

< 논 문 >

다공 세라믹 버너 내부의 화염 거동에 관한 실험

임 인 권* · 정 석 호**

(1996년 7월 10일 접수)

Experimental Study on Flame Behavior within a Porous Ceramic Burner

In Gweon Lim and Suk Ho Chung

Key Words: Porous Ceramic Burner(다공 세라믹 버너), Flame Stability(화염 안정성), Transient Behavior(비정상 거동), Premixed Flame(예혼합 화염)

Abstract

Experimental studies on combustion phenomena within a porous ceramic burner are reported. Main interest of the present work is to investigate fundamental flame behaviors and their effects on the burner operation. Due to high thermal capacity of the porous ceramic materials, the response of flame to burning condition changes is slow and thus to have a stabilized flame is quite difficult and takes much time. It is found that the temperature profile obtained at downstream of the flame zone is not much sensitive to the movement of flame and the speed of flame movement is less than 0.1 mm/sec for the conditions tested. With the premixed LPG/air flame imbedded within the porous ceramic burner, stable combustion regions and unstable combustion regions leading to blowoff or flashback phenomena are observed and mapped on flow velocity versus equivalence ratio diagram. For the development of burner operation technique which is more practical and safe, intermittent burning technique, where the fuel or/and air is supplied to the burner intermittently, is proposed as one of the flame control methods for the porous ceramic burner and tested in this study. Through the experiment, it is realized that the proposed method is acceptable in respect to burner performance and give much flexibility in the operation of porous ceramic burner.

1. 서 론

초과 엔탈피 연소(excess enthalpy combustion)에 대한 개념이 Weinberg⁽¹⁾에 의해 제안된 이후의 구현을 위한 여러 기술 및 방법에 대한 연구가 진행되어 오고 있다.^(2,3) 이 중에서 연소기 재료로 다공물질을 사용하는 것이 유망하다고 알려져

있으며, 이는 연소가 다공 물질의 내부에서 일어날 때, 외부에 다른 부가 장비를 장착하지 않고서도 초과 엔탈피 현상을 효과적으로 구현할 수 있어 작은 연소 공간에서도 고부하 연소가 가능하고 청정 연소가 가능하기 때문이다.

다공물질을 이용한 연소기에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해서 실험적, 이론적, 또는 수치적 방법을 통하여 진행되고 있으며,⁽⁴⁻⁷⁾ 이를 통하여 다공물질을 이용한 경우 연소 가스로부터 미연 혼합기로의 열재순환(heat recirculation) 현상이 연

*회원, 명지대학교 공과대학 기계공학과

**회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

소속도 및 최대 화염온도의 증가와 연소한계 확장 등의 장점을 가져온다는 것이 알려져 있다. 이외에도 다공 세라믹의 큰 방사율(emissivity)로 인하여 다른 형태의 연소시에는 얻지 못하는 고온 균일한 복사 열전달이 가능하며, 일반 화염에 비해 특이한 화염 구조로 인해 일산화탄소 및 질소산화물의 배출량이 매우 적은 저공해 연소가 가능한 이점들 또한 가지고 있다. 또한 연소기 내의 화염 구조가 주로 다공 세라믹 안에서의 복사 열전달에 의해 지배되어, 세라믹 재질을 교환함으로써 복사 특성을 변화시킬수 있어 연소 안정성 및 연소기 운용을 제어할 수 있다는 장점이 있다.^(6,7)

이러한 여러 장점들에도 불구하고 다공 세라믹의 실제 연소기에의 적용은 미미하다. 이는 첫째로 고온 하에서 세라믹 재료의 열충격(thermal shock) 및 수명에 제한이 있다는 점과, 둘째로 실제 다공 세라믹 연소기에서 화염 안정성 및 연소 제어가 어렵다는 점 때문이다. 최근 고온에서도 안정적으로 사용할 수 있는 다공 세라믹 재질이 지속적으로 개발되고 있다.⁽⁸⁾ 다공 세라믹 연소기 내의 화염은 직접 관찰하기 어려워, 실험적 연구는 상당한 제약을 받고 있으며, 연소속도, 온도분포, 일산화탄소 및 질소산화물 등의 배출물, 복사 열전달 등의 측정 결과들이 주로 보고되고 있다.^(9,10) 이러한 연구들의 종합화와 관련한 난제의 하나는 다공물질의 재질과 화염 안정화의 기준이 서로 상이하기 때문에 다공 세라믹 연소기의 실용화에 걸림돌이 되고 있다.

연소기에서 화염전파속도(flame propagation speed) 또는 연소속도(burning velocity)는 일반적으로 화염이 일정 위치에 정지되어 있는 정상상태에서의 미연 혼합기의 유동속도로 정의된다. 세라믹 물질의 경우 열용량(thermal capacity)이 크고, 연소기 주위의 단열재를 통한 매우 느린 열전달 특성이 화염의 안정화에 영향을 미친다. 따라서 화염이 이동하는 다공 세라믹 연소기에서는 연소속도의 측정은 화염 안정화의 기준에 좌우된다.

본 연구에서는 다공 세라믹 연소기 내에 화염이 존재할 때 연소 조건에 따른 화염 거동과 안정 및 불안정한 연소영역을 파악하였다. 이를 바탕으로 넓은 운전 범위에서 연소를 안정적으로 유지시키고, 다공물질이 가지는 장점들을 이용하여, 연소기를 안전하게 운전할 수 있는 새로운 연소방법을 제시하고자 한다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

실험 장치는 다공 세라믹 연소기, 유량 및 온도 측정 장치와 데이터 획득 장치로 구성되어 있다. 열전대의 위치가 표시된 다공 세라믹 연소기의 개략도가 Fig. 1에 나타나 있다. Fig. 2는 10 ppi (pores per inch) 및 65 ppi의 다공 세라믹에 대한 직접 사진이며, 각각 85% 및 87%의 기공률을 가지고 있다.

다공 세라믹 연소기는 스폰지 형태로 기공률(porosity)이 높은, 부분 안정된 지르코니아(partially stabilized zirconia : PSZ)로 ϕ 5.1 cm 인 원형 실린더를 사용하였으며, 화염이 세라믹 버너 부분으로 유입시 및 화염전파시 나타날 수 있는 열충격(thermal shock) 및 이의 전파를 최소화 하기 위하여 높이 1.3 및 2.5 cm의 실린더를 쌓아 총 길이를 14.0 cm로 하였다. 본 연구에서는 10 ppi를 연소기 재료로 사용하였다.

세라믹 실린더의 주위에는 두께 2.54 cm의 원형

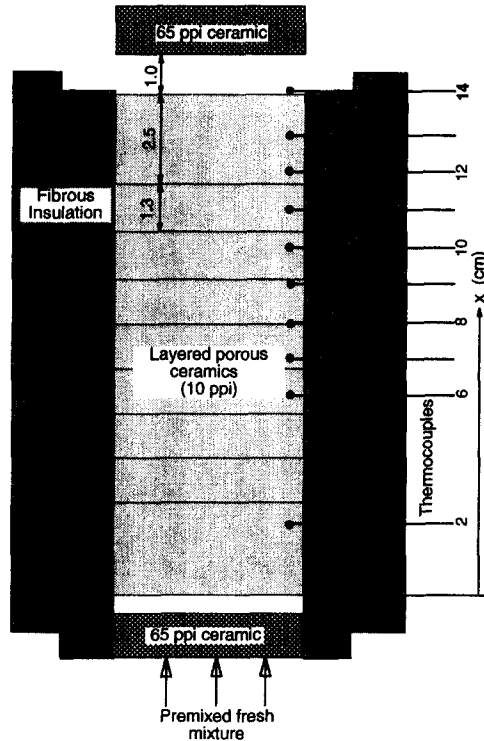


Fig. 1 Details of burner section with thermocouple locations

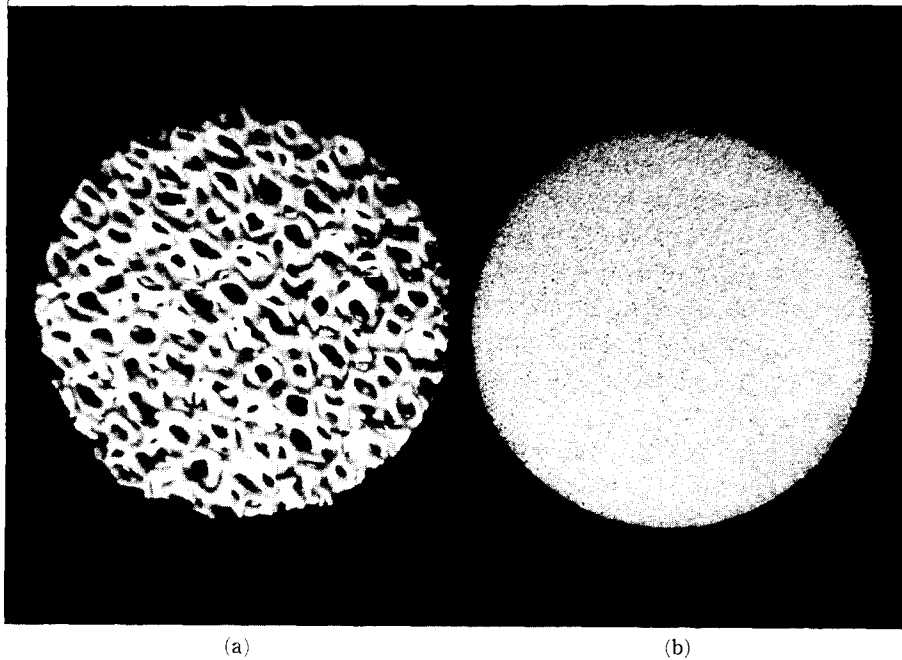


Fig. 2 Direct photographs of porous ceramic (a) 10 ppi and (b) 65 ppi

알루미나를 이용하여 단열하였고, 연소기 내의 온도 분포 및 화염 거동을 측정하기 위하여 ϕ 300 μm 인 10개의 B형(Pt/6%Rh-Pt/30%Rh) 열전대를 세라믹 내부에 삽입하였다. 다공 세라믹 연소기에서 온도 분포는 일차원에 가깝다는 것이 기존의 실험적 연구에서 밝혀져 있으므로⁽¹¹⁾ 연소기의 한 수직단면에서만 온도 측정을 행하였다. 온도 신호는 데이터 획득장치(Fluke)에 의해 컴퓨터에 저장되고 후처리된다.

연료와 산화제로는 상용 LPG와 압축공기가 사용되었고, 유량은 습식 가스미터(wet gas meter)에 의해서 보정된 로터미터들로 조절하였다. 연소기에 유입되기 전에 연료와 산화제는 미리 혼합이 이루어지고, 연소기 하부에 유입된 이 후에도 유리바드 및 허니콤을 통과시킴으로서 연소기의 세라믹 부분에 도달하기 전에 완전 혼합 및 균일한 유동 형태를 이루도록 하였다. 또한 연료공급 라인에 밸브를 위치시켜서 필요에 따라 개폐하였다.

연소기로 유입된 혼합기는 상부의 세라믹 표면에 서 점화된다. 각 실험은 화염이 다공 세라믹의 하단부에 도달할 때까지만 진행되었고, 각 실험이 끝난 후에는 많은 양의 공기를 흘려줌으로써 연소기를 냉각시키고 다음 실험을 시작하였다. 연소기 출

구에서 복사 열전달의 영향을 알아보기 위하여 연소기 본체와 같은 재질의 높이 1.3 cm 및 ϕ 5.1 cm의 촘촘한 65 ppi의 세라믹을 출구 2.0 cm 상부에 위치시켜 필요시 복사 차단용으로 사용하였고, 연소기의 입구에는 역화를 방지하기 위해서 복사 차단용과 같은 세라믹(65 ppi)을 주 연소기 아래에 위치하였다.

3. 결과 및 고찰

온도측정에 있어 열전대 및 측정 시스템에 기인한 측정 오차가 존재하지만, 다공 세라믹 연소기에서는 기상과 고상의 온도 불균일성으로 인해 오차가 추가된다. Fig. 3(a)와 3(b)는 다공 세라믹 연소기에서 정확한 온도 측정시의 어려움을 보여주고 있다. 그림은 당량비 $\phi=0.5$ 이고 연소기 입구에서의 평균속도가 $u_o=34$ cm/s일 때 시간 경과에 따른 연소기의 온도 분포 및 등온선을 나타낸 것이다. 이 혼합기에 대한 자유전과화염의 연소속도 S_L 는 10 cm/s 이하이고, 단열화염온도는 CEC코드⁽¹²⁾를 사용하여 계산시 1509.4 K이다.

측정 초기(0 s)에 연소기 하부에 복사 차단용 세라믹을 위치시킴에 따라 출구에서의 복사 열손실이

감소되어 출구 온도가 증가됨을 알 수 있다. 이 때 출구에 위치한 열전대는 세라믹 고체부분과 약간의 거리를 두고 있으며, 가스의 온도를 측정하고 있음을 확인할 수 있었다.

170 s 경과 후 출구에 위치한 열전대를 중앙부를 향하여 이동시켜 세라믹 고체 부분의 온도를 측정하였고, 이에 따라 시간이 지남에 따라 약 90 K 정도 감소하였다. 이의 주된 요인은 열전대의 이동에 따라 화염이 위치하는 부분의 고온 세라믹과 열전대 사이의 복사 열전달의 영향에 기인한다. 즉 다공 세라믹의 불규칙하고 복잡한 구조 때문에 열전대가 화염이 위치하는 고온의 세라믹 부분에 직접 노출될 수도 있고, 노출되지 않을 수도 있기 때문이다. 이에 따라 본 실험에서 온도 측정의 오차 또는 불확실성은 상당히 크며 이는 다공 세라믹 연소기 특성상 피하기 어렵다.

또한 전체적으로 안정되게 연소가 되면서 화염면(최대온도를 나타내는 $x=8\sim 9$ cm 사이에 위치)이 0.04 mm/s 정도의 매우 느린 속도로 이동하는 것이 관찰되었다. 또한 화염면이 이동하더라도 반응 지역 하류의 온도분포는 화염 이동과 관계 없이 일정하게 유지된다는 것과 상류로의 열전달 효과가 화염 전면에서 약 3 cm 이상 유지됨을 알 수 있다.

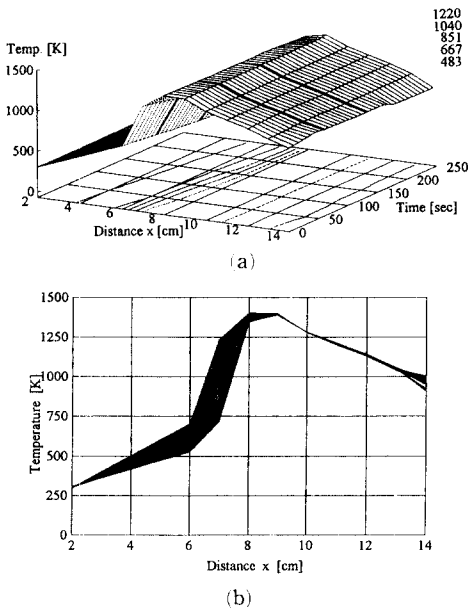


Fig. 3 Temperature profiles for $\phi=0.5$ and $u_o=34$ cm/s

Fig. 4는 $\phi=0.68$ 및 $u_o=48.4$ cm/s인 혼합기의 연소시 화염 거동을 보여준다. 복사차단 세라믹을 위치시키고 점화시킨 경우 화염은 약 600 s 동안 차단용 세라믹으로의 열전달과 연소기 출구의 크고 부상된 화염(lifted flame)으로 인해서 반응영역이 연소기 안으로 들어가지 않는 화염 날림 현상에 가까운 상태가 된다. 차단용 세라믹이 제거되고 유속을 감소시키면, 세라믹 상부에는 작은 화염들이 생기고 화염이 세라믹에 완전히 밀착되어 열전달이 촉진되고 결국에는 화염이 연소기 상류 쪽으로 전파된다. 화염이 세라믹 연소기 안으로 유도된 후 초기의 연소 조건으로 하면 화염은 0.08 mm/s의 속도로 연소기의 상류로 역확된다. 이는 정해진 유속 및 당량비 조건에 대하여 점화에서부터 시작하

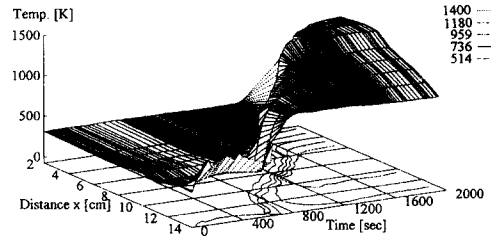


Fig. 4 Temperature profiles from ignition to flashback for $\phi=0.68$ and $u_o=48.4$ cm/s

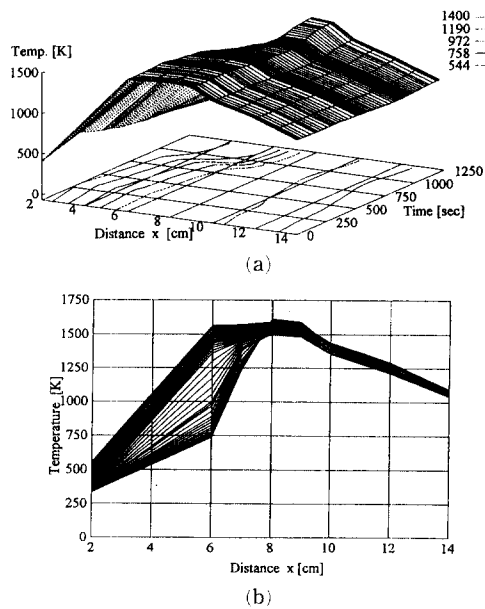


Fig. 5 Relocation of flame position for $\phi=0.63$ and $u_o=48.2$ cm/s

여 화염을 연소기 안으로 유도하는 것과 연소기 내에 안정된 화염을 얻기에는 상당한 시간 및 조절이 필요하다는 것을 알려주며, 특히 초기에 화염을 다공 세라믹 내로 유도하는 것은 주어진 연소조건이 역화 연소 범위 내 일지라도 힘들다는 것을 보여준다.

Fig. 5(a)와 (b)는 $\phi=0.63$ 및 $u_o=48.2$ cm/s인 경우의 화염 거동을 보여준다. $x=6$ cm에서 위치한 화염에 대하여 연료 유량을 감소시켜 화염을 연소기 중간부로 이동시키고 900 s 후 다시 원래의 유량조건으로 할 때 화염이 조건 변경 전의 위치로 돌아오는 가를 시험하였다. 조건 변화에 대하여 화염이 이동하는 데에는 0.02 mm/s 이하 속도로 약 15분 정도 소요되고, 원래의 연소 조건으로 전환시 화염이 원래 위치로 이동하지 않고 중간부에서 위치하는 것을 알 수 있다. 이는 외부의 조건 변화에 대하여 연소기의 응답속도가 매우 느리다는 것과 동일한 연소 조건에 대해서도 연소기 내의 여러 지점에서 화염이 위치하여 연소가 일어난다는 것을 알려준다. 이러한 현상은 다공 세라믹 연소기내에서 화염을 원하는 곳에 안정화시키는 것과 화염제어가 어렵다는 것을 의미한다.

또한 반응지역 하류에서의 온도 변화는 Fig. 3(b)의 온도 변화에 비하여 더 크다. 연소기 내에서 느린 화염전파시에는 반응지역 하류의 온도 변화는 거의 달라지지 않으나 외부 연소조건 변화는 연소기 하류의 온도 분포를 전체적으로 변화시키는 것을 알 수 있다.

속도와 당량비 선도 위에 안정 연소(stable combustion), 역화(flashback) 및 날림(blowoff)이 발생하는 연소영역을 Fig. 6에 나타내었다. 각 실험의 초기에 화염면(온도가 최대인 곳)을 연소기

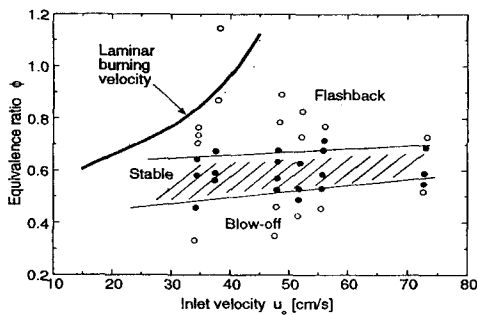


Fig. 6 Regions of flame within porous ceramic burner

중간부분인 $x=7$ cm에 위치시킨 후, 화염면이 약 5분 동안 움직이지 않으면 안정된 화염이라 판정하여 분류하고, 상류 쪽으로 이동할 경우는 역화, 하류 쪽으로 이동할 경우는 날림이라 판정하였다. 비교를 위하여 자유전파화염의 연소속도를 함께 나타내었다. 그림에서 $\phi \approx 5$ 근처까지의 희박 혼합기에 대해서도 안정된 화염을 얻을 수 있으며, 동일한 유속 조건에 대해서는 당량비가 증가할수록 역화 영역 쪽으로 진행되고 당량비가 감소할 경우 화염 날림이 일어난다.

위 그림은 초기에 화염이 연소기의 중앙부에 위치하고 시간을 5분으로 정해서 얻어진 영역이기 때문에 역화 및 날림 영역에서 연소가 불가능하다는 것을 의미하지는 않으며, 이 영역들에서도 화염면이 0.04 mm/s 이상의 속도로 느리게 이동하면서(위의 기준에 따른 역화 또는 날림시에도) 연소가 가능하다는 것을 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 이는 연소기 내 화염 위치에 따라 연소 속도가 달라지는 다공 세라믹 연소기의 특성 때문이며, 연소 영역의 판단시 다른 판정기준을 사용한다면 위에서 분류된 연소 영역들의 범위 또한 달라질 수 있음을 의미한다.

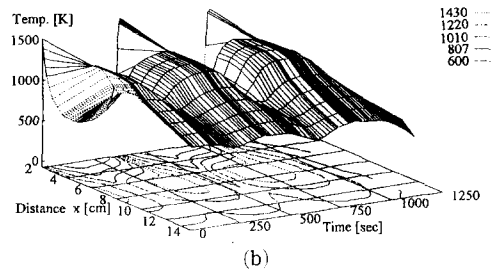
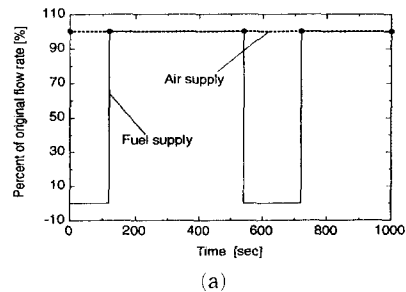


Fig. 7 (a) Schedule for fuel and air supplies to the burner, (b) Temperature profile and isothermal lines with intermittent fuel supply as described in (a)

앞에서 언급된 일련의 실험을 통하여 다공 세라믹 연소기 내에서 화염 제어가 매우 힘들고 안정 연소를 이룰수 있는 연소 영역이 상당히 제한되어 있음을 알 수 있다. 또한 연소 영역의 판단 기준을 비롯하여 연소기의 재질과 시험 조건이 다른 경우, 연소기의 실용화를 위해서는 보다 효율적인 운전 방법이 필요하다.

본 연구에서는 앞에서 언급된 실험 결과들을 바탕으로 하여 다음과 같은 비정상상태 연소를 이용한 다공 세라믹 연소기 운전방식을 제안하고 시험해 보았다. Fig. 7(a)와 (b)는 다공 세라믹 연소기의 운전방식의 일부를 보여주고 있다. 실험 초기에는 역화연소 영역의 조건인 $\phi=0.76$ 및 $u_0=34.7$ cm/s로 연소하는 화염은 연소기의 상류까지 전파되어 위치해 있다. 이 상태에서 연료 및 공기의 유량을 Fig. 7(a)와 같이 제어할 경우 연소기의 온도 분포는 Fig. 7(b)와 같이 변화한다.

측정 시작부터 120 s까지 공기의 유량은 일정하게 유지시키고 연료의 공급을 중단시키면, 연소기가 전체적으로 냉각되어 온도가 감소함을 알 수 있으며, 세라믹의 높은 열용량으로 인해서 연소기의 상류에서부터 천천히 온도가 감소함을 볼 수 있다. 120 s가 경과한 후 연료를 다시 공급시키면 혼합기는 스스로 재점화되어 연소가 재개되고, 다시 역화되어 연소기의 상부로 이동한다. 540 s가 지난 후 다시 연료의 공급을 720 s까지 중단시킨다. 이런 간헐적인 연료 공급 방식으로 약 1000 s 정도 운전시킬 때 연료 공급은 전체 운전시간의 약 1/3 동안만 공급되지만, 연소기 출구의 온도 변화는 약 200 K 정도로 한정된다.

세라믹 재질의 높은 열용량으로 인해서 연료가 스스로 재점화되는 것을 이용하였으며, 이 경우 세라믹 속에서의 느린 화염 전파로 인한 운전의 어려움 특히 역화의 위험성을 제거할뿐만 아니라 연료 공급의 양을 절감할 수 있는 장점이 있다. 또한 재점화시기 즉 연료 공급의 시기는 냉각시 공급되는 공기 및 연료 유량과 온도들을 조절함으로써 쉽게 조정할 수 있어 다양한 연소기 운용 형태를 찾을 수 있다.

4. 결 론

다공 세라믹 연소기에서의 화염 거동 및 연소형태에 대한 기본적인 실험적 연구를 행하였다. 이

종류의 연소기에 대하여 온도 측정시 존재하는 불확실성 때문에 상당한 실험 오차가 존재함을 알 수 있었다. 세라믹의 높은 열용량으로 인해서 연소 조건 변화에 대한 연소기 내 화염의 응답속도가 느려서 연소기 내의 화염 제어가 상당히 어렵다는 것을 알았다. 연소 조건에 따른 안정연소, 역화발생 및 화염날림 발생 영역을 알아보고, 안정연소영역의 바깥 부분에서도 연소가 가능하다는 것을 확인하였다. 또한 영역의 분류시 화염 안정화정도의 기준에 따라서 다른 결과를 가질 수 있다는 것을 알 수 있다.

손쉬운 연소제어의 한 방법으로 비정상연소 방식을 이용한 연소기 제어 방법을 제안하고 시험해 보았다. 비정상연소의 한 방법으로 간헐적인 연료 공급에 따른 화염의 거동을 살펴보고, 이 경우 화염 위치를 고정시키지 않고 운전이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 연소기 출구에서의 온도 변화는 상당히 적게 나타나며 공기 및 연료의 유량과 온도들을 조절함으로써 다양한 연소기 운용 방법의 도출이 가능하다는 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 연구비지원(과제번호: 961-1006-051-2) 및 서울대학교 터보동력기계연구소의 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Weinberg, F. J., 1986, "Combustion in Heat-Recirculating Burners," In F. J. Weinberg (Ed.), *Advanced Combustion Methods*, pp. 183~236, Academic Press, New York.
- (2) Kotani, Y. and Takeno, T., 1982, "An Experimental Study on Stability and Combustion Characteristics of an Excess Enthalpy Flame," *19th Symp. (Int'l) on Combustion*, pp. 1503~1509.
- (3) Takeno, T. and Sato, K., 1979, "An Excess Enthalpy Flame Theory," *Combustion Sci. & Tech.* Vol. 20, pp. 73~84.
- (4) Sathe, S. B., Kulkarni, M. R., Peck, R. E. and Tong, T. W., 1990, "An Experimental and Theoretical Study of Porous Radiant Burner Performance," *23rd Symp. (Int'l) on Combustion*, pp.

- 1011~1018.
- (5) Andersen, F., 1992, "Heat Transport Model for Fibre Burners," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 18, pp. 1~12.
- (6) Chen, Y. -K., Matthews, R. D. and Howell, J. R., 1987, "The Effect of Radiation on the Structure of Premixed Flame within a Highly Porous Inert Medium," *ASME Winter Annual Meeting*, HTD-81.
- (7) Takeno, T. and Sato, K., 1981, "A Theoretical and Experimental study on an Excess Enthalpy Flame," In Bowen, J. R., Manson, N., Oppenheim, A. K. and Soloukhin, R. I. (Ed.) *Progress in Astro. and Aero*, Vol. 76, pp. 596~610.
- (8) High-Tech Ceramic product literature, High-Tech Ceramics Co., Alfred, NY, (1988).
- (9) Khanna, V., Goel, R. and Ellzey, J.L., 1994, "Measurement of Emission and Radiation for Methane Combustion within a porous Medium Burner," *Combustion Sci. & Tech.* Vol. 99, pp. 133~142.
- (10) 이용일, 신현동, 1996, 다공질 내부의 연소현상에 대한 실험적 연구, 대한기계학회논문집, 제 20권 제1호, pp. 321~327.
- (11) Min, D. -K. and Shin, H. -D. , 1991, "Laminar Premixed Flame Stabilized Inside a Honeycomb Ceramic," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34(2), pp. 341~356.
- (12) Gordon, S. and McBride, B. J., 1971, "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Composition, Rocket Performance, Incident and reflected Shocks and Chapman-Jouguet Detonation," NASA Pub. NASA SP-273.