

〈論 文〉

다공질 내부의 연소현상에 대한 실험적 연구

이용일* · 신현동**

(1995년 4월 28일 접수)

An Experimental Study on the Combustion Phenomena
in porous media

Yong Il Lee and Hyun Dong Shin

Key Words : Porous Media(다공질), Flame(화염), Experimental Study(실험적 연구), Stability(안정성), Downstream Flame(하류해), Combustion(연소)**Abstract**

Experiments were performed on the laminar premixed flame stabilized in a porous medium to know whether the flame downstream of the combustor exists or not. In previous theoretical studies, a stable flame has been predicted in the downstream region of the combustor, but it has never been observed in experiments. In this study, a stable downstream flame could be obtained for the lower burning velocity through circumferential heating by a blue flame positioned outside the periphery of the specially devised combustor. The existence of the stable downstream flame was confirmed by a direct photography of soot line, and temperature measurements. The effect of combustor diameter to flame stability was also considered. As the diameter of the combustor increases, the lean flammability limit was extended.

1. 서 론

다공질 내부에서의 예혼합연소가 미연혼합기의 예열에 의한 연소강도의 증가, 저공해 연소가스의 배출, 가연한계의 확장과 복사에너지의 실제적 이용에 기여한다는 것은 잘 알려져 있다.⁽¹⁻¹⁰⁾ 다공질 내부의 예혼합 연소는 1970년대 초부터 흥미 있는 연구제목 중의 하나가 되었지만 다공성 물질의 기하학적 복잡성과 재질상의 문제점은 다공질 내부의 연소현상에 관한 연구를 수행하는데 장애요인이 되어 왔다. 다공질에서 안정된 연소의 범위를 결정하기 위하여 Weinberg에 의한 연구이래 실험적 또는 수치적으로 많은 노력이 경주되어 왔다.^(1,3-8,10-15)

Echigo는 적당한 광학적 두께를 갖는 다공성 물질은 비복사성 가스엔탈피의 상당부분을 복사에너지로 변환할 수 있다고 보고하였다.⁽⁷⁾ Tong 등은 구조화법(spherical harmonics approximation)을 이용하여 산란효과를 모델링하였으며 foam 형의 다공성 물질을 사용하여 연소실험을 실시하였다.⁽¹⁵⁾ Min과 Shin은 격자형 세라믹 허니콤을 연소기로 사용하여 실험을 실시하였고 연소기 내에 매우 일차원적인 화염과 매우 이차원적인 화염이 존재함을 보고하였다.⁽¹⁶⁻¹⁷⁾ 그러나 그들의 실험에서는 오직 연소기의 상류에서만 화염을 안정화시킬 수 있었으며 연소기 하류에서는 안정된 화염을 얻을 수 없었다.

본 연구에서는 다공질 연소기의 하류에서의 화염 안정화를 위해 특별히 고안된 연소기를 사용하였으며, 그 결과 연소기의 하류에서 안정된 화염을 얻

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

을 수 있었다. 또한 기체와 연소기 벽에 대해 각각 온도측정을 하였으며 연소실험 후 연소기를 절단하여 연소기의 단면을 조사하였다.⁽¹⁸⁻²⁰⁾ 다공질 내부에서 화염대의 위치는 매연선과 온도측정을 통하여 확인할 수 있었으며 연소기 내부에서의 화염안정화 영역과 화염안정화에 대한 연소기 직경의 영향을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1에 나타난 바와 같이 공기압축기와 연료 탱크를 나온 압축공기와 프로판가스는 각각의 레귤레이터와 오리피스를 통과하면서 유량이 제어되며 압축공기의 수분이 실리카겔 탱크를 통과하여 제거된 후 충분히 혼합된다. 공기의 유로계에는 실험의 재현성과 화염안정화를 위해 실리카겔을 사용하여 공기중의 수분을 제거하였다. 프로판과 공기의 예

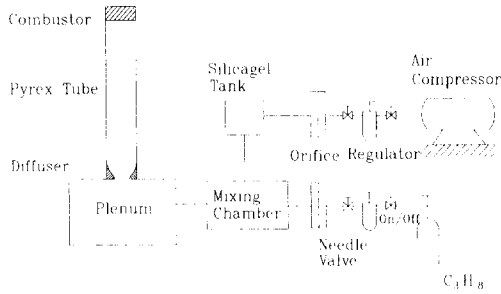


Fig. 1 Schematic of flow system

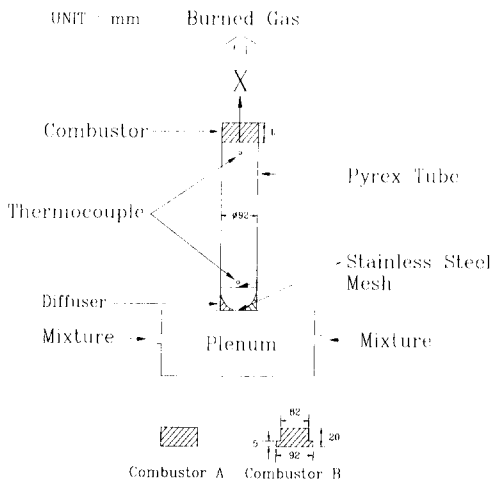


Fig. 2 Schematic of the burner system

혼합기는 Fig. 2에 보여지는 바와 같이 버너의 하단으로부터 디퓨저와 두 개의 스테인리스 스틸 메시를 통과하여 길이 L의 연소기내에서 연소된 후 대기중으로 방출된다. 디퓨저와 스테인리스 스틸 메시는 역화를 방지하기 위하여 설치되었으며 화염 거동을 관찰하기 위하여 버너하단과 연소기 사이에 내경 92 mm의 파이렉스 튜브를 설치하였다. 예혼합기의 온도를 알기 위하여 연소기 상류에 k형 열전대를 사용하였다. 본 실험에서 사용한 연소기의 자세한 사양을 Fig. 3에 나타냈으며, 내경 92 mm, 단위 사각격자의 수력직경(hydraulic diameter : 수력반경의 4배)이 1.1인 원통형 세라믹 허니콤을 사용하였으며 수력반경은 점수주변(wetted perimeter)에 대한 유로의 단면적의 비로 정의된다. 사용된 연소기의 기공률은 0.76이고 고체의 주된 재질은 코디어라이트(magnesium-alumino-silicate : 2MgO·2Al₂O₃·5SiO₂)이며 용점은 1465 °C이다. 기존의 연구에서⁽¹⁶⁻¹⁷⁾ Fig. 2에 도시된 바와 같은 A형의 연소기를 사용한 반면에 본 연구에서는 연소기의 하류에 화염을 안정화시키기 위하여 B형의 연소기를 고안하였다. B형 연소기는 Fig. 2에 보여진 바와 같이 A형 연소기의 일부를 원주방향으로 절단한 형태를 취한다. 온도는 기체온도와 고체온도를 측정하였으며 각각 직경 0.1 mm의 Pt-Pt/13% Rh 열전대와 25 μm의 Pt-Pt/13%Rh 열전대를 사용하였다. 열전대의 이송은 독취현미경(measuring microscope, PiKaSeiKo LTD, division 0, 1 mm)을 사용하였고, 열전대로부터 발생하는 기전력은 디지털 온도계(digital thermometer, YEW, Type 2852)로 측정하였다.

본 연구에서 사용된 실험변수는 당량비(φ)와 유

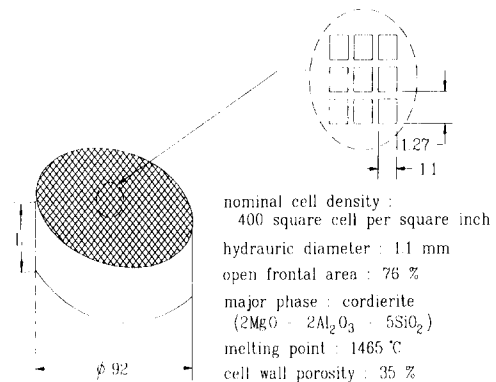


Fig. 3 Details of a combustor of honeycomb ceramic

량비(r)이며 유량비의 정의는 아래와 같다.⁽¹⁶⁻¹⁷⁾

$$r = \frac{m_m}{m_o} = \frac{\rho_m u_m}{\rho_o u_o} \quad (1)$$

식 (1)에서 m_o 와 m_m 는 각각 보통의 예혼합화염과 실제로 공급되는 혼합기의 질량유량이며, ρ 와 u 는 각각 밀도와 속도이다. B형 연소기로 들어가는 혼합기의 속도(u_m)를 알기 위하여 연소기 상류 5 mm 지점에서 산란입자로 파라핀을 사용하여 LDV로 속도를 측정하였다. 실험은 상대적으로 높은 당량비, 낮은 유량의 혼합기를 공급하여 연소기 하류에서 안정된 화염을 형성한 후 시작하였다. 연소기가 충분히 가열 된 후 원하는 당량비와 유량비의 혼합기로 연소기 하류에서 화염을 안정화시켰으며, 이 조건에서 당량비를 증가시키면 화염이 연소기의 상류로 이동하였고 다시 당량비를 줄이면 하류에서와 같은 유동조건인 혼합기에 대해 연소기의 상류에서도 화염을 안정화시킬 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 $\phi=0.68$, $r=0.66$ 의 혼합기의 경우 B형 연소기 상류와 하류에서 안정화된 화염의 직접 사진이다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(c)는 각각 상류화염의 상부 및 측면 사진이고, Fig. 4(b)와 Fig. 4(d)

는 각각 하류화염의 상부 및 측면 사진이다. Fig. 4(a)의 상류 화염은 기존의 연구에서 A형 연소기를 사용하여 안정화시킬 수 있었지만 하류에서는 화염을 안정화시킬 수 없어서 B형의 연소기를 고안하였다. B형 연소기의 경우 하류에서 화염을 안정화시킬 수 있었던 이유는 연소기 주변에 형성된 청염이 연소기 내부로 열을 공급하여 연소기로부터의 측면 열손실에 의한 화염의 이차원화를 방지하였기 때문이다. 이는 A형 연소기와 B형 연소기의 기하학적 차이로 A형 연소기에서 모든 혼합기는 연소기 내부에서 연소되며 연소기 측면에서 고체로부터 복사에 의한 열손실을 받게된다. 이 열손실이 연소기 내부의 화염안정화에도 영향을 미치게 되며 Fig. 6의 매연선 사진에서 알 수 있는 바와 같이 유량이 작은 경우, 측면 열손실의 영향으로 매우 이차원적인 화염이 형성된다. 반면에 B형 연소기의 경우 Fig. 4에서와 같이 혼합기의 일부가 연소기의 절단부를 통과하여 연소기 측면에서 청염의 형태로 연소된다. 이 청염이 연소기 측면을 가열하여 연소기 측면에서 열손실의 영향을 상쇄시키고 연소기 내부의 화염안정화에 기여하게 된다.

Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)에 각각 A형과 B형의 연소기의 경우, 당량비와 유량비의 함수로 화염안정도곡선을 도시하였다.⁽¹⁶⁾ 역하는 화염이 연소기의

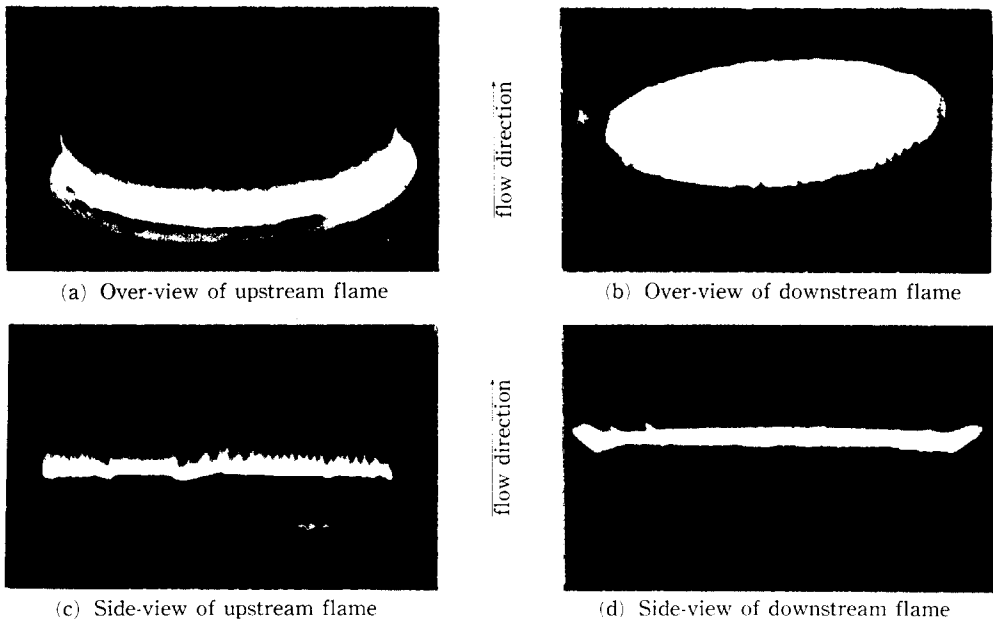
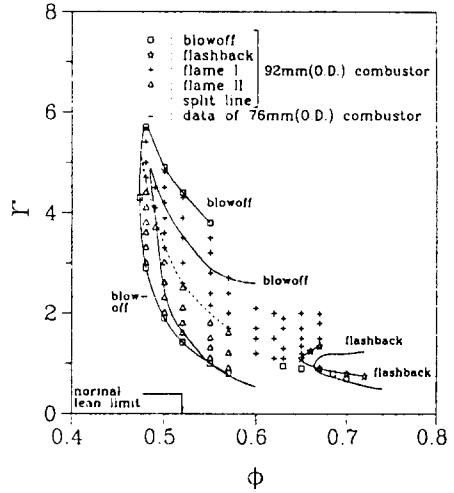
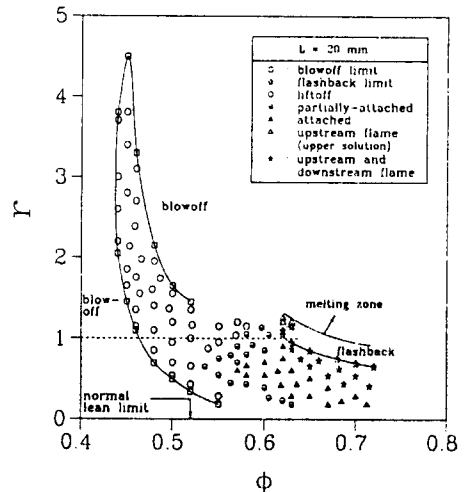


Fig. 4 Direct photographs of combustor type ($L=20$ mm : $\phi=0.68$, $r=0.66$)

상류로 전파되어 연소기 밖으로 나오는 경우로 정의하였으며 취원은 A형 연소기의 경우 화염이 연소기 내에서 안정화되지 않는 경우로 정의하였으며, B형 연소기의 경우 연소기 내부와 연소기 출구 근처에서 화염이 안정화되지 않는 경우로 정의하였다. Fig. 5(a)에서 보여지는 바와 같이 A형 연소기의 경우 연소기 직경이 큰 경우가 희박가연 한계와 연소기 내에서 연소 가능한 유량범위는 확장되었으며 역화가 발생하는 당량비는 감소하였다. 이는 연소기 내에서 총발열량에 대한 열손실의 비가 감소하였기 때문이며 당량비를 고정한 상태에서 유량을 어느 이상 증가시키거나 감소시키면 화염이 소화되었다. 분할선을 기준으로 유량이 큰 경우는 일차원적인 화염(화염 I)이 형성되었으며 유량이 작은 경우는 상대적으로 측면열손실이 커져서 매우 이차원적인 화염(화염 II)이 형성되었다.^(16,17) 일차원적인 화염(화염 I)은 유량이 많은 경우에 발열량이 크기 때문에 연소기 측면에서 열손실의 영향을 상대적으로 적게 받아서, 연소기 반경방향으로 연소기 입구에서 화염대까지의 거리가 같은 화염이다. 반면에 이차원적인 화염(화염 II)은 연소유량이 작기 때문에 발열량이 작아서 상대적으로 연소기 측면에서 열손실의 영향을 크게 받는다. 이 경우 연소기 측면 부근에서 화염대는 열손실을 이기지 못하여 하류로 이동하고 이차원적인 형태를 갖게되며, Fig. 6(a)의 매연선의 형태가 이를 입증한다. B형 연소기의 경우 Fig. 5(b)에 도시한 바와 같이 당량비가 0.62 보다 작은 경우에 화염이 연소기 상부로 부상되었고, 당량비가 0.62보다 큰 경우에는 역화가 되는 영역이 존재하였다.⁽¹⁸⁾ 이 당량비에서 역화되는 유량비보다 작은 유량비에서 연소기의 상류와 하류에서 화염이 존재하는 영역이 형성되며 유량을 계속 증가시키면 연소기가 녹는 영역이 존재한다.⁽²¹⁾ 당량비가 0.62-0.63의 경우에는

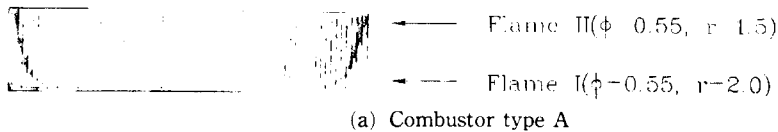


(a) Flame stability diagram of combustor type A

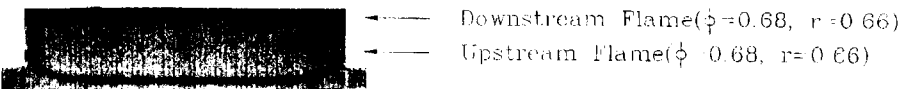


(b) Flame stability diagram of combustor type B

Fig. 5 Flame stability diagram



(a) Combustor type A



(b) Combustor type B

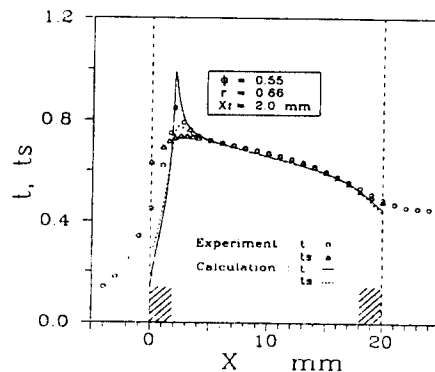
Fig. 6 Soot lines

연소기의 상류에 유량이 많은 경우의 화염인 상부 화염이 존재한다. 실험에 사용된 유량 범위에서 연소기를 통한 압력손실은 10 mmH₂O보다 작으며, 본 실험에서 화염의 안정화나 거동에 압력의 효과는 크지 않다고 사료된다.⁽¹⁶⁾

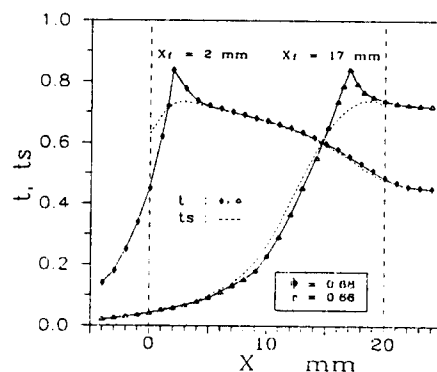
연소기 내에서 반응대의 위치를 확인하기 위하여 실험 종료 후에 연소기의 단면을 조사하였다. Fig. 6에서 보여지는 바와 같이 연소기 단면에 검은 선이 관찰되는데, 이는 예열대에서 연료인 프로판의 열분해에 의한 탄소 입자가 연소기 표면에 침착되었기 때문이라고 사료된다.^(16~19) 이 매연선으로 반응대의 위치 및 형태를 쉽게 확인할 수 있다. 이는 연소기에서 매연선이 형성되는 위치는 화염대 직전의 예열대이며, 온도측정에서 얻어진 온도 피크와 매연선의 위치가 거의 일치하기 때문에 매연선의 형태는 화염대의 위치 및 형태를 잘 반영한다고 사료된다. Fig. 6(a)에 보여지는 바와 같이 A형 연소기의 경우, 두 가지의 매연선이 관찰되며 유량이 크고 작을 경우 각각 화염 I 과 화염 II 에 상응하는 매연선이 존재한다. 이 경우 연소기의 하류에는 화염이 존재하지 않음을 알 수 있다. Fig. 6(b)에는 B형 연소기의 경우 $\phi=0.68$, $r=0.66$ 인 경우에 연소기의 상류와 하류에 매연선이 존재함을 알 수 있으며, 이는 기존의 연구자들이 수치계산으로 예측한 바와 같이 연소기 상류뿐만 아니라 연소기 하류에서도 화염이 존재함을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 길이 20 mm의 B형 연소기의 축방향으로 열전대를 이송하며 측정한 고체온도(ts)와 기체온도(t)의 분포를 나타낸다. 온도는 단열화염온도로 무차원화하여 표시하였으며 Fig. 7a에서 보여지는 바와 같이 실험치와 계산치는 경향이 유사하게 나타났으며 화염대와 예열대에서 다소 차이를 보이는데 이는 계산에 사용된 가정과 온도측정에서의 오차에 기인한다고 사료된다.⁽²¹⁾ 측정된 온도는 단열화염온도보다 작는데, 이는 다공질 연소에서의 초과엔탈피 화염과는 다른 화염으로 유량이 작은 경우 상대적으로 열손실의 비가 증가하기 때문이다. 초과엔탈피화염은 혼합기가 화염대로 유입되기 전에 예열을 받게 되어, 혼합기가 연소되기 전에 혼합기의 엔탈피가 상승하게 되는데 이 엔탈피 상승으로 화염의 온도가 단열화염온도 이상의 온도를 갖는 화염을 의미한다.

Fig. 7b는 B형 연소기의 상류와 하류에 화염이 안정화되어 있을 경우 측정된 온도분포이다. 길이



(a) Measured and calculated temperature profiles



(b) Measured temperature profiles

Fig. 7 Temperature Profiles

20 m의 연소기에서 당량비가 0.68, 유량비가 0.66인 하부해의 경우로 연소기 상류 2 mm와 하류 17 mm 위치에 화염이 존재하였음을 알 수 있다. 측정된 온도 피크는 단열화염온도보다 작았으며 다공질 연소기에서의 초과엔탈피화염과는 다른 다공질 연소기에서의 연소의 또 다른 현상이다. 상류해는 하류해에 비하여 예열대에서의 온도상승률이 큰데 이는 하류해에 비해 상류해는 연소기 상류로의 열손실이 크기 때문이다. 화염대에서는 기체/고체의 이상간 온도차가 크게 나타나며 화염대를 지나면서 이상간의 온도균형이 이루어지면서 그 차이는 거의 없어지게 된다.

4. 결 론

연소기로 다공질 물질인 허니콤 세라믹을 사용한 프로판/공기의 예혼합화염에 대한 실험을 수행한

후 아래의 결론을 얻었다.

(1) 본 연구는 다공질 연소기의 하류에 실험적으로 화염을 안정화시킨 첫번째 연구로 특별하게 고안된 연소기(B형 연소기)의 측면열공급에 의해 연소기 하류에서 화염을 안정화시킬 수 있었다.

(2) 연소기 내부의 상류와 하류에 화염이 존재한 영역은 당량비 0.63-0.69, 유량비는 1.0보다 작은 영역이었다.

(3) 연소기 내부에서 안정된 화염의 존재는 온도 측정과 배연선 정보를 통해 확인할 수 있었다.

(4) 연소기의 직경이 큰 경우에 연소기 내부에서 연소 가능한 회박가연한계와 유량범위가 확장되었다.

참고문헌

- (1) Bernstein, M. H. and Churchill, S. W., 1977, "Multiple stationary states and NO_x production for turbulent flames in refractory tubes," *Sixteenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 1737~1745.
- (2) Choi, B. and Churchill, S. W., 1979, "A Model for combustion of gaseous and liquid fuels in a refractory tubes," *Seventeenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 17~925.
- (3) Takeno, T. and Sato, K., 1979, "An excess enthalpy flame theory," *Comb. Sci. Techn.* Vol. 20, pp. 73~84.
- (4) 이용일, 신현동, 1992, 증공의 다공성 실린더 내의 예혼합화염에 관한 실험적 연구, 한국연소학회, 제9회 학술대회논문집, pp. 44~48.
- (5) 이용일, 유영돈, 신현동, 1992, 축대칭 세라믹 연소기의 시작품 제작과 그 평가, 한국과학기술원 연구보고서.
- (6) Takeno, T. Sato, K., Hase, K., 1981, "A theoretical study on an excess enthalpy flame," *Eighteenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 465~472.
- (7) Echigo, R., 1982, "Effective energy conversion method between gas enthalpy and thermal radiation and application to industrial furnaces," *Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf., Munich*, Vol. 6, pp. 361~366.
- (8) Kotani, Y., Behbahani, H. F. and Takeno, T., 1984, "An Excess enthalpy flame combustor for extended flow ranges," *Twentieth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 2025~2033.
- (9) Pfefferle, L. D. and Churchill, S. W., 1984, "The stability of flames inside a refractory tube," *Comb. Flame*, Vol. 56, pp. 165~174.
- (10) Takeno, T. and Hase, K., 1984, "Effects of solid length and heat loss on an excess enthalpy flame," *Comb. Sci. and Tech.* Vol. 34, pp. 207~215.
- (11) Weinberg, F. J., 1971, "Combustion temperature : the future ?," *Nature* Vol. 233, pp. 239~241.
- (12) Yoshizawa, Y., Sasaki, K. and Echigo, R., 1988, "Analytical study on the structure of radiation controlled flame," *Int. J. Ht. Mass Transf.* Vol. 31, pp. 311~319.
- (13) Hsu, P.-F., Evans, W. D. and Howell, J. R., 1993, "Experimental and numerical study of premixed combustion within nonhomogeneous porous ceramics," *Comb. Sci. and Techn.*, Vol. 90, pp. 149~172.
- (14) Hsu, P.-F., Howell, J. R. and Matthews, R. D., 1993, "A numerical investigation of premixed combustion within porous inert media," *J. Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 744~750.
- (15) Tong, T. W., Sathe, S. B. and Peck, R. E., 1990, "Flame stabilization and multimode heat transfer in inert porous media : A Numerical Study," *Comb. Sci. and Tech.*, Vol. 70, pp. 93~109.
- (16) 민대기, 1990, "격자형 세라믹 내에서의 층류 예혼합 연소," 한국과학기술원 박사학위논문.
- (17) Min, D. K. and Shin, H. D., 1991, "Laminar premixed flame stabilized inside a honeycomb ceramic," *Int. J. Ht. Mass Transf.*, Vol. 34(2), pp. 341~356.
- (18) 이용일, 신현동, 1993, 격자형 세라믹 연소기에서의 하류해에 관한 실험적 연구, 한국연소학회, 제11회 학술대회논문집, pp. 10~14.

- (19) 이용일, 신현동, 1994, 측면열손실 또는 열공급에 의한 세라믹 연소기 내의 화염거동, 한국연소학회, 제12회 학술대회논문집, pp. 43~52.
- (20) 이용일, 신현동, 1994, 격자형 세라믹 내의 화염거동에 관한 해석, 대한기계학회 추계학술대회논문집, 대한기계학회, pp. 351~356.
- (21) Lee, Y. I., Shin, H. D. and Baek, S. W., 1995, "Reconsideration on the Laminar Premixed Flame Stabilized in a Ceramic Honeycomb," to be scheduled in *Eighth International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-8) in Combustion*.