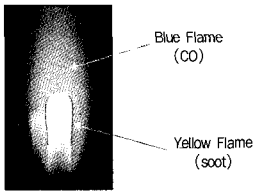
앞서 설명한 바와 같이 순산소 연소를 하게 되면 단열화염온도의 증가 및 배가스 체적의 감소로 인해 에너지 효율이 크게 증가한다. 이와 더불어 가연한계가 확장되고 화염전파속도가 10배 이상 증가하기 때문에 화염 안정성이 공기연소에 비해 크게 향상될 것으로 예측된다. 화염안정성의 증가는 공기연소에서 화염 날림이 되는 조건들이 안정되게 부착될 수 있으

표 1 연료로 메탄, 산화제로 공기와 산소를 사용했을 때 연소 특성 비교

	공기연소	고온순산소연소	특 징
가연한계 (Flammability Limit)	7~15 %	5~50 %	화염안정성 (Flame Stability)
화염전파속도 [cm/s] (Laminar Burning Velocity)	30	390	
단열화염온도 [K] (Adiabatic Flame Temperature)	2200	3050	고에너지효율 (Energy Efficiency)
배기가스 체적비 (Flue Gas Volume)	3.5	1	



(a) 메탄-순산소 대향류 확산화염 (by Kennedy et. al.[3])



(b) 메탄-순산소 동축류 확산화염

그림 1 순산소 연소의 화염 형태

순산소연소는 가연한계의 확장과 화염전파속도를 증가시켜 화염 안정성을 크게 향상시킨다. 또한 화염온도의 증가와 배기가스량의 감소로 인해 에너지 효율도 크게 증가된다. 그러나 고온특성으로 인해 재료의 내구성이 문제될 수 있으므로 새로운 재료 및 냉각디자인, 연소기 개발을 필요로 하며, 고온연소에 수반되는 배출물 증가를 억제하는 방안이 필수적이다.

므로 일반적으로 공기버너에서 사용되는 선회기(swirler) 혹은 보염기(bluff body) 등 안정화를 위한 부가장치의 사용이 불필요하게 된다. 한편 그림 1에서 보다시피 일반적인 순산소 확산화염은 CO의 연소영역이 따로 존재하는 2중 화염구조를 갖게 된다. 이러한 상이한 화염구조 및 화염안정성의 급격한 향상 등을 고려했을 때 순산소 연소기는 기존의 공기연소기와는 설계조건이 달라져야 한다. 하지만 기초연소특성 데이터들을 제외하면 순산소 연소에 대한 정보는 연구결과가 많지 않은 데다 비공개 자료들이 대부분이므로 자료취득이 매우 제한적인 실정이기 때문에, 향후 활발한 연구를 요하고 있다.

이러한 장점들에도 불구하고 순산소연소가 적용되지 못했던 이유는 산소제조 비용 때문에 경제적으로 타당성이 떨어지고, 또한 화염의 온도가 높아 노즐 등 연소기가 손상되는 경우가 발생하였기 때문이다. 하지만 최근 들어 PSA(Pressure Swing Adsorption), ITM(Ion Transport Membrane) 기법 등 공기분리를 통한 산소제조기술의 발달로 인해 제조비용이 저감되고 있어 기후변화협약의 발효와 더불어 산소연소기술의 적용이 중요시되고 있다.

고온순산소 연소기술 기술개발 현황

순산소 연소기술은 유리용해, 비철금속용해 및 철강가열공정용 에너지다소비 고온 열설비에 적용을 목적으로 선진국(미국, 프랑스, 스웨덴, 일본)에서는 Air Liquide, Air Products, Praxair, Linde Gas, AGA 및 Nippon Sanso 사 등 대형 가스제조 전문회사를 주축으로 개발되고 있다. 개발 초기에는 열설비 조업에 요구되는 고온 분위기 제공을 위하여 연소기 기술을 중심으로 개발되어 왔으며, 고비용 산소제조단가로 인한 경제성 측면에서의 불리함으로 인하여 제한적으로 적용되어 왔다. 그러나 최근에는 비교적 경제성 있는 저가 산소제조기술의 상용화로, 고온 열공정에서의 CO_2 및 NOx 저감과 생산성 향상을 동시에 만족할 수 있는 열설비 적용 및 운전기술 등 시스템 최적화 기술 개발에 역점을 두어 연구가 진행되고 있다. 고온순산소 연소기술의 적용처를 정리하면 다음과 같다.

유리용해로

○ 순산소연소는 1980년대 초반 대표적인 유리제

조 회사인 Corning(USA)에 의해 고온을 필요로하는 유리용해로에 부분적으로 적용되기 시작하여 현재 널리 사용되고 있다. 최근들어 MAXON, Praxair 등에서는 유리용해로용 저 NOx 순산소연소기를 개발, 제작하고 있다. 일본에서는 1990년대 초 Nippon Sanso 회사에서 순산소 연소를 이용한 최초의 유리용해로를 개발한 이후, 에너지 절약과 NOx 저감이 가능하여 현재 70% 이상이 순산소 용해로를 사용하고 있다.

산업용 보일러

○ 보일러 효율을 증가시키는 방안으로 순산소 연소가 적용되고 있다. Canada의 CANMET에서는 보일러 연소실 분위기 온도를 적정수준으로 유지하기 위하여 이산화탄소를 재순환(FGR : Flue Gas Recirculation)시키는 시스템을 적용하였으며, Praxair에서도 BP, Alstom Power (USA) 사와 더불어 순산소 연소기술을 보일러 시스템에 적용시키고 있다.

기타

○ Steel scrap 용해용 EAF dust의 처리를 위해 reduced slag과 함께 용해시켜 보도블럭으로 재활용하는 데에 순산소 연소기술이 적용되고 있다. 추가로 발생하는 2차 dust는 아연의 농도가 크게 높아서 아연 재료로 재활용되고 있다.

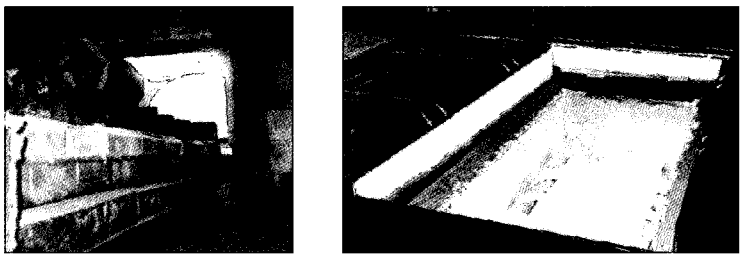
○ 순산소 연소기술은 반도체 충전제로 사용하는 구형의 실리카 입자 제조에 사용되고 있다. 각이 진 천연 석영 파우더를 순산소 연소시키면 구형의 실리카 입자를 발생시킬 수 있다.

○ 폐기물 소각 분야에서도 다이옥신의 제거, ash melting과 더불어 화염 안정성을 증가시키기 위해 순산소 연소기가 사용되고 있다. 특히 폐기물을 소각시켜 발생하는 CO 및 H_2가스는 연료전지, 가스터빈/보일러 등의 연료로 사용되고 있다.

○ 일본에서는 NSR(New Scrap Recycling Process)이라는 고철의 용해기술을 개발하여 고철의 재활용분야에 적용하기 시작했으며 40%의 에너지저감효과를 나타내고 있다.

철강산업에의 적용 예

철강산업에서는 생산성을 향상시키는 동시에 에너지 효율 증가 및 배출물을 감소시키는 기술 개발을 가장 큰 목표로 하고 있다. 이러한 목적을 충족시키기 위하여 특히 최근 들어 강재 가열로(steel reheating furnace)에 순산소 연소를 적용하는 분야가 많이 연구되고 있다.



(a) car-bottom형 로(Bohler Udderholm, Hagfors, Sweden)　(b) pit형 로(Avesta Polarit steel, Sweden)

그림 2 순산소연소를 적용한 강재가열로 시스템

스웨덴, 독일 가스회사인 AGA-Linde 가스 회사에서는 그림 2와 같이 car bottom, pit, box, roller hearth type 등 37개의 다양한 형태의 가열로 설비에 순산소 연소기술을 적용하여 사용하고 있다(2001년 현재).[4] 이들 회사에서는 순산소 연소를 통해서 열설비 생산능력을 5~20% 향상시키고, 가열시간을 25~50% 감소시키며, 연료 사용량은 45~50% 정도 감소시킨 실적을 제시하고 있다. 공기 침투에 의한 NOx 증가 문제를 해결하기 위하여 배기가스 재순환, 저 과잉공기비 하에서 연소, 다단연소 및 로 내부의 압력을 증가시켜 역류를

막는 방법들이 사용되고 있다. 한편 순산소 연소로 인해 강재표면에 품질이 좋은 oxide layer가 형성되는 부가적인 장점도 발생하였다. 하지만 이러한 layer는 특성상 에너지 흡수 효율을 떨어뜨려 에너지 효율 향상을 방해하기도 한다.

프랑스의 Air Liquide 사에서는 강재의 가열과

철강산업에서는 생산성을 향상시키는 동시에 에너지 효율 증가 및 배출물을 감소시키는 기술 개발을 가장 큰 목표로 하고 있다. 이러한 목적을 충족시키기 위하여 특히 최근들어 강재 가열로에 순산소 연소를 적용하는 분야가 많이 연구되고 있다.

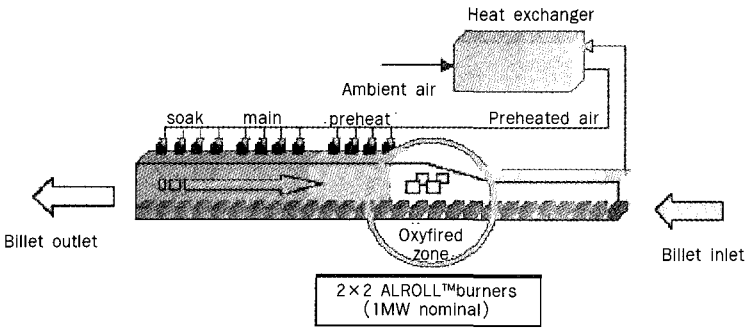


그림 3 ALROLL 버너의 강재가열로 적용 예(L.M.E, France)

정이 생산라인에서 bottleneck이 되고 있다는 점에 착안하여 순산소연소기술의 적용을 통해서 가열시간의 감소와 동시에 효율향상을 꾀하였다.[5] 기존에는 피열물로의 전열효율을 향상시키기 위해서 단순히 로를 길게 만들거나 FGR 및 재생버너를 설치하는 방법이 고안되었지만, 장치비 부담 및 공간적인 제약이 많았다. Air Liquide는 긴 화염을 발생시켜 온도를 균일하게 하는 ALROLLTM이라는 산소버너를 개발하여 가열로의 입구 부분에 사용되던 공기버너 대신 순산소버너를 설치하여 가열 시간을 단축하였고, 강재가 고온에서 머무르는 시간이 줄어들기 때문에 표면부식현상도 많이 감소하는 효과를 확인하였다. Air Liquide의 기술은 bar 생산업체인 LME(Lamines Marchands Europeens, France)에 설치하여 20% 생산성 향상을 가져왔으며, steel wire 생산업체인 SAM Neuves Maisons(RIVA Groupe, France), Strip coil 생산업체인 SOLLAC Strasbourg(USINOR Group, France) 등에도 설치 운전되고 있다.

한편, 순산소를 이용한 Praxair의 DOC (Dilute Oxygen Combustion) 기술은 Bethlehem Steel Corp. (Indiana, USA)의 Burns Harbor Division의 강재 가열로(350 강재톤/일 용량)에도 적용되어 급격한 순환유동특성과 연소기 내에 넓게 분포하는 DOC 화염의 특성으로 인해 강재의 균일가열효과가 확인되었으며, 기술을 통해 60%의 연료절감, 60%의 NOx 감소, 94%의 입자상물질 제거 효과를 나타내고 있다.[6]

또한 철강 용해 분야에서도 순산소 연소 기술이 도입되고 있는데, 네덜란드의 NOVEM에서는 2,300 강재톤/년 (5~8 강재톤/charge) 용량의 회전식 철강용해로를 개발하여 30%의 에너지절감, 생산 단가의 20% 증가, 투자비 70%를 감소시키는 효과를 나타냈다. 이러한 순산소 철강 용해로 기술은 NIJG 사에 적용되어 기존의 용해로에서는 제작이 힘들었던 Ni-resistant cast iron 생산을 하고 있는 중이다.

순산소연소기 및 연소시스템 기술 개발

당 연구소에서는 21C프론티어연구개발사업 이산화탄소저감 및 처리기술개발사업단의 지원을 받아

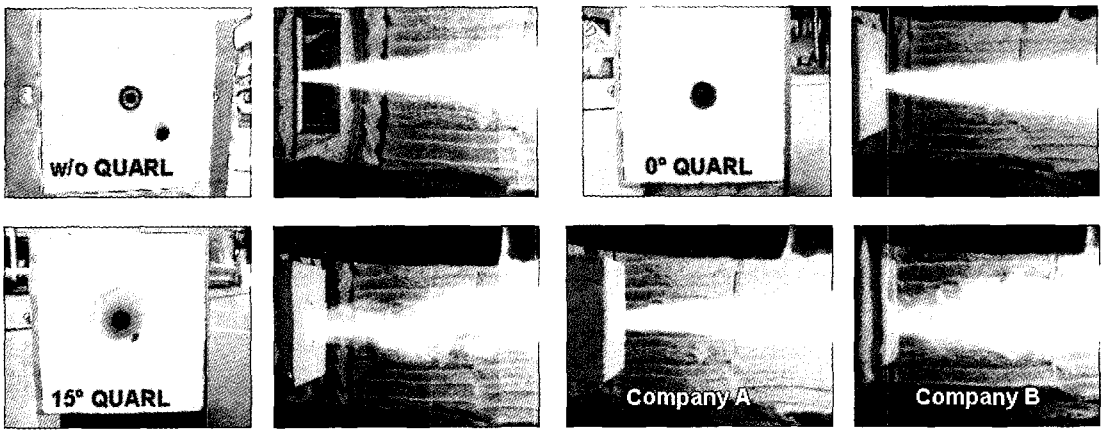


그림 4 0.3MW급 순산소 연소기 성능평가

'지능형 고온 순산소 연소시스템 기술 개발'을 목표로 기초화염실험으로부터 0.3MW급 순산소연소기 및 연소시스템 개발 및 성능시험을 수행하였다. 본 연구 과정에서 확보한 설계기술을 정리하면 다음과 같다.

- 로내재순환효과를 이용한 연소제어기술 : 기초화염실험을 통해 순산소 화염에서는 고속 분사조건에서 선회기 등 추가장치 없이도 화염안정화가 가능함을 확인하였고, 이를 이용하여 연소실 내부에 분포하는 이산화탄소와 수증기 혼합물인 연소생성가스를 유입량을 증가시킴으로써 화염의 온도를 떨어뜨리고 이로부터 NOx 등의 배출물을 저감할 수 있었다. 공기연소기에서 화염안정화 및 화염형상 제어를 위하여 사용되는 퀄은 이러한 로내재순환효과를 방해하기 때문에 상용산소연소기와는 달리 설계과정에서 제거하였다.

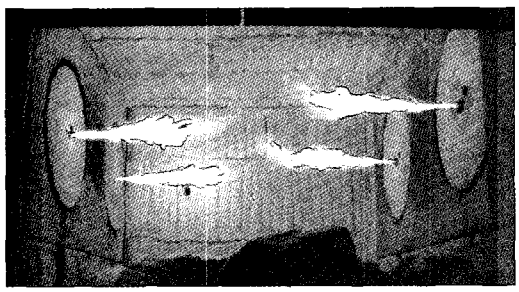


그림 5 연소로 Simulator에서 순산소연소기 성능평가

- 산소의 2단공급을 이용한 화염안정화기술 : 배기가스 재순환을 하게 되면 화염 안정성이 떨어지게 된다. 화염 안정성을 향상시키기 위하여 산화제를 2단으로 공급하는 방법을 고안하였다. 연료노즐 바로 주변의 1단 노즐에 산소 중 일부를 공급하고, 나머지 산소는 이산화탄소와 함께 2단 노즐을 통해 공급하여 연료노즐 출구에서 산소농도를 증가시켜 화염안정성을 제고하는 방법으로 실험결과 화염안정성이 증가함을 확인하였다. 상온의 이산화탄소 첨가 실험, 생성가스 발생기를 이용한 FGR 모사실험 등을 통하여 FGR 량 및 온도, 1단산소 공급비율 등을 결정하였다.
- 배기가스 재순환 시스템 실증 : 배기가스 재순환을 실증하기 위하여 송풍기를 이용한 연소시스템을 구성하였으나 고온에서는 블레이드 재질 때문에 송풍기 사용에 제한이 있고 또한 송풍기 내에서 열손실이 커져서 출구 온도가 급격하게 감소하는 문제점이 발생하였다. 이를 해결하기 위하여 송풍기 대신 고압기체를 이용하여 주변기체를 흡입할 수 있는 이젝터를 사용한 연소시스템을 구성하였다. 이젝터 시스템 사용결과 저압인 2단 공급 산소로부터 질량비 60% 이상인 배기가스를 재순환하여 연소기로 공급하는 것을 실증하였다.

이러한 설계기술들을 바탕으로 0.3MW급 시작품 순산소연소기 및 연소시스템을 설계, 제작하였다. 0.3MW급 순산소연소기는 상용연소기와 비교평가한 결과 화염안정성 및 NOx 배출 특성에서 우수한 성능을 나타냈다. 한편, 강재가열로 시뮬레이터에 개발된 순산소연소기 및 재순환 연소기를 각 4기씩 설치하여 성능평가를 수행하였다.(그림 5)

순산소연소기술의 동향 및 전망

2005년 2월 교토의정서가 발효되어 실질적인 이산화탄소 배출 규제가 시작되었다. 최종에너지 소비의 85% 이상이 화석연료의 연소과정에서 얻어지고 있으므로 연소과정에서 이산화탄소 발생량을 줄이고, 회수비용을 저감할 수 있는 순산소연소기술은 기후변화협약에 대처하기 위하여 앞으로도 활발히 연구, 개발되어야 할 것이다. 이와 함께 최근 산소제조기술이 발달하여 경제적으로도 타당성을 갖추게 됨으로써 순산소연소의 적용처는 기존의 유리용해로, 강재가열로 등에서 산업용 보일러, 폐기물 등 난연성 물질 연소, 합성/부생가스 및 중질유/경유 연소 등으로 점차 확장될 전망이다. 한편, 순산소연소를 하게 되면 화염온도가 급격히 상승하여, 공기분리과정에서 포함되는 소량의 질소 및 가열로 등 연소시스템으로 침투하는 소량의 공기에 의해서도 상당량의 NOx가 발생하게 되는데, 현재 이를 제어할 수 있는 저 NOx 연소기 및 연소시스템 개발이 가장 큰 관건이다.

[참 고 문 헌]

(1) C. E. Baukal, 2003, "Industrial Burners Handbook", CRC Press.

(2) C. E. Baukal, 1998, "Oxygen-Enhanced Combustion", CRC Press.

(3) A. Beltrame, P. Porshnev, W. Merchan-Merchan, A. Saveliev, A. Fridman, L. A. Kennedy, O. Petrova, S. Zhdanok, F. Amouri and O. Charon, 2001, "Soot and NO Formation in Methane-Oxygen Enriched Diffusion Flames", Combustion and Flame, 124, pp. 295~310.

(4) A. Brown, T. Ekman, and C.L. Axelsson, "The Development of Oxy-fuel Technology for Use in Heating Furnace Applications", 2001, Joint International Combustion Symposium-Towards Efficient Zero Emission Combustion, Vol. 1.

(5) O. Delabroy, O. Louedin, R. Tsiava, G. Le Goueffiec, and P. Bruchet, 2001, "Oxycombustion for Reheat Furnaces: Major Benefits Based on ALROLLTM, a Mature Technology", Joint International Combustion Symposium-Towards Efficient Zero Emission Combustion, Vol. 2.

(6) A. P. Martocci, J. L. Jensen, M. F. Riley, and C. L. Bermel, 2001, "Bethlehem Steel's Evaluation of a Low NOx Oxy-Fuel Burner", Joint International Combustion Symposium-Towards Efficient Zero Emission Combustion, Vol. 1.