

〈논 문〉

## 밀폐 연소실 내의 메탄-공기 예혼합기의 연소 및 라디칼 특성에 관한 연구 (II)

최수진\* · 전충환\*\* · 장영준\*\*

(1996년 1월 6일 접수)

### A Study on the Characteristics of Methane-Air Premixture Combustion and Combustion Radicals (II)

S. J. Choi, C. H. Jeon and Y. J. Chang

**Key Words :** Combustion Radical(연소 라디칼), Radical Intensity(라디칼 강도), Equivalence Ratio(당량비), Flame Speed(화염속도)

#### Abstract

In order to evaluate the effects of equivalence ratio, initial pressure and temperature on the laminar flame propagation process, and combustion radicals characteristics, experimental approaches are carried out in methane-air premixture using a constant volume chamber. Local and average radical intensities were measured to determine the time and spatial correlations between each radicals; CH\* (431nm), C<sub>2</sub>\* (517nm) and OH\* (309nm). The results are showed that two kinds of equation were proposed for the cases of continuous flame and intermittent flame type to evaluate actual equivalence ratio using relative intensities with each radicals. Both equations were agreed with actual equivalence ratio within 10% errors range. And schlieren photo and CCD image were compared with flame sizes at equivalence ratio 1.0.

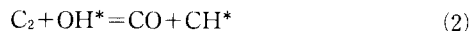
#### 1. 서 론

제(I)보에<sup>(1)</sup> 언급한 바와 같이 연소반응은 혼합기가 분해되면서 발생하는 중간 생성물 즉, 라디칼에 의해 지배된다. 반응영역이나 반응기구를 효과적으로 구명하기 위하여 OH\*, CH\* 그리고 C<sub>2</sub>\*와 같은 라디칼 발광강도를 측정하면 편리하다. 먼저 라디칼의 생성기구에 관해서 Dyer와 Crosley의 연구<sup>(2)</sup>에 의하면, OH\* 라디칼은 상대적으로 긴 수명을 가지고 있기 때문에 연소가스중에 넓게 분포하고, OH\* 자발광은,



인 반응에서는 OH\* 라디칼이 A<sup>2</sup>Σ<sup>+</sup> → X<sup>2</sup>Π로 천이할 때에 발하는 (0, 0), (1, 0), (1, 1) 밴드의 발광이 대부분이고, 그 발광강도는 CH\* 라디칼의 농도에 관계되며, 특히 연소반응영역을 중심으로 높게 나타난다.

또, CH\* 자발광은



인 반응에서 생긴 CH\* 라디칼이 A<sup>2</sup>Δ → X<sup>2</sup>Π로 천이할 때에 발하는 (0, 0) 밴드의 발광이 주이고, 그 발광강도는 C<sub>2</sub>\* 라디칼농도에 비례하고, 주로 탄화수소의 초기반응 영역에서 관찰된다.<sup>(3,4)</sup>

\*회원, 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

\*\*회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

$C_2^*$  라디칼의 자발광은,  $C_2^*$  라디칼이  $A^3\Pi_g \rightarrow X^3\Pi_g$ 로 천이할 때에 발하는 (0, 0) 밴드 (일명 Swan 밴드)의 발광이 대부분이고,  $CH^*$ 와  $C_2^*$  라디칼 자발광강도비는 당량비와 강한 상관성을 갖고 있다고 보고되고 있다.<sup>(5)</sup> 이것은 탄화수소 화염에서,  $C_2^*$  라디칼은 점화에 앞서 연료의 염전반응인 냉·흑염(Cool and dark flame)에 의해 생기는 초기 분해 과정에서 발생되며, 연이어  $CH^*$  라디칼이 발생되기 때문이다.

본 연구에서는 위와 같은 라디칼 특성을 이용하여 연소실내의 메탄-공기 예혼합기의 화염전파특성을 다음과 같이 고찰하고자 한다. 첫째, 연소실 내의 국소 라디칼 발광강도를 측정하여  $CH^*$ 와  $OH^*$ ,  $CH^*$ 와  $C_2^*$  라디칼의 자기상관계수, 상호상관계수를 구하여 라디칼의 특성을 정성적으로 고찰하였다. 둘째, 연소실 전체의 평균 라디칼 발광강도를

계측하여 국소 라디칼 발광강도와 비교하여 시간에 따른 연소실 내 당량비와 라디칼 발광강도와의 관계식을 구한다. 셋째, 화염의 순간 라디칼 자발광을 가시화시키기 위하여 광간섭 필터, 고속도화상 증폭장치, CCD 카메라, 화상처리장치 및 퍼스컴으로 구성된 라디칼 화상처리시스템에 의해 얻어진 화상을 이용하여 라디칼 분포를 고찰한 후, 솔리렌 사진과 비교 분석하였다.

## 2. 밀폐연소실 내의 연소 라디칼 특성

### 2.1 실험장치

본 실험에 사용한 측정장치의 계통도를 Fig. 1에 나타낸 것이다. 전체적으로 두 개 부분으로 나눌수 있는데, 광전자증배관에 의한 라디칼 계측부와 CCD 카메라를 이용한 라디칼 화상촬영부이다.

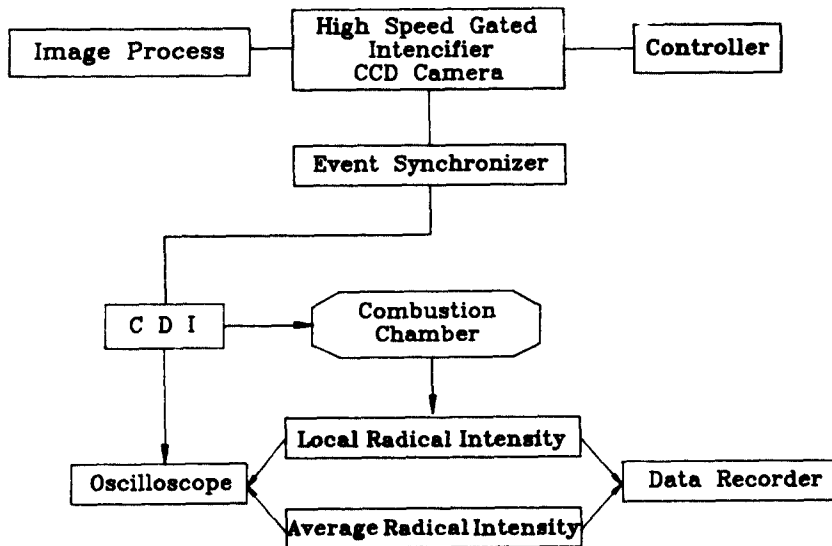


Fig. 1 Block diagram of used measuring instruments

Table 1 Specifications of filter and dichroic mirror

	Observed species	Observed spectrum (nm)	Wavelength $\lambda$ (nm)	Band width (nm)	Trans. rate
Filter	$CH^*$	431	432.3	1.2	49.2%
	$C_2^*$	517	515.5	1.6	65.0%
	$OH^*$	309	310.1	12	35.0%
Dichroic mirror	$CH^*$	431	$R_{431nm} > 97\%$ , $T_{500nm} > 80\%$		
	$OH^*$	309	$R_{309nm} > 99\%$ , $T_{vis.} > 80\%$		

Table 1은 본 실험에 사용한 간섭필터(Interference filter) 및 다이크로익미러(Dichroic mirror)의 중심파장과 반치폭을 나타낸 것이다. 간섭필터가 중심파장 내에 들어오는 광을 통과시킨다면 다이크로익미러는 역으로 반사시키는 기능을 가지므로 간섭필터의 투과율(Transparency rate)이 다이크로익미러의 반사율(Refraction rate)과 같은 역할이다. 필터의 중심파장이 라디칼의 스펙트럼을 포함하는 좁은 반치폭을 가져야 한다. 본 실험의 필터는 가시영역에서는 1.2, 1.6nm, 자외선영역에서는 12nm로 충분한 정도를 가진 것이다.

Fig. 2는 최대 150W의 텅스텐램프를 연소기 내

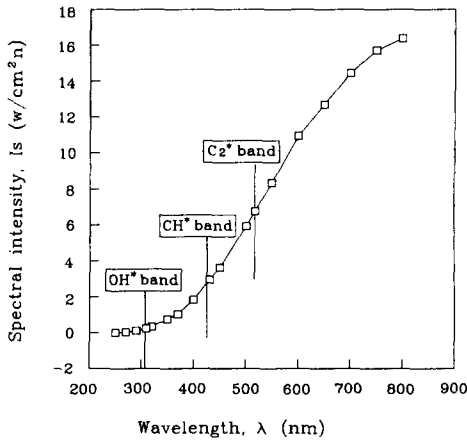


Fig. 2 Spectral characteristics curve of tungsten lamp (focal length=400mm, power=150W)

에 전파되는 화염의 위치와 동일한 초점위치에 놓은 뒤, 간섭필터 등이 없이 집광렌즈( $f=200\text{mm}$ )만에 의해 집광된 텅스텐램프의 파장에 따른 스펙트럴 발광강도를 나타낸 것이다. 텅스텐램프의 발광강도를 기준으로 하여 동일한 위치에서 국소 및 평균 라디칼의 발광강도를 측정하기 위한 광학계를 설치한 후, 텅스텐램프의 출력이나 광전자증배관의 고전압을 변화시키면서 발광강도를 측정하면 실제 텅스텐 램프에서 발생된 라디칼 자발광 파장의 발광강도가 광학계가 구성된 상태에서 증폭 계인에 따라 어떤 값을 가지는 지 확인하였다.

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 국소 라디칼 발광강도의 측정

화염내의 중간생성물인  $\text{CH}^*$ ,  $\text{C}_2^*$ ,  $\text{OH}^*$  라디칼의 자발광으로 연소반응영역의 정보를 얻을 수 있으며, 특히 고온의 화염을 제외하고는  $\text{OH}^*$  라디칼 자발광의 발광강도는  $\text{CH}^*$  라디칼 농도와 대응하며,  $\text{CH}^*$  라디칼과  $\text{C}_2^*$  라디칼은 국소당량비와 밀접한 관계<sup>(6,7)</sup>를 가지고 있다.  $\text{C}_2^*$ ,  $\text{CH}^*$ 의 발광 스펙트럼에서  $\text{C}_2^*$ 는 당량비가 높은 휘염영역에서,  $\text{CH}^*$ 는 당량비가 낮은 청염영역에서 지배적이므로 당량비가 일정한 연소기 내에서 혼합기가 연소될 때 시간에 따른 당량비의 변화는  $\text{C}_2^*$ ,  $\text{CH}^*$ 의 라디칼 발광강도와 밀접한 연관성을 갖는다. 라디칼마다 고유한 파장의 빛을 내기 때문에 라디칼의 종류와 분포는 어떤 라디칼 이미션의 좁은 파장 밴드

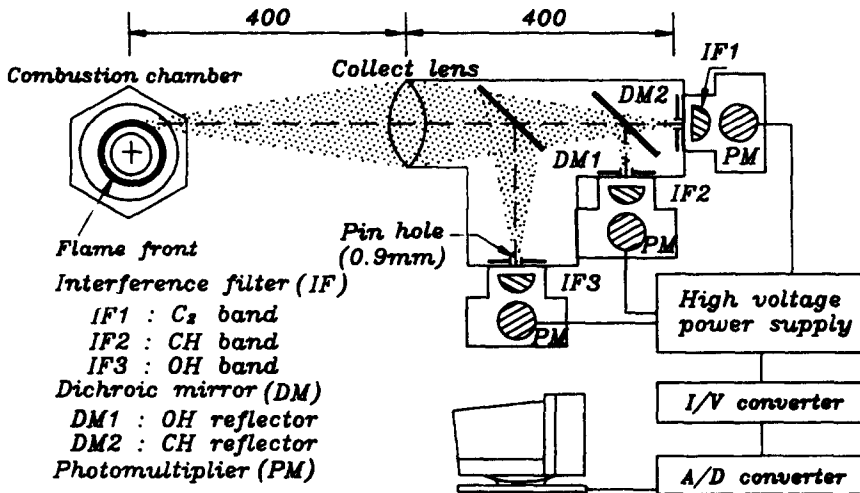


Fig. 3 Optics configuration to monitor local radical intensity of combustion chamber

내의 발광강도 분포를 계측함으로써 추정할 수 있다. 화염중에 존재하는 세 종류의 라디칼(CH\*, C<sub>2</sub>\*, OH\*)의 국소 발광강도를 검출하기 위해서는 Fig. 3에 나타낸 광학계를 사용하였다. 라디칼은 화염으로부터 400mm 위치에 설치한 집광렌즈(초점거리 : f=200mm)에서 집광되어 마이크로미터에서 파장별로 분광된 후 핀홀(직경 1.0mm)에 결상시키고 간섭필터에서 배경광을 제거해서 광전자증배관(Hamamatzu photonics R-955)으로 검출했다. 따라서 화염발광의 검출영역은 렌즈와 각 핀홀에 의해서 직경 약 1mm에 제한되게 된다. 국소 라디칼 발광강도는 연소실 중앙을 원점으로 하여 3지점(중심에서 반경 10mm, 20mm, 30mm)에서 실험조건에 따라 측정하였다.

2.2.2 평균 라디칼 발광강도의 측정

앞의 Fig. 3에서 보는 바와 같이 연소실 내 화염으로부터 발생하는 연소광은 가시화 창을 통과해서

집광렌즈를 거쳐 동일하게 간섭필터를 지난다. 그러나 간섭필터를 통과한 라디칼의 발광강도는 핀홀을 거치지 않고 광전자증배관의 유효면적(8×12 mm)에 결상되어 전기적 신호로 변환된 뒤 증폭되어 데이터 수집 장치에 수록된다.

2.2.3 화상증폭장치에 의한 라디칼 화상처리

공간적인 라디칼 분포를 알기 위해서 셔터속도 100ns 정도의 라디칼 순간화상을 촬영하였다. Table 2는 본 실험에 사용된 화상증폭장치의 특성을 나타낸 것으로 셔터시간은 100ns, 증폭을 위한 시간지연은 110ns이다.

Fig. 4는 라디칼 화상을 촬영하고 처리하기 위한 시스템의 개략도이다. 크게 세부분으로 구성되어 있는데 점화장치를 포함한 정적연소실, CCD 카메라, 시간지연회로와 이미지 그래버(Image grabber)가 내장된 컴퓨터로 구성된다. 시간지연회로는 점화 이후 CCD에 의한 촬영시간을 0.1ms 단위로

Table 2 Specification of high speed gated image intensifier

Mode	Repetition freq.	Gate characteristics		
		Gate time	Delay time	Rise/fall time
Normal gate	10kHz	100ns	110ns	25/25ns

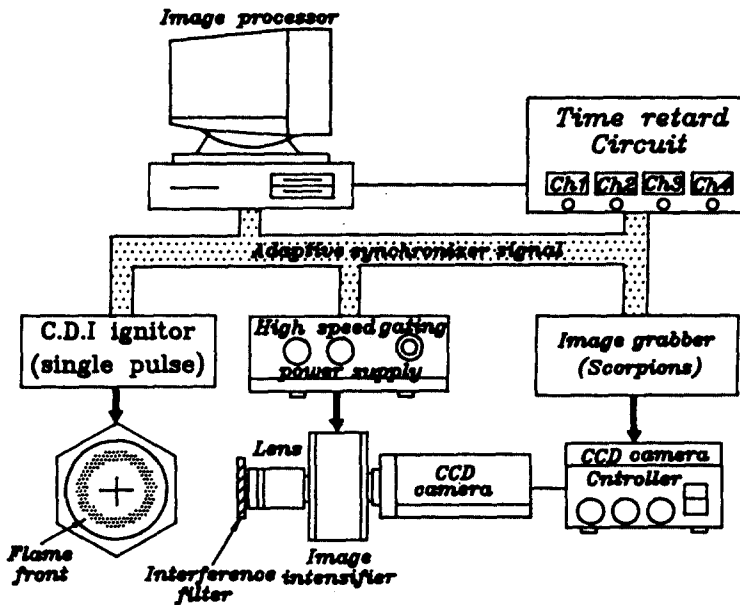


Fig. 4 Experimental apparatus of instantaneous radical image acquisition

변화 가능하며 네 개의 채널을 가진다.

#### 2.2.4 라디칼 발광강도비에 의한 당량비의 측정

전술한 바와 같이 메탄-공기 예혼합기의 당량비는  $CH^*$ ,  $C_2^*$  라디칼의 발광강도비에 밀접하게 관련되어 있으므로, 본 연구에서도 먼저 당량비를 구할 수 있도록  $CH^*$ ,  $C_2^*$  라디칼 발광강도비와 당량비와의 상관관계를 확인하였다. 이와 같은 당량비와 상관관계를 갖는  $CH^*$ ,  $C_2^*$  라디칼의 피크점을 중심으로 시간 의존적인 간단한 대수관계식과 시간에 독립적인 선형관계식을 유도하기 위하여 공급당량비, 초기압력 및 온도에 따라 연소실 전체의 평균 라디칼 발광강도를 아래의 두 가지 방법으로 조사하였다.

첫번째 방법은 먼저 가장 간단한 방법으로  $CH^*$ ,  $C_2^*$  라디칼의 발광강도비 ( $I_{CH^*}/I_{C_2^*}$ )와 당량비가 양대수 좌표계에서 선형관계를 가진다면 아래의 방정식으로 쓸 수 있다.

$$\ln(\phi) = C_1 \times \ln(I_{CH^*}/I_{C_2^*}) + C_2 \quad (3)$$

여기에서  $C_1$ ,  $C_2$ 는 실험상수이다.

Fig. 5는 식 (3)의 시간간격에 따른 변화를 확인하고 당량비와 선형적인 관계를 갖는 최적의 라디칼 발광부분을 찾기 위하여 구분한 네 가지의 발광

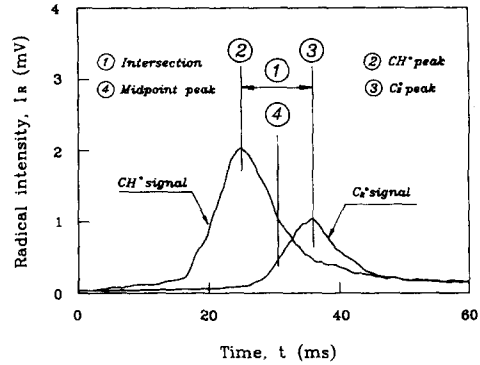


Fig. 5 Calculation modes of radical intensity

Table 3  $C_1$ ,  $C_2$  according to calculation time

Calc. time	$\ln(\phi) = C_1 \times \ln(I_{CH^*}/I_{C_2^*}) + C_2$					
	Temp. (K) : 313.2, 353.2		Pres. (MPa) : 0.08, 0.24, 0.40		Average	
	$C_1$	$C_2$	$C_1$	$C_2$	$C_1$	$C_2$
5ms	0.3821	0.6122	0.41055	0.5820	0.4149	0.5888
	0.4556	0.5599	0.4005	0.6140		
			0.42615	0.5758		
10ms	0.4039	0.6049	0.4165	0.5838	0.4526	0.5677
			0.4466	0.5840		
	0.5109	0.5239	0.4853	0.5420		
15ms	0.4717	0.5609	0.4602	0.5532	0.5400	0.5636
			0.5607	0.5075		
	0.5969	0.4782	0.6104	0.4682		
20ms	0.5403	0.5259	0.5118	0.5303	0.6413	0.4571
			0.6907	0.4280		
	0.7009	0.4240	0.7630	0.3775		
25ms	0.6137	0.4864	0.5779	0.4969	0.7551	0.3950
			0.8351	0.3410		
	0.8470	0.3441	0.9017	0.3064		

강도비 계산방법이다. ①은 CH\*와 C<sub>2</sub>\* 라디칼의 피크점 사이 간격을 포함해서 전후로 5ms, 10ms, 15ms, 20ms, 25ms 동안의 발광강도비 값을 산출하였다. ②는 단지 CH\* 라디칼의 피크점을, ③은 C<sub>2</sub>\* 라디칼 피크점을 그리고 ④는 CH\*와 C<sub>2</sub>\* 라디칼 피크점 사이의 중점을 기준으로 하여 전후 다섯 가지 시간간격으로 발광강도비를 계산하였다. 이 값은 당량비에 따라 각 계산방식의 라디칼 평균 발광강도값을 구한후 최소자승법으로 양대수좌표계에서 방정식의 계수 C<sub>1</sub>과 C<sub>2</sub>를 구하였다.

Table 3에는 네번째 방법으로 C<sub>1</sub>과 C<sub>2</sub>의 값을 계산한 결과를 나타낸 것이다. 피크점을 중심으로 C<sub>1</sub>은 낮고 C<sub>2</sub>는 높은 값을 가지지만 피크에서 멀어지면서 계산시간이 길어질수록 C<sub>1</sub>은 높아지고 C<sub>2</sub>가 낮아진다.

두번째 방법은 버너와 같이 연속화염이 아닌 간헐적 연소방식인 정적연소실의 경우는 1회의 연소현상을 하나의 신호로 보고 당량비 산출에 관계되는 모든 정보를 포함하는 방식이다. 즉, 각 라디칼 발광량의 적분치(전발광량), 최대 발광강도, 전발광기간, 최대 발광강도시간, 연소실 최대압력, 초기압력 등 6개의 세부요소를 조합하여 아래의 크게 세 가지 요소로 구분하였다.

$$\text{발광요소} : I_{CH^*} = \frac{\text{CH}^*\text{의 전발광량} \times \text{온도요소}(T)}{\text{압력요소}(P)}$$

$$I_{C_2^*} = \frac{C_2^*\text{의 전발광량} \times \text{온도요소}(T)}{\text{압력요소}(P)}$$

시간요소 :

$$T_{CH^*} = \frac{\text{CH}^*\text{의 발광개시에서 최대발광까지 시간}}{\text{CH}^*\text{의 전발광시간}}$$

$$T_{C_2^*} = \frac{C_2^*\text{의 발광개시에서 최대발광까지 시간}}{C_2^*\text{의 전발광시간}}$$

압력 및 온도요소 :

$$P = \frac{\text{최대연소압력}(P_{\max})}{\text{초기압력}(P_i)}$$

$$T = \frac{\text{초기온도}(273.2 + T_i, K)}{\text{상온}(273.2 + 20, K)}$$

이와같은 요소들은 당량비, 초기온도 및 압력에 따라서 변화하는데, 특히 발광요소의 경우는 당량비의 증가에 따라 비례적인 경향을 보이지만 시간요소의 경우에는 당량비가 높아지면 감소되는 경향을 가진다. 따라서 이와 같은 온도 및 압력이 라디칼 발광에 선형적인 관계를 가지므로 위와 같은 관계를 통하여 두 개의 영향 중 강한 쪽에 더 큰 영향을 받게 된다. 초기온도의 영향은 초기온도와 상

온과의 비로서 표시하고 그리고 압력변화는 초기압력과 연소최대압력과의 비로서 나타내었다. 따라서 이와같은 각종요소들을 선형적으로 나타내면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi_c = C_1 + (C_2 \times I_{CH^*}) + (C_3 \times I_{C_2^*}) + (C_4 \times T_{CH^*}) + (C_5 \times T_{C_2^*}) \quad (4)$$

라디칼 발광전체의 당량비, 온도 및 압력에 따른 실험값을 각종 요소에 대입하고 각 요소값을 위식에 대입하여 최소자승법으로 실험상수 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, C<sub>5</sub>를 구하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

메탄-공기 예혼합기의 당량비( $\psi=0.8\sim 1.2$ ), 초기온도( $T_i=313.2\sim 403.2K$ ) 및 초기압력( $P_i=0.08\sim 0.40MPa$ )을 변화시키면서 연소실 중심( $r=0, z=0$ )에서 반경 방향(r 방향)으로  $r=10, 20, 30$  mm 지점에서 각각 3 종류의 라디칼을 동시에 측정하여 시간영역 및 주파수영역에서 신호처리하여 화염전파에 따른 라디칼 특성을 고찰한다.

#### 3.1 국소 라디칼의 발광강도 특성

Fig. 6은 혼합기의 당량비 1.0, 초기압력 0.08 MPa, 초기온도 313.2K일 때 측정지점 A, B, C

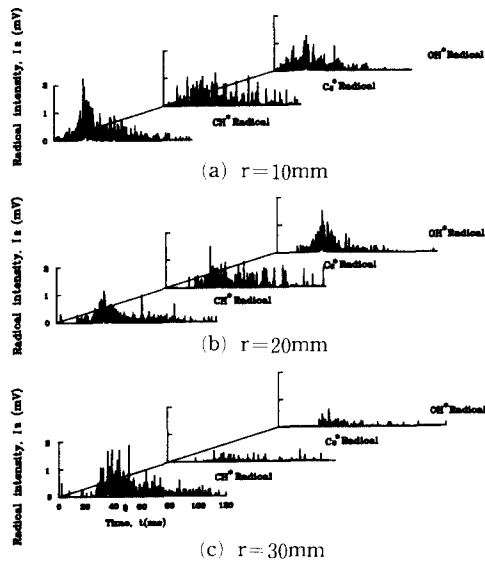


Fig. 6 Each radical signals along the measurement position ( $P_i=0.08MPa, T_i=313.2K$ )

( $r=10, 20, 30\text{mm}$ )에서 얻은 각종 라디칼 신호를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 측정위치에 따른 라디칼 발광강도에 차이가 있음을 알 수 있으며, 특히  $\text{CH}^*$  라디칼의 경우에는 측정위치에 따라 큰 차이가 없으나,  $\text{OH}^*$ 와  $\text{C}_2^*$  라디칼은 발광강도의 차이가 현저함을 알 수 있다. 또한 측정 위치에 따른 시간지연이 발생됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 당량비에 따라 라디칼 평균 발광량과 라디칼 변동성분의 RMS 값을 나타낸 것이다. 전체적으로 당량비 1.1에서 최대 평균발광량을 나타내고 있으며,  $\text{CH}^*$ ,  $\text{C}_2^*$  라디칼의 평균발광량은 당량비에 따라 증가하고 1.1에서 최대에 이른 후 감소하고 있다. 이것은 라디칼의 발광량이 연소조건과 밀접한 관계가 있음을 보여주며, 메탄-공기 예혼합기의 경우 당량비 1.1에서 연소속도가 최대로 되고 따라서 연소기간이 짧아지므로 일정시간 내에 발광하는 라디칼의 양이 많아지기 때문이다.

또한, 당량비 1.1에서 RMS 값이 가장 크게 나타나고 있다. 이것은 반응이 가장 활발하여 라디칼 발광량의 증가와 화염전파속도가 최대로 되어 화염전파시 화염면의 진동효과가 변동성분으로 나타나기 때문이다. 그리고 라디칼신호의 이러한 큰 RMS 값은 슬리렌 사진으로 보면 화염면의 형상이 화염전파속도가 증가함으로써 흐트러진 주름상의 층류화염으로 되어 불안정해지기 때문이고, 또한 라디칼 농도분포화상으로 보면 화염면 형상이 반응대 부근의 라디칼의 랜덤한 생성으로 심한 변화가

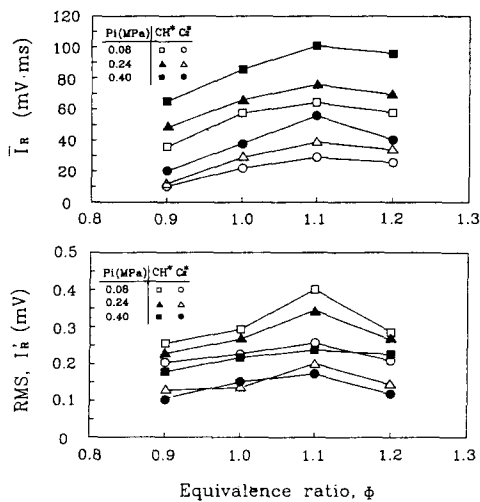
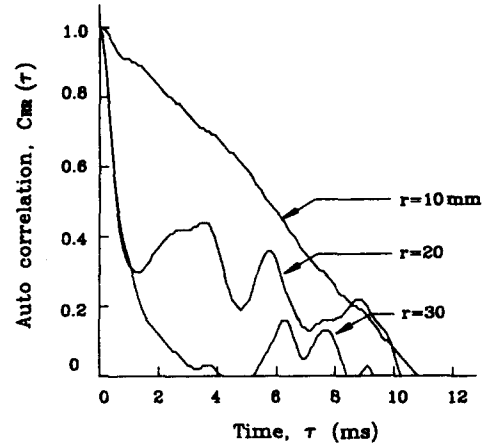


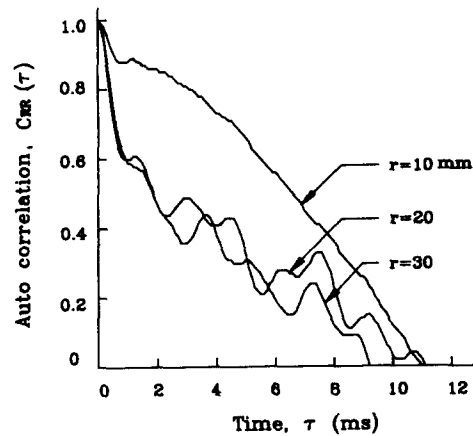
Fig. 7 Effect of equivalence ratio and initial pressure on RMS of radical intensity

발생되어 이것이 변동성분으로 작용된 것으로 사료된다. 그러나 초기압력이 증가하게 되면 RMS 값은 차츰 감소하게 된다. 이것은 초기압력의 증가로 라디칼의 생성이 억제될 뿐아니라 화염전파속도가 감소되기 때문이다. 그리고 시간상으로 보면 초기압력은 연료량을 증가시킴으로써 화염전파속도를 저하시켜 라디칼의 생성 소멸 과정을 오랫동안 지속시키는 효과를 가지고 있다.

Fig. 8은 위치에 따라 관측된 각종 라디칼의 자기상관계수  $C_{RR}(\tau)$ 를 나타낸 것이다. 상관계수가  $r=10\text{mm}$ 에서는 대단히 완만하게 변하지만 정적연소기의 중심에서 멀어질수록 상관계수가 점점 감소되어  $r=30\text{mm}$ 에서는 상관계수가 급격히 떨어져 시간스케일이 매우 짧아짐을 알 수 있다. 이것은



(a)  $\text{CH}^*$  radical



(b)  $\text{OH}^*$  radical

Fig. 8 Auto-correlation along the measurement position ( $P_1=0.24\text{MPa}$ ,  $T_1=313.2\text{K}$ )

중심에 가까운  $r=10\text{mm}$ 에서는 라디칼의 주기성이 대단히 약함을 의미하며,  $r=20, 30\text{mm}$ 로 갈수록 강한 주기성이 나타나며  $\text{CH}^*$  라디칼의 경우 가장 현저하다. 이것은 점화플러그에 가까운 연소실 중심에서  $r=10\text{mm}$ 까지는 초기 화염전파 위치로서 라디칼의 발생이 거의 주기성을 지니지 못한 과도적 상태이나, 이 위치를 벗어나면 주기성을 지닌 정상상태의 특성을 나타내는 것으로 생각된다.

Fig. 9는 초기압력 0.24MPa, 초기온도 353.2K 일 때, 측정위치가  $r=10, 20, 30\text{mm}$ 으로 변함에 따른  $\text{CH}^*$  라디칼과  $\text{OH}^*$  라디칼의 상호상관계수  $C_{\text{CH-OH}}(\tau)$ 를 나타낸 것이다.  $r=10\text{mm}$ 에서  $r=30\text{mm}$ 로 화염이 전파될수록 상관관계는 점점 약해지는 경향을 가지며, 피크점에 대응하는 지연시간은 벽면으로 갈수록 증가하고 측정위치간의 등간격 ( $\Delta r=10\text{mm}$ )에 대해 시간지연( $\tau$ )은 5.66ms, 5.82ms로 나타났다. 측정지점 사이의 거리차( $\Delta r=10\text{mm}$ )를 시간지연( $\tau$ )으로 나누면 속도( $\Delta r/\tau$ )는 176.64cm/s, 171.82cm/s로 되어 동일한 조건에서 화염전파속도(제 I)보의 Fig. 12 참조, 171.0cm/s)와 거의 같음을 알 수 있다. 이것은 측정위치에 따른 라디칼의 생성시간지연은 화염면의 전파속도에 따라서 변하기 때문이라고 생각된다.

Fig. 10(a)는 실험조건에 따라 관찰되는  $\text{CH}^*$ ,  $\text{OH}^*$  라디칼의 상호상관계수를 나타낸 것이다. 당량비가 1.1일 때  $\tau=0$ 에서 피크치가 높아지는데, 이것은 당량비 1.1에서 가장 강한 상관성이 존재함을 의미한다. 또한 위치에 따른 상관계수도 당량비 1.1에서 큰 값을 가짐으로 가장 안정된 화염전파과정이라고 생각된다. Fig. 10(b)는 초기압력 0.08MPa, 초기온도 313.2K일 때  $\text{CH}^*$ 와  $\text{C}_2^*$  라디칼의

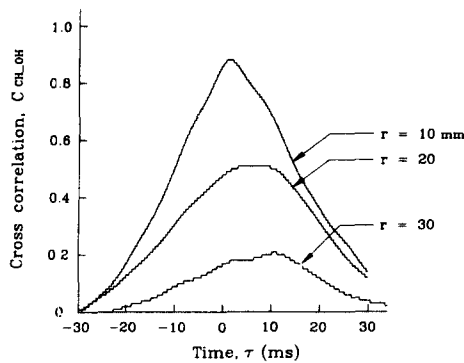


Fig. 9 Cross-correlation between  $\text{CH}^*$  and  $\text{OH}^*$  radical ( $P_1=0.24\text{MPa}$ ,  $T_1=353.2\text{K}$ )

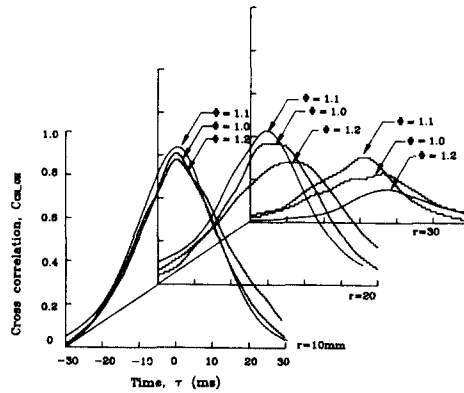


Fig. 10(a) Cross-correlation function between  $\text{CH}^*$ ,  $\text{OH}^*$  radical ( $P_1=0.08\text{MPa}$ ,  $T_1=313.2\text{K}$ )

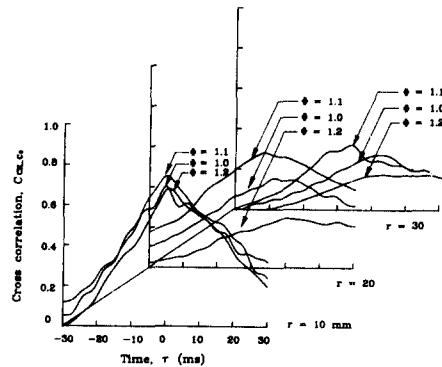


Fig. 10(b) Cross-correlation function between  $\text{CH}^*$ ,  $\text{C}_2^*$  radical ( $P_1=0.08\text{MPa}$ ,  $T_1=313.2\text{K}$ )

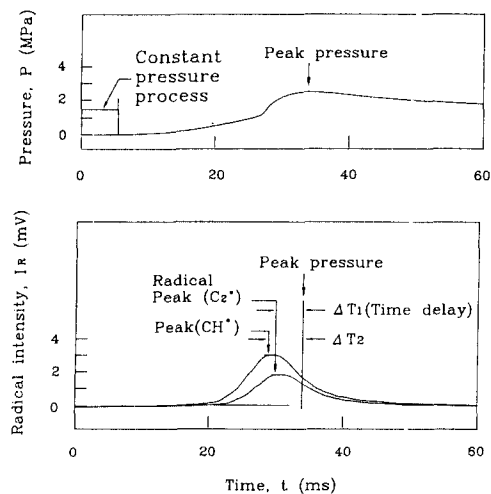


Fig. 11 Relation between peak pressure and radicals time delay



상호상관계수를 나타낸 것이다. CH\*, OH\* 라디칼의 상관관계보다도 상관계수가 낮게 나타나고 있다. Fig. 3-16(a)와 같이 중심에서 벽면으로 갈수록 상관계수의 피크치가 낮아지고, 시간지연( $\tau$ )이 커져 변화가 완만해 짐을 알 수 있다. 특히 당량비가 1.1에서 벗어날수록 이 경향은 더욱 가속됨을 알 수 있다. 이것은 최적의 연소상태인 당량비 1.1에서 벗어날수록 화학반응강도가 약해지며, 벽면으로 갈수록 화염전파속도에 대응하는 시간지연( $\tau$ )을 가지고 상관관계도 매우 약해지기 때문이다.

3.2 평균 라디칼의 발광강도 특성

Fig. 11은 피크압력과 각 평균라디칼 피크점과의 신호지연시간(Time delays)을 나타낸 것이다. 시간지연  $\Delta t_1$ 과  $\Delta t_2$ 는 최대 연소압력 발생시각과 CH\*, C<sub>2</sub>\* 라디칼의 각 피크 발생시간과의 차를 나타내며,  $t$ 는 각 라디칼 피크점 사이의 시간지연 간격을 나타낸 것이다.

Fig. 12는 당량비의 변화에 따른 시간지연( $\Delta t$ )을 나타낸 것이다. 희박연소조건에서 연소장이 불안하여 지연시간  $\Delta t$ 가 5ms 이상까지 상당히 증가하고 이론공연비에서는 안정적인 연소조건이기 때문에 지연시간 없이 거의 동시에 발생하고 있다. 당량비 1.1과 상대적으로 희박한 연소조건인 당량비 0.8과의 화염전파속도의 차이는 약 110cm/s 정도가 발생((제 I)보의 Fig. 12, 13)된다. 따라서 이와 같은 당량비에 따른 화염전파속도의 감소에 인하여 라디칼 피크점 사이의 간격이 상대적으로 늘어난

것으로 생각된다.

3.3 라디칼 발광강도와 당량비와의 상관관계

Fig. 13은 혼합기 초기온도가 313.2K, 353.2K로 각각 일정할 때 계산간격이 15ms와 20ms인 경우의 당량비에 따른 라디칼 발광강도비( $I_{CH^*}/I_{C_2^*}$ )의 실험결과를 나타낸 것이다. 양대수좌표계에서 당량비에 따른 라디칼 발광강도비( $I_{CH^*}/I_{C_2^*}$ )의 실험결과는 일정한 범위안에 분포하면서 거의 당량비에 비례적으로 증가하고 있다. 따라서 본 실험의 당량비 조건( $\phi=0.8\sim 1.2$ )이 메탄-공기 예혼합기의 가연한계( $\phi=0.5\sim 1.7$ )와 비교해 볼 때 상대적으로 좁은 영역이지만 가장 많이 상용하고 있는 범위에 속하므로, 본 실험의 범위 내에서 양대수좌표표가 이

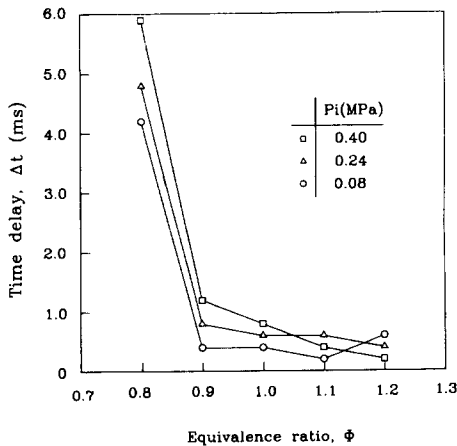


Fig. 12 Time delay between CH\* and C<sub>2</sub>\* radical peaks (T<sub>1</sub>=353.2K)

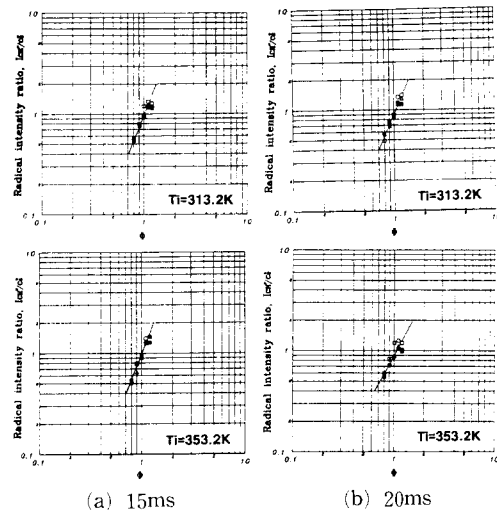


Fig. 13 Linear relation between  $\phi$  and  $I_{CH^*}/I_{C_2^*}$

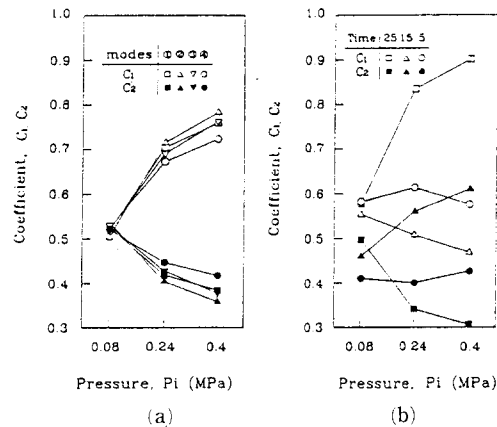


Fig. 14 Effect of initial pressure on coefficient C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>

용한 당량비에 따른 라디칼 발광강도비를 1차관계식  $\ln(\phi) = C_1 \times (I_{CH^*}/I_{C_2^*}) + C_2$ 으로 나타낼 수 있음을 알았다.  $C_1$ 과  $C_2$ 는 1차원 관계식의 실험상수를 의미한다.

Fig. 14(a)는 대수좌표에서 선형성을 확인한 당량비와 라디칼 발광강도비와의 관계식을 Fig. 5와 같이 네 가지 계산방법에 따라 계산한 선형관계식의 계수  $C_1, C_2$ 의 초기압력에 따른 변화를 나타낸 것이다. 선형관계식의 계수들은 초기압력에 영향을 받으며 관계식의 기울기를 의미하는  $C_1$ 은 각 방법에 따라 0.06 정도 변하고,  $C_2$ 의 경우에는 0.058 정도 영향을 받고 있다. 각 방법에 따른 변화의 양은 적으나 ④에서 변동의 폭이 가장 적게 나타나므로 가장 양호한 선형성을 유지할 수 있다. Fig. 14(b)는 Fig. 14(a)에서 가장 양호한 계산방법 ④를 이용하여 시간범위를 5, 15, 25ms로 넓혀가면서 계산한 당량비 관계식의 실험계수  $C_1, C_2$ 의 변화를 초기압력에 따라 나타낸 것이다. 계산시간의 증가에 따라 초기압력 0.08MPa를 기준으로  $C_1$ 값의 차는 0.033, 0.08, 0.310로 변하고  $C_2$ 는 0.032, 0.12, 0.187까지 변한다. 따라서 당량비와 라디칼 발광강도와의 선형관계식은 계산시간에 큰 영향을 받고 있으며 10ms 이상을 벗어나면 10% 이상의 오차가 발생됨을 알 수 있다. 이것은 계산시간이 길어질수록 이와 같은 1차원 관계식에서 벗어나기 때문이다.

Fig. 15(a)는 네 가지의 계산방법에 따라 계산한 선형관계식의 계수  $C_1, C_2$ 의 초기온도에 따른 변화

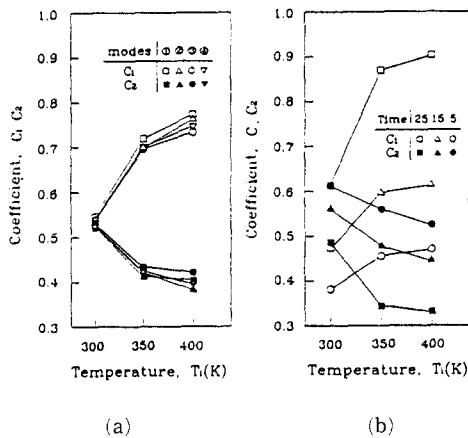


Fig. 15 Effect of initial temperature on coefficient  $C_1, C_2$

를 나타낸 것이다. Fig. 14(a)와 같이 선형관계식의 계수들은 방법 ④에서 최소의 변동이 나타나므로 가장 양호한 선형성을 유지할 수 있다. Fig. 15(b)는 Fig. 14(a)와 같이 가장 양호한 방법 ④로 시간범위를 5, 15, 25ms로 넓혀가면서 계산한 관계식의 계수  $C_1, C_2$ 의 변화를 초기온도에 따라 나타낸 것이다. 계산시간의 증가에 따라 초기온도 313.2K를 기준으로  $C_1$  값의 차는 0.076, 0.127, 0.263로 변하고  $C_2$ 는 0.078, 0.113, 0.14까지 변한다. 따라서 Fig. 14의 결과와 같이 라디칼 발광강도와의 선형관계식은 계산시간의 영향을 받고 있으며 10ms 이내에서 1차원 관계식의 적용이 가능함을 알았다. 버너화염과 같은 연속화염인 경우에는 10ms이내에 다수의 라디칼 발광강도의 피크점이 연속적으로 나타나므로 시간변화의 영향을 적게 받으므로 정도가 좋아질 것으로 생각된다.

따라서 연소실 내의 라디칼 발광강도에 의한 당량비 추정식은 본 실험의 범위에서 방법 ④를 기준으로 10ms 이내에서 아래의 식으로 표현될 수 있으며, 시간에 따른 변화가 적은 연속화염에 적용할 경우에는 당량비의 산출이 더욱 양호할 것으로 생각된다.

$$\ln(\phi) = 0.4526 \times \ln(I_{CH^*}/I_{C_2^*}) + 0.5677 \quad (5)$$

Fig. 16의 아래 그림은 초기압력 0.24MPa, 초기온도 353.2K일 때 각 당량비 조건의  $CH^*, C_2^*$  라디칼의 발광신호를 선형관계식 (5)을 적용하여 시간에 따라 계산된 순간당량비 추정값을 나타낸 것

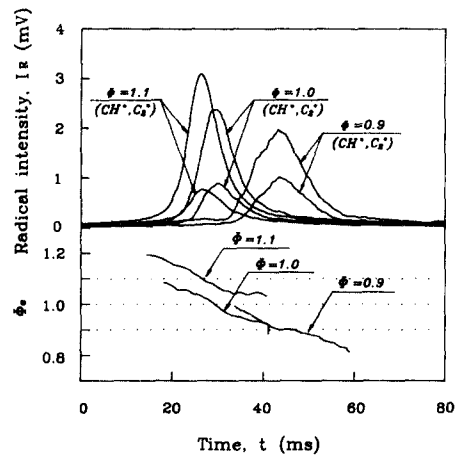


Fig. 16 Radical intensity and equivalence ratio curve according to equivalence ratio ( $P_1=0.24$ MPa,  $T_1=353.2$ K)

이다. 각 당량비의 라디칼 발광강도의 피크점에서는 당량비 추정값과 양호하게 일치하고 있으며, 피크점을 중심으로 10ms 이내에서는 오차 10% 안에서 당량비값에 근접하지만 10ms 범위를 벗어나면 피크점 전에서 높게, 피크점 이후에는 희박한 것으로 계산되어 오차범위가 상당히 커짐을 알 수 있다. 이것은 첫째 본 계산식이 라디칼 최대발광점을 중심으로 10ms 이내의 라디칼 발광강도로 표현된 것이고, 둘째 연소초기의 라디칼 발광강도는 매우 미약하기 때문에 광학계를 거치는 동안에 CH\*나 C<sub>2</sub>\*가 아닌 다른 파장범위의 발광발광강도의 비율이 상대적으로 커기 때문에 생긴 오차라고 생각된다. 간섭필터의 반치폭 내에서 어느정도 다른 발광 성분도 통과하게 되므로, 당량비를 결정하는 CH\*나 C<sub>2</sub>\*의 라디칼 발광강도가 간섭필터를 통과한 다른 발광강도에 비해 미약한 경우에는 오차가 발생하게 된다. 본 연구에서 광학계가 연소실 전체의 연소발광을 받게 되므로 예비반응부의 미약한 발광, 화염대의 강한 발광 그리고 화염대가 지나간 기연부에서 발생하는 후연소 발광이 동시에 나타나게 된다. 전체적으로 라디칼발광강도의 최대점을 지나면 기연부가 상대적으로 커지게 되므로 계산되는 당량비( $\phi_e$ )와 실제 당량비( $\phi_R$ ) 사이에 10% 정도의 오차가 발생된다.

Fig. 17은 앞에서 시간에 따른 오차의 발생을 제거하기 위하여 두번째 방법으로 제안한 라디칼 발광강도의 전체곡선을 하나의 자료로 보고 당량비 추정식 (4)의 CH\*와 C<sub>2</sub>\* 라디칼 발광요소의 변화를 당량비에 따라 나타낸 것이다. 전체 발광량은

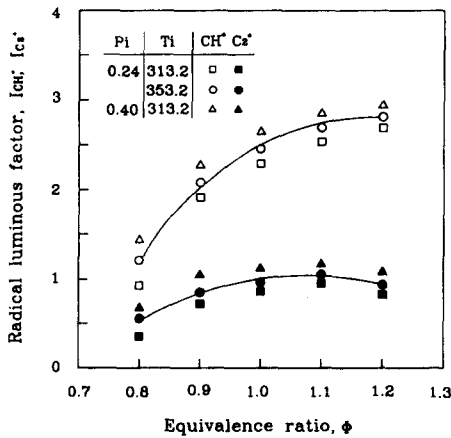


Fig. 17 Effect of equivalence ratio on luminous factor

CH\*의 경우 당량비 1.2까지 점차 증가하는 변화를 나타내며, 특히 당량비 1.0까지는 급격히 증가함을 보이나 그 후로는 증가율이 낮아지는 것을 알 수 있다. 혼합기가 농후한 측에서는 발광요소의 변화가 적으나 당량비 0.8에서 0.9 사이에서는 발광요소의 변화가 상대적으로 커진다. 당량비에 관계없이 전체적으로 초기압력의 변화에 대해 일정한 변화를 보이는데 이것은 초기압력에 따라 연소실 내 혼합기양의 증가가 라디칼 발광량과 비례하기 때문인 것으로 생각된다. C<sub>2</sub>\* 라디칼 발광요소의 변화는 CH\* 라디칼에 비하여 당량비에 미치는 영향은 작으나 당량비 1.0을 기준으로 그 증가가 완만하다가 감소하는 경향을 보이며, CH\* 라디칼과

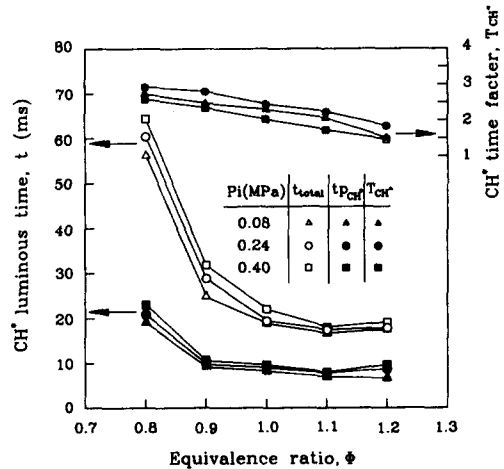


Fig. 18(a) Effect of equivalence ratio on CH\* time factor

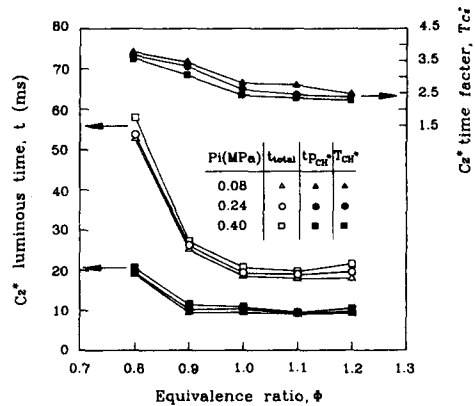


Fig. 18(b) Effect of equivalence ratio on C<sub>2</sub>\* time factor

같이 당량비 0.8에서 0.9 사이에서는 다소 변동량이 많음을 알 수 있다. 이것은 당량비 0.8을 기준으로 희박조건인 연소특성인 긴 연소시간, 적은 발광량이 나타나기 때문으로 생각된다.

Fig. 18(a)는 당량비에 따른 식 (4)의 CH\* 라디칼 시간요소의 변화를 나타낸 것이다. 당량비에 따라 라디칼 발광시간의 변화는 발광요소와는 반대로 감소하는 경향을 보이며, 특히 희박측에서는 전체 발광시간 및 최대발광에 이르는 시간이 급격히 증가하고 있으며 당량비 1.0을 지나면 라디칼 발광시간의 변화는 감소됨을 알 수 있다. 이는 희박연소 시 낮은 화염전파속도로 인해 발생된 것으로 생각된다. Fig. 18(b)는 당량비에 따른 C<sub>2</sub>\* 라디칼 시간요소의 변화를 나타낸 것이다. CH\* 라디칼 시간요소의 변화와 마찬가지로 당량비에 따른 발광요소와는 반대로 감소하는 경향을 보이며, CH\* 라디칼 시간요소보다 다소 높은 값을 가진다.

따라서 발광요소와 시간요소를 당량비와 선형적이라고 가정할 때 두 요소의 1차원 관계식의 기울기를 부호가 서로 다르게 결정해 줌으로써 보다 더 선형적으로 변화하게 된다. 세 가지 요소 중 압력 및 온도도소는 당량비에 관계 없이 거의 일정한 경향으로 발광 및 시간요소 안에 포함되므로 당량비에 따른 발광 및 시간요소를 식 (4)에 대입하고 이것을 최소자승법으로 상수를 구하면 아래와 같아진다.

$$\phi_c = -0.928 + (1.535 \times I_{CH^*}) + (0.716 \times I_{C_2^*}) + (-0.667 \times T_{CH^*}) + (-0.501 \times T_{C_2^*}) \quad (6)$$

첫째방법으로 구한 식 (5)는 1회의 라디칼 발광 곡선으로 시간에 따라 다수의 당량비추정값이 존재하지만, 이와는 달리 식 (6)으로 표현된 당량비 추정식은 1회의 발광에 대해 하나의 당량비 추정값을 가진다. 따라서 본 식의 안정도는 연소실 내의 라디칼 신호의 재연성에 크게 의존하게 된다. 본 실험과 같이 유동이 없는 층류화염의 경우에는 표준편차 5% 이내로 대단히 안정된 값을 가지고 반복 실험을 통하여서도 동일한 값을 얻을 수 있었다.

Fig. 19는 위의 식 (6)을 이용하여 실험에서 계산된 당량비( $\phi_c$ )와 공급당량비( $\phi_R$ )와의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 표준편차 5% 이내로 얻어진 실험값을 발광 및 시간요소로 계산한 식 (6)에 대입하여 얻은 당량비 추정값의 분포를 나타낸 것이다. 공급된 연소실 내 당

량비( $\phi_R$ )와 식 (6)에 의해 계산된 당량비( $\phi_c$ )와의 오차는 최대  $\pm 5.2\%$ , 평균오차는  $\pm 4.1\%$ 로 공급된 당량비와 양호하게 일치함을 보여주고 전술한 식 (5)의 당량비 추정값 보다도 정도가 뛰어난을

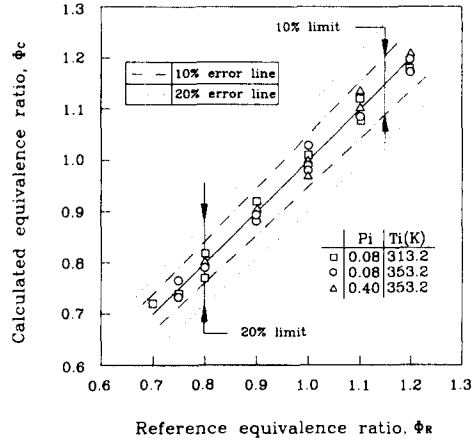


Fig. 19 Relation between calculated  $\phi_c$  and reference  $\phi_R$

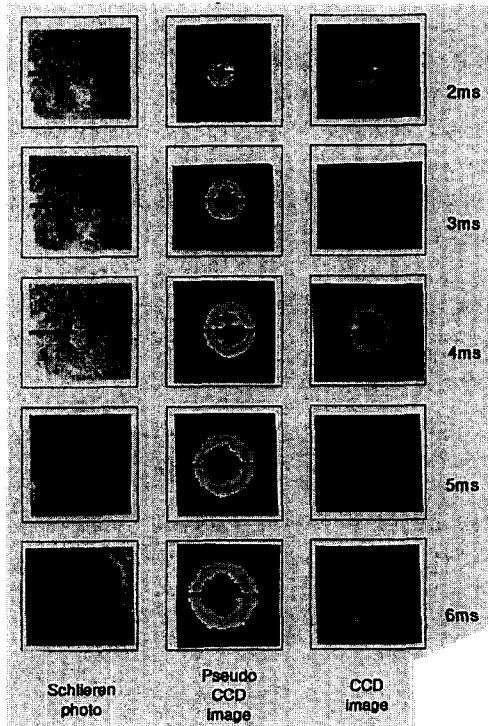


Fig. 20 Comparison between schlieren photo, pseudo CCD image and CCD image ( $\phi = 1.0$ ,  $P_i = 0.08$  MPa,  $T_i = 313.2$  K)

알 수 있다. 따라서 식 (5)는 버너와 같이 연속화염에 적용하고, 식 (6)은 내연기관과 같이 간헐적인 화염에 적용함으로써 정도가 높은 당량비 추정값을 얻을 수 있다고 생각된다.

#### 3.4 라디칼 화상과 솔리렌사진의 비교

Fig. 20은 메탄-공기 혼합기의 당량비 1.0, 초기 압력 0.08MPa, 초기온도 313.2K에서 촬영한 솔리렌사진, 가상색으로 화상처리된 CCD화상 및 CH\* 라디칼 화상을 접화 후 2ms부터 6ms까지 1ms 단위로 5개의 화상을 나타낸 것이다. 화상처리된 화상 및 솔리렌사진을 비교하면 솔리렌사진보다 라디칼 화상의 반경이 약간 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 솔리렌사진은 화염대의 온도차에 의한 급격한 밀도구배를 표현하는 것이므로 화염대의 두께가 작게 나타나지만, 라디칼 화상의 경우에는 솔리렌에서 나타내는 화염대 두께의 양방향으로 화학반응이 일어나는 전체 반응영역의 라디칼 발생부위이므로 화염면 두께가 솔리렌에 비해 두꺼워졌다고 생각된다. 또한 솔리렌사진의 화염대 안 쪽의 기연부의 두께보다도 바깥 쪽의 미연가스 쪽으로의 두께가 상대적으로 더 두꺼워짐을 보이는데 이는 라디칼의 활발한 반응영역이 화염의 진행방향으로 넓게 분포하기 때문이라고 생각된다.

그러나 라디칼의 발광강도가 가장 높은 곳(가상 CCD 상의 흰색부분)과 솔리렌사진의 화염대 부분은 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 이것은 결국 화학반응이 가장 활발한 반응대에서 라디칼도 역시 가장 많이 존재함을 보이는 것이다. 따라서 솔리렌 사진에 나타난 화염면과 가상색으로 나타난 라디칼 발광분포의 흰색으로 나타난 피크점이 거의 일치함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

(1) 연소실 내 국소 라디칼의 자기상관 및 CH\*와 OH\*, CH\*와 OH\*의 상호상관을 통하여 가장 최적의 연소조건은 당량비 1.1이며, 이는 화염전파 속도 특성과 일치한다.

(2) 라디칼 최대 발광강도지점을 중심으로 계산된 당량비 추정식 (5)는 연속화염에 적합하며, 라디칼 발광강도 피크점을 중심으로 10ms 이내에서 양호한 당량비 계산값을 얻을 수 있다.

(3) 라디칼 발광전체로 계산한 당량비 추정식 (6)은 내연기관과 같은 간헐화염에 적합하며, 본 정적연소기에 적용한 결과, 당량비 계산값은 오차 범위  $\pm 4.1\%$  내에서 실험과 거의 일치하였다.

(4) 솔리렌사진에 나타난 화염면과 화상해석을 통해 나타난 라디칼 화상의 최대농도지점은 거의 일치한다.

#### 참고문헌

- (1) 전충환, 장영준, 1996, "밀폐 연소실 내의 메탄-공기 예혼합기의 연소 및 라디칼 특성에 관한 연구 (1)," 대한기계학회논문집(B) 제20권, 제2호, pp. 659~669.
- (2) Crosley, D. R. and Smith, G. P., 1982, "Rotational Energy Transfer and LIF Temperature Measurement," *Combustion and Flame*, Vol. 44, pp. 27~34.
- (3) Gaydon, A. G. 1957, *Spectroscopy of flames*, Wiley Press.
- (4) Winfordner, J. D. (Ed.), 1971, *Spectrochemical Methods of Analysis: Quantitative Analysis of Atoms and Molecules*, Wiley Press.
- (5) Ito, H., Hommo, Y., Jae-Ik Song and Gomi, T., 1988, "An Instantaneous Measuring Method of Air-fuel Ratio by Luminous Intensity of Radical (Application to practical Burner Flames)," *JSME*, Vol. 52, No. 481, pp. 2219~2230.
- (6) Mizntani, Y., 1989, "Visualization and Image Analysis of Combustion Field," *JSME Int. Journal II*, Vol. 32, No. 1, pp. 1~10.
- (7) Sasayama, T., 1987, *Recent Development of Optical Fiber Sensors for Automotive Use*, SPIE, Vol. 840.