

금속매쉬에서 천연가스/공기 표면연소의 화염안정성에 관한 실험적 연구

유현석*, 이현찬*, 이종성*

An Experimental Study on the Flame Stability of Natural Gas/Air Mixture on the Metal Mesh

You Hyun-Seok, Lee Hyun-Chan, Lee Joong-Sung

Key Words : Porous media combustion(다공성물질연소), Excess enthalpy(초과엔탈피), Metal mesh(금속매쉬), Surface combustion(표면연소), Radiative combustion(적열연소), Pressure loss(압력손실)

Abstract

A conventional flame type gas combustion major portion of heat is transferred to the body by convection due to small radiant ability of the gas flame. Increasing the radiation component of heat flux in the combustion zone allows to augment the efficiency of gas utilization. Such effect can be reached by using radiative gas burner applied to metal mesh combustion. Basically the gas radiant burner consists of metallic mesh of high heat resisting steels. In terms of this regards, we have made the burner consisted of metal mesh and measured the radiative flame stability of natural gas/air mixture on the metal mesh burner. The pressure loss through the metal mesh is defined by pressure-velocity slope. The more increased the pressure-velocity slope of the metal mesh is, the wider the stable zone of radiave flame on the metal mesh burner is. And the augmentation of mixture flowrate through the metal mesh make narrow the permissible range of equivalence ratio.

1. 서 론

현재 가스버너의 개발수준은 어느 정도 포화상태에 도달된 시점이며, 버너자체의 기술적 문제점보다는 로(furnace), 열교환기 등과 같은 시스템과의 매칭(matching)이 중요한 기술이라 할 수 있겠다. 이러한 상황에서 최근에 환경문제와 에너지절약이 대두되면서 크게 각 광받고 있는 차세대 연소기술이 메탈파이버(metal fiber) 버너와 축열식(regenerative) 버너이다.

이중 메탈파이버 버너의 기본적인 메커니즘은 다공물질연소(porous media combustion)이다. 즉, 다공물질에서 연소가 발생되면 연소반응에 의한 고

온의 열이 다공물질을 가열하여 전단에서 유입되는 미연혼합기를 예열하여 초과엔탈피(excess enthalphy) 현상을 야기시켜 화염의 안정성을 극대화시키는 것이다. 또한 초과엔탈피현상은 화염대를 감소시키고 다공성물질로의 열전달로 인해 화염의 온도가 저감되어 thermal NOx의 생성도 저감되는 것으로 알려져 있다⁽¹⁾. 따라서 이러한 기본적인 원리를 이용한 메탈파이버 버너는 넓은 TDR(turn down ratio), NOx와 CO 배출이 통상적 연소의 1/10 수준인 저공해성, 가스화염복사의 극대화, 시스템의 소형화 등으로 최근에 관심이 고조되고 있다. 이러한 메탈파이버 버너의 장점은 메탈파이버라는 소재에 의해 가능한 것으로 페크알로이(FeCrAlloy)라는 고온 내열성 합금을 원재료로하여 극세선(30 μ m)을 형성한 것으로 금속 천이라 할 수 있다.

메탈파이버는 기술적 경제적, 문제로 아직까지는 국산화가 전무한 실정이라 전량 수입에 의존하

* 한국가스공사 연구개발원 가스이용기술센터

기 때문에 버너가 개발되더라도 가격경쟁력이 떨어지게 된다.

따라서 본 연구에서는 메탈파이버 버너의 기초 자료와 중간단계 버너의 개발을 위한 목적으로 금속 매쉬(metal mesh)를 이용한 천연가스 화염의 안정성에 대한 특성을 규명하고자 한다.

2. 실험방법 및 장치

2.1 실험방법

실험에 사용된 금속매쉬는 상용제품을 사용하였으며 재질은 고온의 연소반응을 고려하여 SUS316 을 선택하였다. 매쉬별 압력손실을 정의하기 위하여 화염이 없는 상태에서 혼합기의 유량에 따른 압력손실을 측정하였고 유속-압력의 기울기로서 압력손실을 정의하였다. 이때 실험의 일관된 결과를 얻기 위하여 선택된 모든 매쉬는 공간을 (open area)이 50%인 것을 사용하였다.

표면연소는 화염이 금속매쉬에 부착이 되어 매쉬를 적열시키는 적열연소와 매쉬에서 수 mm 부상되어 형성되는 부상연소로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 금속매쉬를 통한 복사전열에 관심이 있으므로 표면연소의 화염안정영역에 대한 정의는 우선 금속매쉬가 강한 복사열을 낼 수 있는 적열연소로 하였다. 화염안정영역의 한계는 목측에 의해 금속매쉬 전체가 적열이 관측되지 않을 때로 하였다.

2.2 실험장치

본 실험에 사용된 연소기의 개략도가 Fig.1 에 나타나 있다. 연소기는 천연가스/공기의 예혼합기 발생을 위한 mixer, 금속매쉬 전단에서 plug flow 를 형성하기 위한 정류장치⁽²⁾ 그리고 정류장치 출구의 금속매쉬 지지부로 형성이 된다. Mixer 는 천연가스와 공기의 농도구배를 최소화한 줄이기 위해 공기의 유동에 수직으로 연료가 유입되는 구조로 하였다. 정류장치는 확대관, 정류관, 수축관으로 형성되었으며 중간에 정류망(mesh 40)을 설치하였고 수축관은 냉각을 위해 water jacket 을 설치하였다. 금속매쉬 전단에는 추가적인 매쉬를 설치하지 않았으며 이는 미연혼합기의 예열효과를 방지하고 한 것이다.

금속매쉬를 통한 압력손실을 측정하기 위해 수축관에 압력측정구를 설치하여 미세차압기(Furness Controls Limited)로 측정하였고 미연혼합기의 온도를 측정하고자 T-type 의 열전대를 설치하였다. 실험시 미연혼합기의 온도는 21~22℃로 거의 일정하였다.

천연가스(CH₄ 90.87%, C₂H₆ 5.81%, C₃H₈ 2.38%, C₄H₁₀ 0.89%, C₅H₁₂ 0.03%, N₂ 0.02%)와 공기의 유량 조절은 질량유량계(Tylan)를 사용하였으며 습식가스미터(Shinagawa)로 확인하였다.

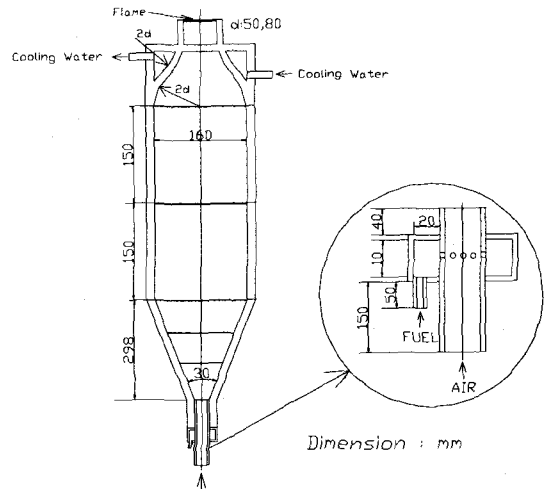


Fig.1 Schematic diagram of the metal mesh combustor

3. 실험결과

3.1 금속매쉬의 압력손실

실험에 사용된 금속매쉬의 혼합기체 유속에 따른 매쉬 전단에서의 압력측정 결과가 Fig.2 에 나타나 있다.

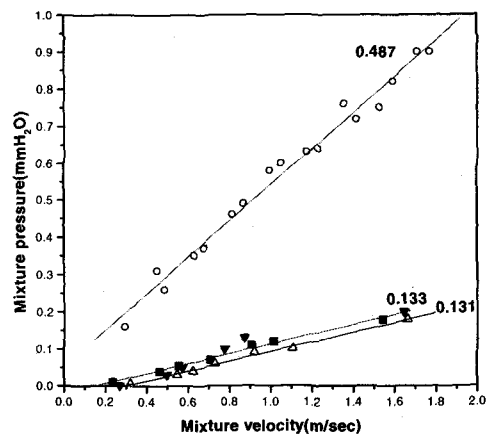


Fig.2 Various pressure loss along the mixture velocity

유속이 증가함에 따라 압력손실이 증가하는 것은

당연한 결과이며 매쉬 종류에 따라 유동저항이 변하게 되므로 기울기 값이 매쉬별로 다르게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 각각의 매쉬를 정의할 때 유속과 압력의 기울기를 사용하였다. 매쉬가 어느 이상이 되면 유속-압력 기울기가 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

3.2 표면연소의 화염안정성

압력손실기울기가 0.487 인 매쉬에 대한 적열연소의 화염안정영역이 Fig.3 에 나타나 있다. 적열연소영역의 형상은 이론당량비(1.0)를 중심으로 화염영역이 대칭되는 구조를 나타내고 있으며 본 실험에 사용된 버너의 적열연소 TDR 은 1:8 정도임을 알 수 있으며 부하가 증가할수록 적열연소를 위한 당량비의 허용범위가 좁아짐을 알 수 있다. 이는 매쉬에서 당량비별 연소속도와 미연혼합기의 분출속도에 의한 화염부착메카니즘으로 설명될 수 있겠다. 즉 미연혼합기의 분출속도가 증가하게 되면 화염이 매쉬에서 안정적으로 부착하기 위해서는 연소속도의 증가가 요구된다. 연소속도는 당량비에 종속되는 물성치이므로 증가된 분출속도만큼 연소속도의 증가도 요구되므로 화염이 매쉬위에서 안정적으로 부착되기 위해서는 당량비가 이론당량비로 근접하게 되는 것이다.

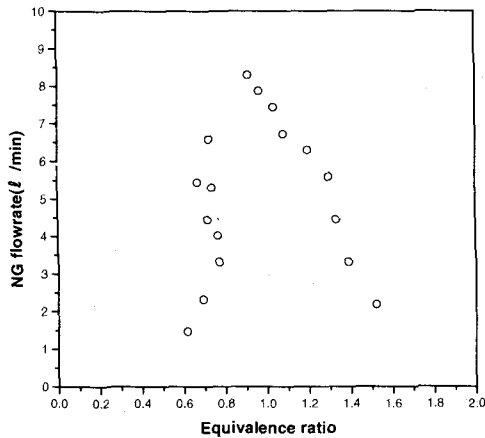


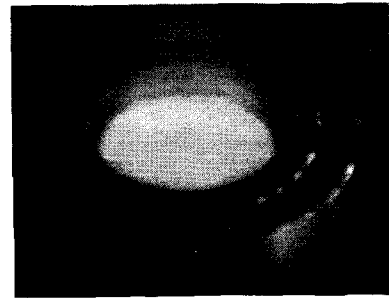
Fig. 3 The stabilization zone of red flame along the natural gas flowrate and equivalence ratio

표면연소는 앞 절에서 정의하였듯이 적염과 청염으로 구분되어 관측되었고 그에 대한 사진이 Photo 1 에 잘 나타나 있다. 사진에서 알 수 있듯이 화염이 금속매쉬에 부착되어 형성되면 화염으로부터 매쉬로의 고온열전달이 발생되어 매쉬가 적열이 되며(a), 혼합기의 유속이 빨라지거나 당량

비가 희박해지거나 과농해지면 화염의 연소속도가 저하되어 화염은 금속매쉬를 이탈하여 매쉬로의 열전달이 감소하여 연소반응에 의한 청염만이 나타나게 된다(b). 따라서 본 실험에서는 청염으로 전환되는 시점을 적열연소의 화염안정영역으로 정의하였다. 또한 매쉬의 선경이 300 μ m 이하가 되면 열변형이 발생되기 때문에 재질에 대한 고려가 추가적으로 필요하겠다.



(a) 청염(blue flame)



(b) 적염(red flame)

Photo 1. Photographs of natural gas/air flame on the metal mesh burner

적열연소의 안정성을 매쉬별로 파악하기 위해 측정된 결과가 Fig.4 에 나타나 있다. 매쉬별로 적열연소가 이루어 지는 연소영역의 형상은 유사하나 TDR 과 허용당량비 범위는 각기 다름을 알 수 있다. 매쉬에 의한 압력손실이 증가할수록 적열연소의 안정영역은 넓어짐을 알 수 있으며 이는 매쉬에서의 압력손실이 화염을 매쉬표면에서 안정적으로 부착시키는데 유리함을 알 수 있는 결과이다. 따라서 적열연소의 영역을 넓히려려면 허용되는 범위내에서 금속매쉬의 압력손실을 높여 주는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다. 압력손실의 기울기가 0.487 인 경우에서 적열연소의 안정범위가 급격히 증가되는 것을 관찰할 수 있으므로 대략적으로 압력손실 기울기가 약 0.4 이상이 되는 것이 유리할 것으로 판단되며 압력손실이 거의 없는 경우에

는 안정영역이 매우 좁아지는 현상이 나타나며 또한 이는 화염의 연소기내로의 역화현상을 유발시킬 수도 있다.

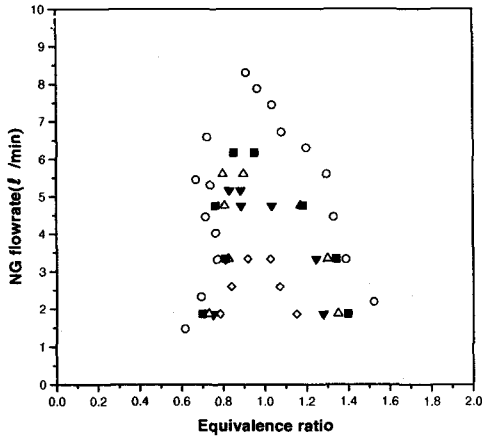


Fig.4 Various stabilization zone of red flame along the natural gas flowrate and equivalence ratio(○ 0.487, ■ 0.133, △ 0.131, ▼ 0.129, ◇ 0.12)

Fig.5 는 적열연소의 안정영역을 혼합기의 유속으로 나타낸 결과이다.

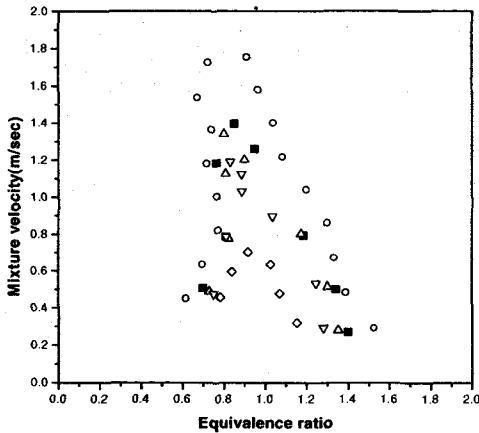


Fig.5 Various stabilization zone of red flame along the mixture velocity and equivalence ratio(○ 0.487, ■ 0.133, △ 0.131, ▼ 0.129, ◇ 0.12)

Fig.4 와 동일한 결과를 횡축에 혼합기의 유속으로 나타낸 것이다. 본 실험에 사용된 천연가스의 최대충류연소속도가 당량비 1.1 부근에서 41.5cm/sec 임을 감안할 때⁽³⁾ 적열연소가 이루어지는 유속의 범위(0.4~1.8m/sec)가 최대충류연소속

도를 훨씬 초과하는 것은 매쉬에서의 연소반응은 난류반응이기 때문이다. Mesh 20 이상이면 등방성 난류가 발생되며⁽⁴⁾ 본 실험에 사용된 매쉬도 모두 20 이상인 점을 감안하면 매쉬에 의한 난류발생으로 연소속도가 증가한 결과라 판단되며, 매쉬의 사이즈가 작아질수록 난류강도의 증가와 더불어 적열연소영역이 확대될 수 있는 것으로 사료된다.

3.3 화염안정영역에서 압력손실

Fig.6 은 적열연소가 발생하는 영역에서의 압력손실을 나타낸 결과이다.

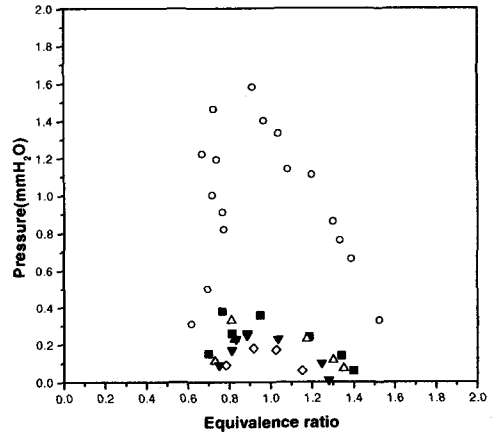


Fig.6 Various stabilization zone of red flame along the pressure loss and equivalence ratio(○ 0.487, ■ 0.133, △ 0.131, ▼ 0.129, ◇ 0.12)

화염안정영역과 유사한 분포를 나타내며 특히 압력-유속의 기울기가 0.487 인 매쉬가 다른 매쉬와 현격한 차이를 보이고 있으며 이는 적열연소 안정영역이 압력손실 기울기 0.487 에서 급격히 확대되는 점과 일치하는 결과이다. 이는 매쉬를 통한 압력손실로 인한 유속의 증대와 난류강도의 증가로 적열연소의 화염안정성 확대에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 결론

금속매쉬에서 천연가스와 공기 혼합가스의 적열연소 화염안정성에 대한 일련의 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 금속매쉬별 압력손실을 측정하여 각 각의 매쉬에 대한 정의를 압력손실기울기로 정의할 수 있었다.

- (2) 금속매쉬에서 천연가스/공기 화염은 적열연소와 청염연소로 구분되어 졌으며 시간당 공급 부하와 당량비에 의해 종속적으로 영향을 받는 것으로 나타났다.
- (3) Mesh20 이상에서는 등방성 난류발생으로 금속매쉬에서 화염이 안정적으로 부착연소되는 메커니즘을 난류연소속도에 의해 이루어짐을 알 수 있었다.
- (4) 압력손실 기울기가 증가할수록 적열연소의 안정영역은 확대됨을 알 수 있었다.
- (5) 이상의 연구결과에 대한 보다 논리적인 추론을 위해서는 유동장 특성의 규명이 추가적으로 필요하며, 적열연소와 청염연소의 연소반응 특성, 특히 thermal NOx 에 대한 배출특성도 필요하겠다.

참고문헌

- (1) Stephen R. Turns, 1996, An Introduction to Combustion, McGraw-Hill, Inc.
- (2) Journal of the J.S.M.E., 1963, Vol.66, No. 537, pp95~100
- (3) 유현석, 한정옥, 방효선, 1997, “천연가스의 연소속도 측정에 관한 실험적 연구”, 대한기계학회논문집(B) 제 21 권 제 2 호, pp.195~201
- (4) 水谷辛夫, 1977, 然燃工學