

절환주기 변화에 따른 축열 연소기의 연소특성

양병옥* · 임인권**

Combustion Characteristics of A Regenerative Combustor with the Change of Alternating Period

B. O. Yang, I. G. Lim

Key Words: Regenerative combustion(축열연소), Porous ceramic material(다공세라믹물질), Alternating period(절환 주기), High-temperature air combustion(고온공기연소)

Abstract

Experimental study on combustion characteristics of a regenerative combustor has performed. High-temperature air combustion in the regenerative combustor is obtained through heat recovery from exhaust gas flow by porous ceramic materials and through alternation of air flow direction through the combustor. Temperature field, CO and NOx emission with respect to the frequency of alternation are measured. It is found that at initial stage of the alternation, temperature of inlet section of main combustion chamber is increased sharply since both high temperature air preheated by the ceramics and prompt fuel injection results in rapid combustion. Following this initial stage, combustion temperature is reduced as the preheated air temperature is reduced. However peak temperature in the chamber and exhaust gas temperature are decreased as the alternation period is reduced, increased temperature of ceramic is observed. CO and NOx emission with respect to the alternation period is also examined. It is found that there exists a range of optimum alternating period for CO and NOx emission characteristics.

1. 서론

연소에 기인한 공해물질 및 온난화가스인 이

산화탄소(CO₂)에 대한 대중의 관심이 높아짐에 따라 고효율 청정 연소가 가능한 실용 연소 방법 및 연소기 개발 연구가 활발히 진행되고 있다. 고효율 청정 연소기 개발의 한 방편으로 축열 연소(Regenerative Combustion) 및 이에 따른 고온 고속 연소 유동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

축열 연소기는 고온에 견딜 수 있는 내열 재료를 열 저장 매체로 사용하여 배기가스의 현열

* 명지대학교 기계공학과(원)

** 명지대학교 기계공학과

을 약 85% 정도를 회수할 수 있고, 고온공기 연소를 통해 연료의 Heating Potential을 증가시키며 연소 효율을 높일 수 있는 장점이 있다.^[1.3.7]

축열 연소기에 대한 연구는 현재 일본 및 유럽과 미국에서 많이 진행되고 있는데, 특히 공업용 로(爐)에 대한 적용성 연구가 활발히 진행되고 있고, 이러한 연구 결과 사용연료의 저감과 공해물질 배출억제 및 효율 증대 등에 대한 실제 연구 결과가 보고되고 있다.^[1.2.5.7] 이러한 연구결과 축열 연소시스템의 응용은 철과 비철 금속의 용해로, 전자설비, 소각로 등에 널리 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

축열 연소기는 기존 연소 방식과는 달리 2대의 연소기가 1조가 되어 운전되는 방식을 취한다. 즉, 일정한 주기로 연소기가 교대 운전되는 방식으로, 운전되지 않는 연소기 측의 공기공급 통로는 운전중인 연소기로부터 생성되는 연소가스의 배기통로 기능을 하게 된다. 이때 배기통로 기능을 하는 연소기내에 고온 내열재료인 다공성 세라믹을 삽입하여 고온 배기가스의 폐열을 축열시키고 일정 운전시간 경과 후에 연소기를 교대 운전하면 연소용 공기는 고온 축열층을 통과하는 동안 직접 열교환에 의해 예열되고 연소에 참여하게 된다.

이러한 방법으로 2대의 연소기를 교대로 운전함으로써 폐열 회수율을 대폭 향상시킬 수 있고, 고온 고속 연소 유동 형태가 나타남으로써 연소실 내 온도 균일화를 이룰 수 있으며, 고온 연소가스가 내부 재순환되기 때문에 유해 배기가스의 배출을 억제 할 수 있다.^[1.2.3.7]

본 논문은 축열 연소기의 연소 특성을 알아보기 위한 기초 연구의 일부로, 축열 연소기의 운전 및 배출물 특성에 관련되는 여러 가지 실험 인자 중에서 연소기의 절환 주기 변화에 따른 연소실 내 온도 분포 및 배출 가스 특성을 알아 보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

Fig. 1 은 본 실험에 사용된 연소기 사진으로 실험장치는 크게 연소기, 방향절환밸브, Relay 회로, 점화장치, 온도측정장치, 연소용 공기와 연료 공급부분으로 구성되어 있다.

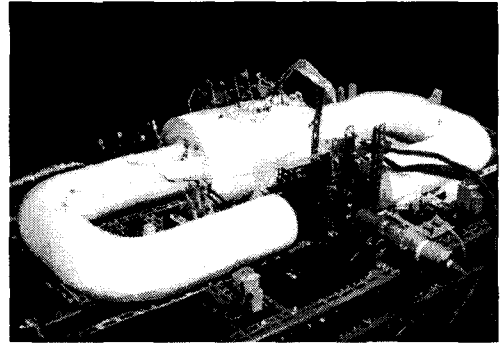


Fig.1 실험용 축열식 연소기

Table 1.
Dimension of Experimental Appar

연소기	전체 길이	360 cm
	외 경	15 cm
	내 경	5 cm
연소실	바깥 길이	40 cm
	안쪽 길이	30 cm
	외 경	30 cm
	내 경	20 cm

실험용 연소기는 공업용로에 사용되는 고알루미나질(High Alumina)의 SK-38 내화용 버너 타일로 제작하였고, 실험 조건의 변화를 용이하게 하기 위하여 몇 개의 부분으로 나누어 제작, 조립하였다. 연소용 공기와 배기가스의 방향절환을 위하여 4-Way Valve를 제작하였고, 기계적 방식인 DC-Motor로 구동시켰다.

Fig. 2 는 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 연소기의 제어에는 DT-VEE 프로그램을

사용한 제어프로그램과 Relay 회로를 이용하였다. 제어프로그램은 PC에 내장된 A/D Board를 이용하여 4-Way Valve Control, 연료 공급용 Solenoid Valve의 개폐, 온도 측정을 위한 열전대의 Data Acquisition에 사용하였다.

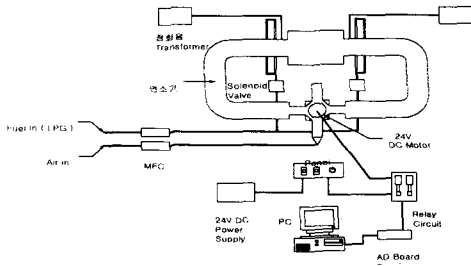


Fig. 2 실험장치 전체도

Relay 회로는 절환 Valve의 절환 시간과 연료 공급용 Solenoid Valve의 개폐시간, 점화용 Transformer의 동기화를 위해 사용하였다.

Fig. 3 은 연소기 및 연소실을 나타낸 개략도이다. 축열재로 사용한 다공 세라믹은 기공률 약 85 %의 길이 15cm, 외경 5cm 인 스폰지 형태의 부분 안정된 지르코니아(Partially stabilized zirconia : PSZ)를 사용하였다. 축열재는 연소실 중심에서 35cm 떨어진 위치에 두개를 대칭이 되도록 삽입하였다.

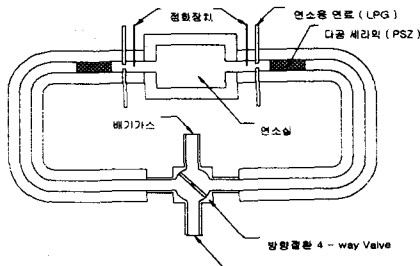


Fig. 3 연소기 세부도

Fig. 4 는 실험에 사용한 다공 세라믹과 종류가 다른 세라믹의 사진을 나타낸 것이다.

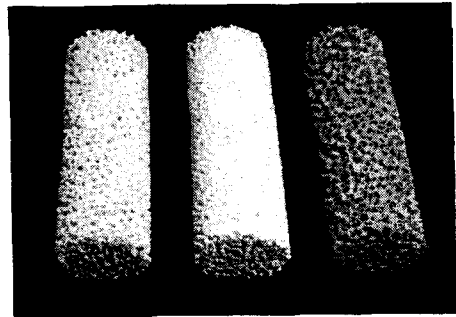


Fig. 4 Photo of Porous Ceramic

연소용 연료는 내경 1.7mm 의 동관으로 제작한 연료 분사노즐을 제작하여, 한 방향에 4개씩 모두 8개를 연소기의 연소공기 유동 방향에 수직으로 설치하여 연료를 공급하였다.

Fig. 5 는 축열재로 사용한 다공 세라믹 물질의 실험 조건을 포함하는 공기 유량에 따른 차압을 나타낸 그림이다. 차압 측정은 축열 연소기와 같은 조건의 차압측정용 실험 장치를 제작하여 실험하였다.

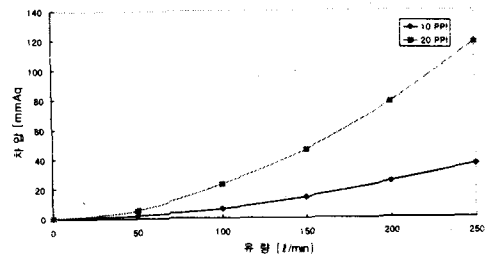


Fig. 5 축열재로 사용한 다공 세라믹의 유량에 따른 차압

2.2. 실험방법

상용 LPG 및 압축공기를 연료와 산화제로 각각 사용하였고, 이들은 습식가스미터에 의해 보정된 질량유량계(Mass Flow-Meter)를 사용하여 공급하였다. 공기 압력은 압력 조절기를 이용하여 2 kg/cm² 로 조절하였다.

공급되는 공기 유량이 일정하고 세라믹을 통

과하면서 공기 온도는 변화하지만, 연소기 투입 온도인 상온을 기준으로 계산 시 공기 속도는 약 2.1m/s 이고, 방향절환밸브의 입구로부터 연료 분사노즐까지의 거리는 1.7m 이다. 공급 공기유동의 연소기내 마찰을 고려하여, 방향절환 후 2초 후에 연료를 공급하였다.

실험 조건은 Table 2 에 나타내었다.

Table 2. Condition of Experiment

항 목	조 건
연료 유량	5.11 l/min
공기 유량	247.9 l/min
Valve 절환 주기	180, 60, 30, 10 sec

연소실 내의 온도 측정을 위하여 R-Type 의 열전대를 21곳에서 설치하였다. 측정 위치는 실린더 형태인 연소실 중심선을 따라 7개를 설치하고, 벽면 부근에 7개를, 그리고 반경 방향으로 중심에 7개를 설치하였다. 열전대의 간격은 5 cm로 하였다.

또 축열재인 다공 세라믹 물질과 입·출구의 온도를 측정하기 위하여 연소기 중심선을 따라 K-type 열전대를 10개 설치하였다. 다공 세라믹의 온도는 표면에 각각 3개의 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다. Fig. 6 의 검은 점으로 표시된 것은 열전대의 위치와 간격을 나타낸 것이다.

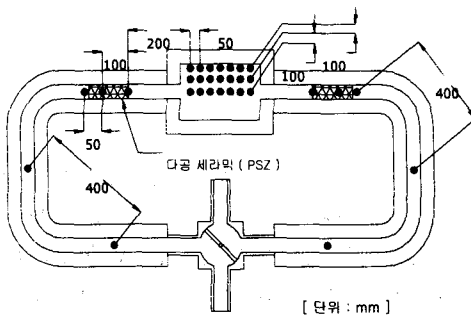


Fig. 6 Location of Thermocouples

배기가스의 측정은 Kane-May Quintox 사의 Gas Analyzer를 사용하여 절환 밸브의 출구 측 20cm의 위치에서 NOx, CO 및 O₂ 의 배출량을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연소기의 온도 분포

축열 연소기의 절환주기에 따른 연소 특성을 알아보기 위하여 절환주기를 180~10 sec까지 변화시키며 실험을 수행하였다. 내화물로 제작된 연소기의 예열 및 열전달 효과가 충분히 제거된 결과를 얻기 위하여, 본 논문에 사용한 결과 자료는 실험 시작 후 120 분 후부터 측정된 결과를 이용하였다.

Fig 7 은 일반 연소기와 같은 조건인 한 방향 흐름에 대한 연소기의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 그래프 안쪽의 그림은 연소기를 펼쳐 놓은 모양을 나타낸 것이고, 연소기 그림 안의 띠는 축열재로 사용한 세라믹이 있는 위치를 나타낸 것이며, 화살표는 유동방향을 나타낸 것이다. 한 방향 흐름 유동시 연소실 입구 온도는 1300 ℃ 정도이고 출구 온도는 600 ℃ 정도로 약 700 ℃ 의 온도 편차를 나타내고 있다.

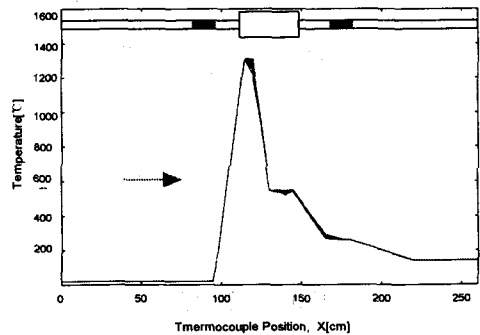


Fig. 7 한 방향 흐름에 따른 온도분포

Fig. 8 (a)는 절환주기가 180 sec일 때, 1 회 절환되는 동안의 연소실 중심선을 따라 측정 한 온도를 나타내고 있다. 절환 초기에 연소실 입구의 온도가 약 1500 °C 이상으로 급격히 증가하고, 이것은 절환 후 초기 고온 예열 공기 및 연료의 급격한 공급에 의한 온도 상승에 의한 것이라고 사려된다. 연소실 내는 600~1300 °C 정도의 온도 분포를 가진다.

Fig. 8 (b)는 절환주기가 180 sec일 때 시간 평균된 연소기 중심 부분의 온도를 나타내고 있다. 축열재로 사용한 세라믹의 표면 온도는 약 600 °C 정도까지 가열되고, 연소 후 배출되는 배기가스의 온도는 평균 200 °C 이상을 나타내고 있다. 연소실 내의 온도는 초기 점화시 보다 낮아져서 1400 °C 이하의 온도분포를 나타낸다.

Fig. 9 는 절환주기를 60 sec로 하였을 때 연소기 중심을 따른 온도를 나타내고 있다. 절 환된 후 점화 시 입구 온도는 약 1500 °C 정도 이며, 배기가스의 온도는 200 °C 정도의 온도 분포를 나타낸다. 연소실 내의 온도분포는 절환 후 연소가 안정화된 상태에서 900~1000 °C 정도를 나타낸다. 세라믹의 표면 온도는 약 750 °C 정도로 가열되고 연소실 입구의 온도도 1400 °C 이하로 낮아지게 된다.

절환 후 초기 온도는 절환주기가 180 sec 일 때와 비슷하지만, 연소실 평균 온도는 상대적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 축 열재로 사용한 다공 세라믹의 표면 온도가 높아 짐에 따라 연소 공기의 온도가 증가하여 연소실 내의 평균 온도가 상승한 것으로 생각된다.

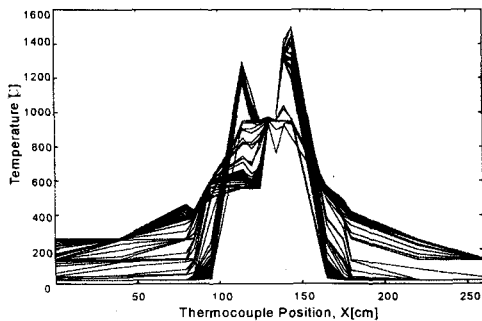


Fig. 8 (a) 절환주기 180 sec일 때의 온도분포

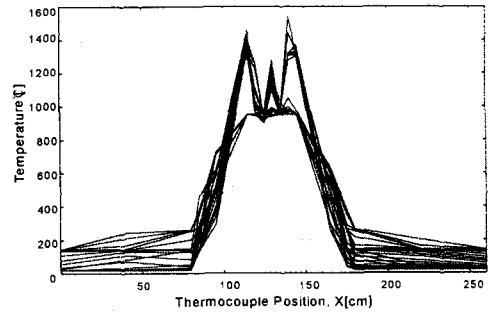


Fig. 9 (a) 절환주기 60 sec일 때의 온도분포

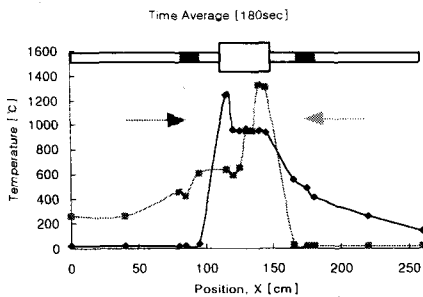


Fig. 8 (b) 절환주기 180 sec일 때의 시간평균 온도분포

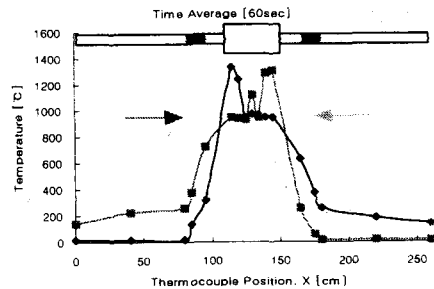


Fig. 9 (b) 절환주기 60 sec일 때의 시간평균 온도분포

Fig. 10 은 절환주기를 30 sec 일 경우를 나타내고 있다. 점화 초기 온도는 1400 °C 이하를 나타내고 있으며, 배기 가스의 온도는 200 °C 이하를 나타내고 있다. 안정화된 상태의 온도는 전체적으로 900~1300 °C 정도의 분포를 나타내고 있으며, 세라믹 표면온도는 절환주기가 60 sec 일 때와 비슷하게 700 °C 이상을 나타내고 있다.

절환주기가 짧아지면서 절환 후 초기 점화온도는 절환주기가 180 sec 일 때 보다 약 200 °C 정도 낮아졌으며, 배기가스의 온도는 약 100 °C 정도 낮아졌다. 또한 연소실 내의 중심 부분에서 고온 영역이 발생하였고, 연소실 내의 전체적인 온도 분포는 균일화되는 경향을 보이고 있다.

Fig. 11 (a)와 (b)는 절환주기가 10 sec 일 때의 온도 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 11 (a)에서 보듯이 절환 초기 온도는 약 1300 °C 정도를 나타내고 있으며, 배기가스의 온도는 200 °C 이하를 나타내고 있다. 연소가 안정화된 상태에서 축열재로 사용한 세라믹의 온도는 약 600 °C 정도를 나타내고 있다.

세라믹 표면의 온도는 절환주기가 짧아지면서 어느 정도 증가하다가 다시 감소하게 되지만, 연소실 내의 온도 분포는 일정한 경향을 보이고 있다. 그러나 절환주기가 짧아지면 연소실 내의 평균 온도는 일정해지는 장점이 있지만 연료가 완전히 연소하지 못하고 불완전 연소하는 현상을 나타내게 된다.

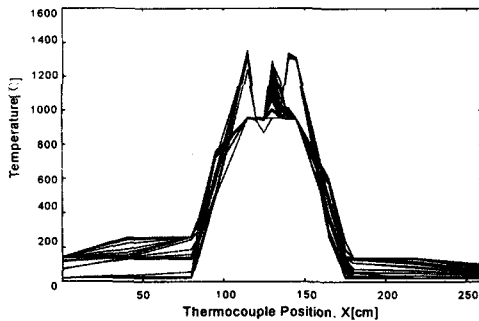


Fig. 10 (a) 절환주기 30 sec일 때의 온도분포

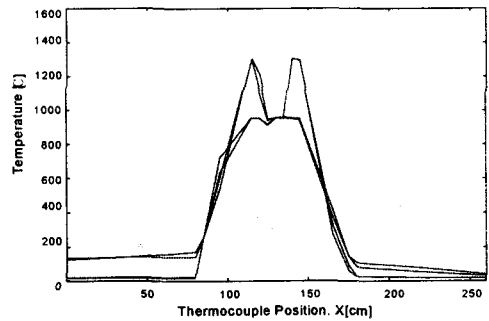


Fig. 11 (a) 절환주기 10 sec일 때의 온도분포

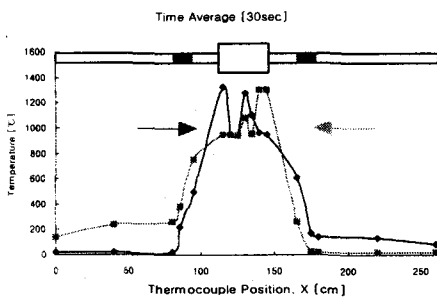


Fig. 10 (b) 절환주기 30 sec일 때의 시간평균 온도분포

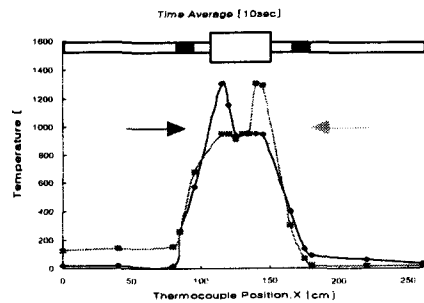


Fig. 11 (b) 절환주기 10 sec일 때의 시간평균 온도분포

Fig. 12 는 절환주기의 변화에 따른 연소실 최고온도와 배출가스 온도, 세라믹 온도를 시간에 대하여 평균하여 나타낸 그래프이다. 연소실 최고온도는 절환주기가 짧아짐에 따라 증가하다가, 절환시간 30 sec 이후에는 약간 감소하게 된다. 연소기 출구의 배기가스 온도는 200 °C 이하로 일정한 경향을 보이고 있다. 세라믹 온도는 600~750 °C 정도를 나타내고 있는데 절환주기가 30 sec 일 때 최고온도를 나타냈다.

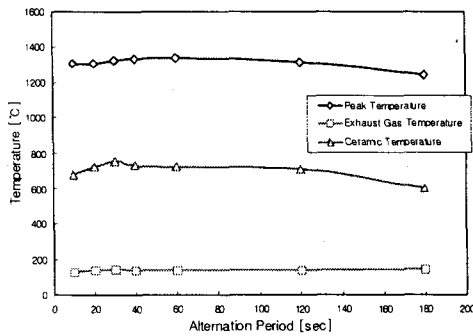


Fig. 12 절환주기에 따른 평균 연소실 최고 온도, 평균 배기가스 온도, 평균 축열재 온도

3.2 절환주기에 따른 CO 및 NOx 발생

배기가스는 측정 후 15% O₂로 변환하여 결과를 나타내었다. 방향 절환 주기는 180, 120, 60, 40, 30, 20, 10 sec 로 같은 공기 및 연료 유량 조건에서 실험을 수행하였다.

Fig. 13 은 방향 절환 밸브의 절환 시간에 따른 NOx 발생량을 나타낸 그림이다. 같은 조건의 한 방향 흐름의 경우, NOx 배출량은 75.2 ppm 정도이고, 절환 연소의 경우는 이보다 적게 배출된다는 것을 알 수 있다.

방향 절환 밸브의 절환 주기가 점차 짧아지면 배기가스 중의 NOx 발생량이 증가하게 된다. 이것은 절환 주기가 짧아지면서 세라믹 축열재의 표면 온도가 증가하여 연소용 공기 온도가 높아지게 되고 연소실 내의 평균온도가 증가하기 때문이다. 밸브 절환시기가 약 60 sec 보다

더 짧아지면 불완전 연소에 의하여 NOx 배출량이 감소하는 경향을 나타냈다.

Fig 14 (a), (b)는 절환주기에 따른 CO 배출량을 나타낸 것이다. 한 방향 흐름에 대해서 CO는 약 133.4 ppm 정도가 발생하였다.

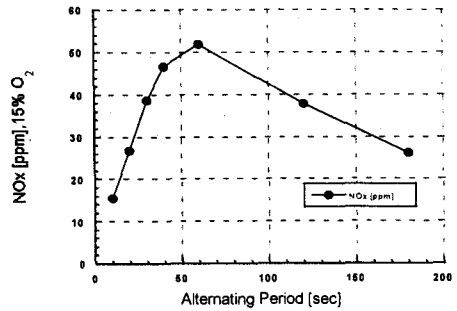


Fig. 13 절환주기에 따른 NOx 발생량

절환 연소의 경우 CO 발생은 절환주기가 짧아지면서 서서히 감소하다가, 절환주기가 60 sec 이하가 되면 증가하는 경향을 보인다. 이것은 절환주기가 짧아지면서 반응에 필요한 시간이 감소되어 불완전 연소되기 때문이다.

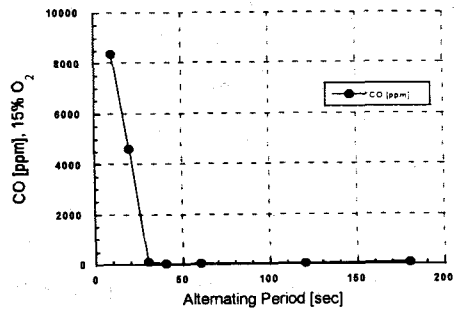


Fig. 14 (a) 절환주기에 따른 CO 발생량

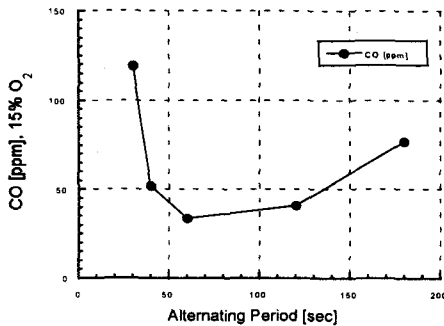


Fig. 14 (b) 절환주기에 따른 CO 발생량

4. 결론

다공 세라믹 물질을 사용한 축열 연소기를 개발하기 위한 기초 실험을 수행하였고, 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 방향절환밸브의 절환시간이 줄어들면 연소실 내의 최고 온도가 낮아지고, 전체적인 온도는 일정한 경향을 나타내고 있다. 또 연소 후 배출되는 배기가스의 온도도 낮아지며, 세라믹의 표면온도는 증가하였다.
- (2) 방향절환밸브의 절환시기를 짧게 하면 세라믹의 표면온도는 증가하지만 전체적으로 불완전 연소하는 현상이 나타났다.
- (3) 절환된 후 연소실 입구 온도는 순간적으로 상승하였다가 연소가 안정화되면 약 100~300 °C 정도 낮아지는 경향이 있다. 이것은 절환된 후 연료공급용 밸브가 열리면서 순간적으로 공급되는 연료의 점화 및 초기 공급되는 고온 공기에 기인한 것으로 보인다.

본 실험은 축열식 연소기의 절환주기에 따른 연소특성을 파악하기 위한 기초 실험을 수행하였고 앞으로 실제 축열재로 사용한 세라믹 물질의 축열 특성과 세라믹 물질의 종류에 따른 특

성을 진행할 예정이다.

점화 초기에 발생하는 문제점들을 해결하기 위해서는 절환 후 연소기에 공급되는 연료 유량을 가변적으로 변화시켜 초기 점화 온도를 낮추고, 절환시간의 단축에 따른 불완전 연소 요인을 줄이기 위해 연료의 공급방식과 공기와의 혼합방식을 변화시켜야 할 것으로 생각된다.

또 효율적인 연소기의 개발을 위해서 연료와 공기의 유량을 변화와 연소기의 형태 등도 변화시키며 많은 결과를 얻어야 할 것이다.

참고문헌

- (1) M. Nishimura, T. Suzuki, R. Nakanishi and R. Kitamura, 1997, "Low-NOx Combustion under High Preheated Air Temperature Condition in an Industrial Furnace", *Energy Convers. & Management*, Vol. 38, No. 10-13, pp. 1353~1363.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 김덕홍, 이용국, 김기홍, 1997, "일체형 축열버너에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 추계학술대회논문집, pp. 1~6.
- (5) 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.

- (7) Yutaka Suzukawa, Syunichi Sugiyama, Isao Mori, 1996, "Heat Transfer Improvement and NO_x Reduction in an Industrial Furnace by Regenerative Combustion System". *Proceedings of the 31th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, pp. 804~809

후기

본 연구는 교육부 연구 지원(ME97-F-06)의 일부 및 산업자원부 청정생산기술사업 연구 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.