

# 축열버너의 연소특성에 대한 실험적 연구

양제복\*, 김원배\*, 노동순\*

## An Experimental Study on Combustion Characteristics of Regenerative Gas Burner

J. B. Yang\*, W. B. Kim\*, D. S. Noh\*

**Key Words :** High temperature air combustion, Regenerative burner, NOx, Fuel direct injection, Internal gas recirculation, Gas nozzle

### Abstract

Regenerative burner is a product of new combustion technology for realizing higher thermal efficiency and lower emissions, moreover utilizing very high preheated air temperature up to 1,000°C. In this study the experimental study was carried out to find out a combustion characteristics breaking the old combustion concept. From the variation of configuration of gas nozzle and hot test on the temperature distribution and NOx, CO, it was found out that the performance of regenerative burner was better than that of existing burner, mainly due to the effect of internal gas recirculation.

### 1. 서론

에너지 다소비 열설비인 공업로는 국내에는 공업화된 지역을 중심으로 약 5,000기 이상(추정) 설치되어 있으며, 이들 설비의 에너지 소비량은 국가 전체 에너지 사용량의 약 15 % 이상( '98년

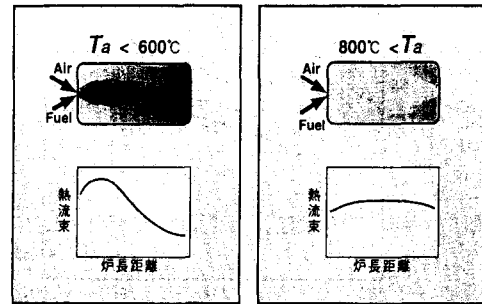
말 현재 국가 에너지 총 사용량 18,000만TOE 중 산업부문이 50%, 그 중 30%인 약 2,700만 TOE 해당)을 차지하고 있다. 한편 공업로의 효율적 이용 즉, 소기의 목적을 달성하면서 에너지소비를 최소한으로 줄이기 위하여 그 동안 산발적인 노력이 있었으나 유가의 파고에 크게 영향을 받아 큰 성과를 거두지 못하였다. 또한 이미 잘 알려진 바와 같이,

\* 한국에너지기술연구소

1992년 6월에 Rio(Brazil)에서 지구환경 summit가 개최되었으며, 여기서 CO<sub>2</sub> 삭감(즉 에너지절약)에 의한 지구환경 보호를 위한 대형 project가 기획되었고, 이에 따라 새로운 형태의 에너지절약 기술개발 program이 설정하지 않으면 안 되는 시기에 도달하였다. 지금까지의 기존 기술에 의한 에너지절약 기술을 “제 1단계의 에너지절약” 이라고 한다면 지금부터는 “제 2단계의 에너지절약”으로서 에너지절약을 환경보호와 관련하여 생각하여야 한다. 공업 선진국에서는 이미 대응하는 구체적인 기술을 연구 개발하는데 박차를 가하고 있다. 따라서 국내에서도 국가적인 차원에서 에너지절약 및 환경보호뿐 만 아니라 기업자체의 생산성향상 및 경쟁력 강화 측면에서도 기여할 수 있는 에너지경제를 이룩하는 것이 그 어느 때보다도 중요한 시기임을 인식할 필요가 있다. 이 과제에 주된 연구목적은 환경 문제의 해결책이 곧 에너지 절약기술이라는 개념 하에, 종래에는 불가능하다고 본, “1,000℃ 이상의 고온 공기를 이용한 연소기술”에 기반을 둔 것으로, 에너지의 절약은 물론, 이에 따라 지구온난화의 원인 물질인 CO<sub>2</sub> 가스를 30%이상 줄일 수 있을 뿐 아니라, NOx도 종래에 비해 50% 정도 감소시킬 수 있는 기술에 대한 내용을 기존의 연소개념을 벗어난 새로운 차원의 연소개념에서 연구하고자 한다.

고온공기를 이용한 연소기술을 시스템화한 축열버너(regenerative burner)에 대한 연소특성을 알아보고자 작은 용량의 시제품을 설계, 제작하여 그 성능을 실험적으로 알아보았다

## 2. 축열버너의 특성



기존 연소      고온공기 연소

Fig. 1 고온공기 연소와 기존연소와의 차이점

축열버너는 대부분의 공업로에 적용이 가능한 범용성 있는 고성능 에너지절약 시스템으로 약 15년 전에 소형 유리용해로에의 적용을 위하여 영국에서 개발되어, 영국 및 미국에서 철강 및 알루미늄업계를 중심으로 보급 발전되었다. 이 기술은 기존의 열교환 기술에서는 얻을 수 없었던 약 30%이상의 높은 에너지절약성을 보이고 있다. 특히, 고온 공기를 이용하므로 연소시의 화염의 특징은 화염의 부피가 크나 농도나 온도기울기가 적으며 휘도가 있는 투명한 색깔을 띠며 연소지연화염의 형태로 토출 노즐에서 약간 떨어진 부상되는 화염을 가지고 있다. 또한 고온공기를 이용하는 경우에는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 기존의 국부 가열영역이 없어지고 로내 온도분포가 매우 균일하게 이뤄지며 따라서 전열효과도 매우 상승하는 작용이 있어 이 기술을 적용하는 공업로의 크기도 줄어드는 이점을 가지고 있다<sup>4,5)</sup>.

### 2.1. 시스템의 구성과 작동원리<sup>7,8)</sup>

축열버너의 구성은 Fig. 2와 같다. 시스템은 버너 2대, 축열/재생기, 절환밸브, 연소용 공기 송풍기, 배기팬 및 제어장치로 구성된다. 축열/재생기는 축열체가

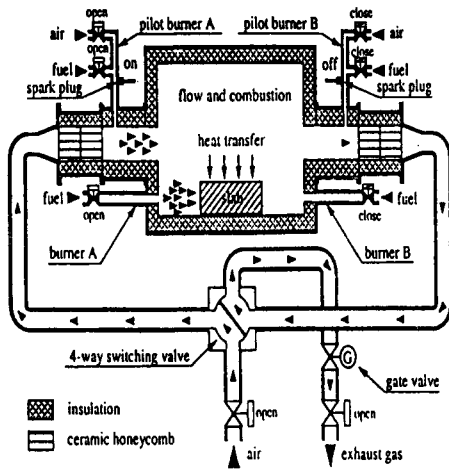


Fig. 2 축열 연소 시스템

충진된 단열상자로 버너 가까이 부착하고 이것을 통해 고온 배가스와 연소용 공기가 교대로 통과하게 한다. 축열체는 입경이 작은 세라믹재질로 기존의 레큐퍼레이터의 약점이었던 열충격, 열응력 및 부식에 대한 내구성 문제를 해결할 수 있다. 또한 고온의 배가스와 연소용 공기가 동일한 통로를 통해 직접열교환함으로써 축열체 표면적이 클수록 전열면적 증가하여 열교환 효율이 증가하여 연소용 공기온도를 로내온도의 80~90%까지 예열할 수 있다. 가스 및 공기가 A버너에 공급되어 로내에서 연소를 수행한 후 B버너의 축열/재생기를 통해 배기된다. 이때 배가스 현열의 대부분을 축열체에 전달하고 배기되며, 출구 배가스온도는 약 200℃ 이하가 된다. 축열체가 충분히 가열되면 절환시스템이 작오하여 연소용공기는 B 버너의 축열/재생기를 통해 공급되는 동안 축열체로부터 열을 공급받아 고온예열공기로 되어 연료와 혼합연소를 수행한 후 배가스는 A 버너의 축열/재생기를 통해 배출된다. 이때 각각의 버너가 연소운전되는 시간은

너용량, 축열체 형상 및 충전량 또는 요구예열온도 등에 따라 결정될 수 있다. 이러한 축열연소기술은 이미 수십년 전에 대형 철강 또는 유리용해로에 적용된 것이 사실이며, 에너지절약 보다는 고온의 로온을 유지하기 위한 목적으로 사용되었다. 최근의 축열연소기술은 축열체의 소형화 및 축열/재생기의 소형화를 통해 일반의 공업로에의 적용을 가능케 했다는 것이 장점이다. 여기서는 축열체로 세라믹 하니컴을 사용하였고 그러나 영국에서 많이 사용되는 직경 20~50mm의 알루미늄나 불이며 다양한 크기의 알루미늄나 불을 혼합 사용할 수 있다. 또 Nugget이라 칭하는 20~30mm의 쇠석형태를 한 알루미늄나 전주품은 미국에서 주로 사용하고 있다. Nugget는 부정형으로 단위 체적당 표면적이 커서 불형태에 비하여 20~30% 작은 체적에서도 동일한 성능을 나타내는 장점이 있다. 근본적으로 지금까지 실용화된 축열버너의 원리는 거의 비슷하고 다만 축열체의 재료와 모양에 차이가 있을 뿐이다. 이러한 세라믹재질은 열 및 온도변화에 강하고 교환이 간단하기 때문에 분진이 함유된 배가스 조건에 대해서도 사용이 가능하다. 축열체는 단열캐스타블로 처리된 축열/재생기 내에 수십 cm정도의 깊이로 충전되어 실제 운전시 약 1000℃에 달하는 온도구배를 갖게 된다. 그러나 운전절환시간이 짧은 경우에는 축열체 자체의 온도변동은 그다지 크지 않은 특징을 보여준다.

축열연소기에는 위에서 서술한 에너지절약성외에 다음의 2가지 우수한 특징을 가지고 있다<sup>1,2,3,4)</sup>.

- (1) 로내온도분포의 개선(로온의 균일화) 일반적일 일방분사식 가열로에서는 버

너로부터 일정한 배가스 유동이 형성되기 때문에 온도분포개선을 위한 자유도가 낮다. 이에 비하여 버너로부터 배기에 이르는 사이의 온도구배를 절환연소에 의해 강제로 절환하는 축열시스템은 로내 온도분포를 개선할 수 있으며, 다수의 버너를 운전할 경우에는 시퀀스를 이용하여 ON-OFF조합운전도 가능하다.

(2) 필터링 기능

축열연소버너의 축열체 표면은 로내로부터 배출되는 각종 연기(분진)를 정제하는 기능이 있어 배가스 후처리를 위한 설비 부담을 경감시키는 장점이 있다. 예를 들면 알루미늄 용해로 적용시 배출되는 연기(분진)류의 약 90%를 축열체 입구 수 cm정도에서 정제하는 효과가 있다.

3. 축열버너의 연소실험

3.1 실험장치 구성 및 시제품 설계제작

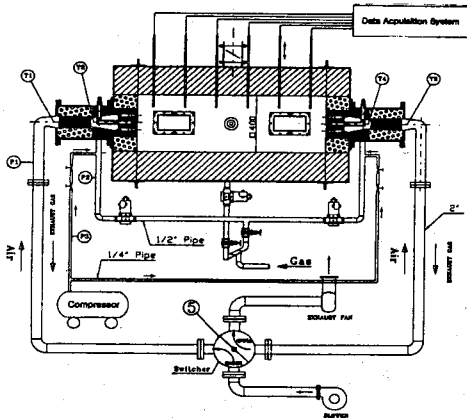


Fig. 3 축열버너 실험장치

고온공기를 이용한 축열버너의 연소특성을 실험하기 위하여 Fig. 3과 같은 실험장치를 설계제작 하였다. 실험장치의 사양을 설명하면 다음과 같다.

1. 여사시허리의 크기 : 800 mm x 1200 mm

2. 최고 실험온도 : 1400℃
3. 용 량 : 최고 50 kW
4. 축열체 : 세라믹 허니컴(Cordierite)
5. 축열체 크기 : 직경 70mm x 길이 100mm (밀도 : 300 Cell)
6. 연소용 가스 : LNG (Hu=10,000 kcal/m<sup>3</sup>)

실제 산업현장에 적용가능한 형태인 regenerator가 내장된 regenerative burner와 이를 실험할 수 있는 연소실험장치를 설계 제작하였다. 연소 실험로의 크기는 외부케이싱을 직사각형 형태로 800 mm x 800 mm x 1600mm으로 설계하였고 6t 철판과 L 형강을 이용하여 제작하였다. 실험로의 단열은 최고 사용온도 1400℃의 세라믹 화이버를 두께 200mm 가 될 수 있도록 여러겹으로 압축해서 시공하여 유효단면의 크기가 400mm x 400mm 이고 길이가 1200mm 가 되도록 설계하였다. 실험로의 정면에서 양쪽으로는 로내의 연소상태를 관찰할 수 있도록 100 mm x 200 mm 크기의 직사각형형태인 관측구에 Quartz Plate를 설치하였고 그리고 실험로의 정면 뒷쪽에는 버너의 초기점화시부터 가스가 스스로 착화될 수 있는 온도로 로가 충분히 예열시킬 수 있도록 Pilot Burner를 설치하였다. 실험로의 상단에는 비상시 배기구로 활용할 수 있고 로압이 지나치게 높아 팬으로 로압을 낮출 수 없을 때 배기가스중의 일부를 자연배기시켜 로압을 낮출 수 있도록 배기댐퍼를 상단 중앙에 설치하였다. 로내의 온도분포를 알아보기 위하여 길이방향으로 200mm 간격으로는 R-Type Thermocouple을 수직방향으로 6개 설치하고 이를 동시에 상하 이송시킬 수 있도록 지그를 만들어 설치하였다. 실험용 축열연소버너는 실험로의 양끝 중앙에

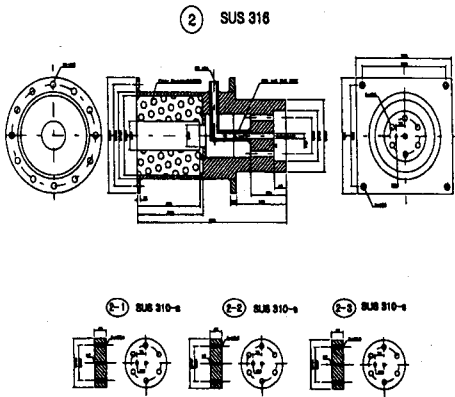


Fig. 4 실험용 가스노즐

설치되고 버너는 1개의 배관으로 연소용 공기가 들어오고 또한 배기가스가 나가야 되는데 이들 역할을 서로 동시에 해 줄 수 있는 4-Way 댐퍼 즉 절환기를 설계 제작하여 연소용 공기 Blower, 배기팬 및 2대의 축열버너와 각각 연결하여 설치하였다. 축열버너의 연소특성을 실험하기 위하여 Fig. 4와 같은 형상의 축열버너를 설계 제작하였다. 버너몸체는 원형의 공기/가스 노즐이 들어갈 수 있도록 몸체도 원형으로 설계하였고 버너의 앞부분에는 공기/가스 노즐을, 뒷부분에는 축열체인 세라믹 허니컴을 넣을 수 있도록 설계하였다.

3.2 연소실험 및 결과분석

로내직접분사 원리를 이용하여 설계, 제작된 축열버너의 연소특성, 특히 연소기의 노즐에 대한 특성을 아래와 같은 방법으로 알아보았다. 즉 적용되는 축열체에 대한 연구는 이미 다른 곳에서 수행하고 있어 이에 대한 기본적인 설계자료는 그 곳에서 도출된 결과를 이용하여 honeycomb 형식의 300 cell (1 제곱인치 내의 면적에 300 개의 구멍이 존재함) 짜리 cordierite ceramic를 사용하였으며 다마 여스기의 공기인 여르가스의 노즐

구조에 따른 연소특성을 실험적인 방법으로 알아보았다. 이 때, 연소용량은 35kW이고 공기비는 실제 운전조건인 약 1.1 그리고 연소용 공기온도는 약 1,000℃를 유지하였다.

3.2.1. 공기노즐 변화에 따른 로내 온도 분포

대표적인 결과로 Fig. 5에는 노즐 3을 대상으로 연소용량 35kW, 23kW 그리고 12kW인경우에서의 연소용 공기온도 1,000℃, 800℃ 그리고 600℃로 변화시켰을 경우의 온도분포장을 나타내었다. 그림에서 보듯이 연소용량이 적을수록 그리고 예열공기 온도가 떨어질수록 온도 분포는 매우 좋지 않은 결과로 나타났다. 이것은 나중에 서술하는 기존의 버너에서의 온도분포장에서의 결과와 매우 흡사한 결과를 나타내고 있는데 연소용량이 떨어질수록 가스노즐의 토출속도가 떨어져 연료와 공기와의 혼합이 나빠지고 이것이 온도저하의 원인이 될 뿐만 아니라 온도의 분포면에서도 공기의 토출속도가 예열공기온도가 떨어져 매우 낮은 속도로 토출되기 때문으로 풀이할 수가 있다.

Fig. 6을 살펴보면 축열버너와 기존버너와의 온도분포 면에서 차이점을 나타내고 있다. 기존버너에서는 일반적으로 육안으로 보아 화염이 존재하고 화염이 존재하는 중간이 가장 온도가 높은 것으로 나타나는데 여기서도 약 20℃의 연소용 공기 그리고 연소용량은 45kW의 버너를 적용하였는데 이런 결과가 나왔으며, 즉 온도분포의 균일면에서도 약 버너 전방 약 300 - 400 mm 정도에서는 약간 낮은 1,100℃ 정도였으며 후류로 갈수록 화염의 온도가 높아져 최고 1,280℃ 정도에 달하기도 하는 매우 불균일

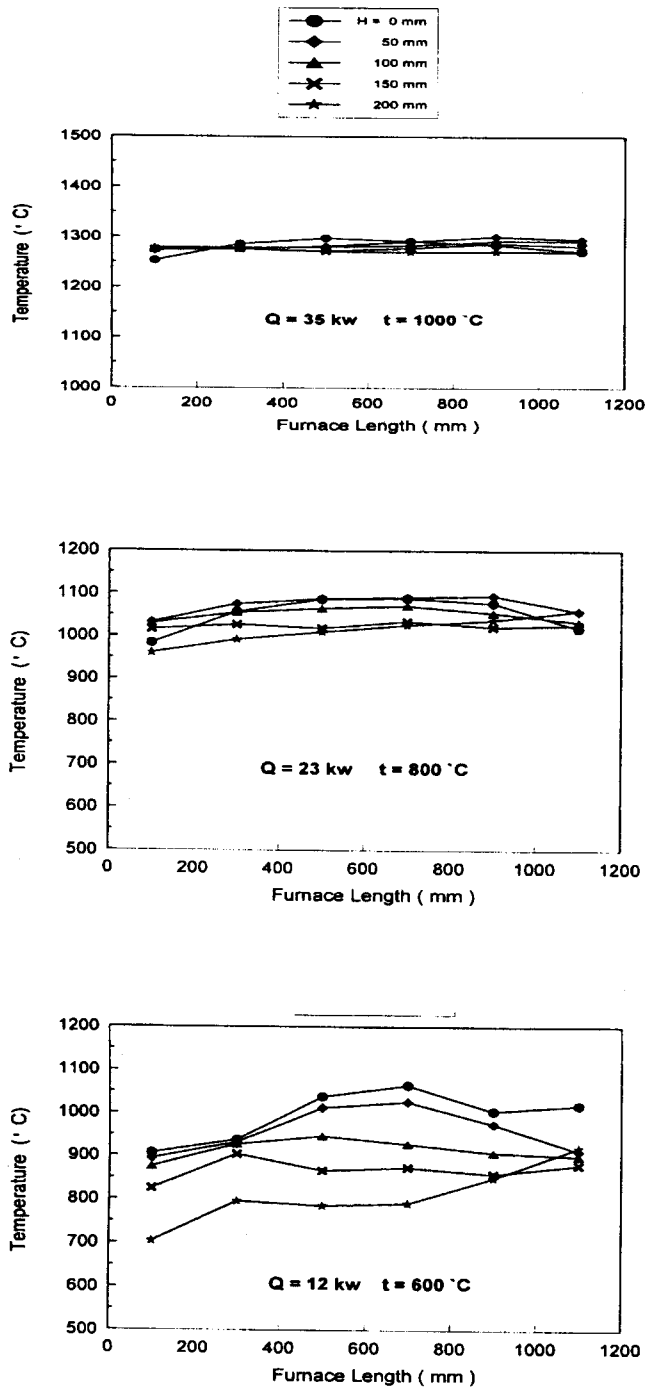


Fig. 5 용량별 온도분포 비교

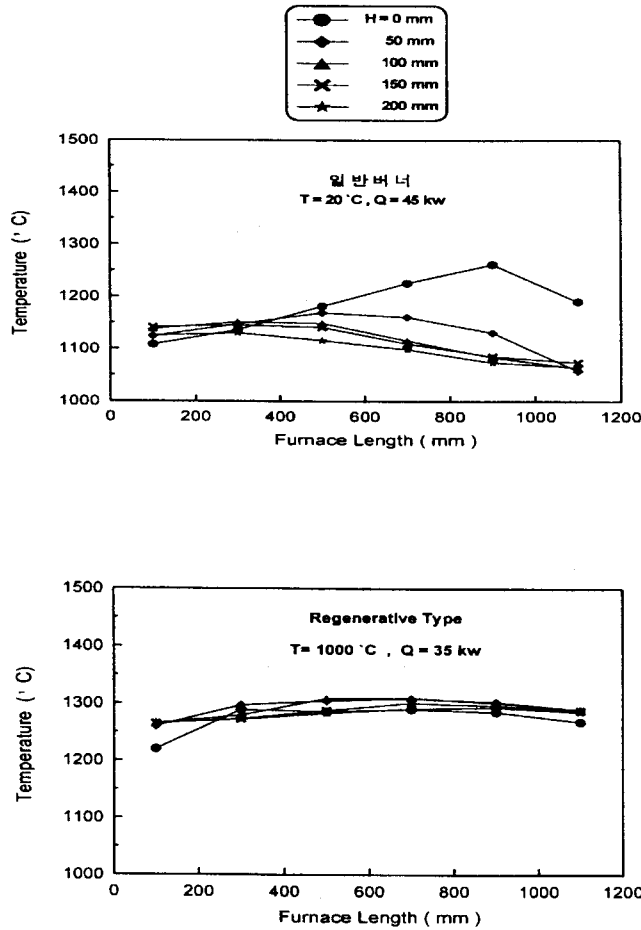


Fig. 6 기존버너와의 비교

한 온도분포 결과가 나왔다. 그러나 축열버너의 노즐중 가장 양호한 노즐 3을 적용한 경우 앞에서 서술하였듯이 온도분포면에서 비교할 수 없을 정도로 매우 양호하게 나왔으며 온도장의 크기도 예열공기 온도가 높아 평균적으로 약 1,280°C 정도가 되었다.

3.2.2. CO 측정

앞에서 온도분포장에서 가장 양호한 결과로 나타난 3번 노즐을 대상으로 공기비와 예열공기 온도가 변화에 따라 연

소실험을 행하고 CO를 배가스 출구인 연돌에서 배가스 분석기로 측정하여 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이 때의 연소용량은 35kW이고 예열공기온도는 1,000°C 그리고 공기비를 고정시켰을 경우에는 약 1.1를 유지하였다. 일반적으로 CO는 연료와 공기의 혼합정도를 나타내는 바로메타로 버너의 노즐을 설계할 때 중요하게 고려하여야 할 요소 중의 하나이다. 그림에서 보듯이 공기비가 증가할수록 CO는 잔여산소 0.5 %인 경

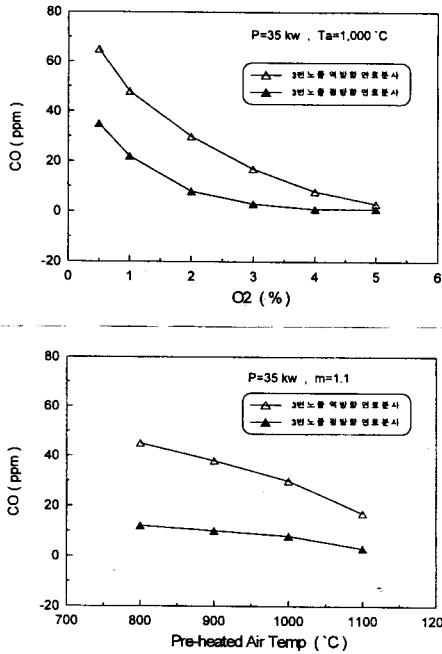


Fig. 7 CO 비교

인 경우에 5ppm이하로 떨어짐을 볼 수 있는데 이것은 일반적으로 알려진 내용으로, 즉 연소용 공기가 많을수록 불완전 연소의 산물인 CO가 떨어지는 것과 같은 맥락에서 찾을 수가 있다. 예열공기가 높을수록 CO농도가 떨어지는 것은 연소용 공기온도가 올라가면 공기속도도 빨라지고 이에 따라 반응도 활발히 일어나 불완전연소의 장애가 되는 원인들이 없어짐에 따라 CO의 농도는 떨어진다고 볼 수 있다.

다른 변수로는 온도분포장에서와 마찬가지로 병류식과 향류식을 적용했을 경우의 결과를 비교하였는데 병류식(정방향)이 향류식(역방향)의 경우에 비하여 매우 양호한 결과를 나타내었다. 이것은 역방향으로 연소를 시키면 공기와 연료가스가 서로 다른 방향으로 만나 혼합이 잘 될 것으로 생각되나 단순히 로내의

유동장의 그렇게 간단히 전개되지 않고 재순환되는 영역이 보다 많이 존재하므로 역방향으로 연소시키는 것은 혼합면에서는 좋지 않다고 볼 수가 있다.

3.2.3 NO<sub>x</sub> 측정결과

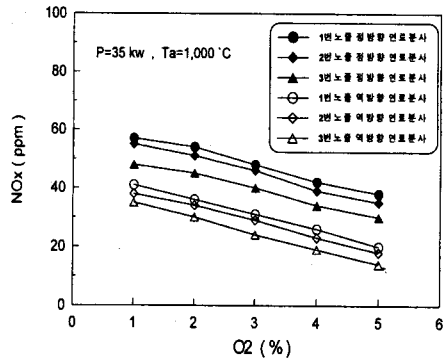
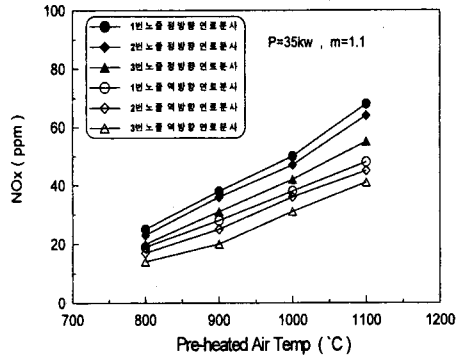


Fig. 8 NO<sub>x</sub> 비교

3 가지 노즐에 대한 NO<sub>x</sub>에 대한 측정 결과를 Fig. 8에 나타내었다. CO 측정시와 마찬가지로 연소용량은 35kW이고 예열공기온도는 1,000 °C 그리고 공기비를 고정시켰을 경우에는 약 1.1를 유지하였다. 그림에서 보듯이 예열공기 온도가 높을수록 NO<sub>x</sub>의 배출량이 증가하는데 이것은 일반적으로 잘 알려진 사실이다. 다만 노즐 1, 2 그리고 3번 즉 공기유속이 빠를수록 그 NO<sub>x</sub> 배출량이 적게



나타났는데 그 이유는 연소용 공기의 토출속도를 120m/s로 하였을 경우 로내의 후방부에 재순환 영역이 크게 발달되고 이것이 버너의 전방부로 영향을 미쳐 연소시에 재순환 연소가스가 가스와 공기의 혼합시에 같이 작용하여 NOx를 저하시키는 이유가 된다. 그리고 향류로 공기를 분출시켰을 경우(역방향 운전) 로내 온도가 병류에 비하여 약간 낮고 또한 난류유동이 심하게 일어나면서 재순환영역이 커지는 것으로 생각되어 이것이 NOx 저하의 직접적인 이유가 된다고 본다.

이상 축열버너의 시제품에 대한 연소 성능실험결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 연소용 공기의 버너 노즐에서의 토출속도를 최소 80m/s 이상을 유지해야 하며 설계 요구속도는 약 120m/s 인데 이 때의 공기에열온도는 약 900 - 1,000°C 정도의 설계온도가 요구된다. 그리고 이에 적정한 열교환기인 축열체의 크기나 종류는 설계되는 버너에 따라 최적화하여 결정되어야 한다.

(2) 연소용공기와 연료 가스의 토출방향에 대한 실험결과는 서로의 장단점이 있지만 실제 현장에서의 운전조건 등 여러 가지 조건을 고려한다면 순기능인 병류식(parallel flow type)이 적당하다고 생각된다.

(3) 특히 NOx의 저감은 연소용 공기의 버너노즐에서의 토출속도에 크게 영향을 받는 것으로 나타났으며 즉 토출속도가 빠르면 빠를수록 적게 나타났다. 이것은 토출속도의 증가에 따라 배가스 자체 재순환영역의 크기가 커져 이 때 연소용 공기와 연료가스의 혼합, 연소과정에 흡인되는 연소배가스량의 증가하고 그리고 예열공기온도의 상승에 따

라 로내의 온도가 균일하게 되어 국부과열영역의 감소에 기인한다고 볼 수 있다.

(4) CO는 연료와 공기의 혼합정도를 나타내는 척도인데 향류식과 병류식을 적용한 경우 차이가 많이 났다. 이것은 공기와 연료의 토출방향의 차이점에 기인한다고 보고 연소성능이 양호한 것은 병류식으로 나타났다.

(5) 축열버너에 적용되는 축열체에 대한 연구는 구체적으로 하지는 않고 선행과제의 연구결과를 이용하였지만 축열버너의 설계시에는 버너의 연소용량에 따라 축열체의 크기와 종류 그리고 재질 등이 고려되어야 하고 이를 토대로 최적 절환주기도 결정되어 설계자료로 제시되어야 한다.

(6) 축열버너의 설계시에 주의할 사항으로는 두 개의 버너가 한 쌍으로 운전되는데 이 때 가스노즐의 공기토출구가 배가스 토출구로 번갈아 작용하기 때문에 배출되는 고온의 배가스로 인하여 노즐을 금속제를 사용하는 경우에는 과열될 우려가 있어 본 실험에서 적용한 바와 같이 냉각용 공기를 주입할 필요가 있고 세라믹제를 사용하는 경우에는 열충격에 견디는 재질을 선정하여야 한다.

(7) 축열버너의 실제 운전의 초기 단계에서는 축열버너의 축열체가 정상적인 연소용공기 예열온도가 나올 때까지 축열되어야 때문에 파일롯트 버너를 버너의 부속품으로 설계,구비하여야 한다

#### 4. 결 론

고온 예열된 연소용 공기를 연소기에 사용하면 로 내에서의 화염형태가 매우 커지고 색깔도 "green"화 되는 것을 실험적으로 확인한 바 있는데 이 결과로 시

용하여 FDI(Fuel Direct Injection: 로내 직접분사기술)방법으로 고온의 예열된 연소용공기를 실제적으로 이용하였을 경우, 즉 축열버너(축열버너)를 시제품으로 설계, 제작하여 연소성능을 실험적으로 알아보고 비교, 검토한 결과는 아래와 같다.

(1) FDI특성을 살린 축열버너의 설계 자료는 가스노즐의 크기는 80m/s 분출속도로 설계, 공기노즐의 각도는 0도, 공기노즐간의 간격은 버너 폭의 1/2정도가 알맞은 것으로 나타났다. 특히 가장 중요한 것은 가스노즐을 중앙에 두고 공기노즐의 원형형태로 주위에 설치시키고 고온공기의 분출속도를 연소용 공기의 예열온도에 따라 차이는 있으나 100m/s에서 120m/s로 유지시키는 것이다. 그리고 parallel flow형식으로 공기와 연료의 분사방향을 같은 방향으로 하는 것이 연소의 특성중의 하나인 혼합성이 좋게 나타났다. 또한 NOx값은 상기 설계 조건에서 보다 적게 나타났다. 그 이유는 연소현상의 결과로부터 공기류에 흡인되는 연소배가스량의 증가, 국부과열영역의 감소에 따른 온도 균일성 그리고 배가스 자체 재순환영역의 크기에 기인한다고 볼 수 있다.

(2) 축열버너의 시제품으로 실험을 하였기 때문에 연소특성이나 축열체의 성능에는 설계, 기반기술이 확보되었다고 보나 축열버너시스템으로서의 완성도에서는 아직도 배가스와 공기의 시간별 절환장치인 절환기의 내구성문제를 해결할 수 있는 설계기술에 대한 연구가 필요하다.

"Combustion with High Temperature Low Oxygen Air in Regenerative Burners", The First Asia-Pacific Conference on Combustion(1997), pp 290-293, Japan.

2. NEDO, New Industrial furnaces of Higher thermal Efficiency Project Report, IV(1996).
3. M. Katsuki and K. Ebisui, "Possibility of Low Nitric Oxides Emission From Regenerative Combustion Systems Using Highly Preheated Air", The First Asia-Pacific Conference on Combustion(1997), pp 294-297, Japan.
4. T. Fujimori D. Riechelmann and J. Sato, "Experimental Study of NOx Reduction by Lifted Turbulent Jet Flame in Highly Preheated Flows", The First Asia-Pacific Conference on Combustion(1997), pp 298-301, Japan.
5. Ken Kishimoto, "Observational Study of Chemiluminescence from Flames with Preheated and Low Oxygen Air", The First Asia-Pacific Conference on Combustion(1997), pp 468-475, Japan.
6. Jun'ichi Sato, "Combustion in High Temperature Air", The First Asia-Pacific Conference on Combustion(1997), pp 286-289, Japan.
7. Tanaka, R, Kishimoto, K. and Hasegawa, Combustion Sci. Technol. (Japanese ed.), Vol.2, (1994), p.257.
8. 省エネルギー : 高温空氣燃焼特集, Vol.48, No.10(1996). pp 18-52.

## 참 고 문 헌

1. Toshiaki Hasegawa and Rvoichi Tanaka