

# 합성가스(H<sub>2</sub>/CO)/공기 예혼합 충돌화염의 연소 및 열전달 연구

## Part I: 연소특성

정병규<sup>1</sup> · 이용호<sup>2</sup> · 이기만<sup>3†</sup>

<sup>1</sup>순천대학교 대학원, <sup>2</sup>순천대학교 기계우주항공공학부

## A Study on Combustion and Heat Transfer in Premixed Impinging Flames of Syngas(H<sub>2</sub>/CO)/Air Part I: Characteristics of Combustion

BYEONGGYU JEONG<sup>1</sup>, YONGHO LEE<sup>2</sup>, KEEMAN LEE<sup>3†</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Suncheon National Univ., 413, Jungang-ro, Sunchoen-Si, Jellanam-do, 540-742, Korea

<sup>2</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering of Chonnam Nat. Univ., 50, Daehak-ro, Yeosu, Jellanam, 550-749

<sup>3</sup>School of Mechanical and Aerospace Engineering, Suncheon Nat. Univ., 413, Jungang-ro, Sunchoen, Jellanam, 540-742

**Abstract** >> The characteristics of flame shape, laminar burning velocity, emissions and heat flux of stagnation point in premixed impinging jet flame of syngas fuel with 10% hydrogen content were experimentally investigated. Also, the adiabatic temperature and burning velocity are calculated by Chemkin package with USC-II mechanism. The equivalence ratios(0.8~5.0) and dimensionless separation distance(2.0~5.0) with fixed Reynolds number(1800) are main parameters in this work. Different flame shapes and colors were observed for different impingement conditions. The experimental results of burning velocity by flame surface area have a consistent with previous works and numerical simulation of this work. The inner flame length could be predicted with the ratio of mixture velocity and burning velocity from a simple formulation by the laminar burning velocity definition. It has been observed that the heat fluxes at stagnation point are directly affected by the flame shape including the separation distance. The emission results in impinging flame of syngas fuel show that the characteristics of NO<sub>x</sub> emission traced well with adiabatic temperature trend and CO emission due to fuel rich condition increased continuously with respect to the equivalence ratio.

**Key words** : Syngas(합성가스), Impinging flame(충돌화염), Burning velocity(연소속도), Flame shape(화염형상), Emission(배출성능), Heat flux of stagnation point(정체점열유속)

## Nomenclature

U<sub>0</sub>: mixture injection velocity, m/s  
S<sub>u</sub>: laminar burning velocity, m/s  
 $\theta$  : angle, degree(°)  
 $\dot{Q}$  : total volumetric flow rate, m<sup>3</sup>/s  
A : flame surface area, m<sup>2</sup>  
L<sub>f</sub> : inner flame length, m

<sup>†</sup>Corresponding author : kmlee@snu.ac.kr

[ 접수일 : 2014.2.1 수정일 : 2014.2.19 게재확정일 : 2014.2.28 ]

Copyright © 2014 KHNES

$L_s$  : side length of conical flame, m  
 $H/d$  : dimensionless impinging distance, m  
 $q''_{st}$  : heat flux of stagnation point, kW/m<sup>2</sup>  
 $\delta_f$  : separation distance between the plate and inner flame tip, m

## 1. 서 론

에너지 자원의 고갈로 인해 현재 잘 쓰이지 않고 있는 연료를 효율적으로 사용하는 방법들 중의 하나가 이전에는 발열량이 낮아 저급 연료로만 여겨졌던 혼합가스(blend gas) 연료를 활용하는 연구이다. 산업적으로 응용될 수 있는 혼합가스에는 제철소와 정유사공정의 부생가스, 매립지 등에서 얻어지는 바이오가스(biogas) 그리고 석탄의 가스화공정에서 생산되는 합성가스(syngas) 등이 있다. 이 중에서 합성가스를 산업용 연료로 활용하기 위한 노력으로 연소성능 향상과 NO<sub>x</sub> 등 배출물 저감에 대한 연구가 진행되고 있다.

한편 유리, 제지, 금속 등을 가공하는 산업에서는 제품의 품질보장을 위해 신속하고 균일한 가열기술이 필요한데 층돌가열(impinging heating)은 표면을 가열하는 효율적인 방법 중 하나로 전열 및 가열성능 향상을 위해 오래 전부터 널리 응용되었던 기술이다<sup>1),7-10)</sup>. 특히 피가열물의 품질과 직결되는 가열공정에서는 청정연료의 연소에 의해 피가열물을 오염시키지 않으면서 고온의 화염으로부터 향상된 전열성능으로 신속하게 가열시키는 층돌연소(impinging combustion)가 경쟁력을 확보하는 핵심기술이 되었다.

이 경우 균일가열이라는 조업 특성상 대부분의 연소에서 예혼합 방식의 연소를 적용하고 있으며 일반적으로 단일조성의 가스연료가 주로 사용되어왔다. 이런 가운데 최근 미 활용된 혼합가스를 주 연료로 사용하려는 수요가 증가하면서 기존 연소에서 수소(H<sub>2</sub>)나 수소가 다량 함유된 합성가스 연소시스템이 부각되고 있다. 이런 경우 기존 연료에서 새로

운 연료로 주 연료가 새롭게 교체되기 때문에 불가피하게 연소기 설계서부터 운전조건 변경 등 수소와 관련된 연소와 열전달 성능에 대한 주요 정보들이 새롭게 요구된다. 그런데 합성가스는 주성분이 수소(H<sub>2</sub>)와 일산화탄소(CO)가 대부분이어서 연소효율과 연소배가스 배출성능 등에서 우수한 성능을 나타내는 것으로 알려져 있으나, 주성분인 수소는 다른 일반 탄화수소연료에 비해 연소속도가 매우 빨라서 조성비 변화가 연소기 주요 성능인 점화와 소염, 역화현상, 화염불안정 등 연소성능에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

따라서 이처럼 수소가 함유된 합성가스 연소기의 안정성과 최적화된 설계정보를 도출하기 위해서는 조성비와 당량비 변화와 같은 연료사양과 운전조건에 직결된 연소에 관한 연구가 우선적으로 수행되어야 한다. 그 중에서도 주성분인 수소와 일산화탄소의 조성비 변화에 따른 현상, 특히 미래 에너지자원에서 중요한 역할을 할 것으로 기대되는 수소가 포함된 연료인 경우, 연소기성능과 밀접한 관련이 있는 연소속도 및 연소배출 성능 등은 이러한 합성가스 연소기 확산을 위해서 가장 먼저 파악되어야 할 특성들이다.

본 연구팀에서는 관련 분야에 유익한 정보를 제공할 목적으로 수소가 포함된 청정연료의 층돌가열을 모사할 수 있도록 합성가스 층돌제트 연소시스템을 구성하여 이에 대한 연구를 진행하였다. 이때 피가열물로 모사된 층돌면은 열교환기 형태로 화염으로부터 피가열물로 전달되는 열전달율을 정량적으로 측정할 수 있어 화염의 연소성능과 함께 열전달 성능을 동시에 평가할 수 있는 좋은 장점을 지니게 된다.

본 연구에서는 합성가스 층돌연소에 관한 체계적인 연구의 시작으로 우선 수소함유량이 10%인 일정한 조성비에서 당량비 변화에 따른 연소속도, 화염의 거동, 정체점에서의 열유속과 연소배출물 특성을 우선적으로 조사한 후 향후 계속된 연구에서는 조성비

변화에 따른 특성을 알아보고자 한다. 본 연구에서 사용한 주요변수인 당량비는 본 연구팀에서 수행된 이전 연구결과<sup>1-3)</sup>와 동일한 범위로 하였으며, 충돌면 존재에서는 면적법으로 새롭게 측정한 층류 연소속도는 Chemkin-II package의 PREMIX Code를 이용한 수치계산 결과와 비교를 하였다. 비교를 위한 계산은 수소가 포함된 연소계산에 비교적 적합한 것으로 알려진 USC-II Mechanism을 사용하였다. 또한 이어지는 보고에서는 본 연구와 동일 조건에서 충돌화염의 열전달 성능을 파악하고자 중심축과 반경방향의 열유속 특성을 분석하여 보고할 예정이다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 버너 및 충돌가열장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험장치를 개략적으로 나타내고 있다. 보다 정확한 화염의 특성을 관찰하기 위하여 버너는 출구에서 속도분포가 균일한 층류 유동을 형성하도록 버너 출구직경 대비 교축비가 36인 수축형 노즐(contraction type nozzle)을 사용하였다. 버너의 노즐직경은 내경이 10mm로 노즐 끝(tip) 부분은 화염에 의해 예열되질 않도록 최대한 얇고 날카롭게 가공하였다. 버너의 전체적인 길이는 200mm로 역화방지와 난류억제를 위하여 버너 하단부에 지름 2.5mm인 스테인레스 볼을 넣었고 그 위에 메쉬층(mesh layer)을 차례로 형성시킴으로써 버너로 공급되기 전 정체실(Settling Chamber)을 거쳐 균일하게 예혼합된 합성가스-공기 혼합기가 완전 발달된 층류상태로 분사되도록 하였다. 또한 층류화염인 관계로 외부 교란에 의한 화염떨림이 열전달 성능에 직접적인 영향을 미치게 되므로 화염의 교란을 방지하기 위해 사각형의 아크릴 실드(Shield)를 버너와 충돌면 바깥쪽에 설치하였다.

연료는 화염의 특성을 보다 엄밀하게 관찰하기 위하여 99.999%의 고순도수소와 일산화탄소를 사용하

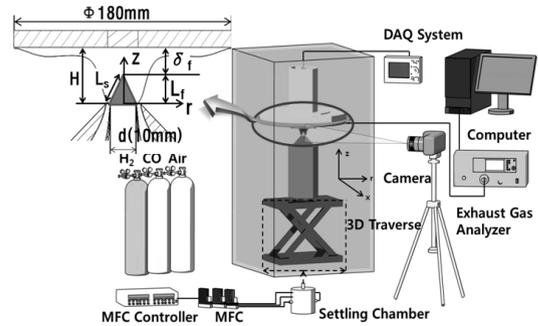


Fig. 1 Experimental set-up

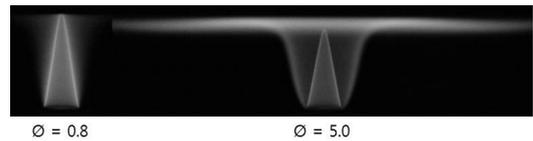


Fig. 2 Direct photos for at  $H/d=3.0$ ,  $Re=1800$

였으며, 산화제도 99.999%의 고순도 압축용 공기를 사용하였다. 이들 유량은 버블(bubble) 유량계로 교정한 습식가스미터(wet gas meter)와 질량유량계(MFC)를 통해 정밀한 양으로 측정되어 합성가스 조성비변화에 따른 당량비 계산에 사용하였다. Fig. 2는 동일한 위치( $H/d=3.0$ )와 유동조건( $Re=1800$ )에서 당량비 변화에 따라 서로 완전히 다른 형태로 거동하고 있는 화염의 이미지로, 희박영역과 과농영역의 대표적인 당량비로 0.8과 5.0 조건에서 화염의 직접사진을 보여주고 있다.

충돌면은 각 실험조건에서 화염의 크기를 고려하여 지름 180mm의 알루미늄 재질로 제작하였으며 노즐과 충돌면간 조절은 상하 이송기구와 좌우 이송장치를 이용하여 고정된 충돌면에 대해 상대적으로 3차원이송이 가능하게 하였다. 충돌면의 중심에는 화염으로부터 전달되는 전열성능을 측정하기 위해 전체 열유속(total heat flux) 양을 측정할 수 있는 열유속 센서(Vatell Co., TG-1000 수냉식)를 장착하였고, 센서 냉각과 충돌면 표면에 응축수가 생성되는 것을 방지하기 위해 별도의 온도조절기를 통하여 약 50°C의 물로 냉각시켰다.

## 2.2 화염형상과 배출성능 분석

노즐과 층돌면 사이에 존재하는 화염형상을 파악하고자 DSLR 카메라(Nikon, D70s)를 사용하여 각 조건에서 화염의 직접사진을 얻었다. 취득한 이미지를 통하여 당량비 변화에 따른 화염의 거동을 파악하였고 화염길이와 내부화염의 표면적을 측정하여 뒤에서 설명하는 식 (1)을 통해 층류화염의 연소속도를 구하였다.

또한 층돌화염의 연소 배출특성을 파악하고자 KSB 8101 규격을 기준으로 제작한 190mm 원주상에 직경 1mm 홀이 63개 가공된 배기가스포집링 프로브(ring probe)를 층돌면 바깥쪽에 장착하여 연소 생성물중 O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> 등 주요 화학종들의 농도를 측정하였다. 추출된 연소배기가스는 전자셀(Cell) 방식의 배기가스분석기(Model : OPTIMA7, MRU Int.)를 통하여 분석하였다.

## 2.3 실험조건 및 측정원리

본 연구에서 수행된 실험조건을 Table 1에 표기하였다. 수행된 합성가스 조성비와 당량비 조건은 층돌면이 없었던 본 연구팀의 이전 결과값과 비교를 위해서 체적비로(이하 체적비) H<sub>2</sub>:CO=10:90와 당량비 0.8~5.0의 동일한 실험조건으로 하였다.

층류 연소속도를 측정하는데 있어 주로 이용하는 방법 중의 하나가 면적법인데 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 취득한 직접사진으로부터 내부화염의 표면적을 산출한 뒤 다음과 같은 식 (1)로 표현되는 층류 연소속도 정의식으로부터 구하였다.

$$\rho_u S_u A = \rho_u \dot{Q} \rightarrow S_u = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (1)$$

여기서  $\rho_u$ 는 혼합기 밀도,  $S_u$ 는 연소속도, A는 원추형 화염의 표면적,  $\dot{Q}$ 는 미연혼합기인 합성가스-공

Table 1 Experimental conditions

Fuel	H <sub>2</sub> , CO			
Oxidizer	Air			
Composition ratio	H <sub>2</sub> :CO = 10:90			
Diameter of nozzle(d)	10mm			
Equivalence ratio( $\Phi$ )	0.8 ~ 5.0			
Reynolds number(Re)	1800			
Plate height	H/d=	2.0	3.0	5.0

기의 체적유량을 말한다.

혼합기 유동조건은 층류유동에 해당되는 레이놀즈수 1800으로 고정하였으며 당량비 변화에 따른 연료와 산화제유량은 레이놀즈수 1800을 기준으로 한 해당 당량비 유량으로 조절하였다. 본 연구에서도 희박영역과 과농영역의 구분을 이전 연구와 동일하게 H<sub>2</sub>:CO=10:90 조성비에서 연소속도가 가장 빠른 2.5를 기준으로 하였다. 또한 연소배출물 분석에서도 위와 동일한 유동조건으로 수행하였으며 버너와 층돌면 위치에 따른 조사는 앞서 설명한 상하 이송장치를 이용하여 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 화염형상

Fig. 3은 본 연구에서 관찰된 당량비 증가에 따른 화염의 직접적인 형상을 나타내고 있다. 앞에서 언급한바와 같이 희박과 과농한 영역은 연소속도가 최대가 되는 지점(당량비 2.5)을 기준으로 구분하였다. 먼저 Fig. 3-(a)에서는 본 연구에서 정의한 희박영역의 직접 사진들을 보여주고 있는데 당량비가 증가할수록 내부화염의 길이(높이)가 점차 줄어들면서 벽면 제트(wall jet)영역에서 층돌면을 따라 형성된 외부화염의 길이가 증가하는 것을 볼 수 있다. 전파특성을 갖는 예혼합 상태인 내부화염의 길이가 줄어드는 현상은 화염의 연소속도가 빨라지는 것을 의미하게 되는데 동일한 레이놀즈수임에도 불구하고 내부반응대

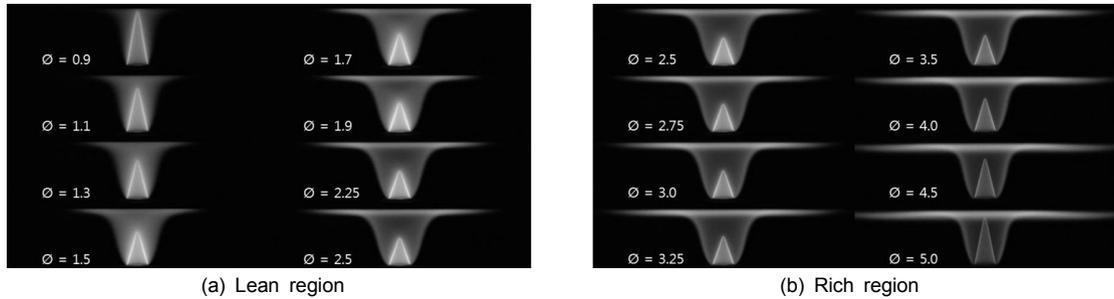


Fig. 3 Direct photos of the flame shapes with respect to equivalence ratios for  $H/d=3.0$ ,  $Re=1800$

인 내부화염의 높이가 당량비에 따라서 확연한 차이를 보인다. 이에 비해 충돌면 표면 위에 펼쳐진 외부화염의 길이는 과농영역까지 계속해서 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 당량비 증가에 따른 연료 과농화 현상으로 확산화염 형태로 연소되는 외부화염 특성때문으로 판단된다.

또한 당량비가 증가하면서 화염의 색상도 달라지는 것을 볼 수 있는데 매우 희박한 조건인 당량비 0.8부터 내부화염의 밝기가 점점 밝아지다가 비록 보여진 사진 이미지에서는 명확하게 구분하기는 힘들지만 육안으로 볼 때 당량비 1.8이 되면 내부화염이 가장 밝아지게 된다. 이후 당량비 2.5까지 다시 화염의 밝기가 점차 감소하는 것으로 나타났다. 동일 조성비에서 당량비 변화에 따른 화염의 이러한 밝기변화는 당량비 1.8 근처의 고온영역에서 특히 CH 라디칼 같은 활성기들이 활발해져 상대적으로 연소반응이 촉진되어 나타나는 현상으로 사료된다.

Fig. 3-(b)는 본 연구에서 정의한 과농한 영역으로 당량비 증가에 따른 화염형상을 보여주고 있다. 이전의 희박영역과는 달리 이 구간에서는 당량비가 증가하면서 내부화염의 길이가 점점 길어지는 것을 볼 수 있는데 다음 절의 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 화염의 연소속도가 감소하면서 생기는 현상이 된다. 희박영역에 이어 과농영역에서는 당량비가 증가하면서 화염의 밝기가 계속 어두워지면서 동시에 내부화염과 이를 둘러싸고 있는 외부 확산 반응대 모두에서 화

염의 색상도 점차 옅어지는 것을 볼 수 있다. 그러나 희박영역과 과농영역 전체에서 당량비가 증가하면 벽면제트영역에서 충돌면을 따라 반경방향으로 충돌면과 평행하게 펼쳐진 외부화염의 밝기는 계속해서 밝아지는 것을 볼 수 있다.

내부화염과는 달리 외부화염에서 밝기가 계속 밝아지는 이러한 현상은 당량비가 증가하면서 연료 중 상대적으로 반응이 빠른  $H_2$ 성분이 빠르게 반응하여 혼합기 내 산화제를 미리 소모하고 이후 반응이 상대적으로 느린 CO성분이 벽면제트 영역에서 외부로부터 유입되는 주변 산화제와 반응하기 때문인 것으로 사료된다. 즉, Fig. 3의 직접사진에서는 잘 보이지 않으나 목측(naked eye)에 의하면 과농영역으로 갈수록 내부화염과 이를 둘러싸고 있는 외부 확산반응대 부분은 점차 어두워지고 옅어지는데 비해 충돌면을 따라 펼쳐진 외부화염은 더욱 밝아지는 것을 볼 수 있다. 이는 희박영역과는 달리 연료 특히 일산화탄소가 과농한 상태에서 주변 산화제 유입에 따른 CO 성분이 주로 반응하기 때문인 것으로 보인다. 이러한 근거는 3.3절에서 설명되는 연소배기가스 배출특성에서 잉여의 CO 농도가 당량비와 함께 증가 하는 Fig. 10-(a) 그래프를 보면 이해할 수 있게 된다.

### 3.2 연소속도 및 정체점 열전달 특성

본 연구에서는 원추형 분제화염의 형상에서 내부화염의 표면적을 직접사진을 통해 측정하여 앞의 연

소속도 정의식 (1)로부터 산출한 층돌제트의 연소속도를 이전 연구결과들<sup>4,6)</sup>과 비교하였다. Fig. 4는 이전 연구자들의 층돌면이 없는 경우 결과와 본 연구에서 수행된 층돌면이 있는 경우 측정된 연소속도 값을 나타낸 그래프이다. 이 경우 본 연구의 실험조건은 H/d가 3.0이고 레이놀즈수는 1800이다. 여기서 실선으로 표시된 계산 값은 비교를 위해 같이 수행된 Premix code를 이용한 USC-II기반의 수치계산 결과이다.

그래프에서 볼 수 있듯이 층돌면이 있는 측정값이 층돌면이 없는 이전결과와 Premix code로 계산한 연소속도와 희박영역에서는 매우 잘 일치하고 있으나 과농영역에서는 서로간 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 특히 과농한 구간에서는 층돌면이 있는 본 연구의 측정값이 Bouvet 결과를 제외한 층돌면이 없는 이전 연구들과 또한 USC-II 기반으로 예측된 연소속도 값보다 약간 높게 나타나 작으나마 층돌면에 의한 영향이 있는 것으로 판단된다. 그러나 사용한 USC-II code가 수소가 함유된 합성가스, 특히 과농한 구간에서 비교하기에는 아직 보완되어야 할 사항이 많다는 지적들을 감안하고, 이전 연구들과 오차 이내에 들거나 근소하게 차이나는 것으로 보아 비교적 간단한 방법인 직접사진을 통해 면적법으로 구한 본 연구의 연소속도 측정방법이 충분히 신뢰할만한 방법이었다고 생각된다.

다음은 화염의 길이(높이)에 대한 분석으로 연소속도를 정의하는 각도법과 면적법이 동일한 결과 값을 갖게 되므로 각도법으로 정의되는 연소속도식 (3)과 면적법 정의식 (4)를 결합하면 버너출구 직경인  $d$ 로 무차원한 원추형 화염의 빗면길이(이하  $L_s$ ) 또는 화염높이(이하  $L_f$ )를 예측할 수 있는 다음과 같은 식 (2)로 표현할 수 있게 된다.

$$\frac{L_s}{d} = \frac{U_0}{2S_u} \quad (2)$$

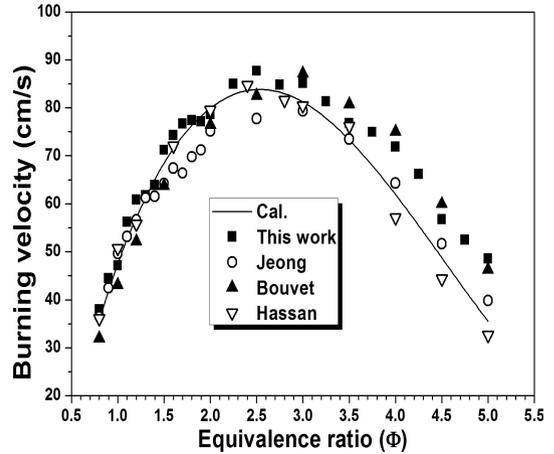


Fig. 4 Comparison of laminar burning velocities with respect to  $\Phi$  for H<sub>2</sub>/CO=10:90

$$S_u = U_0 \sin \theta \quad (3)$$

$$S_u = \dot{Q}/A \quad (4)$$

$$L_s = L_f / (1 - \sin \theta) \quad (5)$$

$$\frac{L_s}{d} = \frac{L_f}{d} + \frac{1}{2} \quad (6)$$

여기서  $U_0$ 는 혼합기의 평균 유속을 나타내고  $L_s$ 는 내부화염의 빗면길이,  $\theta$ 는 원추형인 내부화염의 중심축과  $L_s$ 사이의 각도를 나타낸다.

또한 위의 식 (2)는 원추형 화염의 표면적이 완전한 원뿔인 경로 가정하여 구한 연소속도 값과 역시 원뿔각도가 원추형 화염의 각도와 같다고 보고 구한 연소속도 값이 서로 같은 연소속도 값이 되어야 한다는 근거로 유도된다.

Fig. 5는 원추형 화염의 표면적을 구하기 위해 측정한  $L_s$ 와  $L_f$ 값을 위의 식 (6)으로 표현한 실제 실험으로 구한 화염의 길이와 수치계산으로 예측한 연소속도 값과 유량조건에 해당하는 혼합기 평균속도 값을 식 (2)의 우측 항에 넣어 이론적으로 예측한 화염

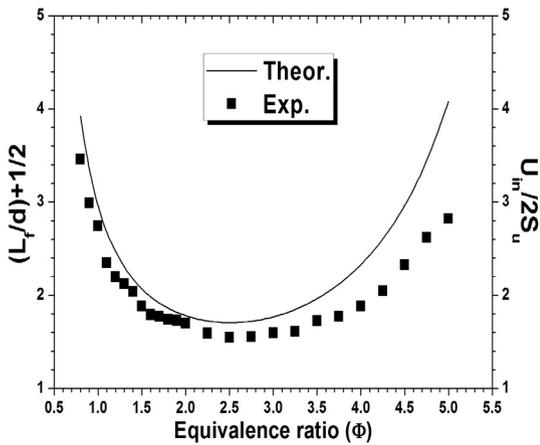


Fig. 5 Comparison of measured flame length and calculated flame length for  $H/d=3.0$ ,  $Re=1800$

길이와 비교한 그래프이다. 실제로 실험값으로 구한 연소속도의 차이는 작지만 Fig. 5의 그래프에서 큰 차이로 보이는 것은 수치계산한연소속도 값이 식 (2)의 우측항 분모로 들어가기 때문에 비록 근소한 차이일지라도 마치 큰 차이를 보이는 것처럼 되기 때문이다. 따라서 식 (2)~(6), 특히 식 (2)을 통해 알 수 있는 혼합기유속과 연소속도와의 비(比)만으로 예측한 화염의 길이를 어느 정도 예측할 수 있음을 알 수 있게 된다.

Fig. 6과 7은 충돌면으로부터 내부화염 팁까지 거리인  $\delta_f$ (이하  $\delta_f$ )와 정체점에서 열유속인  $q''_{st}$ 의 상관관계를 나타낸 그래프이다. 여기서  $\delta_f$ 와  $H/d$  그리고 화염길이인  $L_f$ 와의 상관관계는  $\delta_f = (H/d) - L_f$ 가 된다. Fig. 6의 경우는 희박영역, Fig. 7의 경우는 과농영역에서 이들 상관관계를 보여주고 있는데 겉으로 보기에  $q''_{st}$ 와  $\delta_f$ 가 서로 반비례 관계가 있음을 알 수 있다. 희박영역의 경우 앞의 3.1절 화염형상에서 본 바와 같이 당량비가 증가할수록  $L_f$ 가 짧아지게 되므로  $\delta_f$ 가 커지게 되고 그와 동시에 정체점 열유속이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 충돌면으로부터 고온인 화염이 멀어지게 되면 정체점과 화염팁과의 온도구배가 작아지면서 발생하는 현상이 된다.

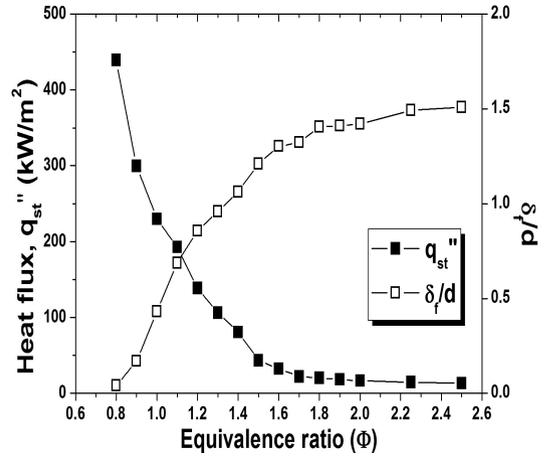


Fig. 6 Relation of heat flux( $q''_{st}$ ) and separation distance ( $\delta_f/d$ ) in rich region for  $H/d=3.0$ ,  $Re=1800$

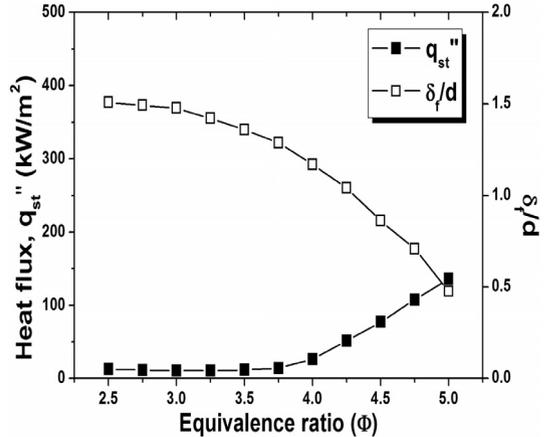


Fig. 7 Relation of heat flux( $q''_{st}$ ) and separation distance ( $\delta_f/d$ ) in rich region for  $H/d=3.0$ ,  $Re=1800$

반면 과농영역인 Fig. 7의 경우에는 당량비가 증가할수록  $L_f$ 가 길어지면서  $\delta_f$ 는 감소하게 되므로 이 때는 거꾸로 온도구배가 증가하여 열유속이 증가하게 된다. 위의 결과들로부터 정체점의 열유속( $q''_{st}$ )에 미치는 요인은 온도구배와 직결된 화염의 형상(높이)과 관련이 높은 것을 알 수 있다. 또한 외부화염의 면적이 당량비가 증가하면서 넓어지는 하지만 정체점에 미치는 열유속 영향은 외부 확산화염보다 충돌면 중심의 온도구배에 영향을 미치는 내부화염 그것도 화염팁 위치가 더 큰 것을 알 수 있다.

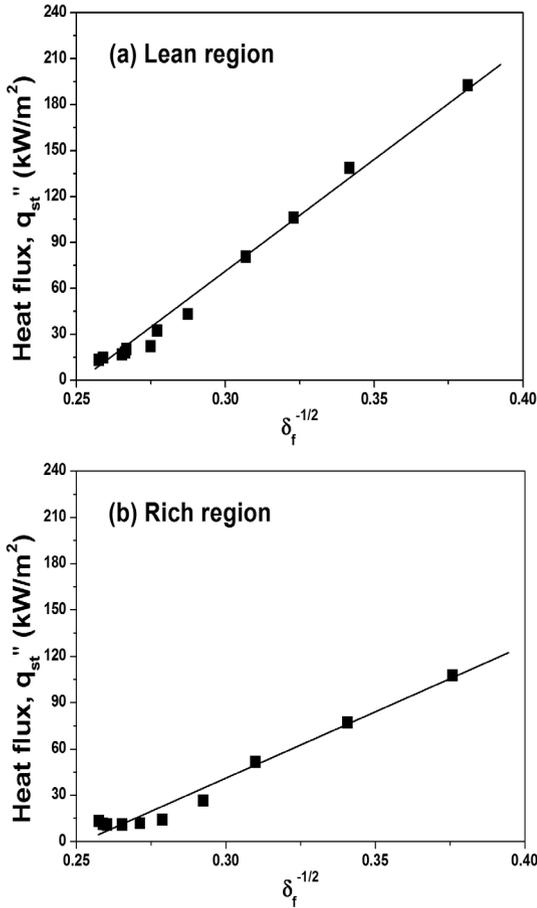


Fig. 8 Linear relationship between stagnation point heat flux( $q_{st}$ ) and inverted separation distance( $\delta_f^{-1/2}$ )

한편, 메탄(CH<sub>4</sub>)을 연료로 한 층돌제트화염에서 Kleijn<sup>7)</sup>은 정체점에서 열유속인  $q_{st}$ 와 화염 팁과 층면과의 거리인  $\delta_f$ 와의 상관관계로  $q_{st} \propto \delta_f^{-1/2}$ 를 제시하였다. 그래서 수소가 함유된 합성가스 연료인 경우에는 이러한 상관관계가 어떻게 되는지 알아보하고자 본 연구에서 측정된  $q_{st}$ 와  $\delta_f$ 의 비례 관계도를 희박 영역과 과농영역을 (a)와 (b)로 구분하여 Fig. 8에 표시하였다. 그런데 그래프에서 보는바와 같이 수소가 함유된 합성가스에서도 Kleijn의 보고대로  $q_{st}$ 와  $\delta_f^{-1/2}$ 의 선형적인 결과를 보여주고 있으나 희박영역과 과농영역에서 기울기가 서로 다른 것을 볼 수 있다. 즉, 희박구간의 기울기가 과농영역의 기울기보다 좀

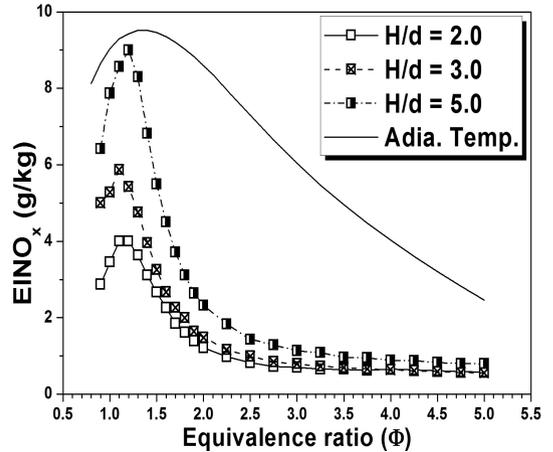


Fig. 9 NO<sub>x</sub> emission for H/d=2.0, 3.0, 5.0 and Re=1800

더 큰 것을 볼 수 있는데 이는 이 구간에서 정체점과 화염과의 온도구배가 더 크다는 것을 의미하게 된다. 이러한 현상은 다음의 배기특성에서 설명되는 단일 화염온도를 실선으로 표시한 Fig. 9를 보면 당량비 2.5를 기준으로 한 좌측구간인 희박영역이 우측구간인 과농영역보다 온도구배가 크게 되는 것을 통해 이해될 수 있다.

### 3.3 층돌화염의 배기특성

본 절에서는 층돌면이 존재할 경우 연소 배출 성능을 파악하고자 층돌화염 후단에서 발생하는 배기가스를 2절의 실험장치에서 설명한 KSB 8101규격을 기준으로 하여 제작한 배기가스포집 링을 통해 샘플링하여 분석하였다. 이 경우층돌거리인 H/d가 연소상태에 미치는 영향에 대해서도 조사하여 결과를 비교하였는데 사전 예비실험을 통해 H/d=2.0, 3.0, 5.0의 세 가지 조건에서 층돌거리에 따른 배출특성을 살펴보았다.

먼저 Fig. 9는 층돌거리인 H/d별로 당량비 증가에 따른 NO<sub>x</sub> 농도를 배출지수(Emission Index, 이하 EI)로 환산하여 나타낸 그래프이다. 측정된 농도를 배출지수로 환산한 식은 다음 식 (7)과 같다.

$$EI_i = \left( \frac{\chi_i}{\chi_{CO} + \chi_{CO_2}} \right) \left( \frac{xMW_i}{MW_F} \right) \quad (7)$$

위의 식에서  $i$ 는 구하고자하는 화학종이다.

여기서 실제 측정값은 NO와 NO<sub>2</sub>가 측정되었고 이들 값을 EINO와 EINO<sub>2</sub>로 환산하여 더한 값을 EINO<sub>x</sub>로 표현하였다. 이때 비교를 위해 Chemkin code로 계산한 H<sub>2</sub>:CO=10:90 조성비에서 합성가스의 단열화염 온도를 Fig. 9에 실선으로 같이 표시하였다. 그래프에서 보는바와 같이 당량비가 증가할수록 EINO<sub>x</sub>는 증가하다가 단열화염의 온도가 최고가 되는 당량비 근처에서 최대치를 보인 뒤로 당량비가 계속 증가할수록 급격하게 감소하다가 서서히 완만하게 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 수행한 H/d 3가지조건 모두에서 동일한 경향을 보였다. 그런데 상대적으로 노즐과 충돌면 사이의 거리가 멀수록 EINO<sub>x</sub>가 높은 것을 볼 수 있다. 이는 노즐과 충돌면 거리가 멀어질수록 주위에서 유입되는 공기량이 많아지게 되고 이러한 이유로 연소가 좀 더 활발하게 진행이 되어 화염의 온도가 높아져 이를 통해 화염과 충돌면간의 높은 배출지수를 갖는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 H/d=3.0으로 일정한 충돌거리에서 충돌 화염이 연소후 배출하는 생성물 중 배출능성과 관련이 깊은 주요 화학종들로 NO<sub>x</sub>, CO, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>의 배출 특성을 각각 나타낸 그래프이다. 여기서 Fig. 10-(a)는 NO<sub>x</sub>와 CO의 농도를 배출지수인 EINO<sub>x</sub>와 EICO로 환산하여 표시한 그래프이며, Fig. 10-(b)는 O<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>의 배출농도를 측정된 그대로 몰분율(mole fraction)인 %로 표시하였다.

먼저 Fig. 10-(a) 그래프를 보면 앞서 Fig. 9에서 설명한 것과 같이 당량비가 증가할수록 EINO<sub>x</sub>의 양은 증가하다가 감소하는 경향을 보이고 있으며 EICO의 경우에는 당량비가 증가할수록 초기의 급격한 증가 이후 어느 정도 일정하다가 다시 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 전체적으로 EICO는 당량비 증

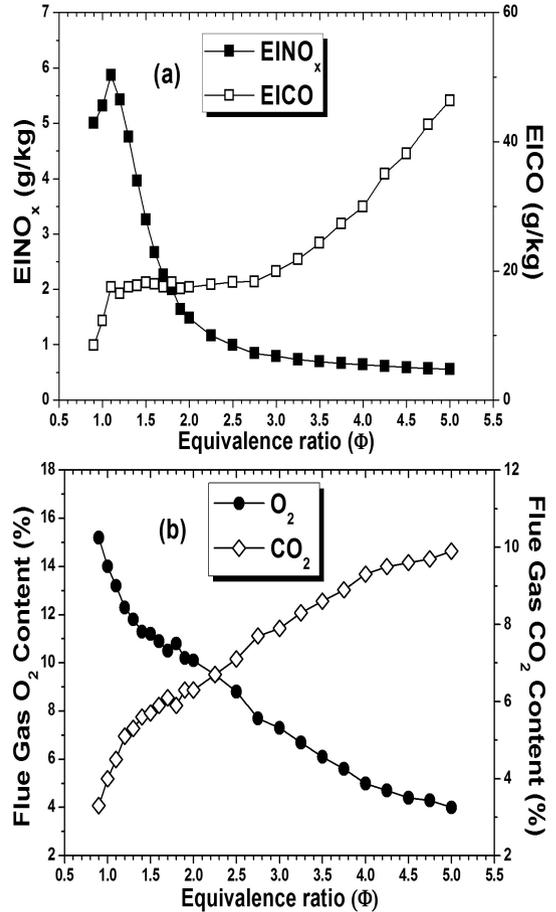


Fig. 10 Emissions of syngas/air premixed flame with equivalence ratios for H/d = 3.0, Re=1800

가와 함께 같이 증가하는 것으로 나타났는데 이는 당량비가 증가할수록 연료가 과농한 상태로 진행되면서 화염의 온도가 낮아지게 되어 나타나는 특성으로 판단된다. 따라서 초기인 당량비 0.9~1.1사이만 제외하곤 EINO<sub>x</sub>와 EICO의 배출특성은 서로 상반된 경향을 보이고 있음을 여기서도 알 수 있다.

Fig. 10-(b)에 나타난 배기가스 내 잔존하는 잉여 산화제 농도인 O<sub>2</sub>와 연소생성물인 CO<sub>2</sub>의 상관관계를 보면 연소과정에서 혼합기내 연료와 산화제간 반응정도를 거시적으로 판단할 수 있게 된다. 먼저 O<sub>2</sub>의 거동을 보면 당량비가 증가할수록 지속적인 감소를 보이는데 이는 레이놀즈수가 1800인 동일한 유동

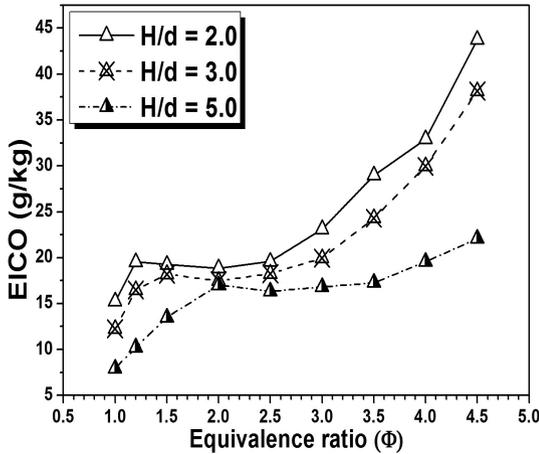


Fig. 11 Variation of EICO with equivalence ratios for  $H/d=2.0, 3.0, 5.0$  and  $Re=1800$

조건에서 당량비가 증가할수록 앞서 설명한 것과 마찬가지로 연료가 과농한 상태가 되므로 혼합기내에 포함된 산화제 양이 줄어들어 배기가스 내 잔존하는 잉여 산화제 농도가 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 이런 이유는 Fig. 10-(a)에서 설명한 CO 증가현상으로도 확인할 수 있다.

이에 비해  $CO_2$  농도는 반대로 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 연소생성물인  $CO_2$ 는 주로 CO로부터 생성이 되므로 당량비가 증가할수록 역시 Fig. 10-(a)에서 설명한 CO 농도증가와 비례해서  $CO_2$ 가 증가하는 것을 보면 이해할 수 있는 현상이다. 물론 연소반응 중에 생성된  $CO_2$ 가 다시 CO로 전환될 수도 있지만 이런 경우는 반응대 온도가 매우 높은 상태에서 과잉의 산소가 존재하는 조건이나 가능하므로 이 경우에는 CO 농도에 비례해서  $CO_2$ 가 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 11은 당량비에 따른  $H/d=2.0, 3.0, 5.0$ 별 EICO 배출특성을 나타낸 그래프이다. 고찰에 앞서 좀 유심히 관찰해야 할 것은 본 실험조건인 당량비는 혼합기 상태에서 비율이며 실제 당량비는

주위 산화제유입 등으로 이보다 희박한 상태가 된다는 것이다. Fig. 11에 나타난 전체적인 EICO 배출

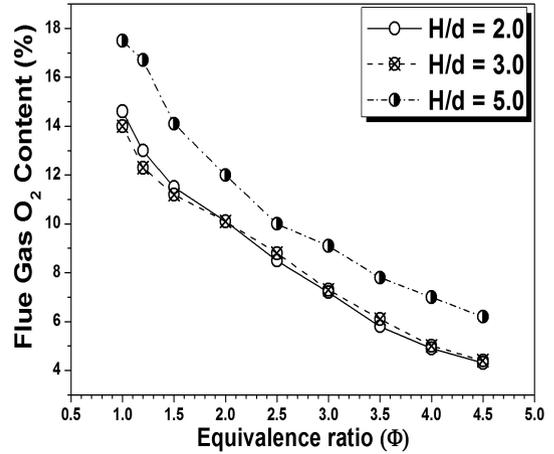


Fig. 12 Variation of flue gas  $O_2$  with equivalence ratios for  $H/d=2.0, 3.0, 5.0$  and  $Re=1800$

거동을 보면 층돌거리인  $H/d$ 별로 약간의 차이가 있으나 희박구간에서 초기에 빠르게 증가하여 1차 피크(peak)치를 보인 후 주춤하다가 과농영역에서 다시 급하게 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 당량비 전 구간으로 보면 EICO는 조사한 당량비 1.0 이후부터는 Fig. 10에서 설명한대로 당량비 증가와 함께 연료가 농후해지는 경향에 비례하여 계속해서 증가하는 것을 볼 수 있다.

층돌거리별로 보면  $H/d$ 가 작을수록 동일한 당량비에서 EICO가 높게 배출됨을 볼 수 있는데 이는 층돌면 이 가까울수록 차가운 층돌면 온도에 의해 화염이 켄칭(quenching)되어 나타난 현상으로 사료된다. 층돌면 온도에 대한 영향은 상대적으로 층돌면으로부터 멀어지는  $H/d=5.0$ 인 경우가  $H/d=2.0$ 과 3.0에 비해 낮게 배출되는 것으로 확인할 수 있는데 특히 과농구간에서는 배출량에서 많은 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 또한 층돌거리인  $H/d$ 가 클수록 주위로부터 산화제 유입이 증가되어 초기 EICO 배출이 빠르게 증가하는 당량비구간이 넓어지고 1차 EICO량 피크점도 낮아지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 12과 13는 배기가스 내 잔존하는 잉여의 산화제인  $O_2$  농도와 연소반응물로 생성된  $CO_2$  농도가 층

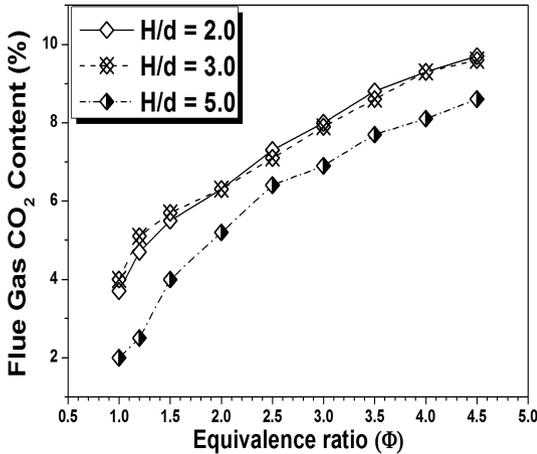


Fig. 13 Variation of flue gas CO<sub>2</sub> with equivalence ratios for H/d=2.0, 3.0, 5.0 and Re=1800

돌거리별로 배출되는 특성을 보여주고 있다. 두 화확종 모두에서 당량비 변화에 따른 전체적인 배출특성은 층돌거리가 H/d=3.0으로 일정하였던 Fig. 10-(b)와 동일한 경향을 보이고 있으나 거리에 따른 배출성향은 O<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>가 서로 상반되는 것을 볼 수 있다. 즉, 층돌거리가 상대적으로 짧은 H/d=2.0과 3.0에서는 O<sub>2</sub>나 CO<sub>2</sub> 농도 모두에서 별다른 차이를 보이지 않았으나 층돌면이 5.0으로 멀어지게 되면 앞에서 설명한 것과 마찬가지로 주위로부터 산화제유입이 증가하게 되어 배기가스 내 잉여 산화제인 O<sub>2</sub> 농도는 Fig. 12에서 보는바와 같이 동일 당량비에서 증가하게 된다. 그런데 이 경우 연소생성물인 CO<sub>2</sub> 농도는 유입된 산화제 증가로 인한 희석효과와 온도저하 등으로 인해 Fig. 13에서 나타난 바와 같이 층돌면 거리가 증가할수록 O<sub>2</sub> 농도와 반대로 동일 당량비에서 감소하는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 조성비가 일정한 합성가스-공기 예혼합 층돌화염의 연소 및 열전달 연구 중 일차적으로 연소특성에 관한 연구로 당량비에 따른 층돌화염의 거동과 정체점 열유속 및 배기특성에 대한 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 희박영역에서 당량비가 증가할수록 연소속도가 증가하여 내부화염의 길이가 짧아지고 과농영역에서는 연소속도가 감소하여 길어지는 것을 확인하였으며, 연소속도와 혼합기 분출속도의 비(比)만으로 이러한 화염의 길이를 예측하는 것이 가능함을 보였다.
- 2) 당량비 변화와 구간에 따라 예혼합상태의 내부화염과 확산상태의 외부화염대에서 화염의 밝기와 색농도가 구별됨을 확인하였다.
- 3) 전과특성을 갖는 내부화염의 표면적으로 구한 연소속도 실험값들이 비교를 위해 수행한 수치계산과 이전 연구자들의 실험값들과 비교적 잘 일치하였으며, 표면적으로 측정된 연소속도 또한 신뢰성을 가지기에 충분하였다.
- 4) 열유속 크기는 내부화염 팁과 층돌면간 온도구배에 비례하므로 과농구간보다 희박구간에서 정체점 열유속의 기울기가 크게 나타나는 현상을 단열화염온도 특성을 통해 이해하였다.
- 5) 층돌화염의 배출특성에서 EINO<sub>x</sub>는 당량비에따라 연소속도가 최대가 아닌 단열화염온도가 최고가 되는 당량비 근처에서 가장 높았다가 감소하는 경향을 보였으며 EICO는 계속해서 증가하는 특성을 보였다. 특히 EINO<sub>x</sub> 배출성향은 단열화염온도의 특성을 잘 추종하는 것으로 확인되었다.

#### 후 기

본 연구는 2013년도 정부(교육부) 재원인 한국연구재단 연구비의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (NRF-2011-0009856).

#### References

1. J. Y. Park, K. M. Lee, C. H. Hwang, "Stability Characteristics of Syngas(H<sub>2</sub>/CO)/Air Premixed Flames using an Impinging Jet Burner", The Korean

- Society of Combustion, Vol. 16, No. 1, 2011 pp. 15-21.
2. K. J. Kang, T. J. Part, C. H. Whang, K. M. Lee, "A Study on Combustion Characteristics of Synthetic Gas Air Lifted Premixed Flames with High Strain Rate in an Impinging Jet Combustion Field", The Korean Society of Combustion, Vol. 16, No. 4, 2011 pp. 31-37.
  3. B. G. Jeong, K.M.Lee, S.R.Lee, "Laminar Flame Speed Measurements and Flame Structure Differences of Syngas(H<sub>2</sub>/CO)-Air Mixture in Lean and Rich Conditions", Asia-Pacific Conference on Combustion, Proceedings of ASPACC 2013, pp. 112.
  4. B. G. Jeong, K. M. Lee, "A Study on the Laminar Burning Velocity of Synthetic Gas of Coal Gasification (H<sub>2</sub>/CO)-Air Premixed Flames", Trans. of the Korean Society of Hydrogen Energy, Vol. 23, No. 5, 2012, pp. 493-502.
  5. Bouvet N, Chauveau C, Gokaip I, Halter F, "Experimental Studies of the Fundamental Flame Speeds of Syngas(H<sub>2</sub>/CO)/Air Mixtures", Proc. Comb. Inst., Vol. 33, 2011, pp. 913-920.
  6. Hassan MI, Aung KT, Faeth G.M, "Properties of Laminar Premixed CO/H<sub>2</sub>/Air Flames at Various Pressures", J. of Propulsion Power, Vol. 13, 1997, pp. 239-245.
  7. C.R. Kleijin, "Heat Transfer from Laminar Impinging Methane Air Flame", Proceedings of the 2001 ASME-PVP, Atlanta, USA, pp.1-11.
  8. S. Chander, A. Ray, "Influence of Burner Geometry on Heat Transfer Characteristics of Methane/Air Flame Impinging on Flat Surface", Experimental Heat Transfer, Vol. 19, 2006, pp 15-38.
  9. Wei-Dong Hsieh and Ta-Hui Lin, "Methane flame stability in a jet impinging onto a wall", Energy Conversion and Management, Vol. 46, 2005, pp. 727-739.
  10. Subhash Chander, Anjan Ray, "Flame Impingement Heat Transfer : A review", Energy Conversion and Management, Vol. 46, 2005, pp. 2803-2837.