

## 환경친화적 산업용 신연소기술

노동순<sup>†</sup>

### Environmentally Friendly Industrial Combustion Technologies

Dongsoon Noh

**Abstract.** Two novel industrial combustion technologies are introduced. High temperature air regenerative combustion for industrial heating system and oxyfuel combustion for power plant are considered as a energy saving and CO<sub>2</sub> emission reducing combustion technology. Research works are necessary to understand fundamental phenomena and to develop application technologies to industrial sector.

**Key Words :** 고온공기연소, 산소연소, 보일러, 공업로

#### 1. 서 론

산업공정의 에너지원단위 최소화는 원가절감 뿐만 아니라 설비의 최적설계에 기본적으로 고려될 요소이며, 에너지다소비 설비인 공업로에 있어서도 예외는 아니다. 고성능 공업로 설계에 있어서 친환경성 역시 고려되어야 할 요건으로 대두되고 있는 바, 설비의 고효율, 고성능화를 위해서는 공정 열원의 고온화를 통한 생산성 향상과 공업로중 연소로의 경우에는 이에 따른 질소산화물(NOx) 발생량 및 온실가스로서 주 역할을 하는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출저감기술이 요구된다. 최근 공업로 선진국인 일본과 미국을 중심으로 급속히 상용화 추세에 있는 고온공기연소(축열연소) 시스템은 향후 공업로의 고성능 청정화 기반기술로서의 역할이 예상되고 있다. 본 고에서는 제한적이긴 하나 산업용 고성능 청정연소기술 현황과 전망에 대하여 정리해 보기로 한다.

#### 2. 고온공기연소기술

열설비의 에너지절감은 폐열회수장치(열회수, 열재생)를 사용하여 가능하다. 유리용해로 및 대형 가열로

는 이러한 폐열회수장치를 이용하여 에너지절감을 유도하고 있다. 영국의 British Gas 사는 '70년대와 '80년대를 거치면서 폐열회수 및 열재생형 연소기개발에 기여한 바 크다.<sup>(1)</sup> 폐열회수겸용 연소기는 폐열회수에 의한 연소용 공기온도를 약 600°C 까지 예열하는 범위에서는 에너지절약형 연소기로서의 성능을 발휘할 수 있는 반면, 세라믹 구형체를 충전한 열재생장치를 이용하는 연소기의 경우는 연소배가스의 온도가 1300-1400°C 일 경우에 연소용 공기를 약 1000°C 까지 예열할 수 있으므로 이에 상응하는 에너지절감이 가능하다. '90년대에 들어서 일본의 Nippon Furnace Kogyo Kaisha 사는 고온열재생장치 설계최적화에 기여한 바 있다. 열관성이 작은 세라믹 하니컴 축열체를 이용한 소형 열재생기를 통해 연소용 공기를 약 1200°C 까지 예열할 수 있는 가능성을 보였고<sup>(2,3)</sup>, 따라서 이에 상응하는 가열시스템의 열효율 상승이 가능할 것으로 예상되고 있다. 고온공기연소는 영국의 Hardesty와 Weinberg에 의해 제안된 '초과엔탈피 연소'의 일종으로<sup>(4)</sup> 고온 열재생장치를 이용한 산업용 실용 연소시스템은 1993년 일본의 국가연구사업으로 착수된 바 있다.<sup>(5)</sup> Fig. 1은 열재생장치를 적용한 고온공기 연소시스템 개념도를 보여 준다.

Fig. 1 구조의 열재생 연소시스템은 연소용 공기에 열온도가 1100-1200°C 수준을 유지하는 것을 조건으로 운전된다. 2대의 연소기가 주기적으로 교대로 운전되는 방식으로, 연소가스는 정지중인 연소기에 내

<sup>†</sup>한국에너지기술연구원 신연소시스템연구센터  
E-mail: dsnoh@kier.re.kr

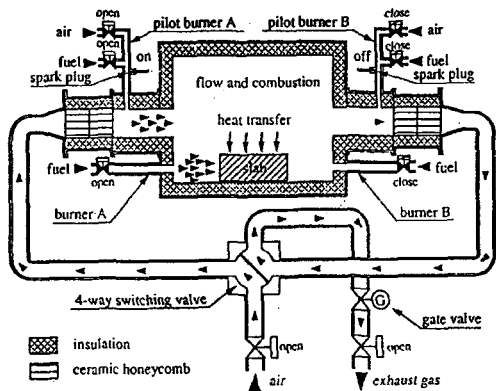


Fig. 1. 열재생장치를 이용한 연소가열시스템.

장된 축열실을 통해 배기되며, 이 과정에서 배가스 현열은 축열체에 저장되고 일정시간 경과후 교대운전이 되면 연소용 공기가 축열기를 통해 유입되어 고온으로 예열되는 것이다. 통상적으로 교대운전시간은 30-60초 정도이며, 연소부하 및 축열체 용량에 따라 조정될 수 있다. 연소실의 분위기 온도는 예열공기온도보다 50-100°C 정도 높게 운전되게 된다.

한편 고온공기연소의 에너지절약성은 인정되는 반면 고온에 따른 NOx 생성이 심각하게 대두되었다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 1990년초 일본의 동경가스는 연료직접분사(FDI:Fuel Direct Injection) 개념의 연소방식을 소개한 바 있다.<sup>(6)</sup> 이는 연료가스를 상대적으로 산소농도가 희박한 고온의 연소실 배가스에 분산적으로 직접분사하여, 화염의 온도를 낮추는 한편 고온에 의한 연소성을 이용하는 개념이다. 이러한 개념을 도입하여 Nippon Furnace에서는 고온저 NOx 연소가 가능한 최적의 연료분사방식을 개발하였으며, Fig. 1에 보인 바와 같이, 연료분사노즐과 고온공기분사노즐을 일정거리 분리배치하는 방식이다. Fig. 2는 상용의 연료직접분사식 고온공기연소시스템이며, Fig. 3은 화염사진이다.

한편 유럽국가에서는 이와는 달리 저 NOx 연소를 위한 새로운 구조의 연소기 개발에 집중한 바 있다. 1992년 독일에서는 FLOX(Flameless Oxidation)<sup>(7)</sup> 연소기를 개발하였으며, 이는 일련의 연소용 공기 분사노즐을 이용하여 연료가스와 혼합되기 전에 고온의 배가스가 연소용 공기에 유입되도록 하는 구조로서, 연소용 공기중의 산소농도를 저하시켜 화염의 국부적 고온영역형성을 억제하여 저 NOx화를 구현코자 한 것이다. 네델란드에 소재한 IFRF(International Flame

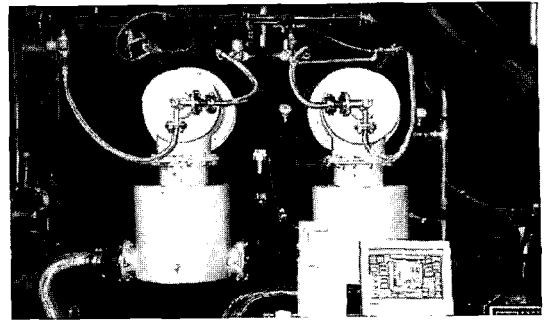


Fig. 2. 직접분사식 고온공기연소시스템.

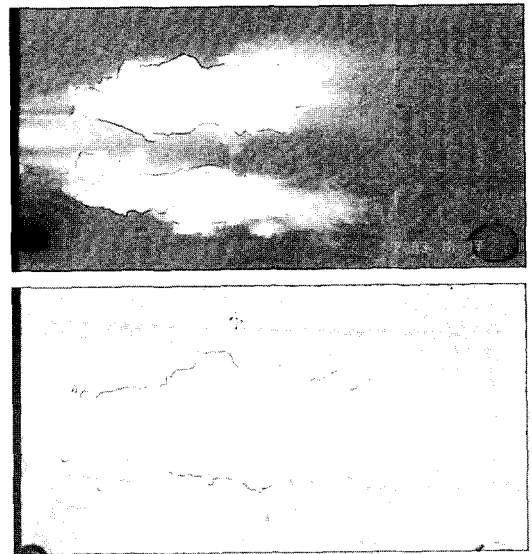


Fig. 3. 고온공기연소화염.

Research Foundation)에서는 SCALING 400 프로그램의 일환으로 일련의 저 NOx 연소기 개발을 수행하였다.<sup>(8)</sup> 그 대표적인 구조는 중앙의 연료가스 노즐주위로 2차 연료노즐을 구성하고 그 중간에 연소배가스와 연소용 공기노즐을 위치한 구조이다. 정격용량의 80% 또는 100%의 연료를 각 노즐을 통해 선택적으로 분사함으로써 매우 안정적인 저 NOx 연소를 구현할 수 있었으며, NOx 발생량은 연소용 공기에열온도와 무관하고 연소특성은 FDI 연소와 매우 흡사함을 보였다. 특히 연소용량 12MW인 연소기에 대한 실험결과, 화염복사량이 일반의 연소방식에 비하여 약 20% 향상되는 결과를 얻었으며 이는 화염분산에 따른 화염체적이 증가된 데에 기인하는 것으로 밝혀졌다. SCALING 400 프로그램의 요지는 저 산소농도 분위기 배가스에 연료분사의 최적화이다.<sup>(9)</sup> 연료분사

노즐의 위치, 직경 및 운동량 등은 분사연료가 1차적으로 고온의 연소가스와 혼합되고 2차적으로 연소용공기와 혼합되도록 하는 구조설계이다. 그 외에 캐나다의 가스기술연구소(CGRI: Canadian Gas Research Institute) 역시 연료/공기의 분산분사에 의한 저 NOx 연소기 개발을 수행중에 있다.<sup>(10)</sup>

### 3. 산소연소기술

산소연소의 특징은 고온화염을 얻을 수 있고, 배가스량이 작아 배기손실을 최소화할 수 있고, 배가스처리가 용이하며 순산소를 이용할 경우 질소성분이 존재하지 않으므로 NOx 생성을 근본적으로 배제할 수 있으며, 상대적으로 CO<sub>2</sub> 및 H<sub>2</sub>O의 분압이 높아서 복사전열효과가 크다는데 있다. 현재, 산소연소는 유리용해로, 알루미늄 용해로 등 대형 연소로와 주철용 로타리식 용해로 등 세계적으로 약 300기 이상에 적용되고 있으며, 향후 각종 폐기물 용융소각 및 발전용 보일러 등에 적용이 유망시 되고 있다.

Fig. 4는 유리용해로용 산소연소화염이다.

Table 1은 유리용해로의 산소연소 조건을 비교한 것

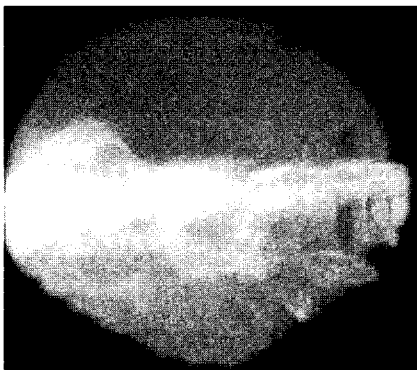


Fig. 4. 산소연소화염.

Table 1. NOx 특성(End-fire 형 유리용해로)

구 분	공기연소	산소연소	산소연소	
처리량	ton/day	62.7	46.8	75.8
연료량	10 <sup>4</sup> kcal/h	343	224	345
배가스량	Nm <sup>3</sup> /h	5,663	1,500	1,869
분위기	N <sub>2</sub> (% wet)	72	38	30
	H <sub>2</sub> O (% wet)	14	36	43
	CO <sub>2</sub> (% wet)	9	22	26
	O <sub>2</sub> (% wet)	5	4	1
	NOx (kg/h)	25.6	2.6	2.95

으로 종래의 고온예열공기를 사용한 경우에 비하여 NOx를 약 1/10로 저감할 수 있음을 보여준다. 그러나 산소연소는 질소성분이 함유될 경우에는 다량의 NOx를 생성시킬 수 있는 단점이 있다. 즉, 산소의 순도, 연료중의 질소, 로내 침입공기 및 연료분무에 사용되는 공기중의 질소와 피열물중의 질소 등이 그것이다.

연소분위기중에 질소성분함유를 전제로 한 연료직접분사기술은 산소연소에 있어서도 그 효과를 기대할 수 있다. 즉, 중앙에 연료노즐을 설치하고 원주방향으로 주위에 산소노즐을 설치한 구조의 연소기에 대한 NOx 저감효과는 상당한 것으로 보고되었다. 즉, 기존의 노즐믹싱형 산소연소버너에 비하여 약 1/4 이하인 1 g/m<sup>3</sup> (공기연소시 94ppm, 11% O<sub>2</sub>에 상당)으로 NOx 생성을 대폭 저감할 수 있다.

철강 및 유리공업에서 산소를 사용한 가스/오일연료 연소법은 열효율 향상이 가능하다는 측면에서 점차 그 효용성이 인정되고 있다. 산소연소기술은 유리용해공정에서 70%의 용해능력향상, 60%의 에너지절감 및 NOx 저감이 가능한 장점을 갖고 있다. 최근에 이러한 장점을 고려하여 상업용 보일러에의 산소연소 기술 적용개발이 확대되고 있다.

일본은 JSIM(Japan Society of Industrial Machinery Manufacturers) 연구개발사업<sup>(11)</sup>의 일환으로 배가스 응축형 순산소 보일러 기술개발에 착수한 바 있다. 사업의 목표는 고성능 고효율 저공해 보일러기술개발에 있다. 열효율 향상을 위하여 배가스 온도를 50°C 까지 낮추는 응축형 열교환기술을 도입하고, 배가스량 저감, 전열효율향상 및 소형화를 위한 산소연소기술을 도입하고자 하였다. 천연가스를 연료로 하는 경우, 산소연소에 의해 보일러 열효율은 95%로 공기를 사용한 경우 78%보다 약 17%의 효율향상이 있었고, 배가스 응축형 열교환기를 사용한 경우 열효율은 저위발열량 기준으로 약 105%이었다. 배가스중의 CO<sub>2</sub> 농도는 약 69%이었고, 배가스량은 공기연소의 경우에 비하여 약 1/8 수준이었다.

비록 산소연소 및 응축형 열교환을 통한 에너지절감 및 효율향상은 가능하나, 산소제조단가 및 응축수에 의한 부식등의 문제로 단기간내에 실용화는 기대하기 어려울 것으로 전망된다.

최근 국제적으로 관심이 되고 있는 온실가스저감과 관련한 기후변화협약에 대처하기 위한 기술적 방안으로 검토가 될 경우에는 기술의 실용화도 가능할 것으로 판단하고 있다. Fig. 5는 CO<sub>2</sub> 재순환형 산소연소

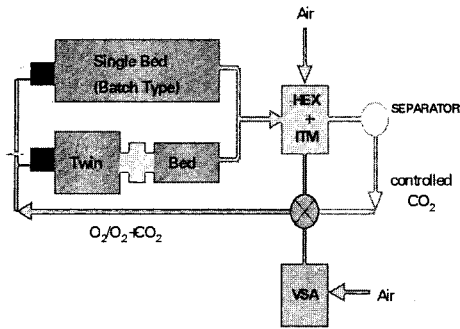


Fig. 5. CO<sub>2</sub> 재순환형 산소연소기술.

가열시스템 구성도이다. 연소용 산화제로 산소를 사용할 경우 화염온도의 상승이 예상되며 이에 설비 안정적 운전 측면에서 화염온도의 제어가 요구될 수 있다. 즉 산소연소시 CO<sub>2</sub> 농도가 통상의 공기연소에 비해 상대적으로 높은 배가스를 재순환시켜 연소용 산화제 중의 산소농도를 제어함과 동시에 반복 재순환에 의해 최종 배가스중의 CO<sub>2</sub> 농도를 고농도화 함으로써 분리 회수의 경제성을 향상시키는 연소기술로서 미국의 DOE 산하 NETL(National Energy Technology Laboratory)에서 발전용 보일러용 연소기술로 실용화 연구가 진행중이다.<sup>(12)</sup>

산소연소기술의 상용화를 위해서 아직까지는 반복적인 실험과정을 거쳐 설계 개발되고 있으며, 이는 실기 규모의 연소화염에 대한 실험 데이터 부족과 설계를 위해 사용되는 해석용 상용프로그램의 부적확성 때문이다. 기술의 잠재성과 개발상의 현실적 문제들을 해결하기 위하여 다국간 공동연구개발 콘소시움이 결성되었다. 일명 OXYFLAME project라 명명된 이 사업은 산소연소기의 상세설계수법과 예측을 위한 프로그램개발을 목표로 AGA, Air Liquid, Gaz de France, Hoogovens Corporate Services B.V., Linde AG, Nippon Sanso Corp., Tokyo Gas Co. Ltd. 와 IFRF 등이 참여하고 있다. 사업목표는 다음의 세가지로 분류되고 있다.

- (a) 순산소 연소화염 측정기술 개발
- (b) 1MW급 연소기 연소특성/성능 도출
- (c) 순산소 연소해석 프로그램 개발 및 평가

이중에서 (b) 및 (c)항목에 대해서는 대외비로 되어 있는 실정이나 (a) 항목에 대해서는 이미 발표된 바 있다.<sup>(13)</sup>

#### 4. 맺음말

고온공기연소기술은 연소용 공기의 고온예열과 전열량의 증대를 통한 20-30%의 에너지절감이 가능하다는 점에서 향후 실용화가 예상되는 기술이다. 이 기술을 적용하는 연소로는 흡사 well-stirred reactor와 같이 공간내 온도균일화가 가능한 특징이 있으며, 기술적 보완이 완료되면 에너지소비절감과 동시에 CO<sub>2</sub>, CO 및 NO<sub>x</sub> 저감이 확실시 되는 차세대 연소 기술이다. 한편 본 기술은 연소로에 적용을 지향하여 개발이 착수되었으며, 현재 가스화 공정에 적용을 위한 기술개발이 부분적으로 수행되고 있다.<sup>(14)</sup>

기술의 실용화 개발은 지속되는 반면 현상규명을 위한 기초적 연구는 다소 미흡한 점이 있으며 향후 다음과 같은 내용에 대한 연구가 보완될 필요가 있다.

- (a) 연료/산화제 분사위치의 최적화
- (b) 산소희박 분위기에서의 연소반응기구
- (c) 무화염 산화반응의 안정범위
- (d) 화염감시 및 제어시스템

한편 산소연소기술은 다수의 장점을 갖고 있으나, 산소제조단가 및 응축수에 의한 부식등의 문제로 실용화가 제한적일 수 밖에 없을 것으로 판단된다. 그러나 향후 기후변화협약과 관련한 온실가스인 이산화탄소저감이 절실히 요구되는 시점에서는 기술의 경제성과 설비의 환경성과의 비교우위에 의하여 기술의 상용화가 예상되고 있다.

이상의 연소기술은 화석연료가 주 에너지원으로 사용되는 한 미래 환경친화적이고 경제성 있는 산업용 연소기술로 인식되어 실용화 연구가 선진국을 중심으로 꾸준히 지속되고 있으며, 연소현상 규명을 위한 다양한 기초적 연구가 병행되고 있다.

#### 참고문헌

- 1) Masters J., Webb R. J., Davies R. M., 1979, "The Use of Modelling Techniques in the Design and Application of Recuperative Burners", *J. Inst. Energy*, pp. 196-204.
- 2) Tanaka R., Kishimoto K. and Hasegawa T., 1994, "High Efficiency Heat Transfer Method with Use of High Temperature Pre-Heated Air and Gas Recirculation", *Combust Sci and Technology*, Vol. 1, No.

- 4.
- 3) Kastuki M. and Hasegawa T., 1998, "The Science and Technology of Combustion Highly Preheated Air", *The Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute.
- 4) Hardesty D. R. and Weinberg F. J., 1974, "Burners Producing Large Excess Enthalpies", *Combust. Sci. and Technology*, Vol.8, pp. 201-214.
- 5) Tanigawa T., Hasegawa T. and Morita M., 1998, "The Output of Key Technologies in the National Project-High Performance Industrial Furnace Development Project", *Proceedings of the 12<sup>th</sup> IFRF Members Conference*, The Netherlands.
- 6) Nakamachi I., Yasuzawa K., Miyahara T. and Nagata T., 1990, "Apparatus or Method for Carrying out Combustion in a Furnace". *US Patent No.4,945, 841*.
- 7) Wunning J. A. and Wunning J. G., 1992, "Brenner fur flammenlose Oxidation mit geringer NO-Bildung auch bei hochster Luftvorwarming", *GasWarme International* 41, Heft 10, 438.
- 8) Weber R., Sayre A. N., Dugue J. and Horsman H., 1993, "Scaling Characteristics of Aerodynamics and Low-NOx Properties of Industrial Natural Gas Burners-The Scaling 400 Study", Results of the 12 MW burner test. *IFRF Doc. No. F 40/y/9*.
- 9) Weber R., 1996, "Scaling Characteristics of Aerodynamics, Heat Transfer and Pollutant Emissions in Industrial Flames", *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 3343-3354.
- 10) Sobiesiak A., Rahbar S., Becker H. A. 1998, "Performance Characteristics of the New Low-NOx CGRI Burner for Use with High Air Preheat", *Combustion and Flame*, 115:93-125.
- 11) Koshiji T., 1998, "High Performance Boiler and Energy Saving", Paper IV-2in *Documents of a Meeting on Development of High Performance Industrial Furnace*, Tokyo.
- 12) Klara S. M., Hyman D. and Thompson D., 2003, "Advanced Oxyfuel Boilers and Process Heaters for Cost Effective CO<sub>2</sub> Capture and Sequestration", *Project Facts*, NETL, DOE, USA.
- 13) Lallemand N. and Weber R., 1999 Measuring Instruments for Studying Oxy-Natural Gas Flames. *Journal of the Institute of Energy*.
- 14) Suzukawa Y., Mori I., Sugiyama S. and Hasegawa T., 1998, "Development and Application of Direct Fired Regenerative Burner Heating System", *Proceedings of the JFRC/AERC Symposium*.