Transactions of KSAE, Vol. 11, No. 6, pp.65-72 (2003)

Copyright © 2003 KSAE
1225-6382/2003/066-10

수소를 첨가한 탄화수소 혼합기의 난류연소 특성에 관한 실험적 연구

김 준 효[*1] · 한 원 희[1] · 키도 히로유끼[2]

목포해양대학교 기관시스템공학부[1] · 큐슈대학교 공학부[2]

An Experimental Study on the Turbulent Combustion Characteristics of Hydrocarbon Mixtures by Hydrogen Addition

Junhyo Kim[*1] · Wonhui Han[1] · Hiroyuki Kido[2]

[1]*Division of Marine System Engineering, Mokpo National Maritime University, Jeonnam 530-729, Korea*
[2]*Faculty of Engineering, Kyushu University, Hukuoka 812-8581, Japan*
(Received 4 July 2003 / Accepted 7 August 2003)

Abstract : In order to clarify turbulent combustion characteristics of hydrocarbon mixtures by hydrogen addition, turbulent burning velocities in a constant volume vessel were measured for both lean and rich hydrocarbon mixtures. Moreover, the configuration characteristics of turbulent flame was investigated in the wrinkled laminar flame region. A laser tomography technique was used to obtain the images of turbulent flame, and quantitative analyses were performed. As a result, the characteristics of turbulent burning velocity was shown a distinct difference with the addition rate of hydrogen between lean and rich mixtures. On the other hand, the obtained tomograms showed that the surface area of turbulent flame depends almost only on the turbulence intensity.

Key words : Turbulent burning velocity(난류연소속도), Hydrogen addition(수소첨가), Laser tomography(단층사진촬영법), Flame surface area(화염표면적), Flame configuration characteristics(화염형상특성)

1. 서 론

최근, 화석연료 고갈로 인한 에너지 공급문제 및 CO_2 증가에 의한 지구 온난화 현상 등의 환경오염 문제가 국제적인 긴급과제로 대두되고 있다. 그 대책의 일환으로, 내연기관에서는 연비향상 및 배기가스 정화를 동시에 도모할 수 있는 희박연소기술이 크게 주목받고 있다. 그러나, 혼합기의 희박화에 따른 연소속도의 저하, 희박연소한계 부근에서의 실화(misfire) 등이 희박 예혼합 연소기관의 실현에 큰 장애가 되고 있다. 따라서, 엔진에서의 난류연소속도 및 소염한계와 밀접한 관련이 있는 예혼합 난류화염의 구조 및 연소속도에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1-4] 한편, Kido등은 희박 탄화수소혼합기에 소량의 수소를 첨가함으로써 난류연소속도의 증대 및 소염한계의 확대 등 난류연소 특성을 개선할 수 있다고 보고하고 있다.[5] 그 연소촉진기구의 정성적 해석에 의하면, 난류에 의해 굽어진 화염면에서의 실질적 연소속도인 국소연소속도가 반응물의 분자확산 특성에 기인한 선택확산효과에 의해 층류연소속도에서 변화함으로써 난류연소속도 특성에 영향을 미치는 것으로 해석하고 있다.

한편, 엔진의 주운전영역은 연속한 화염면, 소위 주름상 화염이 존재하는 비교적 약한 난류영역[1,2]에 해당한다. 지금까지의 개념에 의하면,[3,4] 이와 같이 약한 난류영역의 경우, 난류연소속도의 특성을 결

*To whom correspondence should be addressed.
kjh571@mmu.ac.kr

정하는 주요인자는 화염 표면적과 국소연소속도이며, 화염표면적은 난류강도의 증가에 비례하여 커지고 국소연소속도는 층류연소속도로 가정하고 있다.

본 연구에서는, 전술한 지배인자 중 화염표면적에 착안하여 난류연소속도 특성에 대하여 검토하였다. 먼저, 정적용기를 이용하여 수소를 첨가한 탄화수소혼합기의 난류연소속도를 계측하였다. 또, 레이저 토모그래피로 화염의 순간 2차원 단층사진을 촬영하여 난류화염구조를 관찰하고, 난류화염의 표면적을 평가함으로써 수소첨가가 난류화염의 표면적에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험에 사용한 연소용기는 2개이며, 제 1연소기는 Fig. 1과 같이 내경 약 100mm의 거의 구형에 가까운 정적 연소기로, 광학계측을 용이하게 할 수 있도록 마주 보는 4면에는 직경 85mm의 관측창이 있으며, 다른 2면에는 난류발생용 다공판과 원심팬을 설치하였다. 분압충전법으로 용기 내에 주입된 혼합기는 각 원심팬의 전방에 설치된 다공판을 통과하여 연소실 중심부에서 충돌하고, 거의 등방적인 정상 난류장을 형성한다.

난류장의 특성은 LDV를 이용하여 중심단면상에서 중심을 원점으로 하여 40mm×40mm, 10mm 피치의 계 25점에 대하여 측정하였다. 계측결과에 의하면, 난류강도 u'는 팬 회전수가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다. 한편, 종방향 적분공간척도 L 및 Taylor 미세척도 λ_g는 난류강도 u'(~2.0m/s)가 증가함에 따라 각각 약간 증가 또는 감소하는 경향을 보였다. 그 변화범위는 각각 L이 3.2±0.3mm, λ_g가 1.7±0.2mm 정도였다. 연소실험은 소정의 팬 회전수의 조건으로 연소실 중심부에서의 불꽃점화에 의해 실시하였다. 연소속도의 계측에 사용한 제 2연소기도 거의 구형에 가까운 내경 약 120mm의 정적 연소기[5]로 마주 보는 4면에 다공판을, 다른 2면에는 관측창을 설치하였다. 다공판 뒤에 설치된 원심팬을 회전시켜 연소실 중심부에 등방적인 정상 난류장을 형성시킬 수 있다. 제 1연소기의 경우와 마찬가지로, u'는 팬 회전수에 비례하였으며 L 및 λ_g도 같은 경향을 보였는데, 그 변화범위는 L이 3.3±0.3mm, λ_g가 1.6±0.1mm 정도였다. 한편, 층류 및 난류연소속도는 연소실 내의 압력상승률에서 산출하였다.[6,7]

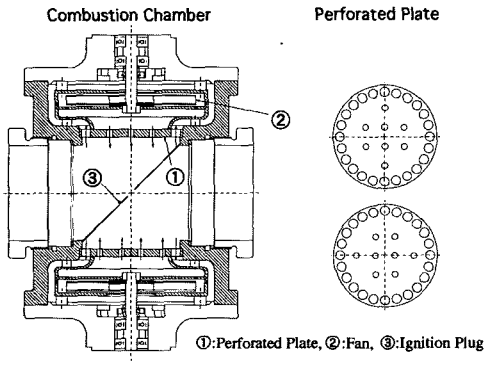

Fig. 1 Cross-sectional view of combustion chamber

화염의 단층사진 촬영에 이용한 광학계는 Fig. 2와 같다. Nd-YAG 레이저(제2고주파 532nm, 출력 300mJ/pulse, 펄스 폭 5ns)와 원통형 렌즈 3매(초점거리:40, 480, 1000mm)를 이용하여 폭이 약 72mm, 두께 0.2mm 이하의 레이저 시트를 연소실에 조사하였다.

산란입자는 평균입경 0.02~0.05 μm의 초미립자 TiO_2를 사용하였고 CCD 카메라(1280×1000 화소)로 산란광을 촬영하였다. 1화소의 크기는 실제 화상에서 약 0.11mm 정도이다.

한편, 화염의 자발광에 의한 영향을 방지하기 위하여 렌즈 앞에 밴드 패스 필터(center wavelength: 530nm, halfwidth: 10nm)를 설치하였다. 레이저 토모그래피에 의한 단층사진 촬영은 모든 혼합기에 대하여 난류강도 u'=0.7m/s의 조건(팬 회전수는 2000rpm)에서 실시하였다.

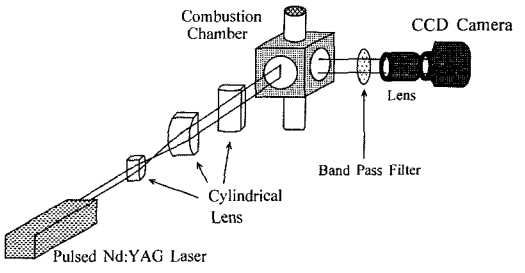

Fig. 2 Schematic diagram of the laser tomography system

Table 1 Properties of hydrocarbon mixtures by hydrogen addition

Mixture	Φ	Molar Fraction					S_{L0}	a_0	ν	Le
		CH_4	C_3H_8	H_2	O_2	N_2	cm/s	mm^2/s	mm^2/s	
M08H00-25	0.8	1.00	–	0.00	2.50	9.63	25.30	21.05	15.55	0.89
M08H02-25	0.8	0.80	–	0.20	2.13	9.56	25.01	22.12	15.75	-
M08H05-25	0.8	0.50	–	0.50	1.56	7.66	24.95	24.47	16.23	-
M08H08-25	0.8	0.20	–	0.80	1.00	6.50	25.40	27.81	16.90	-
M08H10-25	0.8	0.00	–	1.00	0.63	6.25	25.25	30.35	17.40	0.42
M12H00-25	1.2	1.00	–	0.00	1.67	6.83	24.90	21.09	15.60	0.93
M12H02-25	1.2	0.80	–	0.20	1.42	6.23	24.70	22.68	15.91	-
M12H05-25	1.2	0.50	–	0.50	1.04	5.31	24.18	25.87	16.56	-
M12H10-25	1.2	0.00	–	1.00	0.42	5.08	24.50	32.49	17.89	1.28
P08H00-25	0.8	–	1.00	0.00	6.25	25.00	25.40	19.47	14.66	1.57
P08H02-25	0.8	–	0.80	0.20	5.13	21.78	25.25	20.04	14.80	-
P08H05-25	0.8	–	0.50	0.50	3.44	15.13	25.47	21.41	15.13	-
P08H08-25	0.8	–	0.20	0.80	1.75	9.28	24.74	24.73	15.94	-
P08H10-25	0.8	–	0.00	1.00	0.63	6.25	25.25	30.35	17.40	0.42
P12H00-25	1.2	–	1.00	0.00	4.17	18.96	24.60	19.01	14.41	0.89
P12H02-25	1.2	–	0.80	0.20	3.42	15.72	24.78	19.72	14.57	-
P12H05-25	1.2	–	0.50	0.50	2.29	11.23	24.56	21.57	15.02	-
P12H08-25	1.2	–	0.20	0.80	1.17	6.77	25.16	26.04	16.12	-
P12H10-25	1.2	–	0.00	1.00	0.42	5.08	24.50	32.49	17.89	1.28

2.2 혼합기의 조성

실험에 이용한 메탄/수소 및 프로판/수소 혼합기의 조성은 Table 1과 같다. 난류장에서의 연소속도 및 화염표면적을 평가하기 위하여 각 혼합기의 층류연소속도 S_{L0}는 약 25cm/s로 같게 하였다. 표에서 a_0는 열확산율, ν는 동점도, Le는 부족성분의 확산계수에 근거한 Lewis수를 나타낸다. 또, Φ는 다음 식과 같이 2종류의 연료 중의 탄소 및 수소 분자수를 토대로 한 총합당량비[5]를 의미한다.

$$\Phi=[(x+y/4)(1-\delta_H)+0.5\,\delta_H]/Xo \quad (1)$$

여기서, 혼합기 조성은 $(1-\delta_H)C_xH_y+\delta_HH_2+XoO_2+X_NN_2$이며, δ_H는 수소의 첨가비율로 수소가 연료 중에 차지하는 체적비율을 나타낸다. 본 연구에서는 Φ를 0.8과 1.2의 2종류, δ_H는 0, 0.2, 0.5, 0.8 및 1.0으로 하였다. 한편, 메탄/수소 혼합기 중 Φ와 δ_H가 각각 1.2, 0.8인 혼합기(M12H08-25)는 제작할 수 없었다.

화염의 단층사진 촬영에는 표 중의 δ_H가 0, 0.5, 1.0인 혼합기를 대상으로 하였다. 단, 과농 메탄/수소 혼합기 중의 δ_H가 0.5인 혼합기의 경우(M12H05-25)에는, 난류강도 u'=0.7m/s의 조건이 소염한계 부근이었기 때문에 δ_H를 0, 0.2, 1.0으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 난류연소속도 특성

난류강도 u'의 변화에 대한 메탄/수소 및 프로판/수소 혼합기의 난류연소속도 S_T의 측정결과를 Fig.3에 나타낸다. Fig. 3으로부터, 동일한 층류연소속도임에도 불구하고 수소첨가비율 δ_H에 따라 난류연소속도 특성이 다른 것을 알 수 있다. 또, δ_H에 대한 난류연소속도 S_T의 변화도 당량비 Φ의 값에 따라 명백하게 다른 것을 알 수 있다.

즉, Φ=0.8인 희박 혼합기의 경우, 동일한 난류강도에서의 S_T는 δ_H가 증가함에 따라 비교적 단조롭게 증가한다. 한편, Φ=1.2인 과농 혼합기에서는 불규칙한 변화를 보이고 있다. 과농 메탄/수소 혼합기의 경우, 동일한 난류강도에 대한 S_T는 δ_H가 증가함에 따라 저하하면서 δ_H=0.8이 되면 연소하지 않지만, δ_H=1.0(즉, 연료가 수소만의 경우)에서는 다시 연소하게 되며 δ_H=0(연료가 메탄만의 경우)의 경우와 거의 같은 값을 보인다. 과농 프로판/수소 혼합기에서는, δ_H=0.5까지는 δ_H의 증가에 따라 S_T는 약간 증가하지만, δ_H=0.8부터 오히려 S_T가 현저하게 저하하게 된다. Fig. 3으로부터, 희박 탄화수소 혼합기에 수소를 첨가함으로써 난류연소속도 특성을 개선할 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 과농 혼

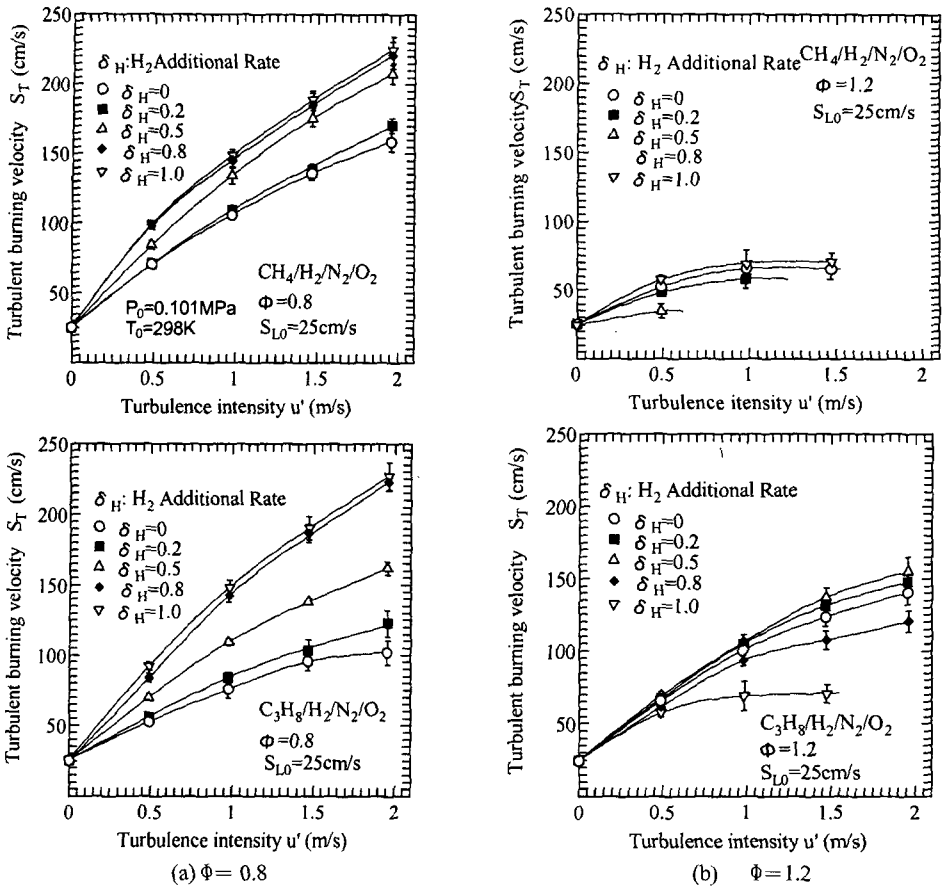

Fig. 3 Turbulent burning velocities of hydrocarbon mixtures by hydrogen addition

합기의 경우에는, 수소첨가가 오히려 난류연소속도 특성에 악영향을 미치는 경우도 있음을 알 수 있다.

3.2 화염구조 및 화염표면적

3.2.1 화염구조 관찰

Fig. 4는 난류강도 u'=0.7m/s로 일정하게 하고 당량비 Φ와 수소첨가비율 δ_H를 변화시켰을 때 메탄/수소 및 프로판/수소 혼합기의 대표적인 화염 단층사진을 나타낸 것이다. 사진에서 중앙부의 검은 부분이 기연가스(burned gas) 영역이며, 왼쪽 위에서 오른쪽 아래로 경사지게 보이는 것은 점화플러그이다.

Fig. 4로부터, 화염구조는 당량비 및 수소첨가비율의 변화에 관계없이 대체로 연속한 화염면을 가지는, 소위 주름상 층류화염의 구조임을 확인할 수 있다. 화염면의 형상 특성을 살펴보면, 프로판/수소 혼합기의 경우, 미연혼합기 쪽으로 예리하게 돌출된 기연가스의 형상이 발생하는 빈도가 메탄/수소 혼합기에 비해 많은 것을 확인할 수 있다. 또, 대체적으로 수소첨가비율이 증가할수록 동일한 현상이 두드러지는 경향임을 알 수 있다.

한편, 화염형상에 미치는 Lewis수 *Le*의 영향에 대해서는, *Le*>1인 경우의 화염형상은 난류에 의한 유체역학적 불안정성을 감소시키는 방향으로 작용하고, 반면에 *Le*<1일 때에는 화염면의 불안정성을 증가시키는 방향으로 작용하는 것으로 보고하고 있다.[8] 그런데, Fig. 4와 Table 1로부터, 기연가스가 미연혼합기 쪽으로 예리하게 돌출되는 현상은 *Le*<1의 경우에도 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 본 연구의 실험조건에서 발생한 이 현상을 Lewis수

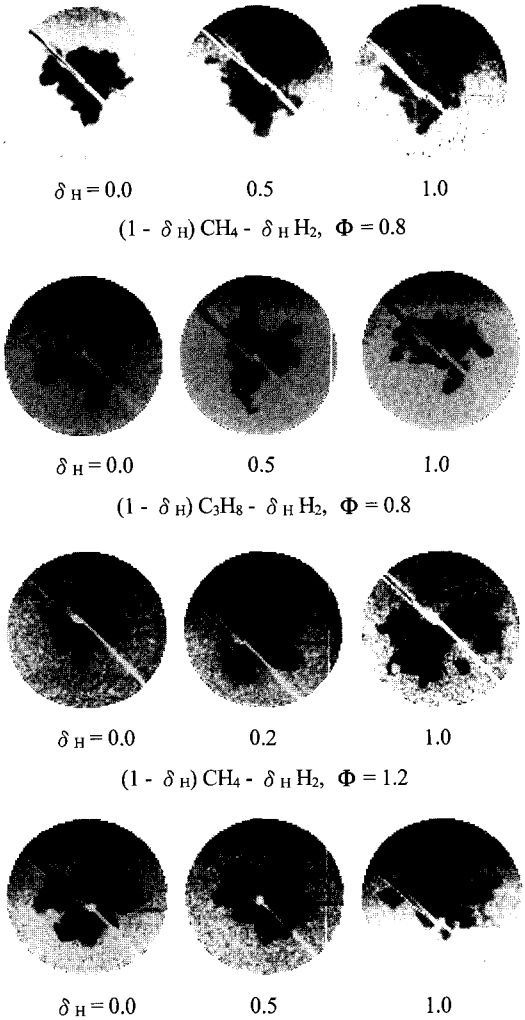

Fig. 4 Tomograms of turbulent flame(u'=0.7m/s, S_{L0}= 25cm/s)

의 영향으로 보기는 어려운 것으로 생각된다.

3.2.2 화염표면적 평가

최근 난류화염의 표면적을 정량적으로 평가하기 위하여 프랙탈 해석이 많이 이용되고 있다. 그러나, 프랙탈 차원의 정량적 평가에는 불확실성이 존재한다. 따라서, 본 연구에서는 Kido등이 제안한 방법[9,10]을 이용하여 화염표면적을 평가하였으며, 그 방법은 개략적으로 다음과 같다.

먼저, 화염의 2차원 단층사진을 화상처리하여 화염면에 해당하는 기연가스 영역과 미연혼합기 영역

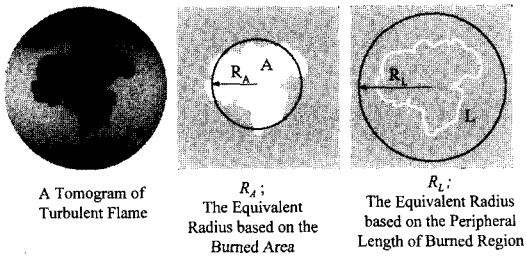

Fig. 5 Definition of R_L and R_A on the image of turbulent flame

의 경계선을 검출한다. 기연가스 영역의 주위길이 L 및 면적 A로부터, Fig. 5에 보인 바와 같이, 등가반경 R_L, R_A를 계측하고 그 비 $(R_L/R_A)^2$을 이용하여 화염형상을 평가한다. 이 비 $(R_L/R_A)^2$은 화염표면적에 상당하며 난류에 의한 화염면적의 증가율 또는 화염형상의 복잡도를 의미한다. 한편, 이 화상해석은 동일한 조건에서 30매 이상 실시하였다.

본 연구에서는 정적용기 내의 전파화염을 대상으로 하고 있기 때문에 $(R_L/R_A)^2$은 정적용기 내의 압력 및 화염전파 진행도에 의한 영향을 받을 가능성이 있다. 일례로 혼합기 M08H05-25, u'=0.7m/s의 경우에 대하여, 분위기 압력 및 기연영역 면적의 등가반경 R_A를 연소실 용적의 등가반경 R_C로 무차원화한 값 $(R_A/R_C)^3$(즉, 화염전파 진행도의 대표치)에 대한 $(R_L/R_A)^2$의 변화를 Fig.6에 각각 보인다. 한편, 분위기 압력은 약 0.06kPa 간격으로 정리하였다.

Fig. 6으로부터, $(R_L/R_A)^2$은 압력 및 $(R_A/R_C)^3$이 증가함에 따라 약간 커지는 경향임을 알 수 있다. 따라서, $(R_L/R_A)^2$은 양자의 영향을 약간 받는 것으로 생각된다. 한편, 압력과 $(R_A/R_C)^3$에는 상관관계가 있으며 거의 비례하고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는, $(R_L/R_A)^2$에 대한 압력 및 $(R_A/R_C)^3$의 영향을 방지하기 위하여 $(R_L/R_A)^2$과 $(R_A/R_C)^3$의 관계를 1차 최소자승법으로 구하고 동일한 $(R_A/R_C)^3$일 때의 $(R_L/R_A)^2$ 값을 이용하여 평가하였다.

Fig. 7은, $(R_A/R_C)^3$=0.0175일 때, 수소첨가비율과 당량비에 대한 $(R_L/R_A)^2$의 결과를 표준편차와 함께 나타낸 것이다. 그림에서, $(R_L/R_A)^2$은 약간의 차이는 있지만 δ_H=0.5까지는 수소첨가비율 및 당량비에 관계없이 거의 같은 값을 보이고 있다. 그러나, δ_H= 1인 경우에는, 과농 혼합기의 $(R_L/R_A)^2$ 값이 희박 혼

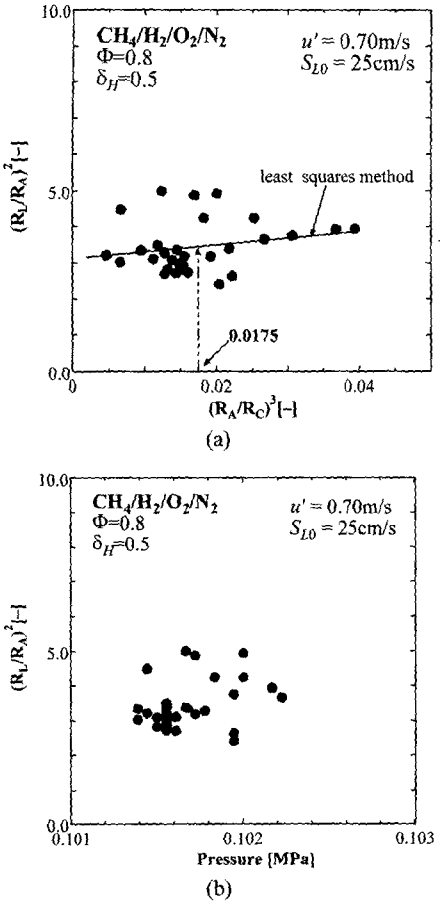

Fig. 6 Variation of $(R_L/R_A)^2$ with $(R_A/R_C)^3$ and ambient pressure

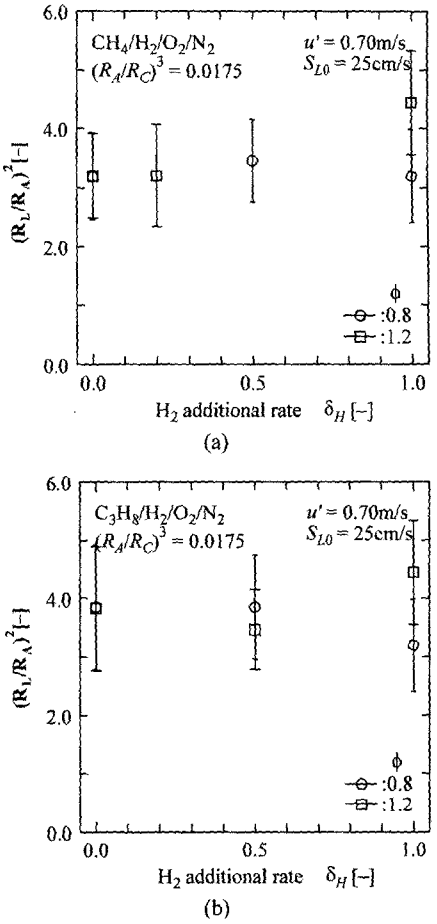

Fig. 7 Flame surface area of turbulent flame (u'=0.7m/s, S_{L0}=25cm/s)

합기보다 큰 것을 확인할 수 있다. 이것은 희박할수록 화염이 복잡화하기 쉬운 수소의 확산특성과 모순되며, 연료의 종류와 수소첨가비율 및 당량비에 의한 $(R_L/R_A)^2$의 변화량이 Fig. 3에 나타난 S_T의 변화에 비해 작으므로 해석오차로 생각할 수도 있다. 따라서, 층류연소속도와 난류강도가 같은 경우, 수소를 첨가한 탄화수소 혼합기의 화염표면적은 대체로 연료의 종류, 수소첨가비율 및 당량비에 관계없이 거의 일정한 것으로 생각된다. 한편, 여기서도 $(R_L/R_A)^2$ 값에 대한 Lewis수의 뚜렷한 영향은 발견할 수 없다.

Fig. 8은 $(R_L/R_A)^2$의 변화를 u'/S_{L0}에 대하여 정리한 것이다. Fig. 8로부터, $(R_L/R_A)^2$의 값은 u'/S_{L0}에 비례하여 증가하는 경향임을 추측할 수 있다. 난류강도

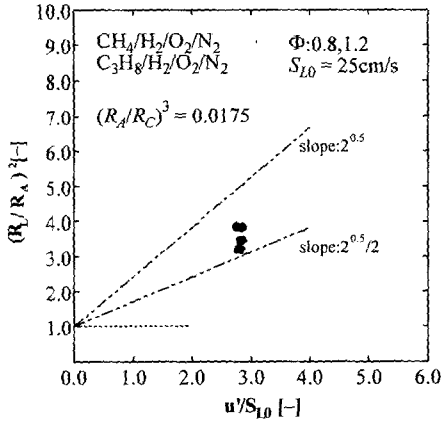

Fig. 8 Relationship between $(R_L/R_A)^2$ and u'/S_{L0}

u'=0일 때는 난류에 의한 화염표면적의 증가가 없

다고 하면, 메탄/수소 및 프로판/수소 혼합기의 화염표면적은 u'/S_{L0}에 일시적으로 비례하며 그 구배는 $2^{0.5}/2$보다 조금 큰 것을 알 수 있다. 단, 이 구배에 대해서는 다른 u'/S_{L0}에 대해서도 $(R_L/R_A)^2$의 값을 측정하여 보다 상세하게 검토할 필요가 있다.

3.3 난류연소속도의 지배인자에 대한 고찰

종래의 연소모델에 의하면, 난류연소속도의 특성을 결정하는 주요인자는 화염 표면적과 국소연소속도이며, 화염표면적은 난류강도의 증가에 비례하여 커지고 국소연소속도는 층류연소속도로 가정하고 있다. 이 개념에 의하면, 동일한 난류강도의 조건에서는, 층류연소속도가 동일한 혼합기의 난류연소속도는 당연히 같아야 할 것이다. 그러나, Fig. 3의 결과는 난류연소속도에 차이가 발생하고 있음을 명백하게 나타내고 있다. 즉, 층류연소속도와 난류강도가 동일한 조건임에도 불구하고, Φ=0.8인 희박 혼합기의 난류연소속도는 δ_H가 증가함에 따라 증가하고 있다. 그런데, Fig.7의 화염단면적은 δ_H에 관계없이 거의 일정한 경향을 나타내고 있다. 한편, δ_H=1인 과농 혼합기의 화염표면적은 가장 큰 값을 보였다. 이것은 전술한 바와 같이 해석오차로 생각할 수도 있지만, Fig. 3(b)에서 알 수 있듯이, 수소첨가비율이 높은 과농 프로판/수소 혼합기에서는 오히려 동일한 난류강도에 대한 난류연소속도가 저하하는 반대경향을 보이고 있다. 이상의 결과로부터, 예혼합 난류연소속도의 특성은 화염표면적의 특성만으로 설명할 수 없다는 것을 알 수 있다. 그러므로, Fig.3에 나타난 난류연소속도의 차이는 이전의 개념과는 달리, 난류연소시의 국소연소속도가 분자확산특성에 근거한 선택확산효과[11,12]에 의해 층류연소속도에서 변화했기 때문인 것으로 쉽게 추측할 수 있다.

4. 결 론

수소를 첨가한 탄화수소 혼합기의 난류연소속도를 계측하고, 레이저 토모그래피를 이용한 화염형상의 관찰 및 화염표면적의 평가결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 희박 탄화수소 혼합기의 경우, 난류연소속도는 수소첨가비율이 증가함에 따라 증대하였다. 그러나, 과농 탄화수소 혼합기에서는 수소첨가비율에 따라 난류연소속도가 증대 또는 저하하는 복잡한 연소특성을 보였다.
2) 화염구조는 혼합기의 종류에 관계없이 연속한 화염면을 가지는 소위, 주름상 층류화염으로, 기연가스가 미연혼합기 쪽으로 예리하게 돌출된 화염면 형상이 관찰되었다.
3) 난류에 의한 화염면적 증가율에 상당하는 $(R_I/R_A)^2$의 값은 난류강도에 크게 지배되고, 연료의 종류와 수소첨가비율 및 당량비와는 무관하였다.
4) 난류화염면에서의 국소연소속도는 선택확산효과에 의해 층류연소속도에서 크게 변화하게 된다는 것을 추측할 수 있다.

References

1) J. Abraham, F. A. Williams, F. V. Bracco, "A Discussion of Turbulent Flame Structure in Premixed Charges," SAE 850345, 1985.
2) J. H. Kim, S. K. Ahn, "A Study on the Structure of Premixed Turbulent Propagating Flames Using a Microprobe Method," Transactions of KSAE, Vol.3, No.6, pp.78-86, 1995.
3) G. E. Andrew, D. Bradley, S. B. Lwakabamba, "Turbulence and Turbulent Flame Propagation-A Critical Appraisal," Combustion and Flame, Vol.24, pp.285-304, 1975.
4) O. L. Gulder, "Turbulent Premixed Flame Propagation Models for Different Combustion Regimes," Proc. 23th Int. Symp. on Combust., Combust. Inst., pp.743-750, 1990.
5) H. Kido, S. Huang, K. Tanoue, T. Nitta, "Improving the Combustion Performance of Lean Hydrocarbon Mixtures by Hydrogen," JSAE Review, Vol.15, No.2, pp.165-170,1994.
6) B. Lewis, G. von Elbe, "Combustion, Flames, and Explosion of Gases," 3rd ed., Academic Press, p.389, 1987.
7) V. S. Babkin, V. I. Babushok, V. A. Suyushev, "Dynamics of Turbulent Gas Combustion in a Closed Volume," Combustion, Explosion, and

Shock Waves, Vol.13, No.3, pp.291-295, 1978.
8) F. A. Williams, "Combustion Theory," 2nd. ed., Benjamin/Cummings Publishing Co., pp. 631-637, 1985.
9) H. Kido, M. Nakahara, K. Nakashima, M. Ikeda, "A Study of Turbulent Flame Structure in Premixed Mixtures Taking the Preferential Diffusion Effect into Consideration," Transactions of JSME, Vol.29, No.3, pp.666-673, 1998.
10) H. Kido, K. Nakashima, M. Nakahara, 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) H. Kido, K. Tanoue, M. Nakahara, H. Kido, T. Inoue, "Experimental Study of the Turbulent Combustion Mechanism of Non-stoichiometric Mixture," JSAE Review, Vol.17, N0.4, pp.361-367, 1996.
12) H. Kido, M. Nakahara, T. Inoue, "Effect of Preferential Diffusion on Turbulent Combustion of Hydrogen Mixtures," Transactions of JSME, Vol.62, No.600, B, pp.3198-3204, 1996.