

정적연소실 내의 라디칼 계측 기술

Radical Measurement Technology in Constant-Volume Chamber

장 영 준, 전 총 환
Y. J. Chang, C. H. Jeon



장 영 준
• 1947년 5월생
• 내연기관, 열역학
• 부산대학교 정밀기계공학과 교수



전 총 환
• 1962년 10월생
• 내연기관, 열역학
• 부산대학교 정밀기계공학과 조교

발생되고 이것이 최종적인 화염색깔의 변화로 나타난다. 화염내의 OH^* , C_2^* , CH^* 라디칼 자발광은 연소반응영역을 규정하고, 특히 OH^* 라디칼 자발광 강도는 화염온도, CH^* , C_2^* 자발광은 국소당량비와 밀접한 연관을 갖는다.

이 글에서는 자동차엔진을 모형화한 정적연소기 내의 라디칼 계측기술에 관해 언급하고자 한다. 밀폐연소기내에서 연소반응에 의해 발생된 국소 및 평균 라디칼 강도를 계측하여 순간당량비를 구할 수 있는 관계식을 유도할 수 있으며, 이것을 이용하면 기관에서 발생하는 연소광에 의하여 순간당량비를 구하거나, 각종 산업용 버너 등 다양한 연소기에 적용할 수 있을 것이다. 또한 필자가 소속된 연구실에서 주로 개발하고 있는 라디칼 계측기술의 현황과 연소해석에 적용한 실예를 보임으로써 저공해 초회박 차세대 엔진개발을 위하여 요구되어지는 내연기관의 연소현상 규명에 조금이라도 보탬이 되고자 한다.

1. 서 론

연소과정에 있어서 각종 생성물의 계측은 연소과정의 현상규명은 물론이고 연소시에 발생하는 유해배출물의 생성과정을 해명하기 위해서도 중요하다. 최근 화염분광법을 이용하여 예혼합 화염의 공기연료비, 분자나 라디칼의 농도 및 반응율을 구하는 화염 진단기법과 연소 측정기술에 많은 관심이 모아지고 있다. 즉, 화염의 고유한 색깔은 각 연소조건에 따른 다양한 정보, 즉 당량비, 화염온도, 연소형태 등을 포함하고 있는 연소 라디칼에 의해 결정된다. 당량비의 변화에 따라 화염내부의 라디칼의 농도변화가

2. 연소실내의 중간생성물 계측기술 개요

2.1 연소실내 계측을 위한 실험도구

예혼합기의 연소과정 특히, 엔진모형연소실내의 연소과정의 가시화와 화염전파속도의 측정, 압력에 의한 연소해석 등은 연소과정을 이해하기 위하여 매우 중요한 연구분야이다. 연소와 같은

복잡한 현상에 대하여 가시화야 말로 모델구성의 첫단계로서 뿐 아니라 실수를 피하는 유용한 수단으로 가장 효과적이다. 이러한 유동가시화의 노력은 1872년 Otto에 의해 손으로 구동되는 모형 실린더 엔진이 만들어지고, 이 엔진모델을 사용하여 최초로 흡입 유동 성향을 연구하였다. 1934년 Rothrock는 디젤엔진의 연소현상을 촬영함으로써 화염전파 연구에 지대한 도움을 주게 된다. 1961년 Bowditch는 4사이클 가솔린 엔진의 피스톤을 연장하고 헤드에 석영으로 된 창을 부착하여 실린더 축방향을 통한 내부유동을 최초로 가시화하였다. 1979년 미국 Sandia연구소에서는 흡배기 밸브가 벽면에 부착된 형태의 연소실 관찰용 연소기를 제작하였고, 이와 유사한 연구가 같은 해 프린스턴 대학에서도 시작되었으며, 또한 1980년 GMR, MIT등에서는 직접고속사진 촬영이 가능한 양면이 평판형 압축석영으로 된 엔진모사 연소기를 제작하였다. Table 2는 최근 각국의 엔진을 이용한 연소 및 유동 가시화 연구현황을 나타낸 것이다.

연소방식은 밀폐연소실의 정적연소방식과 개방연소실의 정압연소방식으로 대별된다. 즉 항공기의 제트엔진과 같은 경우에는 후자인 정압연소방식을 사용하고 있으며 자동차엔진을 모형화한 경우에는 정적연소방식을 취하고 있다.

본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 메탄-공기 예혼합기를 정적연소시켰을 때 연소실내 라디칼을 압력 및 이온프로브와 함께 계측하고, 라디칼 화상촬영 및 연소가시화를 위하여 Fig.1에 나타낸 것과 같이 내경 70mm, 길이 34mm, 연소실 체적이 130cm³인 듀랄루민제 원통형 연소기를 제작, 사용하였다. Table 1은 본 실험의 변수 및 조건을 나타낸다.

2.2 연소중간생성물 계측을 위한 기술현황

화염중에 존재하는 중간생성물의 농도를 검출하기 위해서 종래에는 거의 직접채취법(Sampling probe method)을 이용하였으나, 최근에는 특히 레이저, 2차원 광계측기 그리고 영상처리기술의 발달로 인하여 레이저광을 이용한 측정기술을 이용하고 있다. 레이저광을 이용한 측정기술로는

레이저 유도형광법(Laser Induced Fluorescence : LIF), 레이저광 산란법(Laser Scattering : Mie, Rayleigh, Raman Scattering) 등이 있다. Fig.2는 각종 레이저를 이용한 측정법의 원리를 나타낸 그림이다. 그러나 외부에 의해 높은 에너지를 주입하는 이와 같은 방법은 화염내에 낮은 농도의 라디칼성분을 계측하는 데는 용이하지만 화염 자체의 화학발광으로도 계측할 수 있는 풍부한 라

Table 1 Experimental condition

Experimental parameter	Condition
Premixture	Methane-air
Pressure, MP _a	0.08, 0.24, 0.4
Equivalence ratio	0.8~1.2
Temperature, K	313.2, 453.2, 403.2

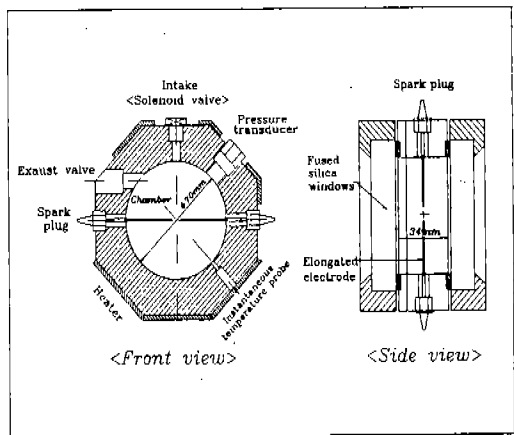


Fig.1 Schematic of combustion chamber

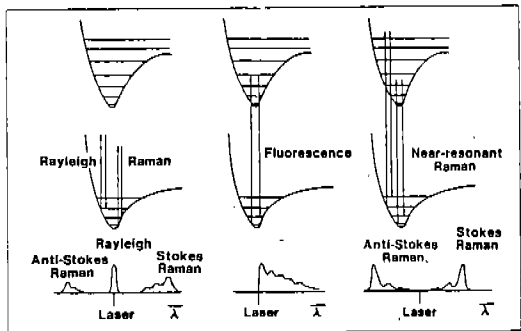


Fig.2 Incoherent light scattering processes and spectra

Table 2 Present Research Summary of Flow Visualization in Engine Part

Researcher			Engine Spec.				Visualization	Measurement
Nation	Depart	Name	SI CI	Type	Bore	Head Piston		
U.S.A	General Motors	S.Butes	SI	4	92	pent- roof flat	Cylinder liner & piston(sapphire)	3000 CCD camera flame flont growth
		Alkidas Peterson	SI	4	92.1		piston head	High speed camera heat transfer process
	Sandia Nat. Lab.	M.Green	SI 6	2	95.3		Cylinder head & piston	Two high speed video camera orthogonal schlieren image
	Cummins Engine Co.	Loye	SI 13	4	140	DI	Patial cylinder head(10mm) & liner(12mm) (quartz)	Laser sheet (LI method) Soot Imaging
West Ger- many	Benz Lab.	Pfister Muly	SI	4	75 ×75	square piston	Cylinder liner	Laser sheet Smoke Generation
	BMW Lab.	Hartman	SI	4		flat	Piston & patial liner (HTD : high turbulence port)	Laser sheet (3-direction) LDV flow analysis
	Nurnberg Univ. Stuttart Univ.	Dust Tropea Herweg Zroglo	SI SI 7.3	2 4	 73	flat	Small circle window in head 4-windows in liner with orthogonal view (Disc chamber)	LDA system -LSTM, TSI, DANTEC High-speed schlieren photography
Aust- ralia	Melbour- ne Univ.	Kamar Lambe	SI 10	4	89	incline pent- roof	Piston head (80mm Bowditch)	High-speed camera Swirl ratio
Austria	Pitcher Wigley	CI	CI 21	2	170		4-windows in head with orthogonal view	PDA system (Drop size and velocity)

디칼은 자발광을 필터링하여 중요한 정보를 얻을 수 있을 것이다. 따라서 가격이나 적용이 용이한 간섭필터 등을 이용해 동일한 효과를 얻기 위해서는 중심파장이 라디칼과 동일한 광계측 필터 등을 제작하는 것이 기술적으로 어려움으로 남아 있다.

하지만, 이것은 코딩정착기술상 상당히 어려운 문제이다. Table 4는 본 실험에 사용된 광간섭필터의 특성과 각 라디칼의 중심파장을 나타낸 것이다. 라디칼신호중 이 반치 폭안에 포함된 어느 정도의 잡음이 들어가게 되므로 이것이 예측값이나 신호분석에서 오차를 가지게 된다. 광간섭필터와 반대 기능을 가진 것이 다이크로거울이다. 간섭필터가 중심파장내에 들어오는 광을 통과시킨다면 다이크로거울은 반대로 반사시키는 기능을 가진다. 즉 간섭필터의 투과율(Transparancy rate)이 다이크로거울의 반사율(Reflection rate)과 같은 역할이다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

3.1.1 광간섭필터 및 다이크로거울(Dichroic mirror)

화염중에 존재하는 라디칼자발광(OH*, CH*, C₂*)의 강도를 검출하기 위해서 무엇보다도 화염발광중에서 각 라디칼성분을 필터링하는 것이 중요한 기술중의 하나이다. 그러나 간섭필터로 동일한 효과를 얻기 위해서는 중심파장이 라디칼과 동일한 파장이고 반치폭이 대단히 좁아야

3.1.2 라디칼강도 검정(Calibration)장치

본 실험에 사용되는 광학계의 특성(집광렌즈, 광간섭필터, 광전자증배관등)을 파악하기 위해서 먼저 실제 라디칼의 강도가 광학계를 통과한 후 강도를 비교, 검정할 필요가 있다. 특히, 라디칼 강도를 광전자증배관의 증폭계인을 조정하기 위한 고전압 공급장치와 함께 검정해야 한다. Fig.3

Table 3 Combustion Diagnostic techniques

Elastic scattering process	Inelastic scattering process	Absorption process	Nonlinear optical process
Rayleigh	Raman	Resonant line of sight	Stimulated Raman gain/loss spectroscopy(SRGS)
Mie	Near-resonant Raman	Differential absorption	Raman-induced Kerr effect(RIKES)
	Fluorescence		Stimulated Raman scattering Hyper-Raman scattering
			Coherent anti-Stokes Raman scattering(CARS)
			Higher-order Raman spectral excitation spectroscopy(HORSES)

Table 4 Interference Filter Characteristics

Observed Species	Observed Spectrum	Filter		
		λ_c (nm)	Band width	Tranp. λ
OH*	309 nm	310.1	10.0 nm	35.2 %
OH*	431 nm	432.3	1.2 nm	49.2 %
C ₂ *	517 nm	515.5	1.6 nm	65.0 %
D/M Mirror		OH* Reflector		99.0 %
		CH ₂ * Reflector		97.0 %

는 최대 150W의 텅스텐램프를 연소기내에 전과 되는 화염의 위치와 동일한 초점위치에 놓은 뒤, 간섭필터 등이 없이 집광렌즈만에 의해 집광된 텅스텐램프중에 존재하는 OH*(309.0nm), CH*(431.2nm), C₂*(516.2nm)의 파장위치에 따른 스펙트럼 강도를 나타낸 것이다.

3.2 실험방법

3.2.1 연소실 평균라디칼 발광강도 측정법

Fig.4는 본 실험에서 사용된 연소실 평균라디칼강도 측정 광학계를 나타낸다. 그림에서 보는 바와같이 연소실내 화염으로부터 발생한 빛과 화염발광(Flame luminosity)은 연소실로부터 FS 창을 통과해서 집광렌즈(f=200mm)에 의해 광전자증배관의 입사표면에 모아진다. 집광렌즈후에 다이크로거울과 광간섭필터<투과중심파장/반치폭 : 430.5nm/10nm(CH*라디칼밴드용), 514.0nm/12.5nm(C₂*라디칼밴드용)>를 이용해 분광했다. 분지된 광경로를 통해 전달된 광은 정해진 파장범위의 빛만을 투과시키는 광간섭필터(interference filter; band pass filter)에 의해 선택된 라디칼발광의 강도는 광전자증배관에 의해 전기적 신호로 변환된 뒤 증폭되어 데이터 취득 장치에 수록된다.

3.2.2 고속도광증폭장치에 의한 순간화상측정법

라디칼순간화상을 얻기 위해서는 광간섭필터를 통과한 라디칼자발광을 순간적인 셔터기능뿐 아니라 셔터시간동안만 통과해서 더욱 미약해진 라디칼광을 증폭시켜야 한다. 이역활을 MCP(Microchannel plate)을 내장한 LI(Image intensifier)에 의해 가능하다. Fig.5는 라디칼 순간화상을 촬영하기 위해 사용된 광학계를 나타내고 있다. 시간지연회로의 ch1은 점화장치로 입력되고 ch1과 시간지연을 제어할 수 있는 ch2에서 펄스신호를 이 고속화상증폭장치로 보내지면 100ns동안 셔터가 열림과 동시에 라디칼면적신호가 LI를 통과하면서 증폭된 후 CCD 화면에 결상된다.

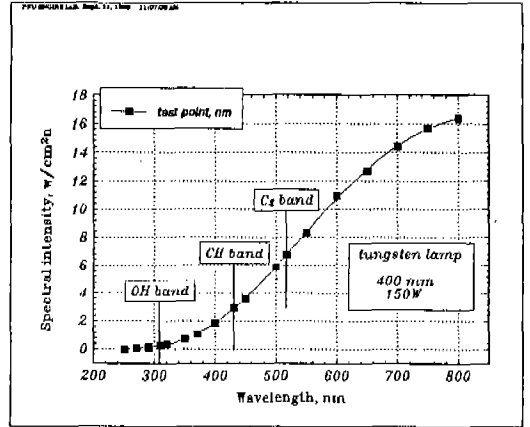


Fig.3 Spectral characteristics of tungsten lamp

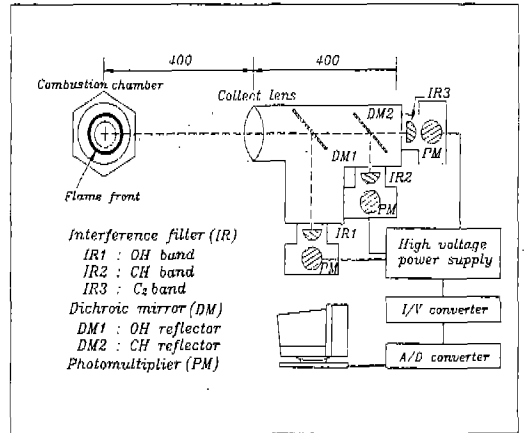


Fig.4 Configuration of average radical intensity

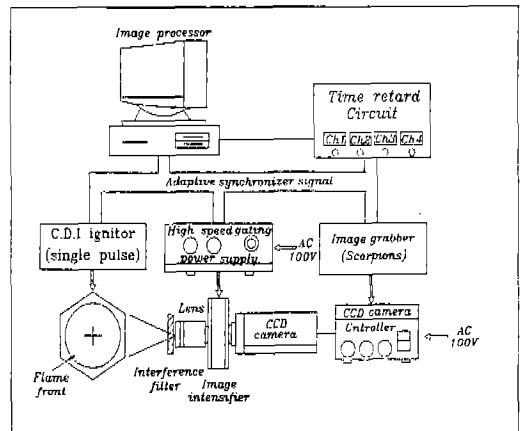


Fig.5 Configuration of instantaneous radical image

4. 당량비 추정기법

4.1 순간당량비 산출방법

Fig.6는 광학계에 의해 측정된 라디칼신호의 예를 나타낸 것이다. 먼저 가장 간단한 방법으로 CH^* , C_2^* 라디칼의 강도비($I_{CH^*}/I_{C_2^*}$)와 당량비와의 최적의 선형관계를 확인하기 위하여 충전소기간에서 4가지 경우로 구분하여 Fig.7에 보는 바와 같이 강도비를 계산하였다. 이와 같이 구분하여 계산하는 이유는 가장 당량비와 선형적인 관계를 갖는 라디칼 발광부분을 찾기 위함이다. 첫번째의 경우는 CH^* 와 C_2^* 라디칼의 각 피크점 전후로 25, 50, 75, 100, 125점과 두 피크점 사이의 강도비 값을 산출하였다. 두번째의 경우는 CH^* 라디칼만을 기준으로하여 피크점 전후의 5가지 경우로 강도비를 계산하였다. 세번째, C_2^* 라디칼만을 기준으로하여 피크점 전후의 5가지 경우로 강도비를 계산하였다. 마지막으로 CH^* 와 C_2^* 라디칼의 피크점 중간위치에서 전후 5가지 경우로 강도비를 계산하였다. 이 값은 당량비에 따라 각 계산방식의 라디칼 평균강도값을 구한후 최소자승법(least square method)으로 양대수좌표계에 상관관계 방정식의 계수 C_1 과 C_2 를 구하였다. Fig.8은 4가지 경우에 대해 계산한 뒤 양대수좌표계에 나타낸 당량비와 라디칼강도비의 관계를 나타낸 그림이다. 모두 양대수 좌표계에서 아주 양호한 선형성을 유지함을 알 수 있다. 나머지 모든 경우에 대해서도 동일한 경향을 산출할 수 있었다. 그러므로 어떠한 라디칼을 기준으로 선택하여도 아래의 식에 의한 당량비와 산출은 양호하다고 할 수 있다.

$$\ln(\phi) = C_1 \times \ln(I_{CH^*}/I_{C_2^*}) + C_2 \quad (1)$$

여기에서 C_1 , C_2 는 실험상수이며, 본 실험에서는 $C_1=0.6413$, $C_2=0.4571$ 이다. Fig.9는 각 당량비 조건의 CH^* , C_2^* 라디칼 출력신호를 시간에 따라 식(1)을 적용하여 계산된 순간당량비 계산 값을 나타낸 것으로서 설정치와 측정치는 양호하게 일치하고 압력에 의한 영향은 무시할 만큼 작았

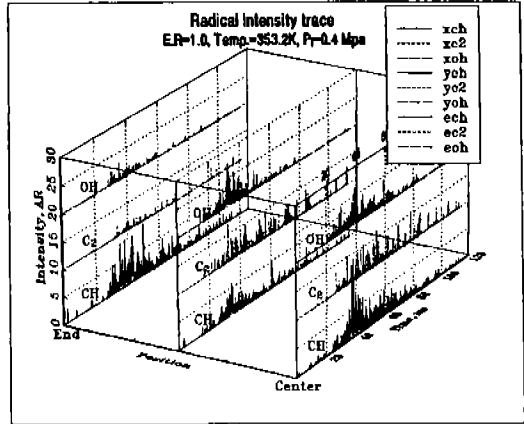


Fig.6 Radical signal traces according to position

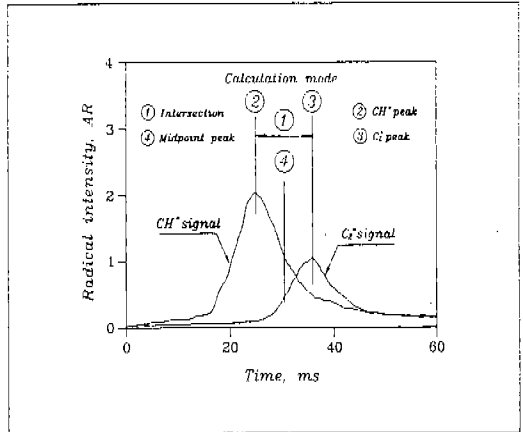


Fig.7 Calculation mode of radical intensity

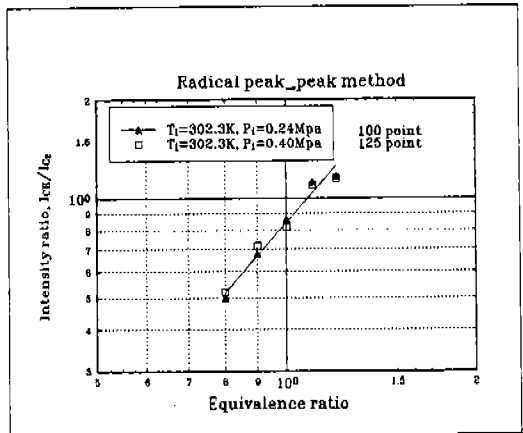


Fig.8 Linear relation between ϕ and $I_{CH^*}/I_{C_2^*}$

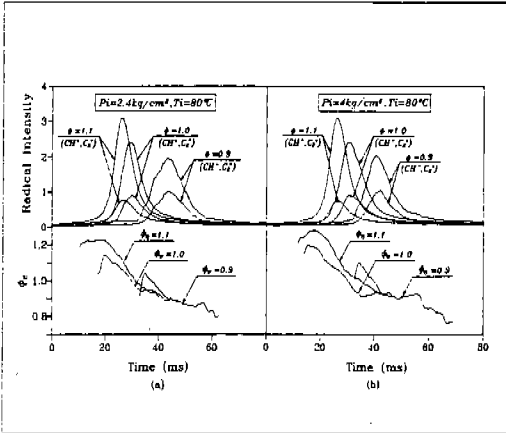


Fig.9 Radical intensity and instantaneous equivalence ratio traces

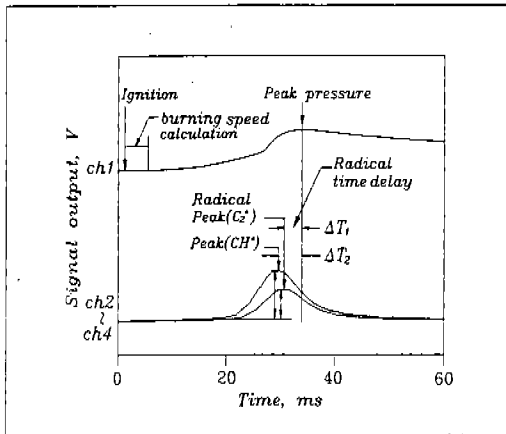


Fig.10 Explanation of pressure and radical trace

다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 최대 라디칼 강도 근처에서 공급당량비 조건과 일치하는 순간당량비를 나타내지만, 최대점 전에서 약간 과농하게, 최대점 이후에는 약간 희박한 것으로 계산된다. 이것은 연소초기의 라디칼강도는 매우 미약하기 때문에 광학계를 거치는 동안에 CH*나 C2*가 아닌 다른 파장범위의 발광강도의 비율이 상대적으로 그만큼 커지므로 생긴 오차라고 생각된다.

4.2 평균당량비 산출방법

Fig.10은 공연비 산출에 관계되는 CH, C2 라

디칼과 그때의 연소압력을 보여주고 있다. 공연비 산출에 관계되는 요소로는 각라디칼 발광량의 적분치(전발광량), 최대발광강도, 발광지속시간, 발광개시시간, 최대발광강도시간, 연소실 최대압력, 초기압력등 9개의 세부요소를 조합하여 아래의 크게 3가지 요소로 구분하였다.

발광요소

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

$$I_{C2} = \frac{C_2^* \text{의 전발광량} \times \text{온도요소}(T)}{\text{압력요소}(P)}$$

시간요소

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

$$T_{C2} = \frac{C_2^* \text{의 발광개시에서 최대발광까지 시간}}{C_2^* \text{의 전발광시간}}$$

압력 및 온도요소

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

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

전체 발광량은 당량비에 따라 급격히 증가함을 알 수 있으며, 특히 혼합기가 희박측에서 그리고 농후한 측에서는 변화가 적으나 당량비 0.9에서 1.0사이에서는 급격한 변동이 발생되며 온도의 영향보다는 압력의 영향이 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 이와같은 압력의 영향과 온도의 영향을 적절히 고려해 주기위해 발광요소안에 압력변화는 초기압력과의 비로서 사용하였고, 온도는 상온을 절대온도 기준으로 하여 무차원화시킨후 고려하였다. 당량비에 따라 라디칼 발광

시간의 변화는 희박측이나 과농측이나 발광강도 만큼 큰변화는 없지만 최대지점에 이르는 시간은 대단히 짧아짐을 알수 있다. 이와같은 3가지 요소를 고려해 산출한 식을 나타내면 아래와 같다.

$$\Phi_C = C_1 + (C_2 \times I_{CH}) + (C_3 \times I_{C2}) + (C_4 \times T_{CH}) + (C_5 \times T_{C2}) + (C_6 \times P) \quad (2)$$

당량비, 온도 및 압력에 따른 실험값을 위 식에 대입하고 이것을 각종 조건에 대입하여 최소자

승법으로 상수를 구하면 아래와 같다.

$$C_1 = -0.04197, C_2 = 12504, C_3 = -0.8609$$

$$C_4 = 0.3126, C_5 = -0.8997$$

식(2)을 이용하면 각종 실험조건에서 계산된 당량비(ϕ_C)와 공급당량비(ϕ_R)와의 상관관계를 Fig.11에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 오차는 최대 $\pm 4.2\%$, 평균오차는 $\pm 1.8\%$ 로 양호하게 일치함을 보여주고 앞에서 구한 순간당량비 보다는 정도가 뛰어남을 알 수 있다. 초대압력에 대한 평균당량비 계산식의 안정도를 알아보기 위하여 당량비 1.0일때 각 실험에서 얻어진 최대압력보다 높은 압력값을 대입할 경우 당량비에 미치는 영향을 나타낸 것이 Fig.12이다.

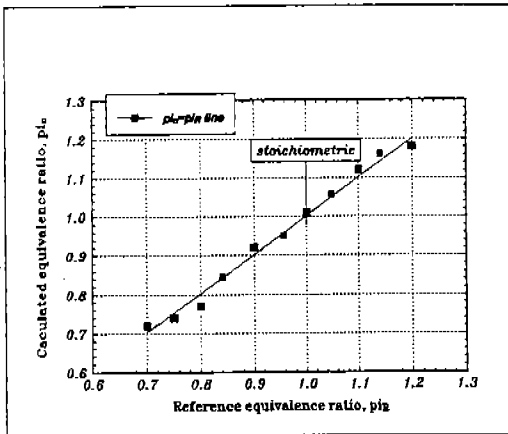


Fig.11 Calculated ϕ_C and ϕ_R reference correlation

5. 결 론

연소실내 연소광 중에 포함된 평균라디칼강도를 계측하여 당량비 예측과의 상호관계 및 순간라디칼화상을 촬영하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 순간 및 평균라디칼 신호를 이용하여 당량비 추정할 수 있는 방법을 제안하였고 그 가능성을 보였으며, 본 정적연소실인 경우는 평균당량비 산출식을 적합함을 알았다.

둘째, 라디칼 순간화상 촬영을 통해 라디칼 신호의 진동은 화상에 나타난 바와 같이 라디칼의 활성적인 활동으로 인해 화염면에서 높은 주파수의 진동이 발생됨을 알았고, 화염면의 두께보다도 넓게 CH 라디칼이 분포함을 알았다.

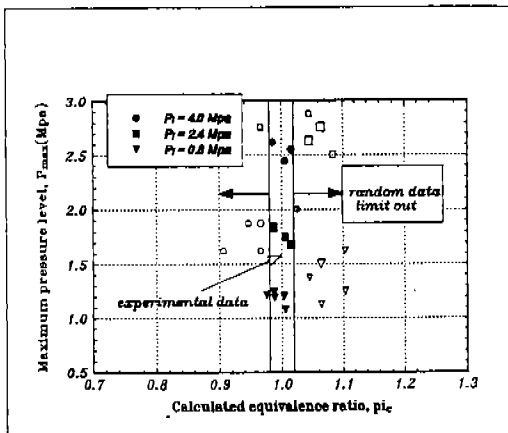


Fig.12 ϕ_C correction induced by p_{max} variation

참 고 문 헌

1. Mizutani, Y., "Visualization and Image Analysis of Combustion Field", JSME Series II, Vol.32, No.1, pp.1-10, 1989.
2. N.A. Chigier, "Combustion Measurement, Hemisphere, 1991.
3. Eckbreth, A.C., "Combustion Diagnostics by Laser Raman and Fluorescence Techniques", Prog.Eng-

- rgy Combust. Sci. Pergamon Press, Vol.5, pp.253, 1979.
4. Mizutani, Y. and Nakabe, K., "Visualization of the Reaction Zone of a Flame by Image Processing(Further Report)", JSME Series B, Vol.52, No.504, pp.2219-2226, 1988.
5. Dyer, M.J. and Crosley, D.R., "Two-Dim. Imaging of OH LIF in a flame", Opt. Letters, Vol.7, No.8, pp.382, 1982.