

〈학술연구〉

## 다공성 표면복사버너에서 열특성 연구

심근선\* · 이기만\*\*

### A Study of Thermal Characteristics in Porous Surface Radiant Burner

K. S. Sim, K. M. Lee

Key Words : Surface combustion(표면연소), Porous radiant burner(다공성 복사버너), Preheating effect(예열효과), Radiation efficiency(복사효율), Flame mode(화염 모드).

#### Abstract

This article describes an investigation of basic combustion characteristics of radiant burner with various firing rate and equivalence ratios in porous metal. The objective of this study is to investigate the radiation efficiency, exhaust emission and preheating effect of unburned mixture in porous surface burner. As a main experimental condition, firing rates and equivalence ratios each were adjusted from 204 to 408 kW/m<sup>2</sup> and 0.4 to 1.3. Experiment results show that the flame of Porous surface burner could be divided into three modes depending on the different flame shapes. First, it was appeared low NOx and CO emission as well as low surface temperature in blue flame mode. Second, in radiation mode, surface temperature and radiation efficiency were measured highly. Finally in pool flame mode, burner surface temperature and the preheating effect of unburned mixture were decreased again.

#### 기호설명

$\Phi$  : Equivalence ratio  
 $\eta_r$  : Radiation efficiency  
 $\eta_p$  : Preheating efficiency  
 $\epsilon$  : Stefan-Boltzmann constant  
 $\sigma$  : Metal fiber emissivity, 0.7

$Q_f$  : Firing rate, kW/m<sup>2</sup>  
 $Q_p$  : Preheating firing rate  
 $Q_r$  : Radiation firing rate  
 $Q_{con}$  : Conduction firing rate  
 $A$  : Burner surface area, m<sup>2</sup>  
 $T_{sur I}$  : Burner met surface, K  
 $T_{sur II}$  : Burner met bottom  
 $T_\infty$  : Atmospheric temperature  
 $T_{mix}$  : Unburned mixture temperature

논문접수일 : 2014.06.08. 게재확정일 : 2014.06.20.

논문수정일 : 2014.06.18.

\* 순천대학교 대학원 우주항공공학과

\*\* 교신저자, 순천대학교 기계·우주항공공학부

## 1. 서론

최근 석탄 및 에너지 고갈문제가 이슈로 떠오르고 있다. 그에 따른 저공해, 고효율의 연소시스템이 요구되어지며 환경규제 또한 강화되고 있다. 종래에 가정 및 업소용 가스버너에 주로 사용된 확산화염 형태의 분젠버너의 경우 연료와 공기의 혼합특성이 좋지 않아 전반적으로 화염의 길이가 길고 고온의 배기가스 배출로 인해 공해물질의 배출량이 많으며 효율을 향상 시키는 데에도 한계가 존재한다. 이러한 문제점을 해결하고, 강화되는 규제를 만족시키는 방안으로 다공성 금속매트(porous metal mat)를 이용한 예혼합 표면복사버너가 제안되고 있다.

다공성 표면복사버너는 예혼합된 연료와 산화제가 매트에 존재하는 수많은 홀로 나누어져 각각의 홀에서 연소되는 표면연소 방식으로 화염이 다수의 세포(cell) 형태로 형성되는 버너를 말한다. 이때 매트를 가열하여 나오는 복사과 대류에너지로 피가열물을 가열하거나, 매트가 가열되면서 매트표면에서 버너내부로 열전도가 일어나 버너 내부에서도 복사와 대류가 일어나는데, 이때 미연혼합기(unburned mixture) 예열효과(preheating effect)가 나타나게 된다. 이로 인해 효율적인 내부 재순환이 이루어져 가연한계의 확장과 CO, UHC(unburned hydrocarbon) 등을 감소시킬 수 있다. 또한 화염의 온도가 낮기 때문에 화염온도와 비례하는 열적 NOx의 생성을 억제하는 효과를 갖게 된다.[1-5]

하지만 예혼합 표면복사버너의 연소조건에 따른 각각의 화염형상들이 갖는 연소특성에 관한 연구가 상대적으로 부족한 상태이다. 따라서 본 연구는 표면복사버너로 다공성 금속매트를 이용하여 형성된 표면연소 화염을 대상으로 화염형상 변화에 영향을 미치는 열용량(firing rate,  $Q_f$ )과 당량비(equivalence ratio,  $\Phi$ ) 변화에 따른 화염모드와 그에 따른 화염의 거동을 확인하고, 각 화염모드에서 나타내는 복사효율과 예열효율 등 금속매트버너의 열특성과 배출성능을 중심으로 한 다공성 표면 복사버너의 연소특성을 파악하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험장치를 개략적으로 나타낸 것이다. 실험에 사용된 버너는 출구의 직경이 50mm인 원형버너를 사용하였고, 균일한 표면연소를 위해 기공률(porosity)이 86%인 다공성 금속매트를 사용하였다.

예혼합 연소를 위해 버너에 유입되는 연료와 산화제는 유입되기 전에 정체실(settling chamber)을 거쳐 충분히 잘 혼합되도록 하였다. 예혼합된 혼합가스의 균일한 유동장 형성을 위하여 서로 다른 사이즈의 세라믹 허니컴을 2단으로 하여 금속매트 아래에 위치시켰다. 상용 가스기기에 적용하기 위하여 연료는 상용 프로판(LPG)를 사용하였으며, 연소용 산화제는 압축공기를 사용하였다.

가스유량은 버블메타(bubble meter)로 최초 교정한 질량유량계(mass flow meter)를 사용하여 정밀하게 조절하였다. 또한, 연소실을 모사하고 화염의 거동 특성을 관찰하기 위하여 버너출구에 직경 50mm의 원통형 석영유리를 장착시켰다.

표면복사버너의 열특성 및 성능을 조사하기 위하여 K-type의 열전대를 버너의 표면으로부터 300mm 높이에 위치하여 배기가스의 온도를 측정하였고, R-type의 열전대를 사용하여 버너 표면의 온도를 측정하였다. 버너 표면온도는 정밀한 온도 측정을 위하여 2차원 이송대(traverse)를 사용하여 측정하였다.

또한 미연혼합기의 예열효과를 조사하기 위해 R-type의 열전대를 금속매트 후면(後面) 중앙에 세라믹 접착제로 고정시켜 매트의 열전도율을 파악했으며, K-type의 열전대를 매트후면 2mm 아래 위치시켜 버

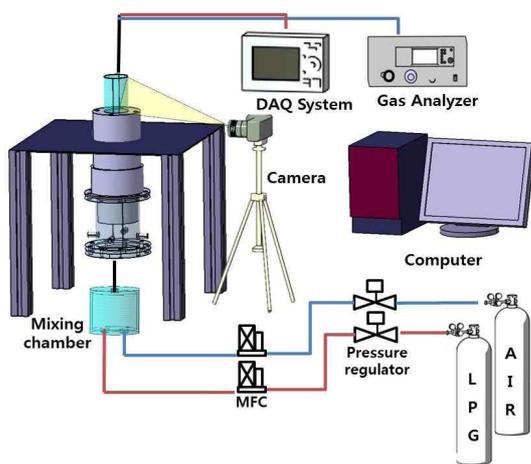


Fig. 1 Experimental set-up

너로 유입되는 미연혼합기 열량을 파악하였다.

표면복사화염의 배출성능을 파악하기 위해 연소실 후류 300mm의 열전대와 같은 높이에 프로브를 설치하여 취득한 배기가스를 가스분석기(Optima 7)를 사용하여 CO와 NO<sub>x</sub>의 연소배출물 성능을 확인하였다. 그리고 화염의 형상을 파악하고자 DSLR 카메라를 사용하여 표면복사버너의 각 조건별 화염이미지를 취득하였다.

### 2.2 실험조건 및 방법

본 연구에서는 다공성 복사버너의 화염의 형상 및 거동에 영향을 미치는 열용량( $Q_f$ )과 당량비( $\phi$ )를 주요 변수로 설정하였다. 이러한 변수들을 중심으로 한 실험조건을 Table 1에 요약하였다.

열용량을 고정하기 위해 연료의 유량을 고정한 상태에서 공기의 유량을 변화시키는 방법으로 당량비를 가연한계 이전인 0.4에서 과잉구간인 1.3까지 0.1씩 조절하였으며, 열용량은 204kW/m<sup>2</sup>에서 408kW/m<sup>2</sup> 까지 조절하여 각 변수에 따른 화염의 특성을 조사하였다.

표면온도의 측정은 버너중심을 기준으로 반경방향으로 5mm간격으로 총 9포인트를 측정하여 평균 내어 나타냈으며, 평균표면 온도( $T_{sur\parallel}$ )를 사용하여 표면 복사버너의 복사효율( $\eta_r$ )을 식(1)으로 정의 하였다.

$$\eta_r = \frac{Q_e}{Q_f} \quad Q_e = \sigma \epsilon A (T_{sur\parallel}^4 - T_{\infty}^4) \quad (1)$$

또한 표면온도와 같이 측정된 매트 바닥의 온도( $T_{sur\perp}$ )와 미연혼합기의 온도( $T_{mix}$ )를 사용하여 예열 효율( $\eta_p$ )을 식(2)으로 정의 하였다.

$$\eta_p = \frac{Q_p}{Q_{con}} \quad Q_p = \dot{m} c_p (T_{mix} - T_{\infty}) \quad (2)$$

$$Q_{con} = kA \frac{T_{sur\parallel} - T_{sur\perp}}{\Delta X}$$

Table. 1 Experimental condition.

Parameter	Range
Fuel	Commercial LPG
Oxidizer	Air
Porosity	86%
Diameter of burner(d)	50mm
Firing rate(kW/m <sup>2</sup> )	204 ~ 408
Equivalence ratio( $\phi$ )	0.4 ~ 1.3

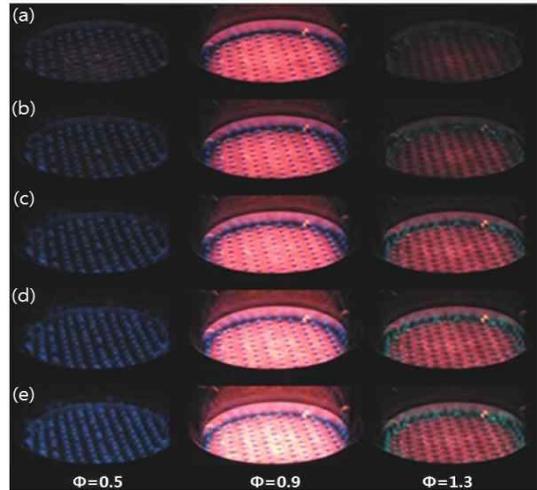


Fig. 2 Direct flame photos for of surface combustion versus different equivalence ratios and firing rates ; ( a: 204, b: 255, c: 305, d: 357, e: 408 (kW/m<sup>2</sup>) )

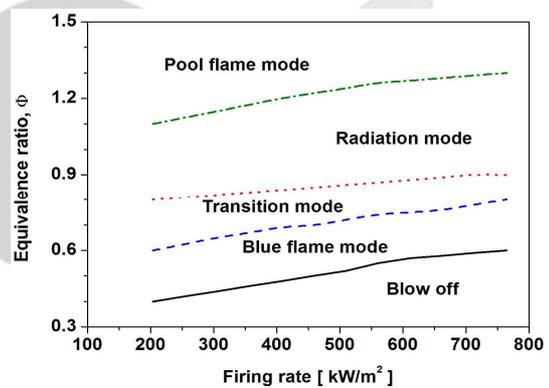


Fig. 3 Flame mode map of the porous surface burner in this work

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 화염모드

Fig. 2는 다공성 표면복사버너의 주요변수 중 하나인 열용량을 고정한 상태에서 나머지 변수인 당량비를 조건에 따라 변경하여 나타난 화염의 형상을 동일 촬영 조건에서 얻은 직접사진 이미지중 화염의 거동이 확실한 3가지 조건에서의 이미지이다.

먼저 맨 상단인 (a)이미지들은 열용량을 204kW/m<sup>2</sup>으로 고정한 상태에서 당량비를 0.5, 0.9, 1.3로 변경

하여 촬영한 이미지들이다. 당량비 변화에 따라 당량비 0.5의 청염모드(Blue flame mode)와 당량비 0.9의 복사모드(Radiation mode) 그리고 당량비 1.3의 풀모드(Pool flame mode)로 구분된다. 청염모드는 연료가 희박한 조건에서 매트 존재하는 수많은 홀 위로 비교적 긴 청염이 존재하는 경우를 말하며, 복사모드는 연소반응이 활발한 조건에서 나타나며 매트위에 존재하던 화염이 매트 안에 존재하여 매트를 적열시키는 것을 말한다. 마지막으로 풀모드는 연료가 과잉된 조건에서 나타나며 버너 홀 위로 각각의 화염이 생성되는 청염모드와는 다르게 버너의 표면위로 하나의 화염이 넓게 생성되고 매트가장자리의 화염이 녹색을 띠는 경우를 말한다. 다음과 같은 순서대로 (b) 255 kW/m<sup>2</sup>, (c) 305kW/m<sup>2</sup>, (d) 357kW/m<sup>2</sup>, (e) 408kW/m<sup>2</sup> 열용량이 증가할수록 화염의 강도가 강하게 나타난다.

Fig. 3은 위에서 분류한 화염의 모드별 안정화 선도이다. 분류한 것과 같이 당량비가 증가할수록 청염모드, 과도모드, 복사모드, 풀모드를 나타내며 안정화선도에서도 볼 수 있듯이 프로판(C3H8)의 가연한계인 당량비 0.5이하에서도 화염이 존재하는 것을 통하여 표면 복사버너의 특징인 희박구간에서의 가연한계 확장을 확인할 수 있었다.

### 3.2 열 특성

Fig. 4는 버너표면의 반경방향 측정온도를 각 조건별로 평균 내어 나타낸 그래프이다. 조건에 따라 각 열용량 별로 당량비 변화에 따라 나타내었다.

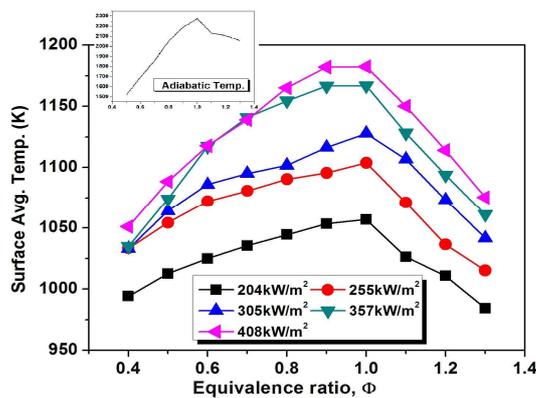


Fig. 4 Burner surface temperature with the various firing rates and equivalence ratios

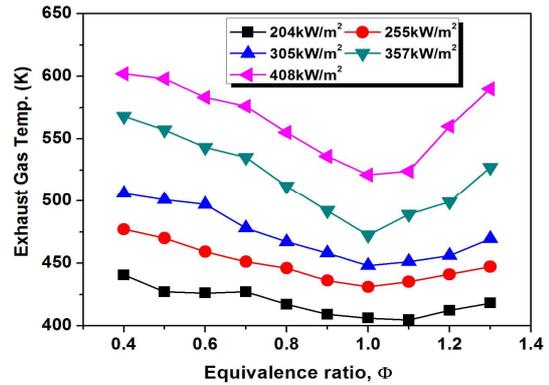


Fig. 5 Exhaust Gas temperature with the various firing rates and equivalence ratios

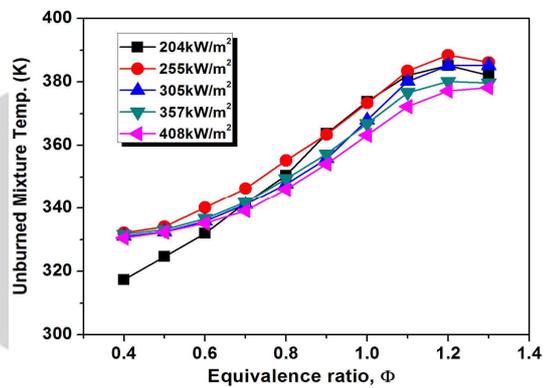


Fig. 6 Unburned mixture temperature with the various firing rates and equivalence ratios

당량비 1.0에서 최고점을 나타내는데 이는 Fig. 4에 나타난 단일연료의 단일화염온도가 당량비 1.0에서 가장 높게 나타나는 것을 통하여 확인할 수 있으며, 청염모드에 있던 화염이 복사모드로 변하면서 화염이 매트 안에 존재하여 매트를 더욱 가열시키는 것으로 판단된다.

열용량이 증가할수록 최고점이 높게 나타내는데 이는 열용량이 증가할수록 연료량이 증가하기 때문에 연소반응이 활발하게 나타나 그런 경향을 보이는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 배기가스의 온도를 측정하여 나타낸 그래프이다. 조건에 따라 각 열용량 별로 당량비 변화에 따라 나타내었다. 당량비 변화에 따라 표면평균온도와는

상이하게 당량비 1.0에서 최하점을 나타내는데 이는 표면온도와는 다르게 청염모드에서 가스를 가열하는데 사용되던 화염의 열이 복사모드로 변하면서 매트를 가열하는데 사용되어져 나타나는 현상으로 보이며, 열용량이 클수록 높게 나타내는데 이는 표면온도의 영향으로 보인다.

Fig. 6는 미연혼합기의 온도를 측정하여 조건에 따라 각 열용량 별로 당량비 변화에 따라 나타낸 그래프이다. 당량비가 증가할수록 증가하며 이는 표면온도의 영향을 받는 것으로 보인다. 열용량이 증가할수록 작은 폭이지만 미연혼합기의 온도가 감소하는데 이는 열용량이 증가하면서 가열하여야 하는 미연혼합기 속의 가스의 양이 상대적으로 증가하기 때문으로 보인다.

### 3.3 열효율

여기서부터는 표면복사버너의 연소메커니즘 중 식(1)과 식(2)로 정의한 버너표면의 복사효율과 미연혼합기 예열효율에 대하여 살펴보았다.

Fig. 7은 버너표면의 복사효율을 실험을 통하여 측정한 평균표면 온도로 계산하여 조건에 따라 열용량 별로 당량비 변화에 따라 나타내었다. 당량비 1.0에서 가장 좋은 복사효율을 나타내며, 열용량이 클수록 작게 나타난다.

이는 열용량이 증가하면서 혼합가스의 유량도 같이 증가하여 매트 안에 존재하던 화염이 매트 밖으로 밀려나면서 생기는 현상으로 보인다. [2-3]

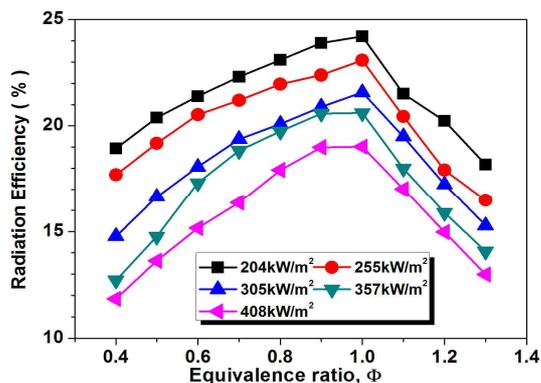


Fig. 7 Radiation efficiency with respect to the various firing rates and equivalence ratios

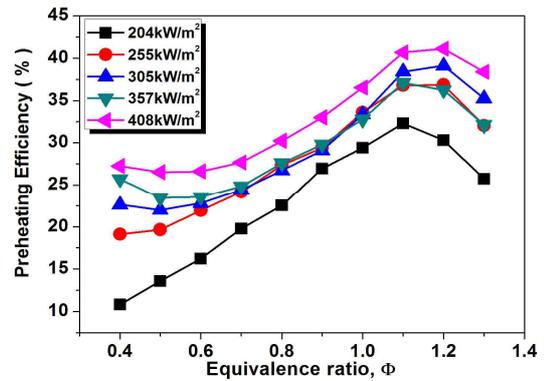


Fig. 8 Preheating efficiency with respect to the various firing rates and equivalence ratios

Fig. 8은 미연혼합기의 예열효율을 실험을 통하여 측정된 매트 바닥의 온도와 미연혼합기의 온도로 계산하여 열용량 별로 당량비 변화에 따라 나타내었다. 당량비 1.0에서 가장 높은 복사효율을 나타내며 열용량이 클수록 높게 나타난다. 이는 예열효율 계산식의 분모에 해당하는 전도의 증가량에 비해 분자에 해당하는 가스유량의 증가량이 상대적으로 크기 때문에 나타나는 현상으로 보인다.

### 3.4 연소배가스 배출특성

다음은 표면복사버너의 변수에 따라 연소시 발생하는 배기가스(CO, NOx)의 배출성능에 대하여 살펴보았다.

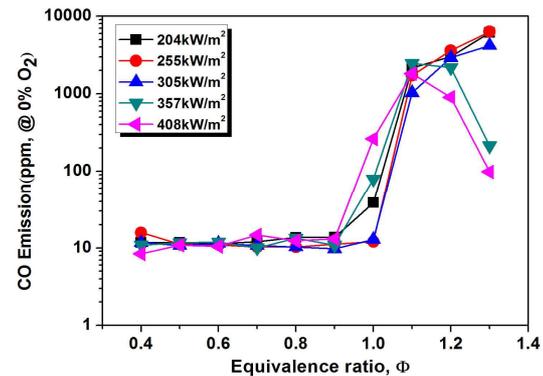


Fig. 9 CO emission for with respect to the various firing rates and equivalence ratios

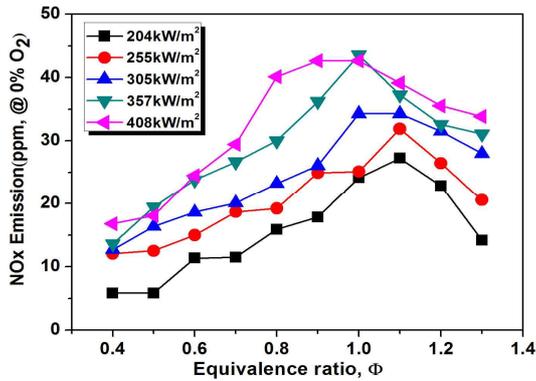


Fig. 10 NOx emission with respect to the various firing rates and equivalence ratios

Fig. 9은 당량비 변화에 따른 CO의 배출성능을 열용량 별로 나타낸 그래프이다. 당량비 0.9이전에는 CO의 배출량이 매우 낮게 나타나는데 이는 표면 복사버너의 특징인 완전연소의 효과로 보이며, 당량비 0.9 이후 급격하게 증가하는데 이는 복사모드의 화염이 풀모드로 변화하면서 매트에서 완전연소 되지 못한 혼합가스가 매트 외부에 외염을 형성하면서 증가 하는 것으로 보인다.

Fig. 10은 당량비 변화에 따른 NOx의 배출성능을 열용량 별로 나타낸 그래프이다. 당량비 1.0에서 최고점 나타나며 열용량이 클수록 높게 배출된다. 이는 당량비 1.0에서 연소반응이 활발하게 이루어져 높게 나타나는 것으로 보이며 이러한 경향은 Fig. 4의 표면평균온도와 같은 경향을 나타냄을 확인 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 다공성 표면복사버너에 관한 연구로 주요 변수들에 따른 화염거동과 열 특성에 대한 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 다공성 표면 복사버너의 주요변수인 당량비( $\Phi$ )와 열용량( $Q_f$ )의 변화에 따른 화염의 거동을 직접사진으로 통하여 비교하였다.
2. 화염의 형상에 따라 청염모드(Blue flame mode)와 복사모드(Radiation mode) 그리고 풀모드(Pool flame mode)로 정의하였으며, 각 모드에 따른 화염의 안정화 선도를 통하여 프로판(C3H8)의 가연한계 이전에서도 화염이 존재하는 것을 확인하였다.

3. 청염모드의 경우 연료가 희박한 낮은 당량비에서 생성되기 때문에 많은 공기의 유입으로 인해 낮은 화염의 온도를 갖게 되어 CO와 NOx의 배출량이 적으며 화염이 매트 밖에 존재하기 때문에 표면의 온도와 복사효율은 낮지만 이와 반대로 배기가스의 온도는 높게 나타나는 것을 확인했다.
4. 복사모드의 경우 연소반응이 활발한 당량비 1.0 부근에서 나타나며, 화염이 짧아져 매트 안에 존재하여 매트를 적열시키기 때문에 표면온도와 복사효율이 좋으며 이에 따른 예열효율도 좋게 나타나지만 CO와 NOx의 배출량이 청염모드에 비해 급격하게 증가하는 것을 확인하였다.
5. 풀모드의 경우 연료가 과잉된 높은 당량비에서 나타나며 표면위에 외염을 형성하여 표면 온도와 복사효율이 떨어지며 이에 따른 예열효율도 낮게 나타나는 것을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 2013년도 중소기업청의 산학협력기술개발사업 지원으로 수행된 연구결과의 일부입니다.(과제번호2013-0381)

#### References

1. C. Keramiotis, B. Stelzner, D. Trimis, M. Founti, "Porous burners for low emission combustion : An experimental investigation", Journal of Energy, Vol. 45, 2012, pp. 213-219.
2. K. W. Cho et al, "Premixed combustion of coke oven gas in a metallic fibre mat", Journal of Fuel, Vol. 80, pp. 1033-1036, 2001.
3. M. M Abdelaal, M. K. El-Riedy, A. M. El-Nahas, "Effect of oxygen enriched air on porous radiant burner performance and NO emissions", Journal of Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 45, pp. 163-168, 2012.
4. S. A. Leonardi, R. Viskanta, J. P. Gore, "Radiation and thermal performance measurements of a metal fiber burner",

- Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, Vol. 73, pp. 491-501, 2002.
5. B. H Yu, S. M. Kum, C. E. Lee, S. L. Lee, "An experimental study of heat transfer and pollutant emission characteristics at varying distances between the burner and the heat exchanger in a compact combustion system", Journal of Energy, Vol. 42, pp. 350-357 2012.
  6. J. Y. Jeong, Y. M Kim, "Numerical Study of Flame Structure and Emission Characteristics in Metal Fiber Burners", Journal of KOSCO, Vol. 16, pp. 27-32, 2011.
  7. KJ. Kang, J.Y. Park and K.M. Lee, "A study on the heat transfer characteristics of a high velocity impinging inverse diffusion flames", Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 12, No. 4, pp. 11-16, 2010.



**심근선**(Keun-Seon Sim)

He received the B.S. degree of School of Mechanical and Aerospace Engineering from Suncheon National University in 2014.

He is a candidate the M.S. degree of Graduate School of Aerospace Engineering in Suncheon National University.

He interests the porous combustion with metal fiber material.

---



**이기만**(Kee-Man Lee)

He received a Ph.D. degree of Mechanical Engineering from KAIST in 1998.

He is currently a professor at the School of Aerospace Engineering in Suncheon National University, and on the Editorial Board of the Korean Society of Combustion.

He interests the area of gas-turbine swirl combustion, synthetic fuel, oxy-fuel combustion, porous combustion and laser diagnostics.

---