

# 축열식 고온공기 연소시스템에 대한 실험적 연구

양 병 옥\* · 임 인 권\*\*

## Experimental Study on High Temperature Air Regenerative Combustion System

B. O. Yang\*, I. G. Lim\*\*

**Key Words:** High temperature air combustion, Regenerative combustion

### Abstract

Combustion characteristics of a regenerative combustor for high temperature air combustion have experimentally studied. Temperature measurement on regenerative ceramic material and combustor has been carried out with changing equivalence ratio at constant turn-over period. Stable and unstable combustion region have been found and also detailed averaged temperature profile with respect to various air flow conditions have been obtained.

### 1. 서 론

최근의 연소기술 동향은 연소효율의 향상과 더불어 공해물질의 배출을 억제할 수 있는 고효율·청정연소에 초점이 맞추어지고 있다.

이러한 고효율·청정연소의 한가지 방법인 축열식 연소시스템이 최근 일본, 유럽국가 등을 중심으로 연구가 많이 진행되고 있으며, 국내에서도 실제 상용 연소시스템에 대한 적용성 실험도 수행되어지고 있다. 고효율 청정

연소 시스템에 대한 연구를 통하여 사용 연료의 절감 및 연소 효율의 증가 등 여러 장점들을 실제로 구현하는 것이 가능하다는 연구결과가 보고되고 있다.<sup>(1),(2),(4),(8)</sup>

연소기 및 열 적용 시스템에서의 효율 증진을 위해서는 시스템 자체에서의 열전달 및 연소 등의 효율을 증진시키는 것과 열 이용 측면에서 효율을 더욱 증대시키기 위해서는, 시스템 외부로 배출되는 배기가스의 폐열을 될 수 있으면 많이 회수하는 것이 필요하다.

축열식 연소시스템은 고온에 견딜 수 있는 세라믹 등의 축열체를 열 저장 매체로 사용하여 배기가스의 폐열을 회수하는 방법으로, 축열체에 저장된 열은 연소용 공기를 예열하여 고온공기 연소시스템을 구현함으로써 연소 효율을 높일 수 있는 장점이 있다.

\* 명지대학교 기계공학과 대학원

\*\* 명지대학교 기계공학과

축열식 고온공기 연소시스템은 기존 연소기의 운전방식과는 달리 2대 이상의 연소기가 1조가 되어, 일정한 주기로 연소기가 교대로 운전되는 방식을 사용한다. 이런 축열식 연소시스템의 운전방식은 작동하지 않는 연소기 측의 공기 공급 통로는 운전중인 연소기 배기가스의 배기 통로 역할을 하게 되고, 이때 배기통로 기능을 하는 연소기내에 세라믹 축열체를 설치하고 고온의 배기 가스의 열을 회수하여 축열되고, 일정한 시간이 경과된 후에 연소기를 교대 운전하면 연소용 공기는 축열된 고온의 세라믹 축열체를 통과하는 동안 직접 열교환을 통해 예열되어 연소에 참여하게 된다. 이러한 방법으로 연소기를 교대로 운전함으로써 연소 후 배출되는 배기가스의 폐열 회수율을 대폭 향상시킬 수 있는 장점이 있고, 연소실 내 유동의 교반 효과가 뛰어나기 때문에 연소실내 온도 균일화를 이룰 수 있으며, 고온 연소가스를 재 순환시킴으로써 유해 배기가스의 배출을 억제할 수 있게 된다.

현재 축열물질을 적용한 축열식 연소 시스템의 연구와 개발이 많이 진행되고 있고, 실

제 연소시스템에 적용도 되어지고 있지만 아직까지 많은 설계 변수와 실험 조건 등에 의하여 운전 조건의 많은 변화가 예상되지만 아직까지 이에 대한 연구자료가 거의 발표가 되고 있지 않는 상태이다.

본 연구는 축열식 고온공기 연소시스템에서 연소 절환주기를 일정하게 하고, 연소시 안정운전 영역과 연소용 공기의 공급온도에 따른 연소특성을 파악하여 축열식 연소기를 설계하는데 필요한 기본 자료를 얻는데 목적이 있다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

#### 2.1.1 축열식 연소기

Fig.1은 실험장치의 전체도를 나타낸 것이다. 본 실험에 사용한 축열식 연소기는 고온에서 견딜 수 있는 SK-38 내화용 물질로 제작하였다. 연소기의 전체 길이는 250cm, 내경 5cm, 외경 15cm로 제작하였다. 연소실은 길

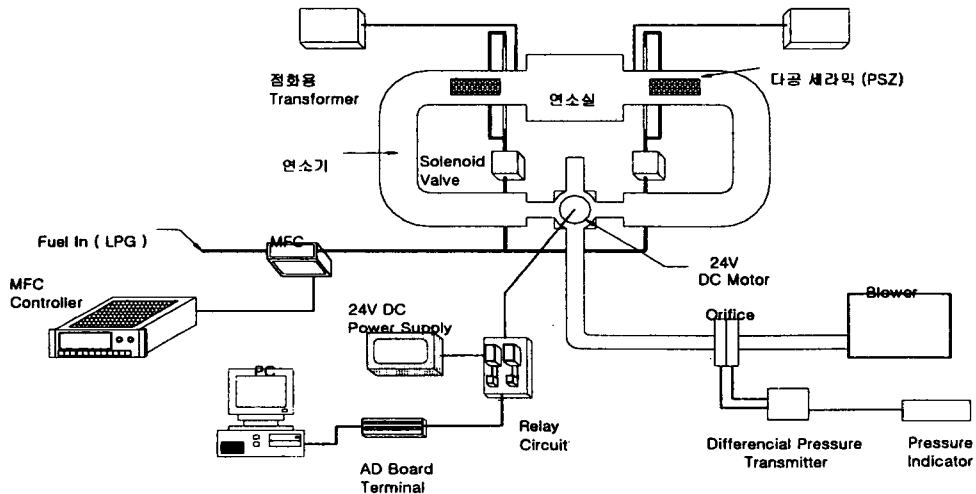


Fig.1 Schematic of Experimental Setup

이 40cm, 내경 20cm, 외경 30cm로 제작하였다. 연소기의 형태는 원통형 구조로 되어 있다.

### 2.1.2 연료·공기공급장치

연소용 연료는 상용 LPG를 습식가스미터에 의해 보정된 질량유량계(MFC)를 이용하여 공급하였고, 연소용 공기는 송풍기를 사용하여 공급하였다. 송풍기는 최대 정압이 240mmAq, 공기유량 4.8m<sup>3</sup>/min, 분당회전수 3450 인 3상 220V의 Ring Blower이며, Inverter를 사용하여 속도를 조절하여 연소기 공기 풍량을 조절하였다. MFC를 통과한 연료는 On/Off Type의 Solenoid Valve를 이용하여 연소실 전의 연료 공급장치를 통해 연소기에 공급하였고, 공기는 Orifice와 Differential Pressure Transmitter를 이용하여 풍량을 측정·공급하였다.

연소용 공기 공급과 배기가스 배출방향을 변화를 위하여 4-way 방향절환 밸브를 제작·사용하였고, A/D Board와 Relay 회로를 이용하여 방향 절환시기를 바꾸어 주었다.

### 2.1.3 축열물질

축열체로 사용한 다공세라믹 물질은 유체 통과시 압력 강하가 작고, 고온에서 충분히 견딜 수 있는 부분 안정된 지르코니아(Partially Stabilized Zirconia)를 사용하였다. 축열체의 길이는 15cm, 외경 5cm이고, 기공율이 약 85%인 20ppi (porous per inch)의 다공세라믹을 사용하였다. Fig.2는 축열식 연소기에 대한 그림으로 축열체는 연소실 중앙에서 35cm 떨어진 위치에 각각 설치하여 배기가스의 열을 회수하고 연소용 공기를 예열하였다.

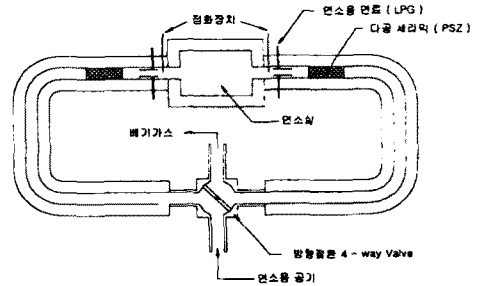


Fig.2 Schematic of Regenerative Burner

### 2.1.4 Burner

Fig.3은 축열식 연소시스템에서 연소기 부분을 나타낸 세부도이다. 연소기는 연소의 안정성과 화염의 균일성을 가지게 하기 위하여 별도로 제작하여 연소실 입구에 설치하였다. 연료 공급관은 1/8" 관을 사용하였고, 공기 공급방향에 수직으로 4곳에서 연료를 공급하였다.

연소용 공기는 연소기의 내부와 외부로 공급되어 연소하게 되는 2단 연소의 형태를 가진다.

### 1.1.6. 온도측정장치

Fig.4는 온도측정을 위하여 축열식 연소시스템에 설치된 열전대의 위치를 나타낸 그림이다.

온도측정은 직경 0.025mm의 R-type과 K-type의 열전대를 이용하여 연소기와 축열체, 연소실 내의 온도를 측정하였고, Fluke사의 Hydra를 이용하여 온도를 기록하였다.

축열체의 온도측정은 다공세라믹 표면4곳과 세라믹 전·후에 K-type의 열전대를 설치하

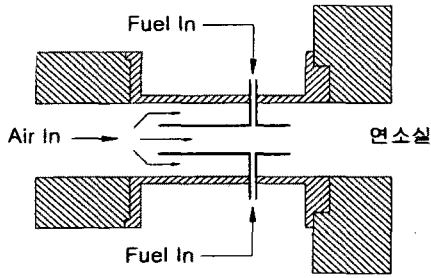


Fig.3 Details of Burner

여 측정하였고, 연소실의 온도분포를 알아보기 위하여 R-type의 열전대를 7곳에 설치하였다.

### 2.2. 실험방법

본 연구는 축열식 연소시스템에 있어 안정 연소 영역의 파악과 당량비의 변화에 따른 배출가스의 배출량 및 축열체의 축열 능력에 관한 실험을 수행하였다.

실험은 공기의 양을 일정하게 공급하고 연료의 공급량을 변화시키며 실험하였으며, 4-way 밸브의 절환주기는 40초로 일정하게 변화시키며 실험을 하였다. 연료의 분사시기 및 방향절환밸브의 절환 시기를 동기화 시켜 4-way 밸브의 방향절환과 동시에 연소의 방향이 바뀌도록 하였다.

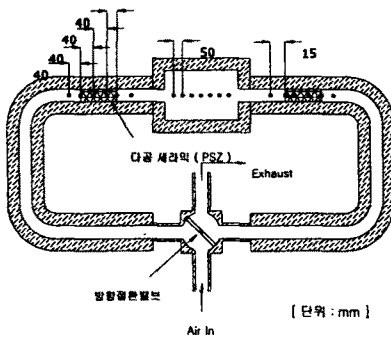


Fig.4 Location of Thermocouples

## 3. 결과 및 검토

### 3.1. 연소 안정 영역

실험은 공기 유량을 200~500 l/min까지 변화시키며 당량비의 변화에 따른 실험을 수행하여 안정적 연소 영역을 조사하였다.

Fig.5는 공기 공급량에 대한 연소 안정 영역을 나타낸 그림이다. 당량비 0.4 이하에서는 연소가 이루어지지 않고 소화되는 경향이 많이 나타나며, 당량비 1.3 이상에서는 연소는 이루어지나 매연과 CO의 발생이 많고 연소실내의 온도 분포가 불균일한 특성을 나타냈다.

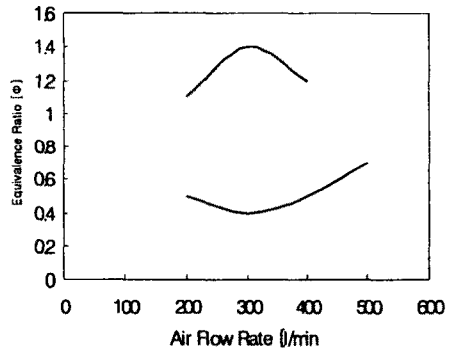


Fig.5 Stable Combustion Region

### 3.2. 당량비에 따른 연소실 온도분포

연소실의 온도측정은 연소실의 중심선을 따라 측정을 하였다. 연소실의 위치는 355~655mm의 위치이고 축열체로 사용한 세라믹의 위치는 40~160, 850~970 mm의 위치에 있다. 또한 연소실로 들어가는 공기 온도는 축열체로부터 15mm 떨어진 위치에서 측정을 하였다.

Fig.6 (a)~(f)까지는 연소용 공기유량이

200l/min일 때 연소 안정 영역에서 당량비의 변화에 따른 축열체와 연소실내의 온도를 나타낸 그림이다.

연소용 공기의 온도는 약 400K 정도로 낮게 나타났고, 연소실의 온도는 최고 1700K에서 최저 800K 정도의 온도 분포를 나타내고 있다.

당량비 0.5에서 0.7사이에서는 연소실 내의 온도차이가 크게 나타나고 있는데 이는 이것은 공기의 유속이 느려 열 재순환이 충분히 이루어지지 못한 것으로 생각되어 진다.

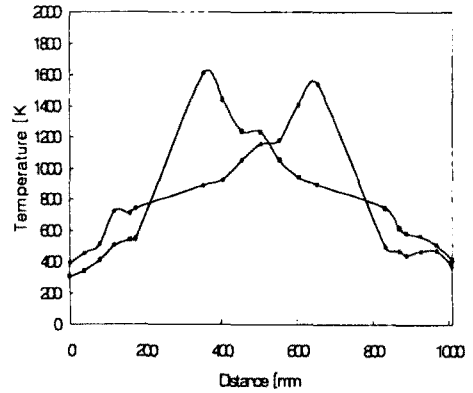


Fig.6 (c)  $Q_{Air} = 200 \text{ l/min}, \phi = 0.8$

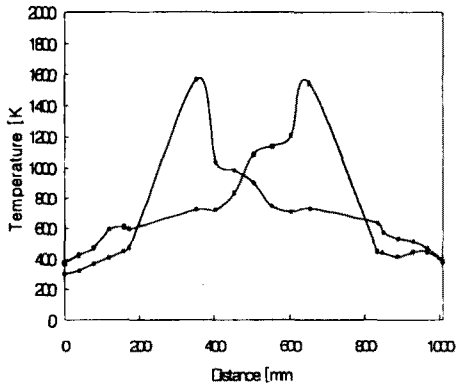


Fig.6 (a)  $Q_{Air} = 200 \text{ l/min}, \phi = 0.5$

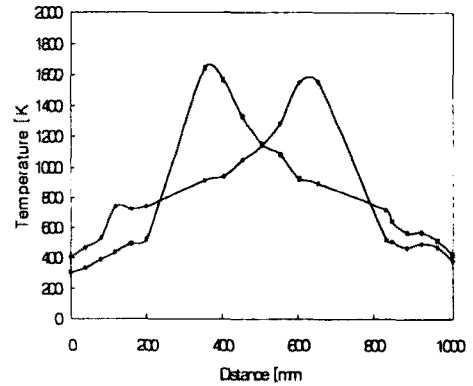


Fig.6 (d)  $Q_{Air} = 200 \text{ l/min}, \phi = 0.9$

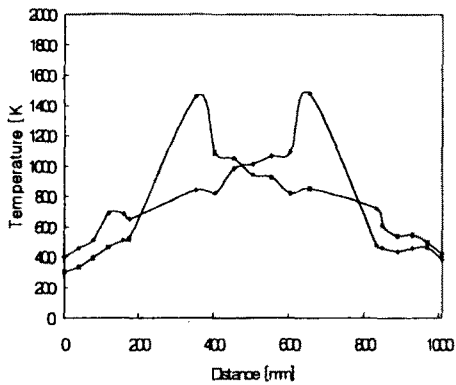


Fig.6 (b)  $Q_{Air} = 200 \text{ l/min}, \phi = 0.7$

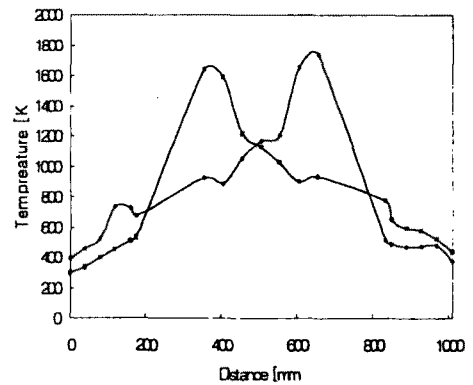


Fig.6 (e)  $Q_{Air} = 200 \text{ l/min}, \phi = 1.0$

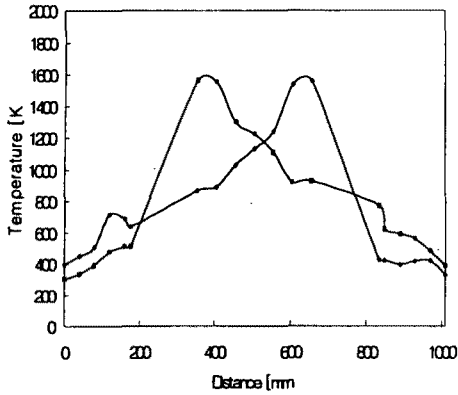


Fig.6 (f)  $Q_{Air} = 200 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 1.1$

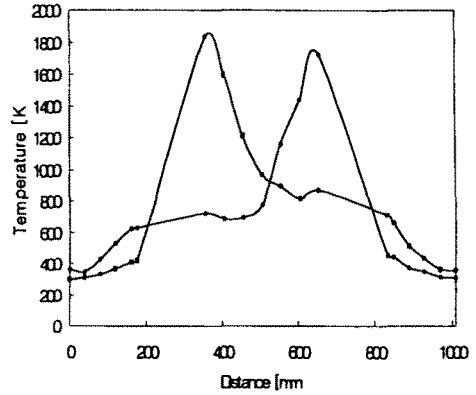


Fig.7 (b)  $Q_{Air} = 300 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 0.5$

Fig.7 (a)~(k)는 연소용 공기 유량이 300l/min일 때 당량비의 변화에 따른 온도분포를 나타낸 것이다.

연소실 내의 온도는 800K에서 1800K 정도를 나타내고 있고, 당량비 0.9 이상에서는 연소실 내의 온도차이가 약 1000K 미만을 나타내고 있다.

축열체를 통과한 공기의 온도는 약 400~500K 정도를 나타내고 있다. 이것은 공기공급방향의 절환 직전에 연소실에 공급되는 공기의 온도로 절환된 후 초기 축열체를 통과하는 공기의 온도는 약 600~700K 정도를 나타냈다.

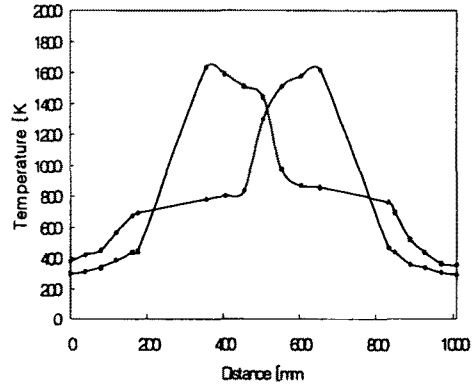


Fig.7 (c)  $Q_{Air} = 300 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 0.6$

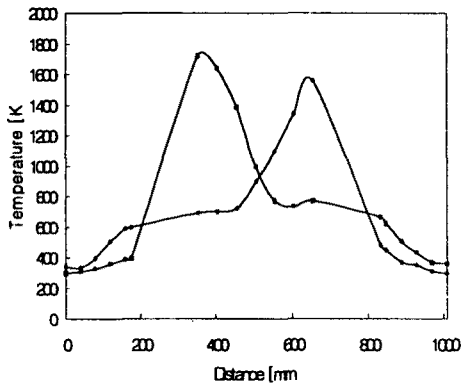


Fig.7 (a)  $Q_{Air} = 300 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 0.4$

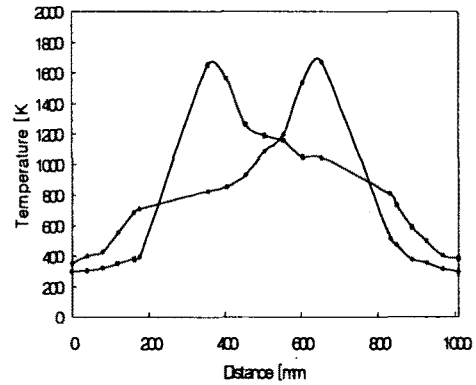


Fig.7 (d)  $Q_{Air} = 300 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 0.7$

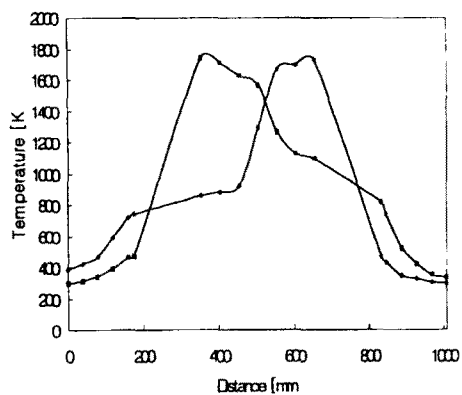


Fig.7 (e)  $Q_{Air} = 300 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 0.8$

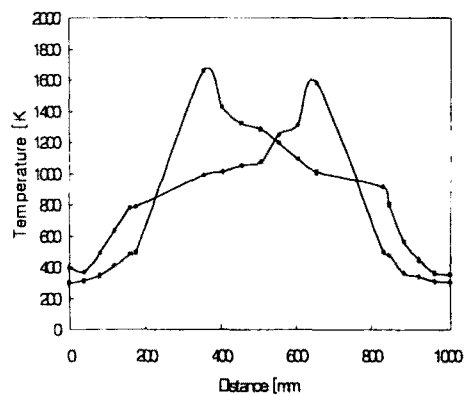


Fig.7 (h)  $Q_{Air} = 300 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 1.1$

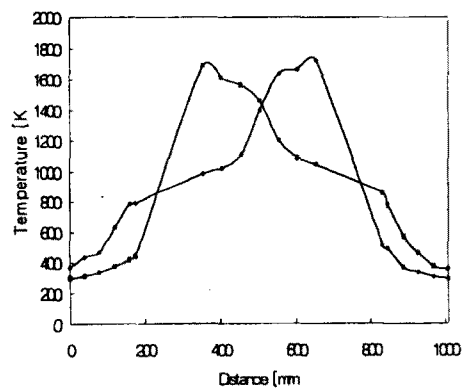


Fig.7 (f)  $Q_{Air} = 300 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 0.9$

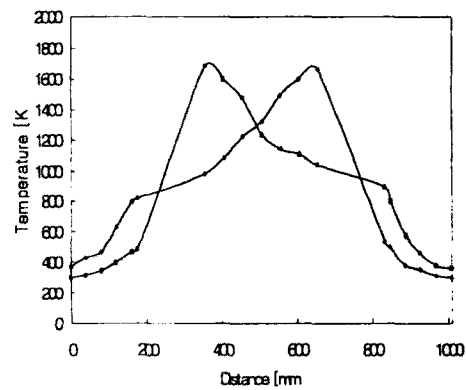


Fig.7 (i)  $Q_{Air} = 300 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 1.2$

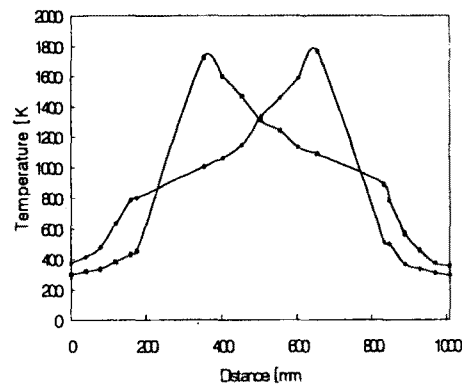


Fig.7 (g)  $Q_{Air} = 300 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 1.0$

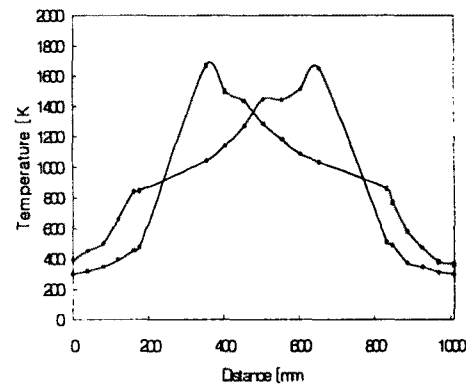


Fig.7 (j)  $Q_{Air} = 300 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 1.3$

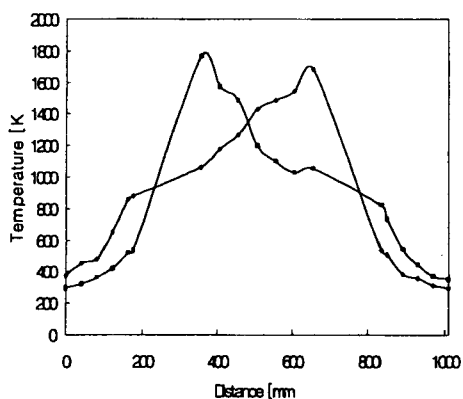


Fig.7 (k)  $Q_{Air} = 300 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 1.4$

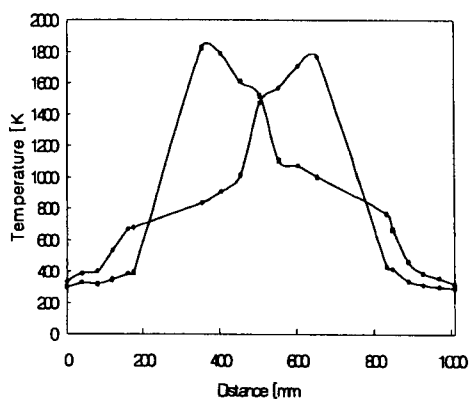


Fig.8 (b)  $Q_{Air} = 400 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 0.6$

Fig.8 (a)~(h)까지의 그림은 연소용 공기유량 400l/min일 때 안정 연소 영역인 당량비 0.5~1.2에서의 연소실 및 축열체의 온도를 나타낸 그림이다.

연소실의 최고 온도는 각각의 당량비에 대해서 약 1800~2000K 정도를 나타내고 있고, 최저 온도는 800~1000K로 연소실 내의 온도 차이는 약 1000K를 나타내고 있다. 또한 연소실의 온도는 거리에 대해서 선형적으로 변화하는 경향이 있다.

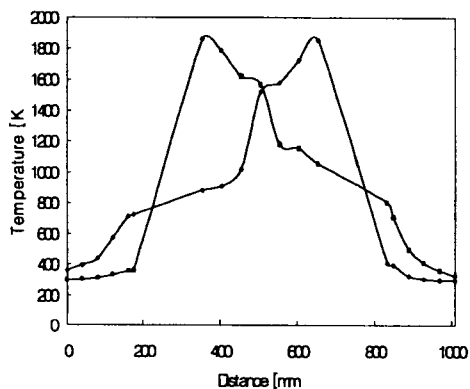


Fig.8 (c)  $Q_{Air} = 400 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 0.7$

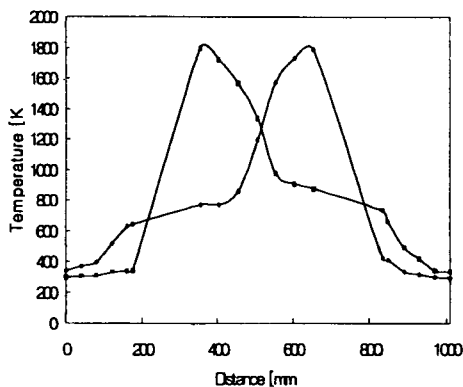


Fig.8 (a)  $Q_{Air} = 400 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 0.5$

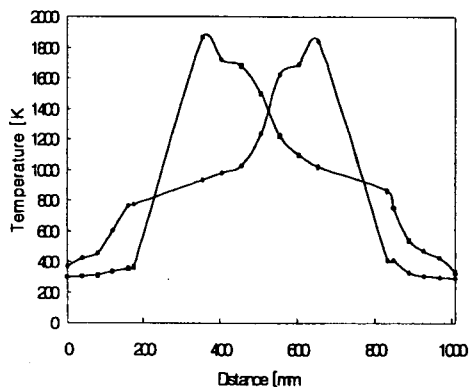


Fig.8 (d)  $Q_{Air} = 400 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 0.8$



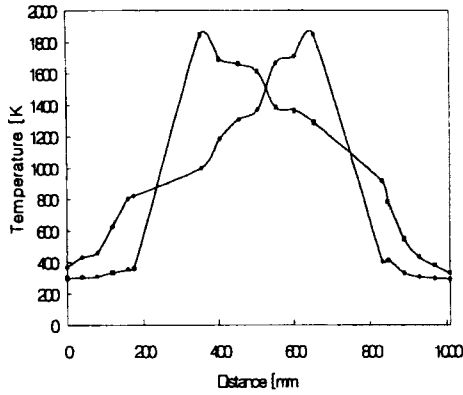


Fig.8 (e)  $Q_{Air} = 400 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 0.9$

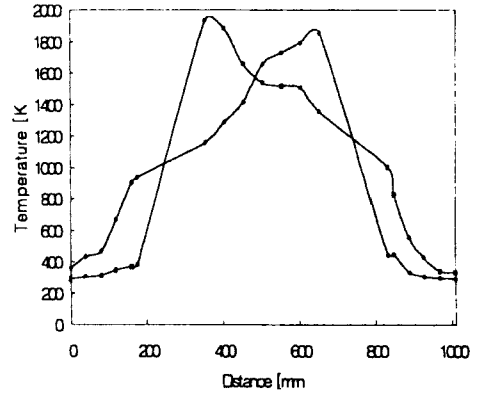


Fig.8 (h)  $Q_{Air} = 400 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 1.2$

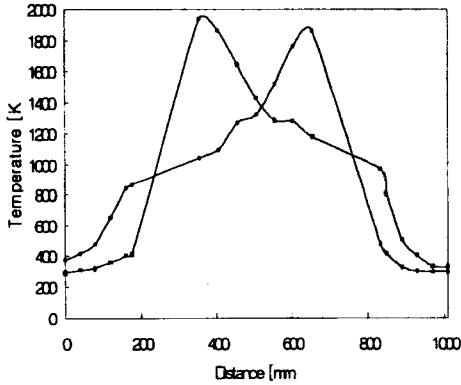


Fig.8 (f)  $Q_{Air} = 400 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 1.0$

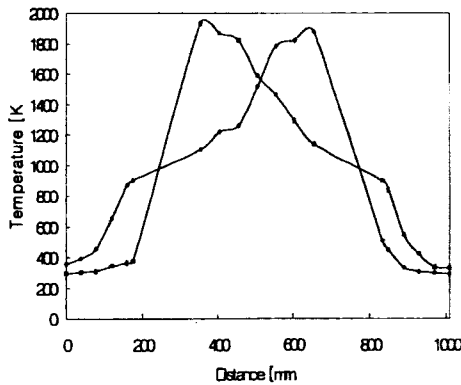


Fig.8 (g)  $Q_{Air} = 400 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 1.1$

Fig.9는 연소용 공기 유량이 500l/min일 때 연소실과 축열체의 온도를 나타낸 그림이다.

연소실의 최고온도는 1900~2000K 정도이고, 연소실 출구측의 온도는 약 1000~1300K 정도를 나타내고 있다.

공기량이 500l/min으로 증가할 경우 안정 연소 영역이 급격히 작아지지만 연소실의 온도차이가 감소하고, 축열체의 온도가 증가하는 경향을 보이고 있다.

축열체의 온도는 400~800K 정도로 연소용 공기의 유량이 증가하면서 크게 증가하는 것을 볼 수 있다.

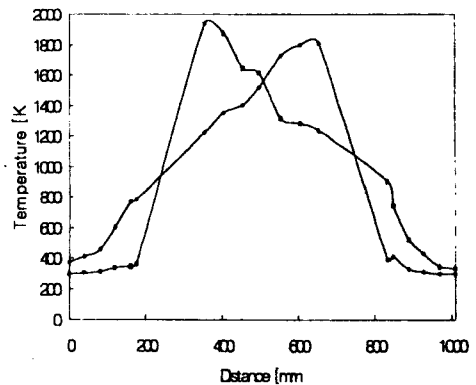


Fig.9 (a)  $Q_{Air} = 500 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 0.7$

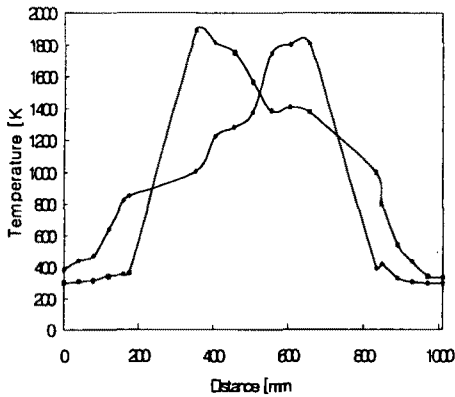


Fig.9 (b)  $Q_{Air} = 500 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 0.8$

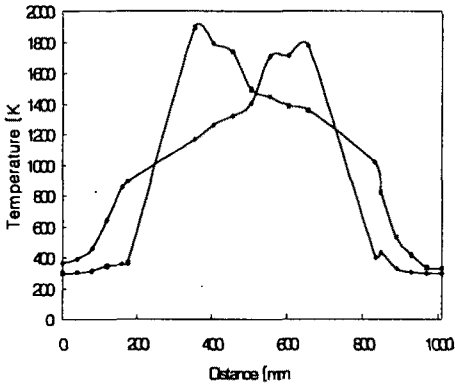


Fig.9 (c)  $Q_{Air} = 500 \text{ l/min}$ ,  $\phi = 0.9$

### 3.3 당량비에 따른 축열체의 온도

Fig.10~Fig.13은 연소용 공기 공급량에 따라 당량비를 변화시키며 축열체의 온도를 나타낸 그림이다. 여기서 P1, P2, P3, P4는 축열체의 온도를 측정된 위치를 나타낸 것으로 P1이 출구측이고, P4가 연소실측의 위치를 나타낸다. P1~P4의 간격은 각각 40mm씩 떨어진 위치에 K-type의 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다.

Fig.10은 공기 공급량이 200l/min일 때 각각의 당량비에 따른 축열체의 온도를 나타낸

그림이다. 연소실측의 축열체 부분은 당량비의 증가에 따라 온도가 약간씩 증가하나 출구 측의 축열체 부분은 당량비가 0.7 이상에서는 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다.

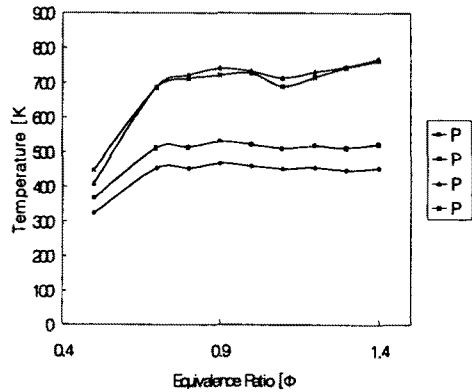


Fig.10  $Q_{Air} = 200 \text{ l/min}$

Fig.11은 연소용 공기 유량이 300l/min일 때 축열체의 온도를 나타낸 그림이다.

연소실측의 축열체 부분은 당량비의 증가에 따라 온도가 급격히 증가해 당량비 1.4에서 약 900K가 되고, 출구측의 축열체 부분의 온도는 당량비에 변화에 거의 영향을 받지 않고 350~450K로 거의 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다.

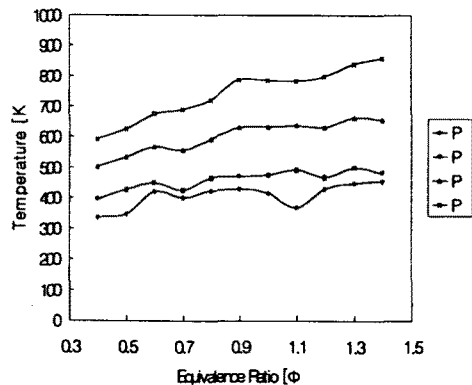


Fig.11  $Q_{Air} = 300 \text{ l/min}$

Fig.12는 공기 유량이 400/min일 때의 축열체의 온도를 나타낸 그림으로 축열체의 온도는 당량비의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

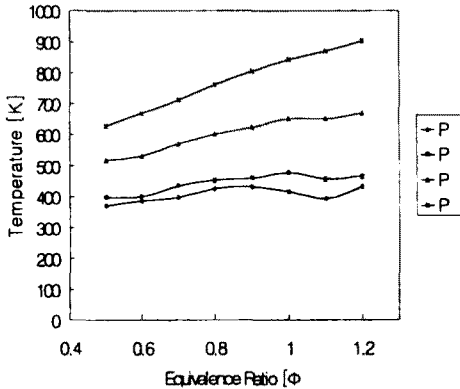


Fig.12  $Q_{Air} = 400 \text{ l/min}$

Fig.13은 연소용 공기 공급량이 500/min일 때 축열체의 온도를 나타내는 그림이다.

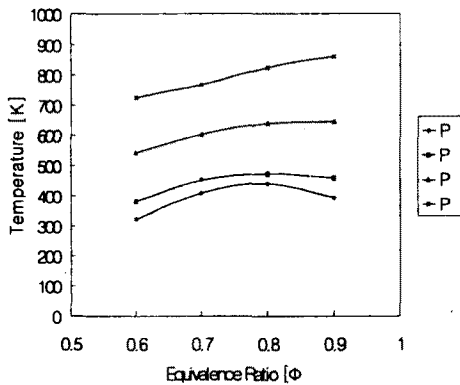


Fig.13  $Q_{Air} = 500 \text{ l/min}$

### 결론

본 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 연소실내의 균일한 온도장을 얻기 위해서는 연소실 설계시 재 순환이 잘 될 수 있도록 설계가 필요 할 것으로 생각된다. 이번 실험에서는 연소실 내의 온도 차이가 약 1000K 정도를 나타내 연소실의 온도 균일화에 문제가 있었던 것으로 보여진다.

(2) 축열체의 축열 능력을 높이기 위해서는 표면적을 넓게 하고 길이를 짧게 해야 될 것으로 생각된다. 이는 축열체의 온도 측정에서 나온 그림에서 보듯이 축열체의 길이 방향에 대해서 온도가 어느 정도 균일한 형태를 나타내기 때문이다.

(3) 초기 연소시 급격한 부피 팽창에 의한 연소 부하가 많이 걸리는 현상이 발생하게 되는데 이를 해결할 수 있는 설계가 필요하다.

### 후기

본 연구는 산업자원부 및 생산기술연구원 에서 지원하는 99년 청정생산기술개발 사업에 의하여 지원되었음을 밝힙니다.

### 참고문헌

- (1) M. Nishimura, T. Suzuki, R. Nakanishi and R. Kitamura, 1997. "Low-NO<sub>x</sub> Combustion Under High Preheated Air Temperature Condition In An Industrial Furnace". Energy Convers. Mgmt. Vol. 38. pp. 1353-1363
- (7) 日本工業爐協會, 1997. "鐵鋼加熱爐における 高温空氣燃焼技術の 適用開發". サーモテック '97 シンポジウム Symposium

- (8) J. Yuan and I. Naruse, 1998, "Modeling of Combustion Characteristics and NOx Emission in Highly Preheated and Diluted Air Combustion", *International Journal Of Energy Research*, Vol. 22, pp 1217-1234.
- (3) Toshiaki Hasegawa, Ryoichi Tanka, 1994, "Advanced Applications of Excess Enthalpy Combustion to Industrial Flame-heated System", *燃焼の科學と技術*, Vol. 1, pp. 265~273.
- (4) Hoffmann J. G., Echigo R., Yoshida H., Tada S., 1997, "Experimental Study on Combustion in Porous Media with a Reciprocating Flow System", *Combustion & Flame*, V. 111, pp. 32~46.
- (5) 김덕홍, 이용국, 김기홍, 1997, "일체형 축열식버너에 관한 실험적 연구", *대한기계학회 추계학술대회논문집*, pp. 1~6.
- (2) Yutaka Suzukawa, Shunichi Sugiyama, Yoshimichi Hino, Muneohiro Ishioka and Isao Mori, 1997, "Heat Transfer Improvement and NOx Reduction by Highly Preheated Air Combustion", *Energy Convers. Management*, Vol. 38, No. 10-13, pp 1061~1071.
- (6) Yutaka Suzukawa, Syunichi Sugiyama, Isao Mori, 1996, "Heat Transfer Improvement and Nox Reduction in an Industrial Furnace by Regenerative Combustion System", *Proceedings of the 31th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, pp. 804~809.