

다공 세라믹 액체 연료 연소기의 연소 특성에 관한 실험적 연구

정경현*, 임인권**

Experimental Study on Combustion Characteristics of Porous Ceramic Liquid Fuel Combustor

K. H. Chung , I. G. Lim

Key Words : 다공세라믹 (Porous ceramic), 액체연료 (Liquid fuel), 연소기 (Combustor), 질소산화물 (NOx)

Abstract

Experimental study on a porous ceramic liquid fuel combustor is performed. Compact burner with low pollutant emission and high combustion efficiency is realized through the use of porous ceramic materials of high porosities. The use of porous ceramic materials in burner material results in rapid vaporization of liquid fuel and enhancement in mixing process, and thus nearly premixed combustion of liquid fuel is achieved instead of diffusion and partially premixed combustion method, which is often used and apt to produce high pollutant emissions such as CO, NOx and soot. With this enhanced vaporization and premixing method of liquid fuel vapor and air, it is found that enhanced combustion process with intense radiation output and better emission characteristics in NOx, CO and soot emission, compared to other conventional liquid fuel burning method, are possible.

1. 서론

연소공학 분야에서 큰 비중을 차지하고 있는 연구 방향은 에너지의 효율적인 이용과 청정 연소가 가능한 고효율 저공해

연소기의 개발 연구에 목표를 두고 있다. 대표적인 연소 공해물질인 질소산화물은 연소시 발생하는 여러 공해물질 중에서 처리 및 제어가 가장 힘들다고 알려져 있다. 질소산화물의 배출은 연소온도 및 연소기 내의 체류시간에 따라 매우 민감하게 증가하므로, 이를 감소시키기 위해서는 연소온도 및 고온 생성물의 체류시간을 줄여야 하지만, 이럴 경우 연소기 내에서의 연소 반응시간이 충분히 제공되지 못하기 때문에, 연소효율은 결국 감소하고

* 명지대학교 기계공학과 대학원

** 명지대학교 기계공학과

일산화탄소 배출은 증대된다. 반면에 연소 효율 증대를 위해서는 반응 온도 및 체류 시간을 가능한 증가시켜야 하고 이는 질소산화물의 증가를 초래한다.

이런 문제점들을 해결하기 위하여 최근 다공 세라믹 물질을 이용한 연소기 개발 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ 다공 세라믹이 예혼합 가스연료 연소에 적용될 경우, 다공 세라믹 물질로 된 연소기 안에서 복사, 전도 및 대류 열 전달로 인한 열 재순환이 존재하며, 이에 따라 다른 연소기에서 얻기 어려운 초과 엔탈피 연소 현상이 일어난다.

이러한 초과 엔탈피 연소 때문에 연소속도 및 최대 화염온도의 증가와 연소한계 확장 등의 장점을 가져온다고 알려져 있으며, 일반적인 화염형태에 비해 특이한 일차원 화염 형태로 일산화탄소 및 질소산화물의 배출량이 매우 적게 발생하는 이점이 있고, 또한 다공 세라믹의 높은 방사율 때문에 고온 균일한 복사 열전달이 가능하며, 많은 전열 공간의 감소가 가능하다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾

지금까지 연구된 다공 세라믹을 이용한 연소기 개발 연구는 기체 연료의 예혼합 연소 방식을 택하는 방식에 한정되어 있었으며, 액체 연료 연소에 적용된 경우는 거의 존재하지 않았다.

액체 연료를 분사 노즐로 분사시켜 연소시키는 액체연료 연소기의 연소형태는 연료와 산화제가 각기 다른 경로를 통하는 확산화염 연소 형태이기 때문에 화염 면에서의 질소산화물의 발생 가능성이 매우 크고, 또 연료의 증발 및 산화제와의 혼합이 원활히 이루어지지 않을 경우 매연 및 일산화탄소의 발생이 크다는 것이 알려져 있다.

충분한 열 전달 능력의 확보 및 매연 등의 발생 저감을 위해서는 화염 크기가 충분히 커야하고, 연소 부하 변동에 따른 연소 형태의 변

화가 크지만, 모든 부하 상태에 대한 공급되는 유량 및 공급 방식 등에 대한 결정이 매우 어렵고, 대용량 버너의 경우 연료 분무 및 혼합 상태가 원활하지 못해 효율이 낮다는 단점 등이 있다.

본 연구는 기체 연료의 연소에 적용된 기존 다공 세라믹 연소기를 변형하여, 고효율 및 청정 연소가 가능한 액체 연료 연소기를 개발하기 위한 기초 실험을 수행하였다.

다공 세라믹 물질을 사용할 경우, 세라믹에서의 높은 복사 열전달에 의하여 분사되는 액체의 증발을 현상을 더 빠르게 촉진시킬 수 있고, 이에 따라 공기와의 혼합을 원활히 할 수 있어서 기체 연료의 예혼합 연소 방식과 거의 동일한 효과를 얻을 수 있고, 연소 부하 변동 시에도 세라믹 속에서의 화염 위치가 스스로 이동하므로 거의 일정한 열 유속을 얻을 수 있다. 또 연료와 공기의 혼합 방식에 연소기 효율이 크게 좌우되는 기존의 액체 연료 연소기와는 다르게, 공기 공급 방식 및 연료 분사 특성에 크게 영향을 받지 않는 연소 형태를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 다공 세라믹 물질을 이용한 액체 연료 연소기의 특성 파악을 위한 기초적인 실험을 수행하였으며, 화염 및 연소 형태 파악, 배기가스 농도 측정, 열효율 및 복사량을 측정하였다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1 은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 도시한 것이다. 주요한 부분은 다공 세라믹 물질로 구성된 연소기, 공기 유량계 및 제어기, 연료용 펌프, 복사 측정 장치, 배기가스 분석기 등으로 구성되어 있다. 압축기에서

공급되는 공기는 압력조절기를 사용하여 일정 압력 (3 kgf/cm^2) 을 유지시키며, 연소기에 공급되는 공기 유량은 습식가스미터에 의해 보정된 질량유량계 (Mass flowmeter)을 이용하여 제어했다.

공급되는 공기는 다시 일정한 압력과 유량으로 8개의 분선에 통과하게 하기 위하여 연소기와 유량계 사이에 공기실을 두어 일정하게 공기가 흐르게 하였다.

Fig. 2 는 연소기 하단 부분의 형태를 자세히 도시한 것이다. 연료와 공기의 혼합을 위한 혼합실과 이의 중앙에 연료 공급 노즐(최대 분사 유량 1.6 l/hr)을 설치하였다. 연료는 혼합실 중앙에서 위쪽으로 노즐 분사 각 60° 로 분사되며, 노즐 위치는 상하 이송이 가능하게 하였다. 공기는 혼합실 주위의 8개의 공기 노즐 (직경 5 mm)을 통하여 공급되며, 연소기 중앙으로 45° , 연소기 상단 방향으로 60° 로 분사시켜 강한 선회 유동을 유발시켰다.

Fig. 3 은 본 실험에 사용된 세라믹으로서 기공률이 약 85% 인 10 ppi (pores per inch)의 스폰지 형태의, 부분 안정된 지르코니아 (Partially stabilized zirconia: PSZ) 로 $\phi = 50 \text{ mm}$ 인 원형 실린더를 13 mm 한 개, 26 mm 두 개를 3단으로 쌓아서 사용하였다.

연료 노즐에 공급되는 액체 연료의 유량은 공급 압력에 의하여 결정된다. 상용 연료공급 방식인 솔레노이드 형식을 택할 경우 공급 압력의 진폭이 크고 화염 형태가 불안정하기 때문에, 일정한 압력을 유지할 수 있는 기어펌프를 사용하였다. 연료 보정은 Fig. 4 (a) 에 나타나 있는 것처럼 기어 펌프 이전에 피펫을 달아 일정한 압력이 유지되는 동안 피펫에서 나오는 유량을 일정 시간동안 측정하여 압력과 유량과의 관계식을 찾을 수 있었다. 기어 펌프 입구에 리턴 밸브를 두어 과도한 압력 부하를

차단했으며, 연료 필터를 이용하여 연료의 불순물을 제거했다.

일산화탄소 및 질소산화물 등의 배기 가스의 측정에는 Kane-May Quintox 사의 제품을 사용하였으며, 배기가스는 된 흡입구 직경이 9 mm 인 석영관으로 제작하여 사용하였다. 측정시 Probe 에서의 화학반응을 고려하여 처음 최대수치로 나타난 CO 및 NOx 의 값을 기록해 사용하였다.

Fig. 5 는 세라믹에서 방출되는 복사량을 측정하기 위한 실험장치를 나타낸 것이다. 연소기에서 방출되는 고온 열기에 의해서 측정센서의 파손을 막기 위하여 측정센서 앞부분에 홀의 직경이 3.5 mm 인 차단벽을 설치하였다. 복사 측정센서와 차단벽까지의 거리는 60 mm , 차단벽과 세라믹과의 거리는 수평거리 145 mm , 수직거리 190 mm 인 곳에서 복사량을 측정하였으며, 센서에서 측정된 전압 신호는 미리 보정된 식 및 view factor를 이용하여 복사량으로 환산하였다.

Fig. 6 은 연소기의 전열효율을 측정하기 위한 실험장치를 도시한 것이다. 노즐 압력을 7 kgf/cm^2 (1.185 l/hr), 연소기에 공급되는 공기 유량 (198.5672 l/min)을 일정하게 유지시켜 같은 조건 ($\phi = 1$)에서 세라믹이 없을 경우와 세라믹이 있는 경우의 열효율을 계산했다. 전열효율 측정은 직경 6.35 mm 동관을 사용하여 열 교환기를 제작하였으며, 열 교환기에 공급되는 물의 유량은 400 ml/min 이다. 입구 및 출구 온도를 T type 의 열전대를 이용하여 측정하였고, 열 교환기의 위치를 10 mm 이동해 가면서 온도를 측정하였다.

본 연구에 사용된 액체 연료로는 상용 석유 (Kerosene) 를 사용하였으며, 석유의 발열량, 밀도 및 당량비 계산 방법은 Table 1 에 나타나 있다. 매연이 과도하게 발생하여 세라믹 표면이 막히고 이에 따라 압력이 과도하게 증가

Table 1 Property of Kerosene

발열량	10400 kcal/kg
밀도	780 kg/m ³
이론공기량	12.2 m ³ /kg
당량비	$= \frac{(F/A)_{real}}{(F/A)_{stio}}$ $= \frac{fuel}{air} \times \frac{A}{F}$ $= \frac{fuel}{air} \times 12.2$

하여 실험이 불가능한 경우는 실험 경우에서 제외하였다. 기존 방법을 통한 액체 연료 연소 시 화염 형태 및 배출물의 특성을 먼저 알아보고, 같은 조건에서 다공 세라믹을 사용하였을 경우 연소 형태 및 배출물의 특성이 어떻게 변화하는지 측정하였다. 화염 형태에 대한 직접 사진은 디지털 비디오 카메라를 이용하여 획득하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 7 과 Fig. 8 은 연료 공급 압력이 각각 3 kgf/cm² 및 7 kgf/cm² 일 때의 공기 유량에 따른 화염 형태에 대한 직접 사진이다. Fig. 7 의 상단의 사진들은 세라믹이 없는 경우이며, 화염 형태가 매우 불규칙하고 매연이 발생되는 것을 보여주고 있다. 공기 유량이 증가함에 따라서 연소기에서 선화 성분의 증가로 인하여 화염 길이가 조금씩 짧아지는 것을 알 수 있다. 전체적으로 화염 색깔이 진한 노란 색 및 적색을 유지하며, 공기 량의 증가에 따라 화염 뿌리 부분에 청색이 조금씩 나타나는 것을 알 수 있다. 공기 공급량이 최대인 경우 강한 선화로 인하여 화염 크기는 작아지며, 부분적으

로 청색 화염이 나타나고, 연소가 완전히 이루어지지 않은 것을 관찰 할 수 있었다.

Fig. 7 의 하단 그림과 같이 다공 세라믹을 이용한 경우, 연소 가능한 공기 유량은 약 112.55 l/min 이상이며, 이 경우 화염 일부가 세라믹을 통과하여 기존 화염 길이보다 더 긴 경우가 나타난다. 이는 연소가 세라믹 속에서 완전히 진행되지 못하고 세라믹을 통과한 연료성분이 외부에서 연소되기 때문이다. 공기 유량을 더욱 증가시키면 세라믹 위에 있던 화염이 세라믹 안으로 끌려 들어가는 현상이 나타난다. 공기 유량이 약 202.15 l/min 이상 일 때는 모든 화염이 세라믹 속에서 연소되어 세라믹 표면에서 매우 강한 복사가 방출되는 연소 형태를 보여주고 있다. 공기 유량 증가에 따른 세라믹 표면에서의 색은 적색에서 하얀 색으로 변화했다.

화염이 세라믹 안에서 완전히 연소되는 형태를 얻기 위해서는 공기 공급량이 충분히 커서, 강한 스윙 유동이 존재하고 이에 따라 충분한 예혼합이 이루어져야 한다. 공기 유량이 작은 경우는 완전한 예혼합 형태의 연소가 이루어지지 않고, 세라믹 아래에서 연소가 시작된 화염이 세라믹을 통과하면서 계속 연소가 진행되는 형태로 된다.

화염이 세라믹 속에서 완전히 연소되지 않은 경우, 세라믹으로부터 상류 노즐 방향으로의 복사 열전달의 강도가 낮기 때문에, 액적의 충분한 증발이 이루어지지 않기 때문에 계속적인 연소 유지가 어렵다는 것이 예견된다. 실제로 충분한 복사가 이루어지지 않는 공기 유량 약 67.75 l/min 의 경우 세라믹 속에 매연 입자가 누적되어 연소가 진행되지 않는 현상이 관찰되기도 하였다.

Fig. 9 는 다공 세라믹을 적용하지 않았을 경우의 배기가스 특성을 나타내는 그래프이다. 분사되는 연료 양을 일정하게 유지시킨 후, 공

기 유량을 점차적으로 증가시키면서 연소기 내에서 배출되는 배기 가스를 측정하였다.

공기량을 점차적으로 증가시킬 경우(당량비가 낮아질 경우), CO 배출 양이 증가하는 반면 NOx 배출은 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 공기 유량을 증가시킬 경우 연소기에서의 선회 성분이 증가하여 공기 유동이 중심보다는 외부를 향하므로 혼합이 잘되지 않고 불완전 연소가 되므로 CO 발생량이 증가한다. 반면에 NOx 배출은 연소기에 유입되는 공기량이 적을 경우(당량비가 증가할 경우), 불완전 연소에 의해서 NOx 배출 농도는 감소하는 경향을 볼 수 있다.

Fig. 10 은 다공 세라믹을 적용하였을 경우의 배기가스 특성을 나타내고 있다. 공기 유량을 점차적으로 증가시킬 경우(당량비의 감소), CO 배출 농도도 함께 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이는 세라믹을 적용하지 연소기에는 나타나지 않았던 특징이다. 이는 공기 유량을 증가시킬 경우 Fig. 7 및 8 에 나타난 바와 같이 다공 세라믹 안에서 완전 연소가 이루어져 CO 농도가 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.

다공 세라믹을 적용한 연소기에서는 전체적으로 희박 연소 쪽에서 거의 완전 연소가 이루어지는 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 고온 상태에서 주로 생성되는 NOx 가 공기 유량을 증가시켜 당량비가 감소되는 영역에서 나타난 것을 통해서 알 수 있다. 위의 두 가지 공해물질에 대한 배출 특성을 통하여 볼 때, 세라믹을 적용할 경우는 전체적으로 희박 연소 영역에서도 CO 및 NOx 의 동시 저감이 가능하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11 은 세라믹에서 방출되는 복사량을 측정한 그래프이다. 복사량은 당량비가 1인 점을 전후해서 변곡점을 형성하는 것을 볼 수 있다. 또한 당량비가 1보다 작은 부분에서 방출되는 복사량은 당량비가 1보다 큰 지점에서 측

정된 복사량에 비해 크게 낮지 않거나 조금 높게 측정되는 것을 볼 수 있다. 이는 세라믹을 적용하여 희박 연소 영역에서 연소시킬 때에도, 방출되는 복사에너지의 양은 크게 떨어지지 않음을 알 수 있다. 따라서 같은 연소 열량을 필요로 하는 연소기를 제작할 경우 희박 연소를 시킬 수 있을 것으로 사료되어진다.

Fig. 12 는 세라믹이 있을 경우와 없을 경우의 열전달 효율을 측정한 그래프이다. 그래프에서 보여지는 기준점은 세라믹이 있는 경우는 세라믹 표면을 기준 점으로 정했으며 세라믹이 없는 경우는 연소기 하단 부분을 기준 점으로 잡아 열효율을 측정하였다. 일반적으로 세라믹을 적용한 연소기에서 열전달 효율이 비교적 높게 나타남을 알 수 있다. 또한 열교환기를 세라믹 표면에 근접하여 설치했을 경우 열전달 효율이 높게 나타남을 알 수 있다. 따라서 동일한 연소기를 제작할 경우 세라믹을 적용했을 때 연소기를 소형화 할 수 있을 것으로 사료되어진다.

4. 결론

본 연구에서는 다공 세라믹 물질을 적용한 액체 연료 연소기 개발에 관한 기초 실험을 수행하였으며, 이를 통하여 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

- (1) 다공 세라믹 물질을 이용한 액체 연료 연소기 개발을 위해서는 액체연료 및 공기와의 혼합을 원활히 할 수 있는 기술이 필요하다. 본 연구에서는 강한 스윙 유동을 통하여 이를 일부분 해결하였다.
- (2) 연료 및 연료/공기 혼합기가 고온 지역을 모두 통과함에 따라서 거의 모든 운전 영역에서 일산화탄소 및 매연의 배출이 크게 감소하며 연소 영역이 전체적으

로 회박연소 쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있었다. 연소 영역이 회박 영역으로 이동하면서 CO 및 NO_x의 배출이 감소되었다.

- (3) 열효율 측정 결과, 세라믹을 사용한 경우가 사용하지 않는 경우보다 높게 나타나며, 세라믹에서 방출되는 복사열 때문에 화염 전방에 열 교환기를 최대한 가까이 설치할 경우 열효율이 더욱 증가함을 알 수 있다. 이는 열 교환기를 세라믹 근처에 최대한 근접하게 설계할 경우 연소기 크기를 소형화 할 수 있다는 것을 암시한다.

Combustion institute, Madison, WI, pp. 49-54.

- (5) Weinberg, F. J., 1986, "Combustion in Heat Recirculating Burners", In F.J. Weinberg(Ed), *Advanced Combustion Methods*, pp. 183-236.
- (6) Kotani, Y. and Takeno, T., 1982, "An Experimental Study on Stability and combustion Characteristics of an Excess Enthalpy Flame", 19th Symp. on Combustion, pp. 1503-1509.
- (7) Takeno, T. and Sato, K., 1979, "An Excess Enthalpy Flame Theory", *Combustion Sci. & Tech.* Vol. 20, pp.73-84.

5. 참고문헌

- (1) Howell, J. R., Hall, M. J., Ellzey, J. L., 1996, "Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media", *Progress in Energy & Combustion Science*, Vol. 22, No. 2, pp. 121-145.
- (2) Tseng, C. J., and Howell, J. R., 1994, "Liquid fuel combustion within porous inert media in heat transfer with Combined Modes", D. E. Beasley and K.D. Cole, Eds, *ASME HTD* Vol. 299, pp. 63-69.
- (3) Tseng, C. J., 1995, "Liquid Fuel Combustion in Porous Ceramic Burners", PhD Dissertation, Department of Mechanical Engineering, The University of Texas.
- (4) Hiatt, J. P. and Hall, M. J., 1994, "Pore scale turbulence in porous ceramic burners," *Proceedings of the Central States Section meeting of the*

후기

본 연구는 1998년 에너지관리공단에서 시행한 에너지기술학술진흥사업의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

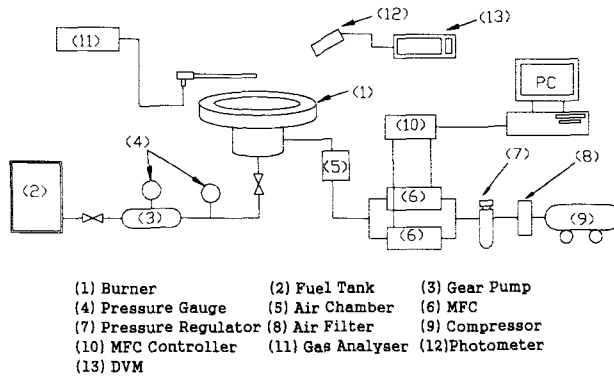


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

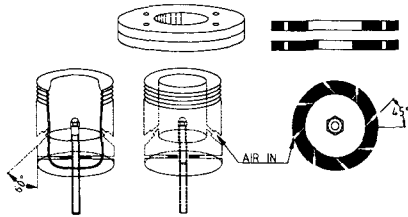
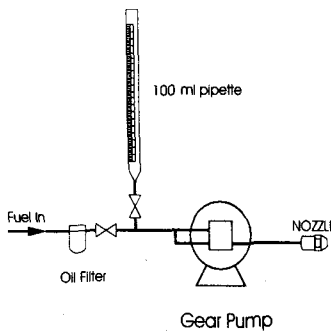


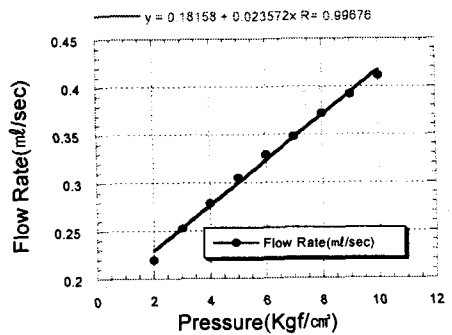
Fig. 2 Details of air/fuel mixing section



Fig. 3 Photography of PSZ ceramics



(a) Experimental setup of fuel calibration



(b) Calibration graph

Fig. 4 Calibration of fuel flow rate

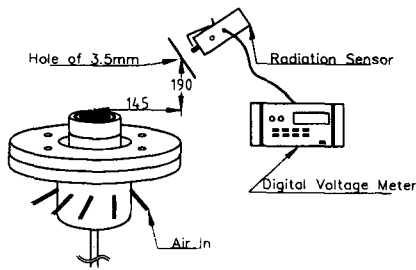


Fig. 5 Radiation flux measurement

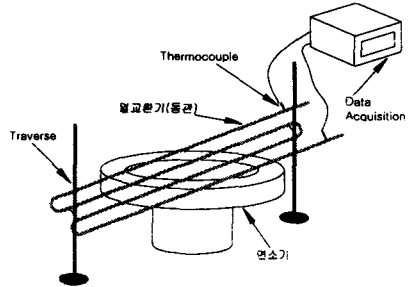


Fig. 6 Measurement of efficiency

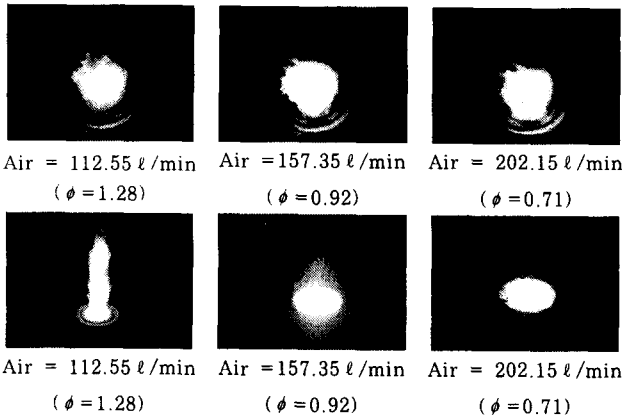


Fig. 7 Flame shape at nozzle pressure of 3 kg/cm^2 , fuel = 0.01315 l/min

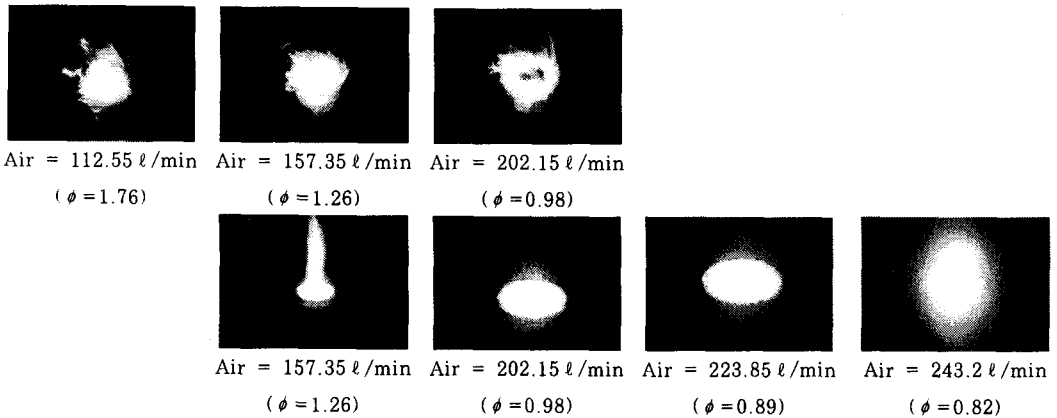


Fig. 8 Flame shape at nozzle pressure of 7 kg/cm^2 , fuel = 0.02087 l/min

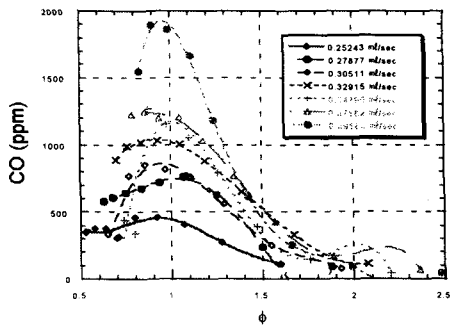


Fig. 9 (a) Emission characteristic without ceramic - CO

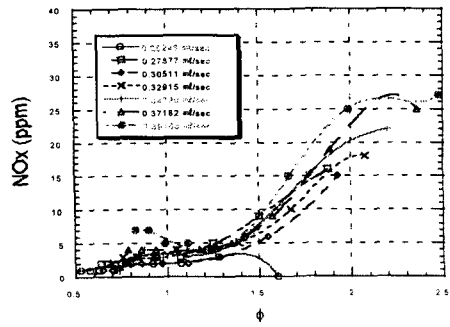


Fig. 9 (b) Emission characteristic without ceramic - NOx

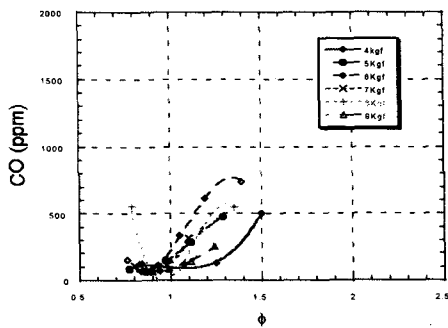


Fig. 10 (a) Emission characteristic with ceramic - CO

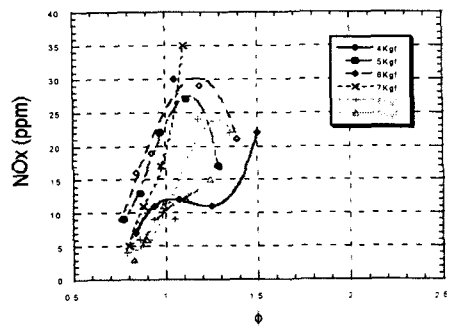


Fig. 10 (b) Emission characteristic with ceramic - NOx

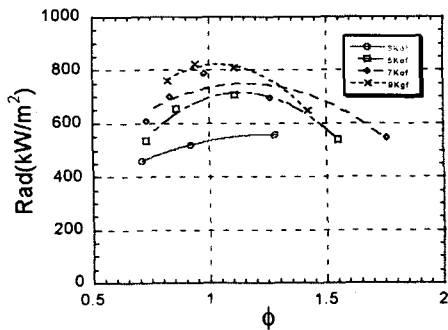


Fig.11 Radiation flux

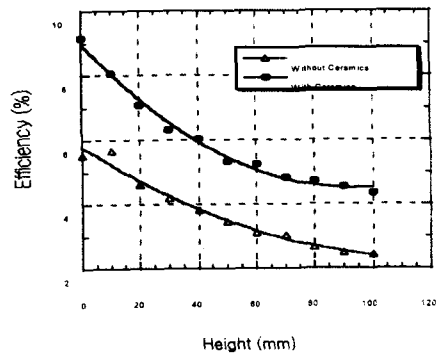


Fig. 12 Efficiency of heat exchanger