

## 건타입 버너의 수소 연소에 관한 연구

이영림\* · 이금배\* · 심규성\*\* · 전용두\* · 유재은\*\*\*  
 (2003년 3월 21일 접수, 2003년 9월 17일 심사완료)

### Study of Hydrogen Combustion with a Gun-type Burner

Young Lim Lee, Kum Bae Lee, Kyu Sung Sim, Yong Du Jun and Jae Eun Ryu

**Key Words:** Hydrogen(수소), Combustion(연소), Gun-type Burner(건타입 버너), CFD(전산유체역학)

#### Abstract

A gun-type burner for a LPG(Liquified Petroleum Gas) boiler was utilized for hydrogen combustion. The study was performed to obtain fundamental data prior to the design of a very low NO<sub>x</sub>, hydrogen-fueled burner. First, numerical simulations were performed to predict mixing characteristics between air and fuel flows, and temperature distributions, etc. Experimental study was then performed to find out flame lengths, temperature distributions, and NO<sub>x</sub> concentrations. The results showed that a gun-type burner for a LPG boiler can be successfully used for hydrogen combustion without any major retrofitting. The hydrogen flame was very stable and 75 ppm of NO<sub>x</sub> in average was observed for the conditions considered in this study. Hydrogen combustion could be therefore a solution to avoid the problem of green-house gas(CO<sub>2</sub>) if hydrogen becomes cost-effective.

#### 기호설명

$T$  : 온도 [°C]  
 $hr$  : 시간 [hour]  
 $Nm^3$  : 표준상태 (0°C & 1 atm) 체적 [m<sup>3</sup>]  
 $k$  : 난류에너지  
 $NO_x$  : 질소산화물  
 $SO_x$  : 황산화물  
 $LPG$  : 액화석유가스  
 $x$  : 수평 방향 좌표성분  
 $y$  : 수직(중력) 방향 좌표성분

$z$  : 수평(화염분사) 방향 좌표성분

#### 그리스문자

$\lambda$  : 과잉공기비  
 $\epsilon$  : 난류에너지 소산율  
 $\phi$  : 당량비

#### 하첨자

$x$  : 1, 2 or 3

#### 1. 서론

화석연료는 연소과정에서 공해 유발물질인 SO<sub>x</sub>나 NO<sub>x</sub>를 발생시킬 뿐 아니라 CO, CO<sub>2</sub> 등이 항상 생성된다. 화석연료를 대체하는 연료 중의 하나인 수소는 이차적 에너지이지만 고효율과 에너지 매개체로 직접 사용이 가능하며 미래의 유용

† 책임저자, 회원, 공주대학교 기계공학부  
 E-mail : ylee@kongju.ac.kr  
 TEL : (041)850-8619 FAX : (041)854-1449  
 \* 회원, 공주대학교 기계공학부  
 \*\* 한국에너지기술연구원 대체에너지연구부  
 \*\*\* 회원, 공주대학교 대학원

한 대체에너지로 부상하고 있다. 1970년대 말부터 시작된 수소에너지 관련 연구는 수소의 제조, 저장, 이용 등의 각 분야에서 많은 연구개발이 이루어져 몇 가지 분야에서는 실용화에 접근하고 있으나, 그 용도가 우주개발 또는 군사용 등의 특수 분야에 한정되어 있다. 이는 아직까지도 수소가 화석연료보다 훨씬 고가이며, 당분간 화석연료보다 값싼 수소의 제조기술 개발은 기대하기 어려운 형편이기 때문에, 현재로서는 화석연료의 공급이 줄어들기 시작하는 21세기 중반부터 이들의 가격상승과 더불어 경제성이 확보될 것으로 전망되고 있다.

수소의 여러 이용기술 중에 연소기술은 주로 내연기관<sup>(1-8)</sup>에 대해 연구개발이 이루어져 왔으며, 보일러 등에 사용되는 연소기술은 아직 초보단계에 있어 더 많은 연구가 요구되고 있다. 특히, 수소와 공기를 연소할 때 문제가 되고 있는 NO<sub>x</sub>에 관한 연구<sup>(9-11)</sup>도 필요하다. 수소의 직접연소는 배기가스를 저감할 수 있는 방법일 뿐만 아니라 최근들어 문제가 되고 있는 온실가스를 해결할 수 있는 방법이기도 하다.

본 연구에서는 저 NO<sub>x</sub>용 수소버너 개발의 첫 단계로써 기존의 LPG 상용버너를 수소연소에 적용할 때 발생 가능한 문제점을 살펴보고 수소 화염의 특성을 알아보고자 한다. 이를 위하여, 수치해석을 이용하여 공기와 수소 연료의 혼합 특성을 알아보고 온도분포를 예측하였다. 다음으로 건타입 버너에 직접 수소를 연소하면서 화염모양, 온도분포, NO<sub>x</sub> 농도 등을 측정하여 향후 저 NO<sub>x</sub> 건타입 버너 설계에 활용하고자 한다.

가정용 보일러의 건타입 버너에 수소를 이용한 사례는 본 저자들이 아는 한 처음이라고 사료된다. 수소는 아직 경제성이 확보되지 않아 본 연구는 선행연구의 성격을 띠고 있다. 하지만 현재 지하가스 중에 수소를 다량 함유하고 있는 경우도 있어 그러한 가스를 사용하고자 할 때는 본 연구의 결과가 곧바로 활용 가능할 것이다.

## 2. 이론적 연구

건타입 버너의 3차원 모델링에는 Catia<sup>(12)</sup>를 사용하였고 유동 및 연소해석을 위해서는 Fluent<sup>(13)</sup>를 이용하였다.

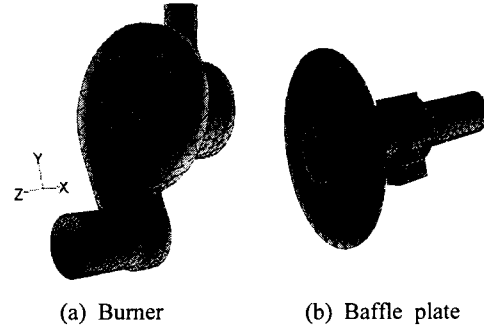


Fig. 1 Mesh system for the burner

### 2.1 버너의 수치해석모델

본 연구에서 고려된 유체유동은 3차원, 비압축성, 정상상태 난류유동으로 난류모델로는 표준 k- $\epsilon$  모델을 사용하였고 수치해석시 영향을 줄 수 있는 기하학적 특징은 가급적 자세히 모델링하여 기하학적 모델링 오류를 최소화하였다. 버너내부의 유동해석을 위해 약 30만개의 격자를 이용하였으며 버너 림(rim)과 배플 플레이트(baffle plate)에서 분사되는 수소노즐에는 약 10만개의 격자를 이용하여 가급적 세밀한 격자로 오차를 줄였다.

Fig. 1은 각각 버너내의 유동 해석을 위한 격자 시스템을 보여 준다.

수소는 지름 1 mm인 10개의 원형노즐에서 2 Nm<sup>3</sup>/hr의 유량이 나오도록 설정하였으며 공기의 유량은 20 °C, 1 기압, 이론공연비 2.38을 기준으로 계산하였는데 팬의 회전수를 조절하여 원하는 유량을 맞추었다. 고려한 과잉공기비( $\lambda$ )는 각각 1.0, 1.1 및 1.3이다. 이 때 과잉공기비는 다음과 같이 정의되어 진다.

$$\lambda = \frac{1}{\phi} \quad (1)$$

여기서, 당량비  $\phi = \frac{\text{이론공연비}}{\text{실제공연비}}$  로써 정의되어 진다.

한편, 팬은 운동량 소스로 가정하여 처리하기 보다는 팬의 형상을 직접 고려하는 rotating reference frame을 사용하였다. 이러한 방법은 어떤 특정한 팬 날개 위치에서 해가 고정되므로 물리적으로 완전히 타당하지는 않지만 팬의 성능곡선을 요구하지 않고, 비정상 동격자(unsteady)

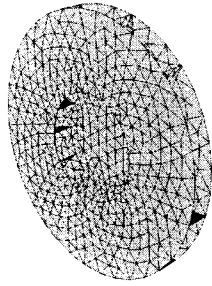
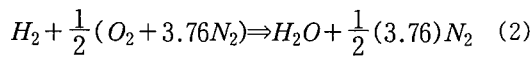


Fig. 2 Mesh system for a fan

moving mesh)로 해석하는 것에 비해 컴퓨터를 이용한 계산시간이 훨씬 줄어든다. Henk<sup>(14)</sup>는 트럭 엔진냉각 해석에 있어 rotating reference frame을 사용하여 팬을 해석하는 것이 운동량 소스로 가정하는 것보다 실험치에 더 근접함을 보여 주었다. Fig. 2는 본 연구에서 사용된 팬의 격자 시스템을 보여주고 있다.

2.2 버너의 연소 해석모델

수소버너의 연소 해석은 가장 기본적인 해석모델로서 4개의 화학종 H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>를 고려한 하나의 전체 반응식으로 가정하였다.



반응율은 에디 소산모델(eddy-dissipation model) 및 PDF(probability density function) 모델을 평형화학 모델과 함께 채택하였다. 점성계수 및 열전도계수와 같은 물성치는 난류가 잘 발달되었다는 가정하에 상수 값을 사용하였고 비열은 온도의 함수로 가정하였다.

3. 실험장치 및 방법

일반적으로 수소를 직접 불꽃 연소시키기 위한 시스템을 설계할 때에는 수소의 빠른 화염전파속도, 역화, 폭발가능성 등을 고려해야 하며, 수소 가스의 취급에도 매우 세심한 주의가 필요하다. 본 실험에서는 LPG용 건타입 상용버너를 이용하

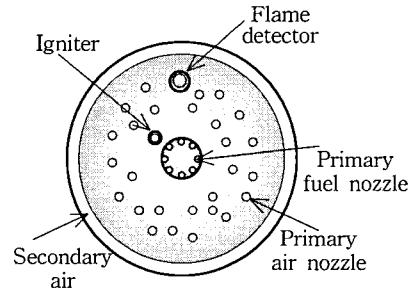


Fig. 3 Plane view of LPG burner nozzle

여 수소연소 시스템을 구현하고자 한다. 버너의 용량은 약 10000 kcal/hr까지 낼 수 있도록 가스를 공급할 수 있고 가스 공급 압력은 280 ± 50 mmH<sub>2</sub>O 이며, 점화는 화염봉(flame rod) 방식이다. Fig. 3에 버너노즐 형상을 나타내었다. 연료는 8개의 구멍으로부터 공기유동에 90°로 분사되고 공기는 배플판(baffle plate)에 뚫려 있는 여러 개의 구멍 및 버너팁과 배플판 사이의 틈새로 각각 유입된다.

또한, 수소를 연소시키기 위하여 Fig. 4와 같은 실험장치를 구성하였다. 수소는 120 bar의 압력용기로부터 압력조절기, 유량계, 유량조절밸브, 온도계, 압력계 및 체크밸브(check valve)를 통하여 버너로 유입된다. 이때, 체크밸브는 단방향 밸브로써 만약의 역화 가능성에 대비해서 장착하였다. 본 연구에서 수소의 유량은 2 Nm<sup>3</sup>/hr로써 고정시켰는데 이는 약 5000 kcal/hr의 열량을 발생하게 된다.

LPG용 상용버너에 수소를 직접 연결하였을 경우 매우 희박한 연소가 되나, 일반적으로 수소의 가연한계는 4 ~ 75 %로써 매우 넓어 여전히 가연한계 내에 놓이게 된다. 따라서, LPG용 버너를 개조없이 수소 연소에 곧바로 사용할 수 있는지의 여부를 알아보기 위하여 Fig. 4와 같이 버너를 수소압력용기에 직접 연결하여 점화하였다.

이 때, 가정용 보일러의 LPG 공급압력은 일반적으로 280 ± 50 mmH<sub>2</sub>O이므로 가능한 한 수소공급 압력을 이 범위 내로 조절하였다. 하지만 상용버너에 장착된 여러 안전장치 중의 하나인 화염감지 장치가 작동되어 점화가 불가능하였다.

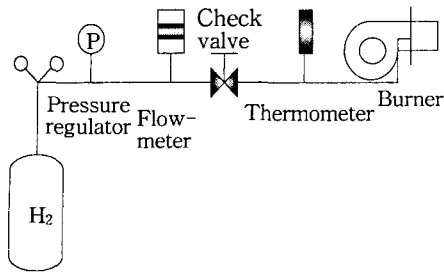


Fig. 4 Schematic of hydrogen combustion system

따라서 화염감지 장치를 해제하고 점화를 시도한 결과, 점화에 성공하였고 안정된 화염을 얻을 수 있었다. 또한, 이후 실험에서 수소유량 조절을 용이하게 하기 위하여 상용버너에 내장된 압력조절기(pressure governor) 역시 제거함으로써 수소압력용기의 압력조절기에서 나오는 출구압력이 버너에 직접 공급되도록 하였다. 연소 실험은 외기가 차단된 외벽 내에서 이루어졌다.

한편, 수소연료를 공기와 연소시킬 때 발생하는 유일한 공해물질인  $\text{NO}_x$  ( $=\text{NO} + \text{NO}_2$ )를 측정하기 위하여, Eurotron 가스 분석기를 이용하였다. 측정용 프로브(sampling probe)는 수냉식으로 스테인레스로 스틸로 제작하였고 프로브로 연소가스를 흡입하였을 때 더 이상 반응이 일어나지 않는 동시에 연소가스 중의 수분이 응축되는 것을 방지하기 위해서 항온조로부터 순환되는 냉각수를 사용하였는데 흡입된 가스가 약  $80^\circ\text{C}$ 로 유지되도록 하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 유동해석

본 연구에서 고려된 버너의 형상 및 배플 플레이트가 전체 유동이나 재순환 영역에 미치는 영향을 알아보고 노즐에서 분사되는 수소연료와 공기가 혼합되는 과정을 고찰하기 위하여 연소를 고려하지 않은 유동(cold flow) 해석을 수행하였다.

Fig. 5는 과잉공기비가 1일 때 배플 플레이트 주위의 속도벡터를 보여주고 있는데 후류 쪽에 재순환 영역이 잘 발달되어 화염의 안정화 및 화염의 길이를 짧게 하는데 기여할 것으로 사료된다. 향후 배플 플레이트의 기공율(porosity)이나

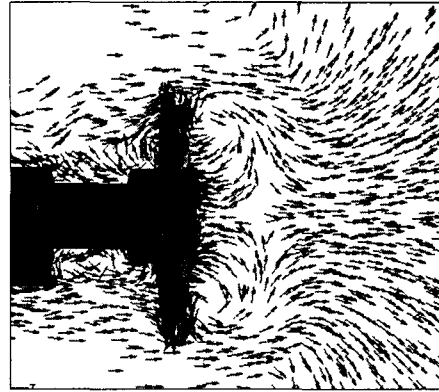


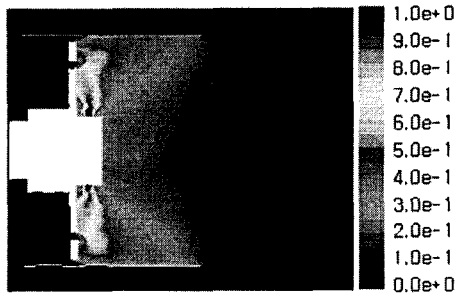
Fig. 5 Flows around a baffle plate at  $\lambda=1$

기공의 형상 및 위치를 변화시켜가면서 재순환 영역이 연소효율이나 화염에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다.

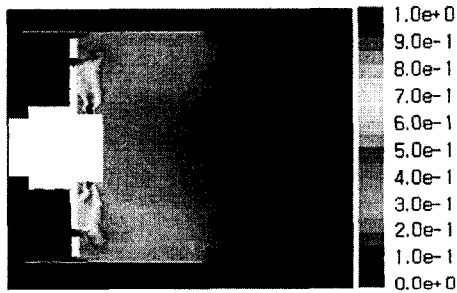
Fig. 6은 과잉공기비가 1.0 및 1.3일 때의 수소몰분율(mole fraction)을 각각 보여주고 있다. 수소는 지름 1 mm의 노즐에서 약 75 m/s로 분사되고 있는데 과잉공기비가 증가할수록 공기유속이 빨라져 침투거리(penetration depth)가 짧아지는 경향이 있으며 과잉공기비 1.3에서 더욱 고른 수소농도분포를 보여 주고 있다. 이는 연소를 촉진시켜 연소효율을 증가시키는데 기여할 것으로 사료된다.

##### 4.2 연소해석

과잉공기비에 따른 화염의 온도분포를 예측하기 위하여 과잉공기비를 1.0에서 1.5까지 변화시켜 가면서 연소 해석을 수행하였다. Fig. 7은 과잉공기비의 변화에 따른 화염의 온도분포를 보여 준다. 화염의 고온 영역은 버너 림의 출구에서 10 cm 이상 떨어진 곳에서 형성되고 있으며 과잉공기비가 증가할 수록 고온영역 역시 증가하여 연소효율 역시 높아짐을 알 수 있다. 또한, 화염길이는 버너 림에서 비교적 짧게 형성되고 있음을 온도 분포로부터 유추할 수 있는데 이는 공기유량에 비해 상대적으로 버너 림이 크다는 것을 암시하고 있다. 최고화염 온도는 과잉공기비가 1.0, 1.1, 1.3일 때 각각  $2041^\circ\text{C}$ ,  $2054^\circ\text{C}$ ,  $2105^\circ\text{C}$ 로 예측되어 과잉공기비가 증가할수록 최고온도는 증가하는 것으로 예측되었다.



(a)  $\lambda=1.0$



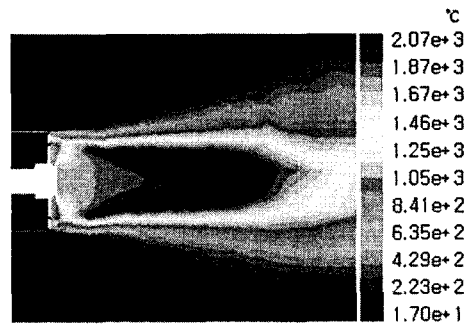
(b)  $\lambda=1.3$

Fig. 6 Mole fractions of H<sub>2</sub> at the middle section

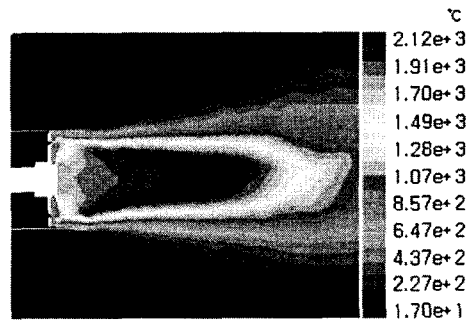
Fig. 8은 버너의 중심선을 따라 화염방향으로의 온도변화를 나타내고 있다. 화염의 온도는 배플 플레이트에서부터 점차 증가하다가 버너림으로부터 대략 11 ~ 13 cm 떨어진 곳에서 최고영역을 형성하고 있다. 이러한 최고온도의 위치는 과잉공기비가 증가할수록 상류 쪽인 버너림을 향하여 점점 가까워지는 경향을 보여주고 있는데 이는 최고온도 기준의 화염 길이가 감소함을 나타낸다.

4.3 연소 실험

상용버너의 안전장치를 해제하고 최초 점화시 안전을 위해 매우 희박한 공연비 상태( $\lambda \gg 1$ )를 유지하였다. 초희박 상태에서 육안으로 관찰된 화염색깔은 옅은 청색을 띠었고 산화제가 과도하게 공급되는 상태이므로 화염은 배플판의 작은 통기구멍에서 형성되어 림의 바깥으로는 화염이 나오지 않았다. 화염은 안정적이었고 점화시 약간의 소음이 발생하였으나 LPG 연료에 비해 그 다지 크지 않았다. 한편, 과잉공기비를 이론공연



(a)  $\lambda=1.0$



(b)  $\lambda=1.3$

Fig. 7 Temperature distribution at the center section of the burner

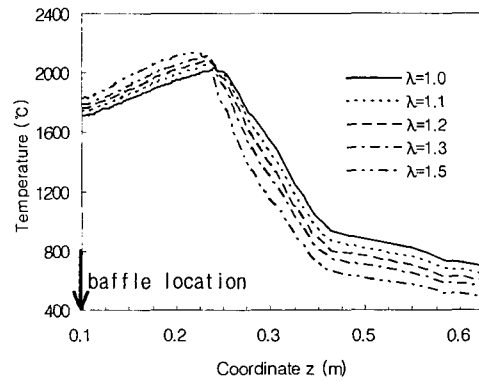


Fig. 8 Variations of temperature along the centerline of the burner

비 영역으로 감소시키면 화염의 색깔도 황색에 가깝게 변화하였다. 일반적으로 수소화염은 낮의 햇빛 속에서는 투명하여 보기가 어렵고 밤에는

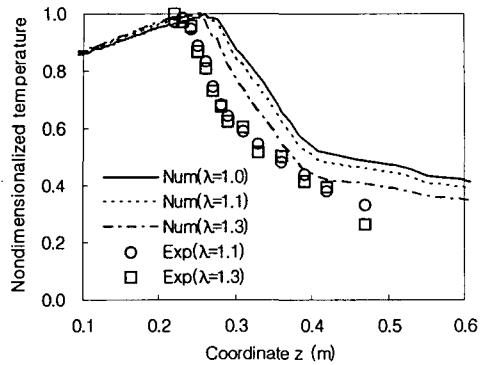
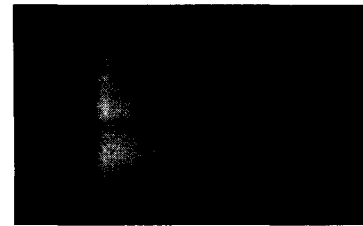


Fig. 9 Comparisons of numerical and experimental temperatures along the centerline.

관찰 가능하며 가시화제를 이용하면 낮에도 관찰이 가능하다.

수소 연소시 화염의 온도분포를 알아보기 위하여 Fig. 9에서와 같이 버너 립 끝의 중앙에서 중심선을 따라 화염 분사방향으로 온도를 측정하였고, 또한 수치해석을 이용하여 온도분포를 예측하였다. 화염온도는 실험값인 경우 가장 높은 계측온도인 약 1325 °C로 무차원화하였고 수치해석값인 경우는  $\lambda=1.3$ 일 때의 최고온도인 2105 °C로 무차원화하였다. 실험결과에 의하면 화염온도는 립으로부터 멀어질수록 전형적인 오차합수처럼 감소하고 있으며 20 cm정도 떨어진 곳에서 약 500 °C정도의 온도가 측정되었다.  $\lambda$ 가 1.3인 경우에서와 같이 공기량이 많아지면 제트의 난류정도가 심해져서 립의 출구로부터 멀어질수록 온도 측정이 불규칙하게 됨을 알 수 있었다. 한편, 수치해석을 통해 최고온도 지점이나 절대값은 정확히 예측하지 못하였으나 정성적인 온도 변화는 예측 가능하였고 향후 좀더 자세한 반응메커니즘이나 비교검증을 통해 수치해석의 정확도를 더욱 향상시킬 수 있을 것이다.

본 실험에서 온도센서는 R 타입(type) 열전대를 이용하였는데 화염으로부터 열전대를 보호하기 위하여 두 개의 접점만 밖으로 노출되어 있는 세라믹 쉬스(ceramic sheath)를 사용하였다. 처음에는 접점을 세라믹 쉬스안으로 들어간 것을 사용하였으나 최고온도가 1000 °C내외이고 응답성이 너무 늦어 사용을 포기하였다. 열전대의 접점이 밖에 나와있는 관계로 열전대가 자주 끊어지는 것을



(a)  $\lambda=1.0$



(b)  $\lambda=1.3$

Fig. 10 Variations of flame shape with excess air ratio

방지하기 위하여 열전대의 두께가 약 1 mm인 것을 사용하였다. 하지만, 이로 인해 접점이 커져 복사효과, 열용량의 증대 및 온도 민감성의 감소를 유발하여 본 연구에서 계측된 최고온도는 약 1325 °C 정도로 제한되었고 한 곳에서 온도를 재는 시간도 증가되었다. 향후 레이저 측정장비나 매우 가는 열전대를 이용한다면 더욱 정확한 온도분포의 측정이 이루어지리라 사료된다. 따라서 Fig. 9에서의 온도는 정확한 값은 아니지만 화염 온도의 정성적인 분포를 예측하는데는 여전히 유용할 것으로 사료된다.

과잉공기비 변화에 따른 수소화염의 형상을 알아보기 위하여 Fig. 10에 과잉공기비 1.0 및 1.3일 때의 화염사진을 나타내었다. 수소화염은 낮에는 투명하여 사진촬영이 불가능하므로 야간에 이루어졌다. 육안에 의한 화염길이는 수소 연소시 이론 공연비에서 약 8 cm로 관찰되었으며 화염이 희박해 질수록 화염의 길이는 더욱 짧아지게 된다.

수소와 LPG간의 화염을 좀 더 정량적으로 비교하기 위하여 5000 kcal/hr (2 Nm<sup>3</sup>/hr의 수소)의 운전 조건에서 수소 화염과 LPG 화염의 온도

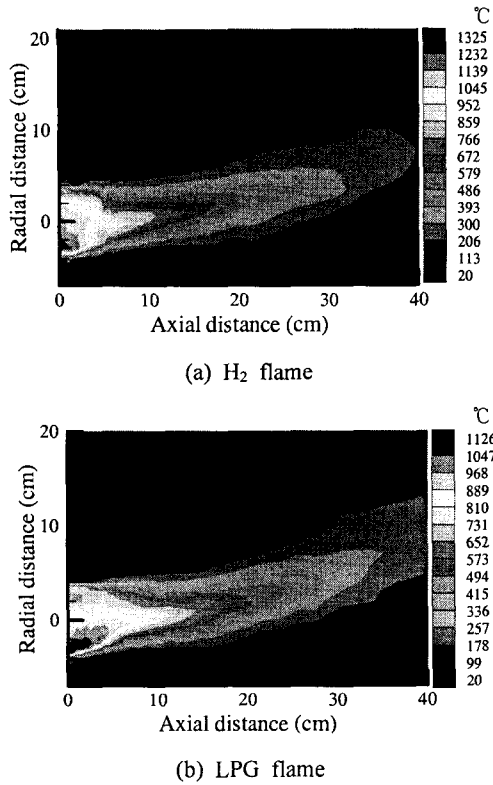


Fig. 11 Temperature distribution of flame at vertical center plane

분포를 R타입 열전대와 3차원 이송장치를 이용하여 Fig. 11과 같이 화염온도 분포를 측정하였다. 이전에 설명하였던 바와 같이 본 연구에서 사용된 R타입 열전대로서는 매우 정밀한 온도 측정은 불가능하며 단지 온도분포의 상대적 비교에는 타당할 것으로 사료된다. 측정결과 수소나 LPG 화염 모두 수평방향으로 진행하면서 자연대류 영향으로 약간 위쪽으로 향하고 있으며 최고온도는 수소화염이 1325 °C로써 LPG 화염보다 약 200 °C 정도 높게 측정되었다. 이러한 현상은 LPG와 같이 분자구조가 복잡한 탄화수소와 달리 수소분자의 경우 구조가 매우 단순하므로 매우 빠른 화학반응을 가지고 있는 것에 기인하는 것으로 설명될 수 있다. 하지만 화염의 절대온도 크기만 차이가 날뿐 화염의 전반적 형상은 거의 비슷하다.

수소 화염의 NO<sub>x</sub>를 예측하기 위하여 PDF 모델

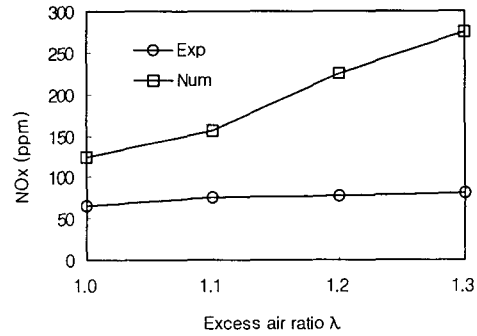


Fig. 12 NO<sub>x</sub> distribution of flame at 5 cm away from the burner rim for 4 % O<sub>2</sub>.

및 Fluent에서 제공하는 NO<sub>x</sub> 계산 알고리즘<sup>(13)</sup>을 사용하였다. Fig. 12는 버너림으로부터 후류쪽으로 5cm 떨어진 중심선에서 과잉공기비에 따른 NO<sub>x</sub> 변화량을 보여주고 있는데 과잉공기비가 증가할수록 NO<sub>x</sub>량 역시 증가하는 것을 보여준다. 이는 Fig. 8에서와 같이 과잉공기비에 따른 최고 온도 증가 현상에 따른 NO<sub>x</sub> 발생량 증가에 기인한다. 한편, 수치해석 결과와 실험결과는 정성적으로 일치하고 있지만 정량적으로는 일치하지 않아 수치해석의 한계를 보여 준다. 향후 좀더 개선된 연소 모델 및 실험 결과와의 비교 검증이 필요하다.

### 5. 결론

본 논문에서는 저 NO<sub>x</sub> 수소 연소기 개발의 첫 단계로 LPG 버너를 이용한 버너성능 실험 및 수치해석을 통해 다음과 같은 결론을 유도하였다.

(1) Rotating reference frame의 팬 모델 및 연소 모델로서 PDF 모델을 채택하여 건타입 버너의 유동 및 연소 해석을 성공적으로 수행하였다. 에디소산 모델은 PDF 모델에 비해 거의 동일한 속도나 온도장을 예측하였으나 NO<sub>x</sub>량 예측시에는 PDF 모델에 비해 우수성이 떨어졌다.

(2) LPG용 건타입 버너를 이용하여 수소를 연료로 사용하는 경우에 안전장치인 화염 감지기 및 압력 조절기를 해제하면 수소의 정상연소가 가능하였다. 본 연구에서 고려한 모든 운전조건에서 안정된 화염이 관찰되었고 초기 점화시의

소음도 그다지 크지 않음을 알 수 있었다. 단, 초기 점화시 점화가 너무 지연되면 수소 연료가 폭발할 가능성이 있으므로 주의가 필요하다.

(3) 수소연료 사용시 화염온도 분포는 LPG와 비교하여 조금 높게 측정되었을 뿐 화염형상은 유사하다. 또한 한 시간 이상의 장시간 운전에도 별다른 문제점이 발견되지 않았다. 따라서 건타입 버너를 장착한 보일러에 수소 혹은 수소가 다량 함유되어있는 지하가스를 곧바로 이용하는 것이 가능하다고 사료된다.

(4) 수소 연소시  $\text{NO}_x$ 는 화염 근처에서 4%  $\text{O}_2$  환산농도 기준시 약 75 ppm 수준이었다. 향후 수소 연소시 저 $\text{NO}_x$  건타입 버너의 설계를 위해 연소장치나 방법의 개선에 대한 연구가 필요하다. 또한 좀더 자세한 반응메커니즘의 도입을 통한 수치해석의 정확도 향상도 필요하다.

#### 참고문헌

- (1) Kwon, B. J., Lee, J. T., Lee, S. Y., and Lee, J. Y., 1993, "The Effect of Compression Ratio on Combustion and Performance Characteristics of Direct Injection Spark Ignition Hydrogen Fueled Engine," *KSAE*, Vol. 1, No. 2, pp. 17~26.
- (2) Kukkonen, Carl A., and Shelef M., 1994, "Hydrogen as an Alternative Automotive Fuel," *Automotive Engineering*, Vol. 102, No. 10, pp. 25~29.
- (3) Mathur, R. and Das L. M., 1991, "Performance Characteristics of a Hydrogen Fueled S. I. Engine using Timed Manifold Injection," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 16, No. 2.
- (4) Kim, J. M., Lee, J. T. and Lee, S. Y., 1992, "Performance Characteristics of Hydrogen Fueled Direct Injection Spark Ignition Engine," *2nd JSME-KSME Thermal Engineering Conference*, Vol. 2, pp. 169~174.
- (5) Homan, H. S., Deboire P. C. T., and Mclean, W. J., 1978, "The Effect of Fuel Injection on  $\text{NO}_x$  Emissions and Undesirable Combustion for Hydrogen Fueled Piston Engines," SAE 780945, pp. 1~17.
- (6) Levi, J. and Kittelson, D. B., 1978, "Further Studies with a Hydrogen Engine," SAE 780233, pp. 1~8.
- (7) Yi, H. S., Kim, H. J., Kim E. S., 1995, "Characteristics of Solenoid Actuated Hydrogen Injector," *KSAE*, Vol. 106, pp. 134~144.
- (8) Oh, B. S., 1994, "A Theoretical Analysis on Hydrogen Gas Fueled Turbine Engine with no Emission Gas," *J. of the Korean Hydrogen Energy Society*, Vol. 5, No. 1, pp. 25~31.
- (9) Yoon, Y. B., Kim, S. H. and Jeung, I. S., 1999, "Experiments on the Effects of Coaxial Air on the Nitric Oxides Scaling in Hydrogen Jet Diffusion Flames," *KSAS Journal*, Vol 27, No. 7, pp. 90~98.
- (10) Chen, J. Y. and Kollman, W., 1992, "PDF Modeling and Analysis of Thermal  $\text{NO}$  Formation in Turbulent Nonpremixed Hydrogen-air Jet Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 88, p. 397.
- (11) Kim, S. H., Kim, M. K. and Yoon, Y. B., 2000, "The Effect of Flame Radiation on  $\text{NO}_x$  Emission Characteristics in Hydrogen Turbulent Diffusion Flames," *KOSCO Journal*, Vol. 5, No. 2, pp. 51~62.
- (12) Catia User's Manual, Version 5.9, Dassault System, 2002.
- (13) Fluent User's Manual, Version 5.3, Fluent Inc., 1997.
- (14) Henk, K., 1998, "An Evaluation of the Simulated Flow through the Engine Cooling System of a Truck," 7th European STAR-CD User Group Meeting.