

수소 예혼합 난류전파화염의 화염형상 특성에 미치는 불활성 가스의 영향

김준호† · 나카하라 마사야* · 키도 히로유키*
(원고접수일 : 2004년 3월 17일, 심사완료일 : 2004년 4월 26일)

Influence of Inert Gas on the Configuration Characteristics of Premixed Turbulent Propagating Flames of Hydrogen Mixtures

Jun-Hyo Kim† · M. Nakahara* · H. Kido*

Abstract : The purpose of this study is to clarify the influence of inert gas on the configuration characteristics of premixed turbulent propagating flames of hydrogen mixtures. Inert gas is changed to N₂, Ar, CO₂ and He keeping the laminar burning velocity of mixtures nearly the same value. A laser tomography technique was used to obtain the flame shape, and quantitative analyses were performed. The result shows that in the wrinkled laminar flame region, the surface area of turbulent flame is slightly dependent on the equivalence ratio and the kind of inert gas. It is also shown the region of convex part of flame toward the unburned gas is greater than that of toward the burned gas regardless of the kind of inert gas.

Key words : Turbulent propagating flame(난류전파화염), Hydrogen mixtures(수소 혼합기), Flame configuration characteristics(화염형상 특성), Inert gas(불활성 가스), Laser tomography(단층사진 촬영법)

1. 서 론

최근, 화석연료 고갈로 인한 에너지 공급문제 및 CO₂ 증가에 의한 지구 온난화 현상 등의 환경오염문제가 국제적인 긴급과제로 대두되고 있다. 그 대책의 일환으로, 내연기관에서는 난류연소 특성, 유해배출가스의 저감, 대체 에너지 개발 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다⁽¹⁻⁶⁾. 한편, 수소연

료는 탄화수소계 연료에 비하여 높은 발열량, 넓은 가연한계 및 빠른 연소속도 등 뛰어난 연소특성을 가지고 있으므로, 내연기관에 적용할 경우 대단한 성능향상을 기대할 수 있다. 뿐만 아니라, 수소/산소계 혼합기의 연소기구는 CO_x, HC를 생성하지 않기 때문에 환경부하 저감에 매우 적합한 연소기술이다. 단, 수소/공기 혼합기의 연소에서는 높은 발열량으로 인한 NO_x 배출의 문제가 있

† 책임저자(목포해양대학교 기관시스템공학부), E-mail : kjh571@mmu.ac.kr, T : 061)240-7091
* 큐슈대학 공학부

지만 넓은 가연한계를 이용한 희박연소의 실현으로 대개 해결할 수 있다. 그러나, 실용적인 측면에서는 연소온도를 제어하기 위하여 적절한 희석제가 필요하다. 따라서, 난류연소속도 특성 및 화염형상 특성에 미치는 희석제의 영향을 해명하는 것은 우수한 수소엔진의 실현을 위한 필수과제이다.

본 연구에서는 층류연소속도가 거의 같은 희박 수소/산소/불활성 가스 혼합기를 이용하여 불활성 가스의 종류가 화염형상에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 먼저, 레이저 토모그래피^[3]를 이용하여 화염의 순간 2차원 단층사진을 촬영하고 화염구조 및 화염면의 거동을 관찰하였다. 또, 단층사진의 화상해석을 통하여 내연기관의 주운전영역에 상당하는, 소위 주름상 층류화염(wrinkled laminar flame)^[7]이 존재하는 비교적 약한 난류영역^[8]을 대상으로 화염표면적 및 국소화염곡률을 정량적으로 산출하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용한 연소기의 개략도를 Fig. 1에 나타낸다. 연소기는 내경 약 100mm의 거의 구형에 가까운 정적 연소기로, 광학계측을 용이하게 할 수 있도록 마주보는 4면에는 직경 85mm의 관측창이 있으며, 다른 2면에는 난류발생용 다공판과 원심팬을 설치하였다. 분암충전법으로 용기 내에 주입된 혼합기는 각 원심팬의 전방에 설치된 다공판을 통과하여 연소실 중심부에서 충돌하고, 거의 등방적인 정상 난류장을 형성한다. 연소실험은 소정의 난류강도의 조건으로 연소실 중심부에서의 불꽃점화에 의해 실시하였고, 난류강도는 팬의 회전수로 제어하였다.

화염의 단층사진 촬영에 이용한 광학계는 Fig. 2와 같다. Nd-YAG 레이저(제 2고주파 532nm, 출력 300mJ/pulse, 펄스 폭 5ns)와 원통형 렌즈 3매(초점거리: 40, 480, 1000mm)를 이용하여 폭이 약 72mm이고 두께가 0.2mm이하의 레이저 시트를 연소실에 조사하였다. 산란입자는 평균 입경 0.02~0.05 μ m의 초미립자 TiO₂를 사용하였고, CCD 카메라(1280×1000 화소)로 산란광을 촬영하였다. 1화소의 크기는 실제 화상에서 약 0.11mm

정도이다. 한편, 화염의 자발광에 의한 영향을 적게 하기 위하여 렌즈 앞에 밴드 패스 필터(center wavelength: 530nm, halfwidth: 10nm)를 설치하였다.

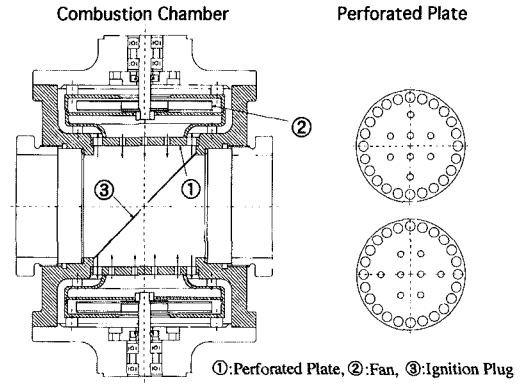


Fig. 1 Cross-sectional view of combustion chamber

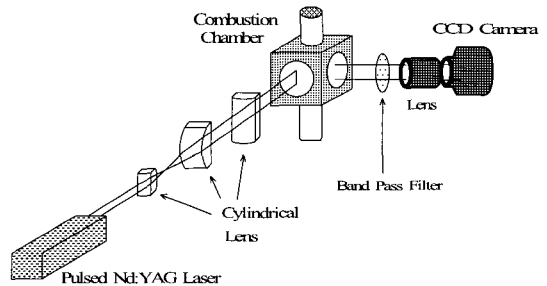


Fig. 2 Schematic diagram of the laser tomography system

3. 혼합기의 조성과 난류장의 특성

실험에 사용한 혼합기의 조성을 Table 1에 나타낸다. 희박 수소/산소 혼합기에 첨가하는 불활성 가스로는 질소 N₂, 아르곤 Ar, 이산화탄소 CO₂ 및 헬륨 He를 사용하였다. 각 혼합기는 층류연소속도 S_{L0} 를 거의 25cm/s로 맞추고 당량비 ϕ 를 변화시킨 인공혼합기이다. 표에서 ν 는 동점도, η_0 ($\eta_0 = \alpha_0/S_{L0}$, α_0 는 열확산율)는 층류화염의 예열역 두께, Le ($Le = \alpha_0/D_a$, D_a 는 부족성분의 확산계수)는 Lewis 수를 나타낸다. 한편, S_{L0} 를 25cm/s로 맞추는 경우, $\phi = 0.5$ 를 초과하는

Table 1 Properties of mixtures

Mixture	ϕ	Fuel & Inert Gas	Molar Fraction			S_{L0} cm/s	ν mm ² /s	η_0 mm	α_0 mm ² /s	Le
			Fuel	O ₂	Inert Gas					
H05-25N	0.5	H ₂ /N ₂	1.00	1.00	6.63	24.74	17.22	0.119	29.50	0.408
H07-25N	0.7	H ₂ /N ₂	1.00	0.71	6.25	24.88	17.38	0.122	30.24	0.419
H09-25N	0.9	H ₂ /N ₂	1.00	0.56	5.77	25.01	17.57	0.124	31.10	0.431
H05-25A	0.5	H ₂ /Ar	1.00	1.00	9.00	24.91	15.33	0.118	29.45	0.393
H07-25A	0.7	H ₂ /Ar	1.00	0.71	8.48	25.00	15.40	0.121	30.19	0.403
H09-25A	0.9	H ₂ /Ar	1.00	0.56	8.28	24.89	15.43	0.123	30.58	0.408
H05-25C	0.5	H ₂ /CO ₂	1.00	1.00	4.30	24.84	10.99	0.085	21.13	0.337
H07-25C	0.7	H ₂ /CO ₂	1.00	0.71	3.95	24.25	11.01	0.090	21.89	0.352
H09-25C	0.9	H ₂ /CO ₂	1.00	0.56	3.48	25.09	11.21	0.092	23.18	0.374
H02-25H	0.2	H ₂ /He	1.00	2.50	7.75	24.75	51.85	0.453	113.32	0.942
H05-25H	0.5	H ₂ /He	1.00	1.00	10.50	25.20	82.42	0.620	152.32	1.112

He 첨가 혼합기는 제조할 수 없었다.

연소용기 내 난류장의 특성은 LDV를 이용하여 중심단면상에서 중심을 원점으로 하여 40mm×40mm, 10mm 피치의 계 25점에 대하여 측정하였다. 한편, Table 1에서, 혼합기의 동점도는 불활성 가스의 종류에 따라 그 차가 상당히 큰 것을 알 수 있다. 따라서, 동점도가 가장 큰 헬륨과 가장 작은 이산화탄소를 이용하여 난류특성에 미치는 동점도의 영향을 계속하였다. Fig. 3(a)는 공기($\nu = 15.313$), 공기+헬륨(GAS1의 $\nu = 80.005$, GAS2의 $\nu = 30.007$), 이산화탄소($\nu = 8.132$) 등 4종류의 혼합기에 대하여 산출한 팬 회전수와 난류강

도의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)로부터, 동점도가 큰 혼합기일수록 동일한 팬 회전수에서의 난류강도가 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 동점도가 커질수록 그 점성에 의해 공간상관이 커지기 때문인 것으로 생각된다. 한편, 실험결과를 1차식으로 하여 각 혼합기에 대한 난류강도의 기울기 C 를 구할 수 있다. Fig. 3(b)는 난류강도 기울기 C 의 변화를 동점도에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 3(b)에서의 기울기 C 는 각 혼합기에 동일한 외력을 가한 경우의 난류강도 증가율로 생각된다. 그림에서, 난류강도 증가율 C 는 동점도가 비교적 낮은 혼합기의 경우에는 큰 차이를 보이지 않지만,

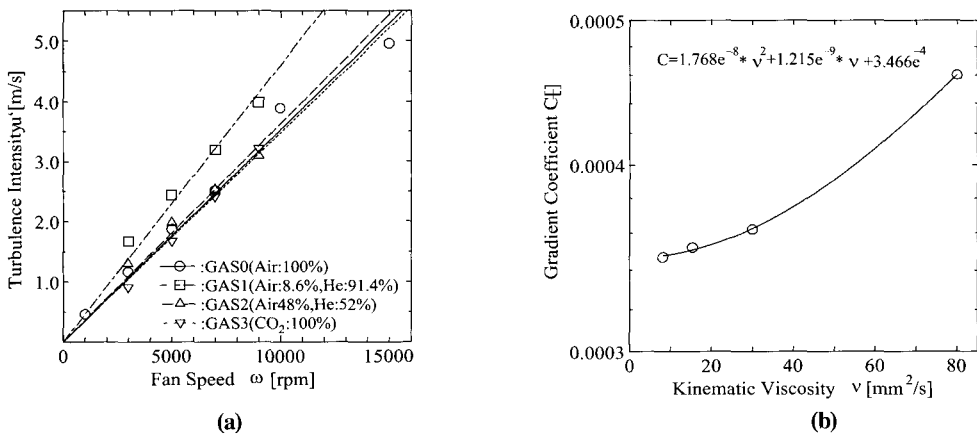


Fig. 3 Turbulence intensity and variation of gradient coefficient

동점도가 큰 혼합기에서는 동점도가 증가함에 따라 비약적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3으로부터, 동점도 ν 와 난류강도 증가율 C 의 관계를 식 (1)과 같이 산출하였다. 난류강도 u' 는 식 (2)를 이용하여 구할 수 있으며, 식 (2)에서 ω 는 팬 회전수이다.

$$C = 1.768e^{-8} \cdot \nu^2 + 1.215e^{-9} \cdot \nu + 3.466e^{-4} \quad (1)$$

$$u' = C \cdot \omega \quad (2)$$

한편, 종방향 적분공간척도 L 및 Taylor 미세 척도 λ_g 는 각각 식 (3) 및 식 (4)를 이용하여 산출할 수 있다.

$$L = 4.848e^3 \cdot u'^5 - 8.124e^{-2} \cdot u'^4 + 5.254e^1 \cdot u'^3 - 1.629u'^2 + 2.442u' + 2.117 \quad (3)$$

$$\lambda_g = 1.484(u'/\nu)^{1/5} \cdot L^{4/5} \quad (4)$$

4. 실험결과 및 고찰

4.1 화염구조의 관찰

Fig. 4는 $\phi=0.5$ 로 일정하게 하고 u'/S_{L0} 를, Fig. 5는 $u'/S_{L0}=1.4$ 로 일정하게 하고 ϕ 를 각각 변화시켰을 때 수소 혼합기의 대표적인 화염단층사진을 나타낸 것이다. 사진에서 중앙부의 검은 부분이 기연가스(burned gas) 영역이며, 왼쪽 위에서 오른쪽 아래로 경사지게 보이는 것은 점화플러그이다. 또, 그림 중 1.4, 2.8 및 5.6 등은 u'/S_{L0} 의 값을 나타낸다.

Fig. 4 및 Fig. 5로부터, 각 수소 혼합기의 화염구조는 불활성 가스 및 당량비에 관계없이 연속한 화염면을 가지는, 소위 주름상 층류화염의 구

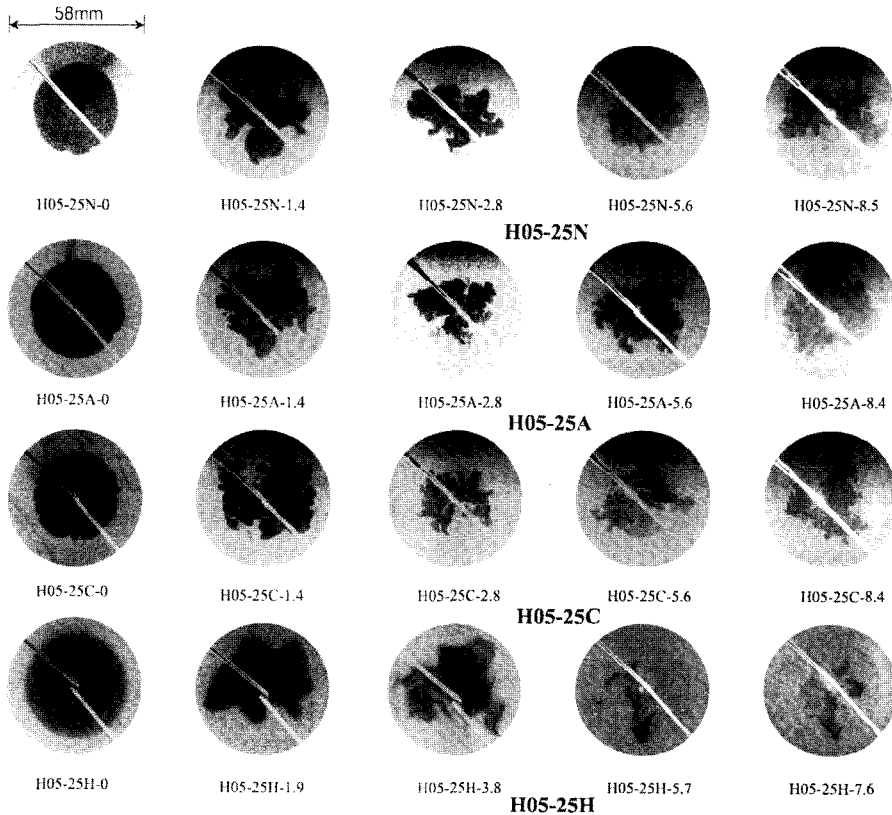


Fig. 4 Tomograms of turbulent flame($\phi=0.5$)

조임을 확인할 수 있다. 또, u'/S_{L0} 가 증가할수록 난류의 영향으로 화염면의 요철이 심해지고 복잡해지는 것을 알 수 있다. 그러나, 당량비에 의한 화염면 형상의 차이는 명백하지 않다. 화염면의 형상 특성을 살펴보면, Fig. 4에서, He 첨가 혼합기를 제외한 수소 혼합기의 층류화염($u'/S_{L0}=0$)에서는 수소연료의 연소 불안정성⁽⁹⁾ 때문인지 화염면의 일부가 기연가스 쪽으로 파고 들어가는 현상을 관찰할 수 있으며 특히 CO₂를 첨가한 혼합기의 경우에는 그 현상이 더욱 뚜렷하여 마치 오픈지 단면과 같은 형상을 보이고 있다. 이와 같은 경향은 난류화염의 경우에도 확인할 수 있으며 CO₂ 첨가 혼합기의 화염은 N₂, Ar 첨가 혼합기의 화염에 비하여 화염면의 요철이 미세하여 화염곡률 반경이 작아지는 경향임을 알 수 있다. 또, N₂, Ar, CO₂ 첨가 혼합기의 경우에는 $u'/S_{L0}=14$ 정도까지 화염전파가 가능함을 확인할 수 있었다.

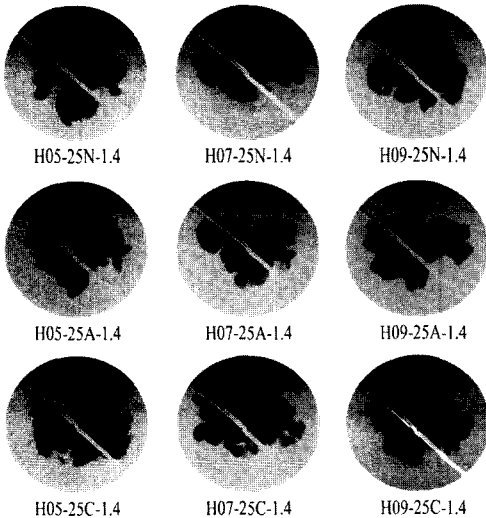


Fig. 5 Tomograms of turbulent flame($u'/S_{L0}=1.4$)

He 첨가 혼합기는 다른 혼합기에 비해 화염면의 요철이 매우 완만하고 크기 때문에 화염곡률반경이 커지는 경향임을 알 수 있다. 또, Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이, $u'/S_{L0}=5.7$ 부터는 거의 국소소염(local-*quenching*)현상에 가까운 화염면 형상이 나타나기 시작하였고 $u'/S_{L0}=7.6$ 을

초과한 경우에는 화염전파를 관찰할 수 없었다. 이것은 He 첨가 혼합기의 동점도가 높아 동일한 u'/S_{L0} 의 조건에서도 난류에 대한 영향이 크기 때문에, 또 열확산율이 큰 만큼 열손실도 커지므로 화염전파에 필요한 온도를 확보할 수 없게 되기 때문인 것으로 생각된다.

이상으로부터, 불활성 가스의 종류에 따라 화염형상의 특성이 달라지는 것을 명백하게 알 수 있다. 따라서, 화염형상 특성을 정량적으로 평가하기 위하여 내연기관의 주운전영역에 해당하는 주류상 층류화염영역(본 연구에서의 조건은 $u'/S_{L0}=1.4$ 에 해당함. 단, He 첨가 혼합기의 경우에는 동일한 팬 회전수임에도 불구하고 동점도의 차이로 인하여 $u'/S_{L0}=1.9$ 로 됨)만을 대상으로 화염표면적, 국소 화염곡률 및 미연혼합기 쪽과 기연가스 쪽으로 돌출된 각 부분의 화염영역비에 대한 정량화를 시도하였다.

4.2 화염표면적

난류연소속도에 영향을 미치는 지배인자 중의 하나인 화염표면적은 Kido등이 제안한 방법⁽¹⁰⁻¹¹⁾을 이용하여 계측하였다. 먼저, 화염의 2차원 단층사진을 화상처리하여 화염면에 해당하는 기연가스 영역과 미연혼합기 영역의 경계선을 검출한다. 기연가스 영역의 주위길이 L 및 면적 A 로부터, Fig. 6에 보인 바와 같이, 등가반경 R_L , R_A 를 계측하고 그 비 $(R_L/R_A)^2$ 을 이용하여 화염형상을 평가한다. 이 비 $(R_L/R_A)^2$ 은 난류에 의한 화염면적의 증가율 또는 화염형상의 복잡도를 나타내며 화염표면적에 상당하는 값이 된다.

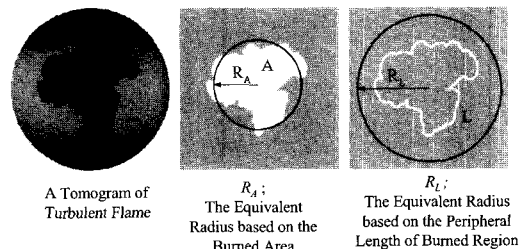


Fig. 6 Definition of R_L and R_A on the image of turbulent flame

한편, $(R_L/R_A)^2$ 은 정용용기 내의 압력 및 화염 전과 진행도 등에 의한 영향을 받을 가능성이 있다. 이러한 영향을 배제하기 위하여, 등가반경 R_A 를 연소실 용적의 등가반경 R_C 로 무차원화한 값 $(R_A/R_C)^3$ (즉, 화염전과 진행도의 대표치)과 $(R_L/R_A)^2$ 의 관계를 1차 최소자승법으로 구하고 동일한 $(R_A/R_C)^3$ 일 때의 $(R_L/R_A)^2$ 값을 이용하여 평가하였다. 화상해석은 동일한 조건에서 30배 이상 실시하였다.

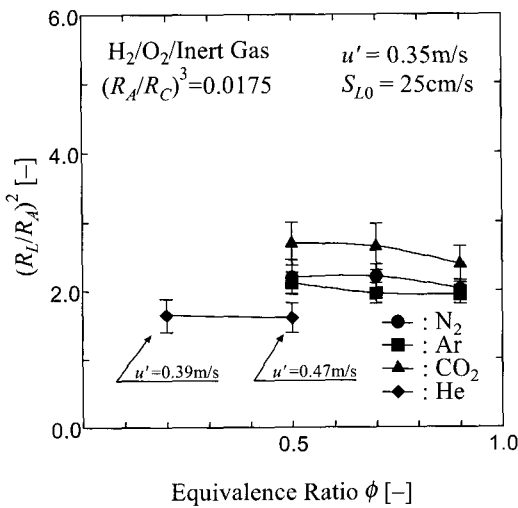


Fig. 7 Variation of $(R_L/R_A)^2$ with equivalence ratio

Fig. 7은 각 혼합기의 당량비 ϕ 에 대한 $(R_L/R_A)^2$ 의 계측결과를 나타낸 것이다. Fig. 7로부터, $(R_L/R_A)^2$ 값은 불활성 가스의 종류에 관계없이 ϕ 가 커지면 조금 작아지는 경향을 보이며, 탄화수소계 혼합기의 경우⁽¹²⁾와 달리 ϕ 에 대한 의존성이 약간 있음을 알 수 있다. 또, N_2 를 첨가한 혼합기

의 경우와 비교하면 Ar의 경우에는 같은 정도의 값, CO_2 의 경우에는 큰 값, He의 경우에는 작은 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이 경향은 수소 혼합기의 난류연소속도 특성⁽¹³⁾과 잘 일치하고 있다. 그러나, 동일한 난류강도에 대한 He 첨가 혼합기의 난류연소속도가 N_2 첨가 혼합기의 1/3 정도 이하의 값밖에 이르지 못하는 등 Fig. 7의 결과만으로는 정량적인 설명이 불충분하다. 따라서, 난류연소속도를 결정하는 또 하나의 중요한 지배인자인 국소연소속도에 착안할 필요가 있는 것으로 판단된다.

4.3 국소화염형상 특성

Lewis수 효과 또는 화염면으로 유입되는 혼합기 비율의 검토에서 난류에 의해 요철이 발생한 화염에서는 미연혼합기 쪽으로 불룩한 화염부분의 연소특성이 연소장 전체를 지배할 가능성이 높은 것으로 보고되고 있다^(14, 15). 본 연구에서는 화염형상 특성의 관점에서 이 점을 검토하기 위하여 국소화염곡률로부터 국소화염형상이 미연혼합기 쪽으로 불룩한지 기연가스 쪽으로 불룩한지를 판단하여 각 부분이 차지하는 영역에 대하여 정량적 해석을 실시하였다.

4.3.1 해석방법

화염표면적의 경우와 마찬가지로, 단층사진에서 화염면에 해당하는 기연가스 영역과 미연혼합기 영역의 경계선을 검출한다. 얻어진 화염면을 이산점(discrete point)으로 검출하고 각 검출점에서의 곡률을 산출한다⁽¹²⁾. 본 연구에서는 미연혼합기 쪽으로 불룩한 화염곡률을 ‘+’로 하였다. 따라

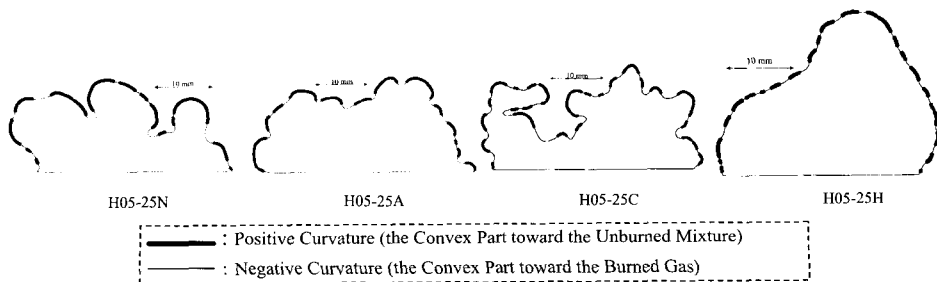


Fig. 8 Configuration of flame front

서, 이 곡률의 정부에 의해 국소화염형상이 미연 혼합기 쪽으로 불룩한 형상인지 기연가스 쪽으로 불룩한 형상인지 판단할 수 있다. 한편, 국소화염형상의 해석은 단층사진을 연소실 중앙에서 2등분한 후 상단부의 화염에 대해서 실시하였다.

Fig. 8은 $\phi=0.5$ 인 각 혼합기에 대한 해석결과 의 일례를 나타낸 것으로, ‘+’ 곡률의 검출점은 굵은 곡선으로, ‘-’ 곡률은 가는 곡선으로 표시 하고 있다. 이와 같이, 화염면을 따라 화염의 요철 이 그려지므로 국소적인 화염형상을 상세하게 검 토할 수 있다.

4.3.2 국소 화염형상

당량비에 대한 각 혼합기의 ‘+’ 곡률의 검출 점 개수의 ‘-’ 곡률의 검출점 개수에 대한 비 Z_u/Z_b 를 Fig. 9에 나타낸다. Z_u/Z_b 의 값은 개략 적으로 미연혼합기 쪽으로 불룩한 영역과 기연가 스 쪽으로 불룩한 영역의 비를 나타낸다. Fig. 9 로부터, N_2 와 Ar 및 CO_2 를 첨가한 혼합기에 비 해 He 첨가 혼합기의 Z_u/Z_b 의 값은 약간 작지만, 불활성 가스의 종류에 관계없이 Z_u/Z_b 의 값은 1이 상임을 알 수 있다. 즉, 난류화염에서는 미연혼합 기 쪽으로 불룩한 영역이 지배적이며, 이 영역에 서의 화염형상 및 연소 특성이 연소장 전체의 난 류연소 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 추측할 수 있다.

Fig. 10은 미연혼합기 및 기연가스 쪽으로 불룩 한 영역에서의 국소 화염곡률반경의 평균치 r_{um} 과 r_{bm} 을 각각 종방향 적분공간척도 L 로 무차원화하 여 나타낸 것이다. Fig. 10으로부터, 본 연구의 실험범위에서는, He 첨가 혼합기를 제외한 나머 지 혼합기의 경우, 미연혼합기 쪽으로 불룩한 영 역의 곡률반경이 큰 것을 알 수 있다. 또, N_2 첨 가 혼합기의 r_{um} , r_{bm} 에 비해 Ar은 같은 정도의 값, CO_2 는 작은 값, He는 약간 큰 값을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 Fig. 4 및 Fig. 5 의 관찰결과와 일치하며, 이 해석에 의해 화염형 상의 특성을 정량적으로 잘 평가할 수 있음을 나 타낸다.

일반적으로 화염형상의 특성에 대한 논의는 Lewis수 Le 의 관점에서 많이 검토되고 있다. Table 1에서 알 수 있는 바와 같이, N_2 및 Ar 첨

가 혼합기에 비해 CO_2 의 Le 는 낮은 값, He의 Le 는 클 뿐만 아니라 1보다 큰 값을 나타내고 있 다. 따라서, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 7 및 Fig. 10 의 결과는 모두 Le 의 관점에서 정성적으로 설명할 수 있다. 그러나, Le 값의 차이만큼 $(R_L/R_A)^2$ 값 의 차이가 보이지 않는 등, Fig. 7 및 Fig. 9의 결과와 Le 와의 정량적인 관계는 찾아볼 수 없다.

또, 본 연구에서 얻어진 화염형상 특성과 난류

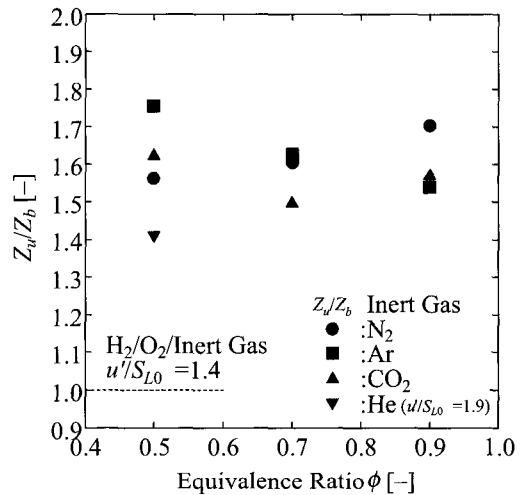


Fig. 9 Variation of Z_u/Z_b with equivalence ratio

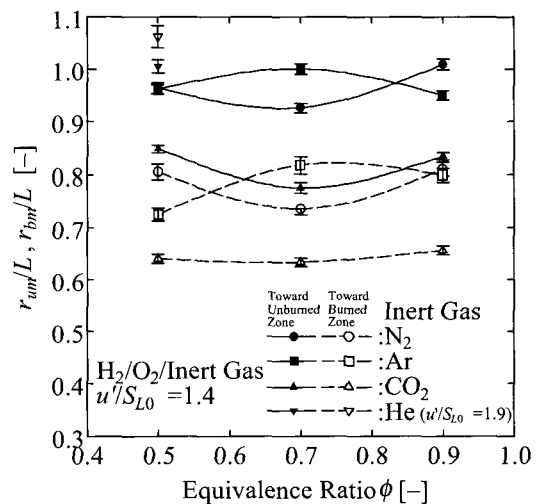


Fig. 10 Variation of r_{um}/L and r_{bm}/L with equivalence ratio

연소속도 특성^[13]을 비교하면, 층류연소속도와 당량비가 같은 혼합기를 동일한 난류강도의 조건에서 연소시킬 경우, 난류연소속도는 곡률반경이 작은, 즉 화염면의 요철이 미세할수록 증가하는 경향임을 알 수 있다. 이것은 화염면이 굽어짐으로써 화염에 작용하는 확산, 열적 불안정성 등이 곡률반경이 작은 화염일수록 뚜렷하게 나타나기 때문에 Fig. 7에서 고찰한 화염표면적 뿐만 아니라 국소 연소속도에도 변화가 발생하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

층류연소속도가 거의 같은 희박 수소/산소/불활성 가스 혼합기에 대하여 불활성 가스의 종류가 화염형상에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 난류강도가 동일한 경우, 화염표면적은 당량비 및 불활성 가스의 종류에 큰 영향을 받지 않는다.
- 2) 화염표면에서 미연혼합기 쪽으로 불룩한 부분이 차지하는 영역은 불활성 가스의 종류에 관계 없이 기연가스 쪽으로 불룩한 영역보다 더 많다.
- 3) 화염곡률반경은, 불활성 가스의 영향을 받으며, N₂와 Ar 첨가 혼합기에 비해 CO₂ 첨가 혼합기의 경우 그 값이 작고, He 첨가 혼합기의 경우에는 커지는 경향이다.
- 4) 층류연소속도, 당량비 및 난류강도가 동일한 경우, 난류연소속도는 화염표면적뿐만 아니라 국소연소속도의 변화에 의한 영향도 받는다.

후 기

이 논문은 21세기한국연구재단의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

[1] H. Kido, K. Tanoue, M. Nakahara, H. Kido and T. Inoue, "Experimental Study of the Turbulent Combustion Mechanism of Non-stoichiometric

Mixture", JSAE Review, Vol. 17, No. 4, pp.361-367, 1996.

[2] 김준호, 안수길, "예혼합 난류화염구조에 미치는 레이놀즈 수와 담켈러 수의 영향에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제19권, 제4호, pp.34-41, 1995.

[3] 김준호, 라진홍, "화상처리기법에 의한 예혼합 난류전과화염의 구조해석", 한국박용기관학회지, 제23권, 제4호, pp.175-182, 1997.

[4] M. W. Bae, "A Study on the Effects of Recirculated Exhaust Gas on NOx and Soot Emissions in Diesel Engines with Scrubber EGR System", SAE Paper, No. 1999-01-3266, 1999.

[5] T. Ishiyama, M. Shioji, S. Mitini, H. Shibata and M. Ikegami, "Improvement of Performance and Exhaust Emissions in a Converted Dual-Fuel Natural Gas Engine", SAE Paper, No. 2000-01-1866, 2000.

[6] H. Kido, M. Nakahara, K. Nakashima and J-H. Kim, "Turbulent Burning Velocity of Lean Hydrogen Mixtures", SAE Paper, No. 2003-01-1773, 2003.

[7] 김준호, "레이저 토모그래피와 화염구조선도에 의한 연소영역의 검토", 한국동력기계공학회지, 제2권, 제1호, pp.17-24, 1998.

[8] J. Abraham, F. A. Williams, F. V. Bracco, "A Discussion of Turbulent Flame Structure in Premixed Charges", SAE Paper, No. 850345, 1985.

[9] R. A. Strehlow, Combustion Fundamentals, McGraw-Hill Book Company, p.428, 1985.

[10] H. Kido, K. Nakashima, M. Nakahara and J. Hashimoto, "An Experimental Study on the Configurational Characteristics of Turbulent Propagating Flames", Proc. of 4th JSME- KSME Thermal Engineering

Conference, Vol. 3, pp. 85-90, 2000.

- [11] 김준호, 한원희, 키도 히로유키, "수소를 첨가한 탄화수소 혼합기의 난류연소 특성에 관한 실험적 연구", 한국자동차공학회논문집, 제11권, 제6호, pp.65-72, 2003.
- [12] H. Kido, K. Nakashima, M. Nakahara and J. Hashimoto, "Experimental Study on the Turbulent Flame Configuration of CH₄/O₂ /Inert Gas Mixtures(in Japanese)", Proc. of 16th Internal Combustion Engine Symp., pp.377-382, 2000.
- [13] H. Kido, J. Hashimoto, D. Barat, M. Nishigaki and H. Okamoto, "Effect of Inert Gas on Turbulent Burning Velocities", JSME Int. J., Series B, Vol.44, No.1, 119-125, 2001.
- [14] H. Kido, S. Huang, K. Tanoue and H. Kido, "Study on Combustion Improvement Mechanism of Non-Stoichiometric Mixtures by Turbulence (in Japanese)", JSME Trans., Vol. 61, No. 590, Series B, pp. 3464-3469, 1995.
- [15] H. Kido, M. Nakahara and T. Inoue, "Effect of Preferential Diffusion on Turbulent Combustion of Hydrogen Mixtures (in Japanese)", JSME Trans., Vol. 62, No. 600, Series B, pp. 3198-3204, 1996.

저 자 소 개



김준호 (金俊孝)

1960년 3월 22일생. 1986년 2월 부산수산대학교 기관학과 졸업(공학사) 1988년 2월 부산수산대학교 대학원 기관학과 졸업(공학석사). 1994년 3월 큐슈대학 대학원 공학연구과 졸업(공학박사). 현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 부교수. 당 학회 증신회원