

고온공기이용 오일 연소기술

김원배 양재복

An Experimental Study on Oil Combustion Technology with High Temperature Preheated Air.

W. B. Kim, J. B. Yang

Korea Institute of Energy Research

Key words: high temperature air combustion, NOx, fuel direct injection, regenerative burner

Abstract

The objective of this study is to develop a new oil combustion technology concerning industrial furnaces and kilns, not only to save energy but also to reduce environmental emissions. Of many kinds of such technologies we chose the high temperature air combustion technology which was initiated by the British steel company in '80s and developed further by the American burner company "North American". In this study it was carried out to test regenerative burner experimentally and to have an applicability to industry. From the variation of configuration of gas nozzle and hot test on the temperature distribution and NOx, it was found out that the reduction of NOx was due to the effect of internal gas recirculation, which will be caused by air emitting velocity from burner nozzle.

1. 서 론

지금까지의 기존 기술에 의한 에너지절약 기술을 “제 1단계의 에너지절약” 이라고 한다면 지금부터는 “제 2단계의 에너지절약”으로서 에너지절약을 환경보호와 관련하여 생각하여야 한다. 에너지 다소비 열 설비인 공업로는 국내에는 공업화된 지역을 중심으로 약 5,000기 이상(추정) 설치되어 있으며, 이들 설비의 에너지 소비량은 국가 전체 에너지 사용량의 약 15 % 이상을 차지하고 있는데 점진적으로 청정 연료인 가스로 대체되어가고 있으나 아직도 오일을 사용하는 곳이 상당수에 이르고 있는 것이 현실이다. 공업 선진국에서는 이미 이에 대응하는 구체적인 기술을 연구 개발하는데 박차를 가하고 있다. 따라서 국내에서도 국가적인 차원에서 에너지절약 및 환경보호뿐만 아니라 기업자체의 생산성향상 및 경쟁력 강화 측면에서도 기여할 수 있는 에너지경제를 이룩하는 것이 그 어느 때보다도 중요한 시기임을 인식할 필요가 있다. 이에 본 과제의 주된 연구목적은 환경 문제의 해결책이 곧 에너지 절약기술이라는 개념 하에 종래에는 불가능하다고 본 오일을 이용 할 때의 1,000℃이상의 고온 공기를 이용한 연소기술에 기반을 둔 것으로, 에너지의 절약은 물론, 이에 따라 지구온난화의 원인 물질인 CO₂ 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 하였다. 또한 이 연구과제는 지금까지 알려진 연소방법이 아니라 새로운 개념의 연소기술, 즉 축열체를 이용한 고온공기 연소기술에 대한 것이므로 주로 실험적 방법에 의하여 이 기술에 대한 검증이나 확인을 하는 과정을 주된 연구내용으로 삼았다.

2 실험장치의 설계 및 실험방법

2-1. 실험장치의 설계 및 구성

오일을 연료로 사용 할 때 고온공기 연소 특성을 알아보기 위하여 [그림 1]과 같은 실험장치를 설계 제작하였다.

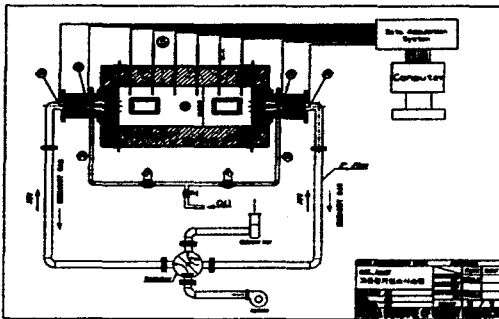
우선 대략적인 실험장치의 사양을 설명하면 다음과 같다.

1. 연소 실험로의 유효크기: 300mm x 300mm x 1100mm
2. 축열체 : 직경 70 mm x 길이 100 mm x 2열 의 100 Cell 코지라이트 세라믹 허니컴
3. 절환방식 : 4 Way 밸브에 의한 절환방식
4. 사용연료 : 백등유 (저위발열량: 9,200kcal/l)
5. 연소용량 : 30,000 kcal/h

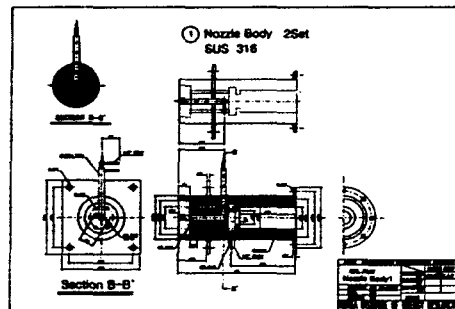
실험로의 앞부분에는 300x120mm 크기의 직사각형모양의 가시창구를 만들어 화염의 관찰 및 사진촬영을 할 수 있도록 하였으며 뒷부분에는 직경 15mm 의 구멍을 일정간격으로 7개씩 3열로 설치하여 열전대 및 수냉 Probe를 삽입해 로내의 온도 및 속도분포를 측정할 수 있도록 하였다. 이러한 열전대 및 압력 Probe의 이송은 Screw-ball bearing 과 프레임으로 만들어진 3차원 이송장치에 의해 일정간격으로 이송시키며 측정할 수 있도록 하였다. 또한 실험로의 상단에는 직경 50mm 의 구멍을 실험로의 양끝단과 중앙사이에 일정 간격으로 3개 설치하여 중앙부분의 구멍에는 Pilot 버너를 설치해 초기점화시 Pilot 버너의 점화불꽃에 의해 메인 버너가 점화되도록 하였고 양쪽 나머지 두 군데에는 밸브를 설치하여 실험 중 로내압을 조절 할 수 있도록 하였다.

양 버너의 절환을 위한 4Way 댐퍼는 연소용 공기와 배기가스와의 누설을 최소화 할 수 있도록 Disk Type의 형태로 설계 제작하였으며 댐퍼의 절환은 제어 패널의 Timer 에 의해 Air Solenoid 밸브를 작동시키고 압축공기가 Air 실린더를 왕복 운동시켜 절환 하도록 구성하였다.

오일 고온공기 연소실험을 위한 실험용 버너는 [그림 2]와 같이 Regenerative 형태의 버너로 2대 설계제작 하였다. 실험용 버너는 연료가 중앙에서 분사되고 연소용 공기는 중앙의 연료노즐을 중



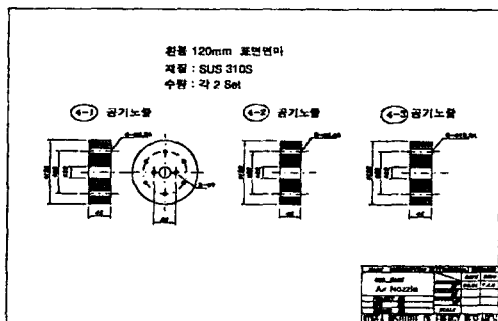
[그림 1] 실험장치 구성도



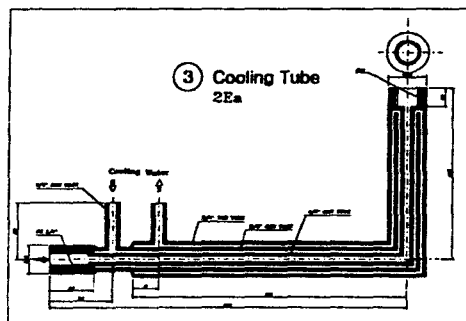
[그림 2] 실험용 버너 몸체

심으로 원형으로 주변에서 분사되는 구조로서 여러 종류의 공기노즐을 교환 할 수 있는 형태로 설계하였다. 또 연소시 연료가 통과하고 끝에 연료노즐을 체결하기 위한 연료배관 Probe는 버너 몸체의 중앙에 위치하여야 되는데 그대로 두면 고온의 배기가스와 예열 공기에 의해 Probe가 가열되어 연료의 Vapor-Lock 현상이 일어난다. 이를 방지하기 위해서 Probe를 [그림 4]와 같이 3중 관 형태로 제작하여 중심통로에는 연료가 들어가고 밖의 2군데 통로로는 Cooling Water가 순환 통과하도록 하여 연료의 비등을 방지시켜 주도록 설계하였다.

실험용 공기노즐은 전에 10여 종류의 공기노즐을 설계하여 각각에 대해 연소특성 및 배가스 분석을 실시한 바 있는데 이번에는 전에 실험했던 결과를 토대로 하여 연소용 공기의 분출 속도변화에 대해서만 실험하고자 [그림 3] 과 같은 3종류의 노즐을 제작하였다. 공기노즐은 공기의 분사 및 배기가스의 배기통로 역할을 계속하여 반복적으로 수행하여야 함에 따라 고온의 배기가스로 인해 로내 온도의 영향으로 매우 고온으로 가열되어진다. 그리고 급속한 산화반응과 고온으로 인해 국부적으로 공기 분사구멍 주위가 녹아서 형상이 일그러지는 경우도 있으므로 고온에서의 산화반응에 견딜 수 있는 재료를 사용하여야 한다. 따라서 본 실험에서는 인코넬에 비해서는 저렴하고 고온에 잘 견디는 SUS 310S 재질의 직경 120mm인 스텐레스 봉을 두께 45mm로 가공하여 예열공기의 온도가 1,000℃에서 120 m/s, 100 m/s, 80 m/s 가 되도록 3종류의 공기노즐을 설계 제작하였다.



[그림 3] 실험용 공기노즐



[그림 4] 연료배관 Cooling튜브

배기가스의 폐열을 모아 두었다 연소용 공기를 예열하기 위한 축열체로는 직경이 70mm 길이가 100mm 이고 100 Cell 의 코지라이트 허니컴 두 개를 버너몸체 내부에 넣어 연소용 공기를 예열할 수 있도록 하였고 또 세라믹 허니컴이 들어가는 버너몸체 내부에는 단열재인 세라볼을 30mm 두께로 단열 시공하였다.

그리고 오일연소를 위한 분사노즐은 오일버너 전문 메이커에서 수입 판매되고 있는 미국의 MONARCH 사의 제품중 적합한 용량의 노즐을 구입하여 사용하였다.

2-2. 연소실험

오일을 연료로 사용하여 로내 직접분사기술 (Fuel Direct Injection)을 사용하여 축열 연소 시스템을 구성하였을 때 실제 적용 가능성을 알아보고 문제점을 파악하며 또 예열공기의 분출속도의 변화에 대한 로내 온도분포와 버너의 상호 전환에 따른 온도변화의 특성을 알아보기 위해 다음과 같은 순서 및 방법에 따라 실험을 수행하였다.

우선 제작 조립한 2대의 버너를 실험로의 양 끝에 서로 일직선으로 마주보게 설치한 후 [사진1] 과 같이 배관과 공기공급 Blower, 배기가스 배출 팬 과 함께 절환기에 연결하여 배관작업을 완료 하였다. 연료의 공급은 버너몸체의 옆면에 연료공급 Probe를 설치하여 전자펌프에 의해 공급할 수 있도록 하였고 배관의 버너몸체 가까운곳에 Solenoid Valve를 설치하여 절환기의 작동순간마다 교대로 열림과 닫힘이 반복될 수 있도록 하였다. 버너의 초기점화를 위하여는 실험로의 중앙상부에 설치한 Pilot 버너를 점화시킨후 실험로가 어느정도 가열되었을 때 Regenerative Burner를 동작시키고 로 가 600 ℃ 이상 충분히 가열된후 Pilot 버너를 정지시키고 연소용 공기 유량제와, 배기가스 분석기를 통하여 공기비를 조절하였다. 양쪽버너의 연소/배기 기능의 절환을 위한 절환기의 작동은 Timer와 Air 실린더에 의해 정해진 시간마다 반복적으로 에어실린더를 작동시킬 수

있도록 Control Panel을 설계 제작하였다. 양버너에 공급되는 예열공기의 온도와 축열체를 거친 후 밖으로 빠져나가는 배기가스의 온도를 알 수 있도록 버너의 공기노즐 입구와 축열체의 끝단에는 R-Type 과 K-type 온도계를 설치하고 Data Acquisition system 에 연결하였고 실험로의 후단에는 150mm 간격으로 R-Type 온도계를 설치하고 Data Acquisition system을 거쳐 컴퓨터에 연결하였다. 열전대의 이송은 동시에 일정간격으로 이송시킬 수 있도록 Traversing 이송장치에 고



[사진1-1] 좌측버너 연소사진



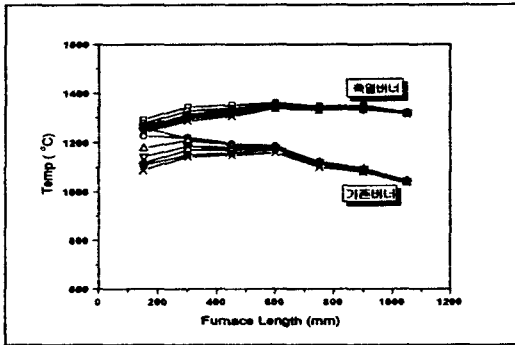
[사진1-2] 우측버너 연소사진

정시켜 이송하였다.

예열공기의 원하는 온도를 얻기 위하여는 절환기의 절환주기가 매우 중요한데 이는 축열체의 재질과 밀도 등에 따라 달라지게 된다. 본 실험에서는 다른 실험자료와 사전 여러 차례의 실험을 통해 최적의 절환주기를 30초로 정하고 실험하였다. 또 실험조건은 연소용 공기는 33 Nm³/h , 연료인 오일(백등유)은 3 L/h 이고, 공기비는 약 1.1정도를 유지하였다.

2-3. 실험결과 및 분석

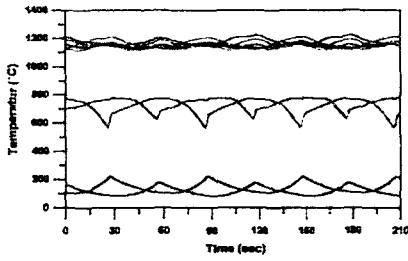
축열버너의 특성은 [그림 5]에서 보듯이 일반 기존 버너를 연소시켰을 때보다는 훨씬 양호한 온도분포를 보이고 있는 것이 특징이다.



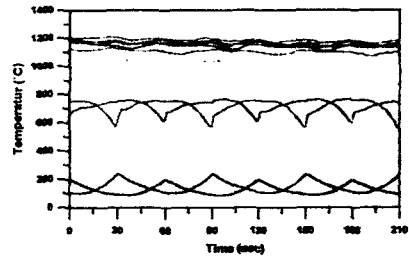
[그림 5] 기존버너와 축열버너의 비교

[그림 6]부터 [그림 9]는 절환주기를 30초로 했을 때 x축에 대해 측정된 시간별 로내 온도 분포의 변화 및 예열공기 온도의 변화, 그리고 배기가스의 온도변화를 나타내었다. 버너가 위치한 중앙을 H=0으로 기준삼아 H=50, 100, 150의 거리는 직각방향(즉 로 폭방향)으로의 거리이고 x=100, 250, 400, 550, 700, 850, 1000의 거리는 축방향으로 한쪽 버너의 끝에서부터 떨어진 거리로 양 버너의 끝의 거리가 1100 mm 이므로 서로 대칭이 되는 길이다.([그림2-1] 참조). 그림에서 보듯이 로내 온도분포는 H=0 에서는 심하게 sin curve를

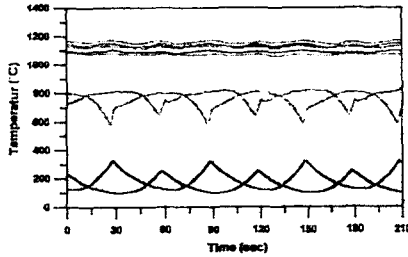
그리는 것을 볼 수 있고 이커브는 H값이 증가할수록 즉 중심에서 떨어져 로 벽쪽으로 가면서 완만해지는 것을 볼 수 있다. 이것은 중심에서는 양쪽버너가 절환하면서 서로 교대로 연소 할 때마다 연소버너의 앞쪽 부분의 온도가 좀 높고 배기쪽이 좀 낮으나 로 벽쪽에서는 거의 연소 버너쪽이나 배기쪽이나 차이가 없음을 나타내주고 있다. 특히 그 중에서도 분사 속도가 큰 노즐#2의 결과가 다른 2가지 노즐의 경우보다 좀더 좋은 결과를 보여주고 있다 또 배기가스의 온도 변화곡선에서도 최고 250℃ 정도의 온도까지 올라갔지만 이는 불과 몇초



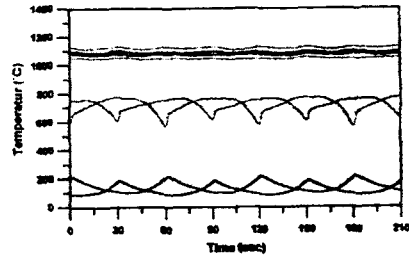
[그림 6] $x=0$ 의 온도곡선



[그림 7] $x=50$ 의 온도곡선



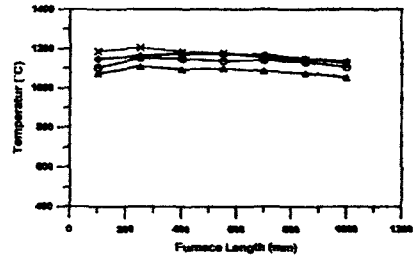
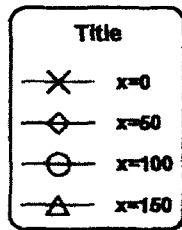
[그림 8] $x=100$ 의 온도곡선



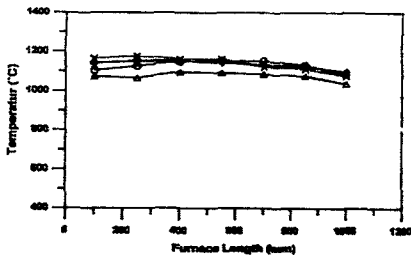
[그림 9] $x=150$ 의 온도곡선

동안의 값이고 평균 온도값으로 생각한다면 150°C 정도의 온도로 낮은 값을 보여주고 있다.

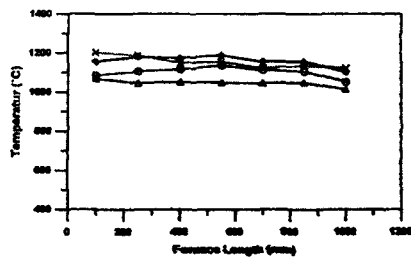
[그림 10]부터 [그림 12]는 로의 길이방향에 대하여 측정된 값인데 분사 속도가 빠를수록 전체적으로 양호한 온도분포를 보여주고 있다.



[그림 10] 노즐# 1

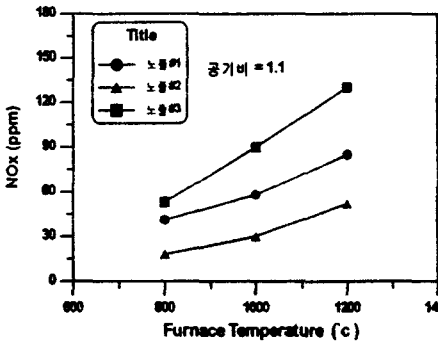


[그림 11] 노즐#2

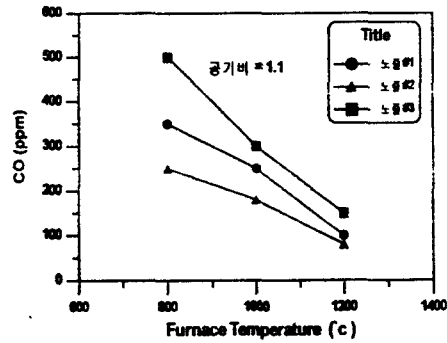


[그림 12] 노즐#3

3가지 노즐에 대한 연소실험에서 NO_x 및 CO 에 대한 측정결과를 [그림13-14] 에 나타내었다. 측정시점은 로내온도의 상승시점에 따라 800℃ 1000℃ 1200℃ 인 시점에서 각각 측정하였으며 측정기기로는 휴대용 측정기기인 TESTO 사의 model - 300M 을 사용하였다. 그림에서 보듯이 로내온도가 상승 할 수록 NO_x의 배출이 증가하는데 이것은 일반적인 사항으로 잘 알려진 사항이다. 다만 노즐#2의 경우가 다른 두 개의 경우보다 NO_x 배출량이 적게 나타났는데 이것은 노즐 #2가 다른 두가지 경우보다 공기의 분사 속도가 빠르기 때문에 로내의 후방부에 재순환영역이 발달하여 이것이 로내 전방부에 영향을 미쳐 연소시에 재순환가스가 공기와 혼합시에 같이 작용하



[그림 13] NO_x 배출량



[그림 14] CO 배출량

여 NO_x를 저하시킨 이유가 된 것이라 생각된다. CO의 측정결과에서 대부분 측정값이 상당히 높게 나타났는데 이는 앞에서 설명했듯이 두 대의 버너가 서로 교대로 연소하면서 한쪽버너가 연소할 때 다른 한쪽버너의 배관으로는 배기가스가 나가게되는데 절환기가 작동하는 순간 그 기능이 바뀌다보니 일시적으로 연소용 공기가 아닌 배기가스가 몇 초 동안 공급되기 때문에 일시적으로 CO의 농도가 매우 높아지게 되고 이것이 계속하여 어느 정도 영향을 미쳐 CO의 측정치가 높게 나타난 것으로 생각된다. 또 로내온도가 높아지면서 CO 농도가 낮아졌는데 이것 또한 로내 온도가 고온이 되면서 예열 공기온도가 높아지고 따라서 공기의 분사 속도도 증가하여 로내에서 공기와 연료와의 혼합이 좋아져 낮아졌다고 생각된다.

3. 결론

오일을 연료로 사용하여 FDI(Fuel Direct Injection: 로내 직접분사기술)방법으로 고온공기 연소 시스템을 구성하였을 때 다음과 같은 특성을 나타내었고 실제적용 가능성을 확인하였다.

- (1) 로내 온도분포에 있어서 온도분포 균일도가 우수한 결과를 나타내었다.
- (2) NO_x의 저감과 CO의 저감은 분출속도가 빠를수록 낮게 나타났는데 이유는 토출 속도의 증가에 따라 배가스 자체 재순환 영역의 크기가 커져 이때 연소용 공기와 연료의 혼합, 연소과정 과정에 흡인되는 연소 배기가스 량이 증가하고 그리고 예열공기 온도의 상승에 따라 로내의 온도가 균일하게되어 국부과열 영역의 감소에 기인한다고 볼 수 있다.

참 고 문 헌

1. Toshiaki Hasegawa and Ryoichi Tanaka, "Combustion with High Temperature Low Oxygen Air in Regenerative Burners", The First Asia-Pacific Conference on Combustion(1997), p290-p293, 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),p294-p297, 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), p298-p301, Japan.
5. Ken Kishimoto, "Observational Study of Chemiluminescence from Flames with Preheated and Low Oxygen Air", The First Asia-Pacific Conference on Combustion(1997),p468-p475, Japan.
6. Jun'ichi Sato, "Combustion in High Temperature Air", The First Asia-Pacific Conference on Combustion(1997), p286-p289, 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：高温空気燃焼特集, Vol.48, No.10(1996).p18-p52.