

가시화엔진을 이용한 연소 및 라디칼 특성에 관한 연구

최수진* · 장영준** · 전충환**

A Study on Combustion Visualizations and Radical Characteristics using Optically Accesible Engine

Su-Jin Choi, Young-June Chang and Chung-Hwan Jeon

Key Words: 화염가시화(flame visualization), 연소반응기구(combustion reaction mechanism), 연소라디칼(combustion radical)

Abstract

A combustion flame visualization system, which is used as an engine diagnostics tool, was developed in order to understand the combustion reaction mechanism in the development stage for S.I. engines. The measurement system consists of an I-CCD camera and a computer-aided image processing system. By using optically accessible engine system, the flame structure was analyzed from the acquired graylevel image and the direction of flame propagation (shape of flame) has been measured to understand combustion phenomena. And combustion radical which involves combustion information were measured. As a result, strong relation between combustion radicals intensity ratio and air excess ratio was found.

1. 서 론

최근 가솔린 기관의 고효율 저공해를 실현하기 위하여 희박연소한계를 확대한 초희박연소 기관의 개발이 진행중이다. 초희박을 실현하기 위해 층상급기연소나

급속연소가 필수적이고, 이를 실현하기 위하여 유동 개선을 통한 방식이나 직분식 등을 이용한 방법이 널리 개발되고 있다.⁽¹⁾⁽³⁾

이러한 방법들은 실린더내의 연소현상을 명확하게 해석할 수 있느냐에 따라 그 성패가 결정된다. 그러나 엔진내의 현상은 유속의 변화가 급격한 과도현상

* 부산대학교 기계기술연구소

** 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

이며, 또한 고온 고압의 밀폐용기내의 현상이라는 이유 등으로 적용 가능한 계측방법은 극히 한정되어 왔다. 이러한 극한 조건하에서 계측을 하기 위해서는 높은 시간분해능과 공간분해능의 계측방법이 아니면 엔진내부현상의 측정이 불가능하다. 엔진내부현상을 측정하기 위한 방법으로는 이온프로브(Ion probe)나 fiber optics를 스파크 플러그 및 실린더 헤드에 심어 계측하는 방법⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾과 실린더 헤드(Cylinder head)나 피스톤 크라운(Piston crown)부 및 실린더라이너에 가시화 창을 설치하는 방법 등 크게 두 가지로 나누어 질 수 있다.⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾ 이온프로브 및 fiber optics를 이용하는 방법은 스파크 플러그, 실린더 헤드의 여러 곳에서 화염 도달 여부를 데이터 처리하여 화염 전파과정을 재구성시키는 방법으로 엔진 개조를 최소화 할 수 있다는 장점이 있지만, 화염의 형태나 전파과정을 정확하게 구현하지는 못하고, 시스템 설치 및 데이터 처리 과정이 복잡하며, 프로브의 설치로 인하여 연소실내의 유동과 연소현상에 영향을 미칠 수도 있다. 그러나, 엔진에 가시화 창을 설치하는 방법은 실제 엔진의 내부를 개조함으로써 가시화를 위한 개조에 따른 차이는 있지만, 연소실내의 현상을 재현하고, 화염형태 및 화염전파를 가시화 장치를 이용하여 온도분포, 밀도분포, 화염전파속도 등의 측정을 행할 수 있다.

본 연구에서는 가시화 엔진을 제작하여 연소실내 연소현상에 대하여 공기과잉률의 변화에 따른 화염의 성장과 압력과의 상관관계를 밝히고, 엔진내 연소현상의 해석을 위한 기초자료를 얻기 위해 연소자발광의 라디칼(Radical) 강도를 계측하여 운전조건이 엔진내 연소현상에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

사용된 엔진의 재원을 Table 1에 나타내었다. 상용 엔진의 실린더 헤드와 블록을 그대로 사용하여, 연소실내로 도입되는 공기 유동이나 혼합기분포가 실제 엔진과 동일하게 유지될 수 있도록 하였다. 가시화 엔진으로 개조·제작은 1번 실린더를 가시화가 가능하도록 연장되게 설계하였고, 광학적인 접근이 가능하도록 피스톤헤드에 가시화 창을 설치하는 방법을 택하였다.⁽¹⁰⁾

Table 1 Base engine specifications

Specifications		
Cylinder		4
Bore (mm)		80.60
Stroke (mm)		88
Displacement (cc)		1796
Compression ratio		8.9
Idle engine speed (rpm)		750 ± 100
Idle spark timing (deg.)		bTDC 5° ± 1°
Intake	Open	bTDC 19°
	Closed	aBDC 57°
Exhaust	Open	bBDC 57°
	Closed	aTDC 19°

2.2. 실험방법

2.2.1 순간화상취득

본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 보이고 있다. 엔진의 시동을 위하여 DC모터를 사용하고, 엔진을 일정 회전수 이상에서 구동하여 시동을 하는 방법을 택하였다. 엔진의 제어를 위하여 programmable ECU(MOTEC M8)를 장착하여 사용하였고, 공기과잉률을

계측하기 위하여 광역 공연비센서(Wide band O₂ sensor, Bosch)를 배기관에 부착하여 사용하였다.

화상취득장치와 엔진에서 나오는 신호와의 동기를 맞추기 위하여 엔진의 캠축에 설치된 엔코더에서 나오는 A펄스와 Z펄스를 이용하여 동기신호로 사용하였다. A펄스는 카운터 회로의 클럭 신호로 사용하였고, Z펄스는 카운터 회로의 게이트 신호로 사용하였다. Z펄스를 게이트 신호로 변환하기 위하여 DG535를 이용하였다. 사용한 카운터는 인텔 8253칩(Timer/Counter chip)이 내장된 DARIM보드를 이용하였고, 카운트를 위하여 Turbo C로 프로그래밍하여 원하는 크랭크 각도(Crank Angle, 이하 CA로 표기)에서 화상취득이 가능하도록 하였다. 화상을 취득하기 위하여 화상증폭장치가 내장된 I-CCD(V-Tek) 카메라를 사용하였다.

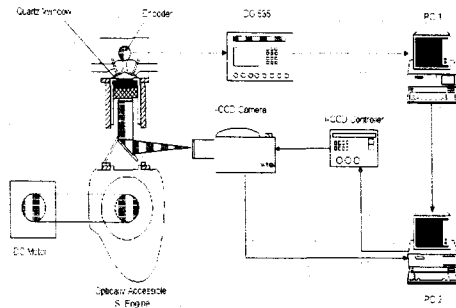


Fig.1 Schematic diagram of image acquisition system

Fig. 2는 본 연구에 사용된 엔진연소실 내의 흡·배기포트와 스파크 플러그의 위치를 보여주고 있는 것으로 전형적인 2-밸브 형태의 연소실내부의 형태를 취하고 있다. 본 실험에 사용된 엔진은 2-밸브 엔진으로 스파크 플러그는 화상의 왼쪽 중단부에 위치하고 있고, 흡기포트

는 화상의 아래쪽에 배기포트는 위쪽에 위치하고 있다.

본 실험의 실험조건을 Table 2에 나타내었다. 실험은 공기과잉률과 점화시기, 그리고 회전수를 변화시켜 가며 행하였다.

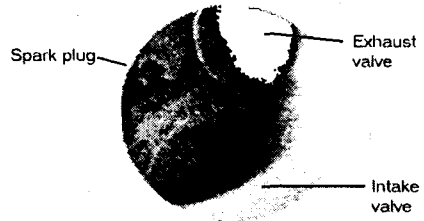


Fig.2 Schematic diagram of spark plug, intake and exhaust valve position (D=50mm)

Table 2 Experimental conditions

	Conditions
Engine speed (rpm)	700, 900
Ignition timing	5, 15, 25° bTDC
Air excess ratio (λ)	1.0, 1.1, 1.2

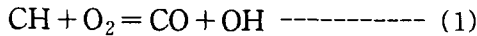
2.2.2 연소라디칼 계측

연소반응은 혼합기가 분해되면서 발생하는 중간생성물, 즉, 라디칼에 의해 지배된다. 반응영역이나 반응기구를 효과적으로 구명하기 위하여 OH, CH, 그리고 C₂와 같은 라디칼 발광강도를 측정하면 편리하다.

본 연구에서는 가시화엔진에서 라디칼 강도와 공기과잉률과의 상관관계를 밝히기 위하여 평균 라디칼 강도를 구하여 이와 공기과잉률과의 관계를 밝히고자 하였다.

먼저 라디칼 생성기구에 관해서 OH라디칼은 상대적으로 긴 수명을 가지고 있기 때문에 연소가스 중에 넓게 분포하고

있고, OH 자발광은



인 반응에서 OH라디칼이 $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$ 로 천이될 때 발하는 (0,0), (1,0), (1,1) 밴드의 발광이 대부분이고, 그 발광 강도는 CH라디칼의 농도에 관계되며, 특히 연소반응영역을 중심으로 높게 나타난다.

또, CH 자발광은



인 반응에서 생긴 CH라디칼이 $A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi$ 로 천이할 때 발하는 (0,0) 밴드의 발광이 주이고, 그 발광강도는 C_2 라디칼농도에 비례하고, 주로 탄화수소의 초기반응 영역에서 관찰된다.

C_2 라디칼의 자발광은, C_2 라디칼이 $A^3\Pi_g \rightarrow X^2\Pi_u$ 로 천이할 때 발하는 (0,0) 밴드(일명 Swan밴드)의 발광이 대부분이고, CH와 C_2 라디칼의 자발광 강도비는 공기과잉률과 강한 상관을 가지고 있다고 보고되고 있다. 이것은 탄화수소화염에서 C_2 라디칼은 점화에 앞서 연료의 염전반응인 냉·흑염(Cool and dark flame)에 의해 생기는 초기 분해과정에서 발생되며, 연이어 CH라디칼이 발생되기 때문이다. 따라서 라디칼 자발광은 반응에 관한 풍부한 정보를 가지는데, 특히 연소반응영역과 연소장내의 국소 당량비분포를 예측하는데에 적합하다.^{(11),(12)}

Fig. 3는 평균라디칼 자발광계측을 위한 측정계이다. 광학계는 세종류 라디칼 자발광을 동시에 검출할 수 있도록 구성하였다. 화학발광은 집광렌즈($f=200\text{mm}$)로 집광되어, 근자외역의 광은 DM1(99% OH reflection, $T_{\text{max}} : 80\%$)에 의해 반사되고, 가시역에서 근적외역까지의 광은 투과된다. 투과된 광은 DM2(97% CH reflection, $T_{\text{max}} : 80\%$)에 의해 반사되어

C_2 밴드를 포함한 광만이 투과된다. 분리된 근자외역 및 가시역의 화염발광은 각각 결상점에 위치한 핀홀과 간섭필터를 통하여 광전자증배관(R106UH, 1P28A, Hamamatsu)에서 검출된다. 실험에 사용된 라디칼 간섭필터의 제원을 Table 3에 나타내었다.

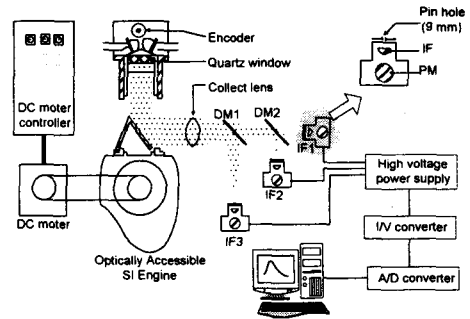


Fig.3 Schematic diagram of combustion radical acquisition system

Table 3 Specifications of interference filter

	λ_{max} (nm)	$\lambda_{1/2}$ (nm)	T_{max} (%)
IF1 (C_2)	516.7	1	56.9
IF2 (CH)	431.5	1.7	47.9
IF3 (OH)	310.2	14.9	18.8

3. 결과 및 고찰

3.1. 화염 가시화

Fig. 4는 공기과잉률 1.0, 점화시기 5, 15 그리고 25° bTDC에 대한, 회전속도 700rpm조건에서 CA 10° 단위로 점화 후 CA 5° 부터 CA 25° 까지 촬영한 화염의 전파사진이다. 화염은 점화 후 CA 5° 부근에서 어느 정도 성장되어 있음을 볼 수 있다. 점화시기에 따라 화염은 거의 비슷하게 전파되고 있음을 볼 수

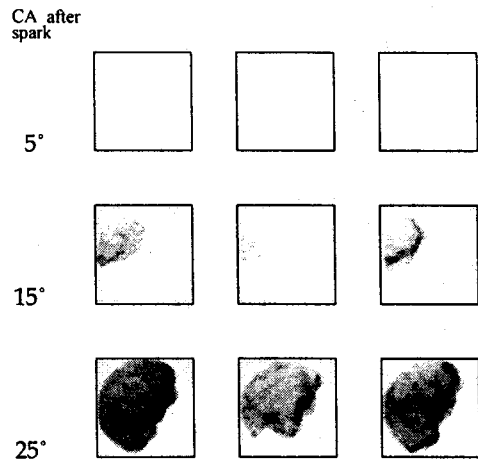
있다. 화염은 점화 초기부터 유동에 의해 약간 찌그러진 상태로 전파되고 있음을 알 수 있다. 화염이 찌그러진 형태로 성장하는 것은 흡입행정시 형성된 스월 유동이 압축과정을 거치면서 대부분 작은 크기의 난류로 소산되나, 약화된 스월 유동이 점화플러그 근방에서 배기밸브 방향의 유동성분을 갖게됨으로써, 화염의 방향을 배기 쪽으로 치우치게 한 것으로 보인다.

Fig. 5는 점화시기 5, 15 그리고 25° bTDC에 대한, 회전속도 900rpm조건에서 CA 10° 단위로 점화 후 5° 부터 25° 까지 촬영한 화염의 전파사진이다. Fig. 4와 유사한 형태의 화염화상을 보이고 있다.

3.2. 점화시기의 변화에 따른 화염전파 비교

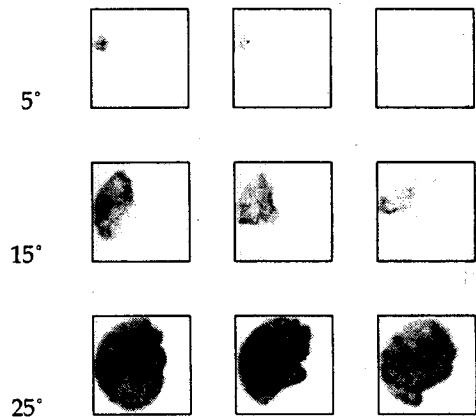
Fig. 6은 회전수 700rpm인 경우 점화시기 변화에 따른 점화 후 CA 5° 마다의 화상 데이터로 부터의 전체 화상면적에 대한 실제 화염의 크기 백분율을 나타내고 있다. 화상데이터로부터 화염의 전파속도가 bTDC 5° 인 경우가 가장 빠르게 나타나고 있음을 볼 수 있고, bTDC 15°, bTDC 25° 는 거의 비슷하게 성장되고 있음을 알 수 있다. 또한 점화 후 15° 까지는 화염의 성장이 느리게 진행되다가 15° 이후에는 빠르게 성장하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 회전수 900rpm인 경우 점화시기 변화에 따른 점화 후 CA 5° 마다의 화상 데이터로 부터의 전체 화상면적에 대한 실제 화염의 크기 백분율을 나타내고 있다. Fig. 6과 마찬가지로 점화 후 15° 까지는 완만한 성장을 보이다가 15° 이후 빠르게 성장하고 있음을 볼 수 있다.



(a) 5 bTDC (b) 15 bTDC (c) 25 bTDC

Fig.4 Flame propagation images at each spark timing of 700rpm



(a) 5 bTDC (b) 15 bTDC (c) 25 bTDC

Fig.5 Flame propagation images at each spark timing of 900rpm

Fig. 6과 7로부터 화염면적을 기준으로 한 점화 후 CA에 따른 화염면적의 크기 비교에서는 각 CA에 따라 큰 차이를 보이지 않는데, 이는 가시화창으로 관측되는 화염이 실제 3차원 화염을 2차원적으로 나타냄으로써 화염이 실린더 벽면에 도달하고 나면 화염의 크기의 차이를 나

타낼 수 없기 때문에 화염의 초기 부분에 대한 결과이기 때문이라 생각되어진다.

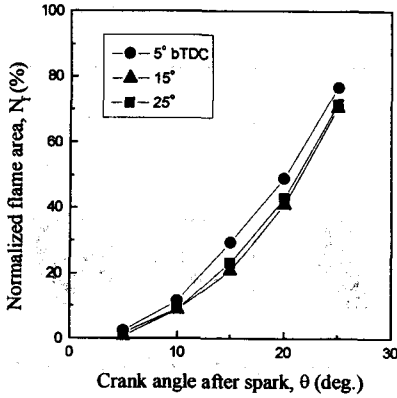


Fig.6 Comparison with flame areas by spark timing at 700rpm

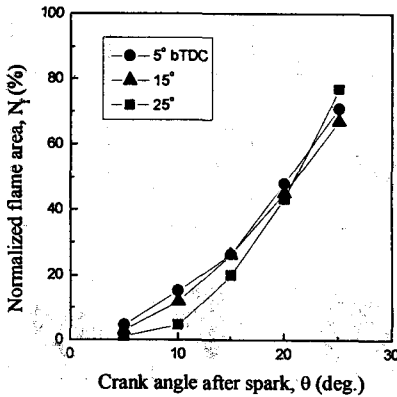


Fig.7 Comparison with flame areas by spark timing at 900rpm

3.3. 공기과잉률에 따른 연소특성

엔진내의 연소는 점화시기 및 분사시기 그리고 연료와 공기 혼합기의 공기과잉률에 따라 그 특성이 달라진다. 이에 공기과잉률에 따른 엔진의 연소특성을 파악하기 위하여 공기과잉률을 1.0에서부터 1.2까지 변화시켜 각 조건에 대한

압력을 취득하였다.

Fig. 8은 점화시기 25° bTDC, 엔진 회전수 700rpm인 경우 공기과잉률에 따른 압력선도를 나타내고 있다. 공기과잉률 1.0에서 가장 높은 압력값을 보이고 희박한 조건인 과잉공기률이 높아질수록 압력값은 낮아지고 있다.

Fig. 9는 점화시기 25° bTDC, 엔진회전수 900rpm에 있어서의 공기과잉률에 따른 압력선도를 나타낸다. Fig. 8과 비교하면 압력의 증가가 현저히 증가되고 있고 또한 압력의 상승률 또한 증대되고 있음을 볼 수 있다. 공기과잉률 변화에 대한 값은 Fig. 8과 마찬가지로 희박할수록 낮아지고 있다.

Fig. 8과 9에서 열발생률을 살펴보면 공기과잉률이 1.0일 경우 열발생률이 가장 빠르게 나타나고 빨리 끝나는 것을 알 수 있다. 이는 공기과잉률이 1.0인 조건에서 다른 조건에 비해 연소가 가장 빠르게 진행되고 있음을 보여주고 있다.

3.4. 공기과잉률조건에 따른 라디칼 발광강도

Fig. 10에 점화시기 25° bTDC, 700rpm 일 때 점화 후 발생하는 각종 라디칼들의 강도를 공기과잉률에 따라 나타내고 있다. 이들 라디칼 강도로부터 OH라디칼이 연소반응후 종료시까지 가장 넓게, 그리고 가장 강한 분포를 하고 있음을 알 수 있고, 다른 라디칼에 비해 공기과잉률의 영향을 상당히 크게 받고 있는 것을 알 수 있다. 또한 라디칼의 피크값은 압력에 비해 CA 3° 에서 8° 정도 당겨져 있다. 이는 최대연소반응과 최대압력작용 사이의 물리적인 지연이 있음을 보여주며 공기과잉률이 높을수록 라디칼 및 압력의 피크값은 지연되고 있음을 보여주고 있다. Fig. 11은 Fig. 10에서 구해

진 각 라디칼들의 강도를 평균하여 상대 강도비로 표시한 것이다. C₂라디칼을 기준 강도로 하여 나머지 두 라디칼의 강도에 대한 비를 구하여 공기과잉률 조건에 따라 나타낸 그림이다.

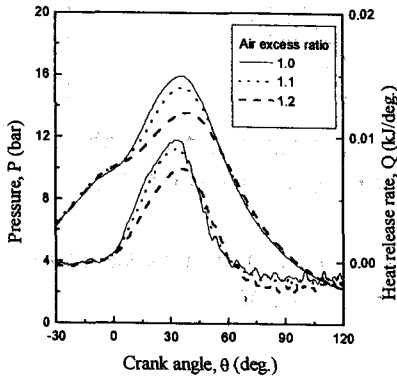


Fig.8 Comparison with cylinder pressure and heat release rate by air excess ratio at 700rpm, 25° bTDC spark timing

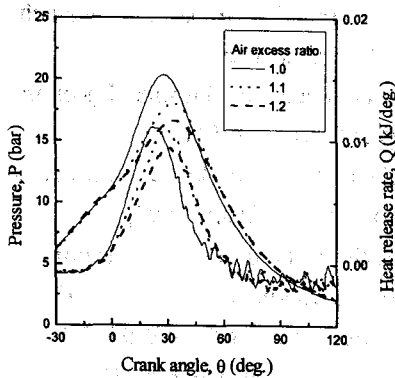


Fig.9 Comparison with cylinder pressure and heat release rate by air excess ratio at 900rpm, 25° bTDC spark timing

Fig. 11로부터 라디칼 강도를 기준으로 하여 공기과잉률에 따른 라디칼 강도비

를 표시할 경우 공기과잉률과 라디칼 강도비 사이에는 선형적인 비례관계가 성립되고 있어서 공기과잉률 사이에 강한 상관관계가 있음을 확인할 수 있었다.

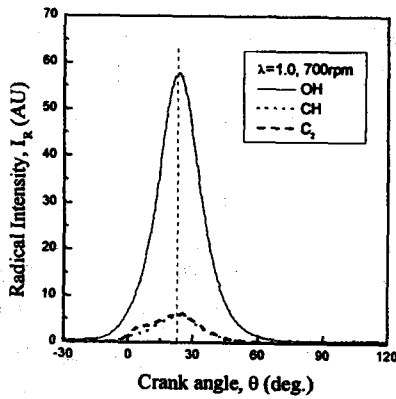
4. 결론

가시화된 가솔린엔진을 이용하여 점화시기 및 회전속도 등의 실험조건에 따라 각 사이클에 대한 연소순간화상과 압력 그리고, 연소라디칼을 취득하였다. 연소순간화상과 압력데이터를 비교 분석함으로써, 점화시기 및 회전속도가 화염의 생성 및 전파에 미치는 영향을 조사하고, 라디칼 자발광을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

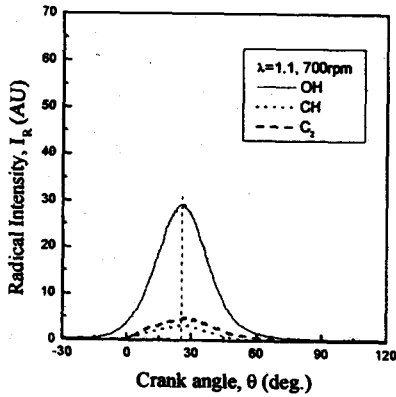
- 1) 흡입과정에서 생성된 스월유동이 압축말기까지 남아서 화염의 성장에 영향을 미침으로써 화염이 배기 쪽으로 밀려서 성장하는 것을 관찰할 수 있었다.
- 2) 공기과잉률이 1.0인 경우가 1.1과 1.2에 비해 연소최고압력은 높아지고 화염전파속도는 빨라진다.
- 3) 라디칼의 상대강도비를 계산한 결과, 공기과잉률과 라디칼 상대강도비와는 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다.

후기

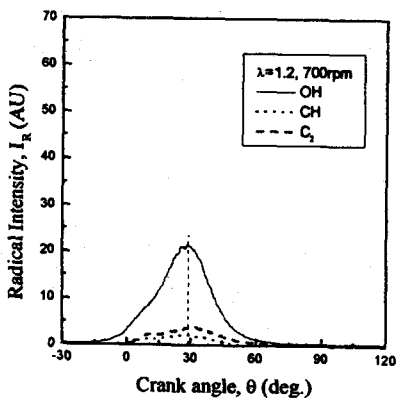
본 연구는 1997년도 교육부 학술연구 조성비(ME-97-F-07)에 의해 지원 수행되었으며, 이에 감사드립니다.



(a) $\lambda = 1.0$



(b) $\lambda = 1.1$



(c) $\lambda = 1.2$

Fig.10 Relative radical intensity

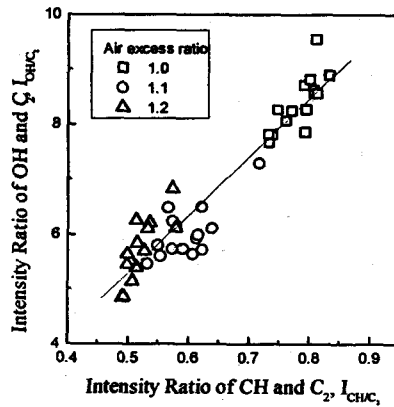


Fig.11 Radical intensity ratio(C_2 base) at 700rpm, 25° bTDC

참고문헌

- (1) J. Harada, T. Tomodita, H. Mizuno, Z. Mashiki, and Y. Ito, 1997, "Development of Direct Injection Gasoline Engine," *SAE 970540*.
- (2) Y. Iwamoto, K. Noma, T. Yamauchi, and O. Nakayama, 1997, "Development of Gasoline Injection Engine," *SAE 970541*.
- (3) T. Tomoda, S. Sasaki, D. Sawada, A. Saito, and H. Sami, 1997, "Development of Direct Injection Gasoline Engine-Study of Stratified Mixture Formaton," *SAE 970539*.
- (4) Lee Kyung-hwan and E.F. David, 1995, "Cycle-by-Cycle Variation in Combustion and Mixture Concentration in the Vicinity of Spark Plug Gap," *SAE 950814*.
- (5) D.E. Nicholson and P.O. Witze, 1993, "Flame Location Measurements in a Production Engine Using Ionization Probes Embodied in a Printed Circuit

- Board Head Gasket," *SAE* 930390.
- (6) Y. Bianco, Y. Cheng, and J.B. Heywood, 1989, "The Effect of Initial Flame Kernel Conditions on Flame Development in SI Engine," *SAE* 890991.
- (7) Akihisa Nakamura, Kiyoshi Ishii and Takashi Sasaki, 1993, "Application of Image Converter Camera to Measure Flame Propagation in S.I. Engine", *SAE* 930322.
- (8) James C. Keck and John B. Heywood, 1987, "Early Flame Development and Burning Rates in Spark Ignition Engine and Their Cyclic Variability", *SAE* 870164.
- (9) L. Zhang, T. Ueda, T. Takatsuki and K. Yokota, 1994, "A Study of the Cycle-to-Cycle Variation of In-Cylinder Flow on a Motored Engine", *COMODIA*, pp.541~546.
- (10) 김주영, 최수진, 전충환, 장영준, 주영철, 1997, "단기통 가솔린 엔진을 이용한 연소가시화", 한국자동차공학회 1997년도 춘계학술대회논문집, pp.29~34.
- (11) 伊藤, 本望, 宋, 五味, 1994, "ラジカルの發光強度による瞬時空燃比の計測", 日本機械學會(B編), 52巻 481号, pp.3362~3371.
- (12) C. H. Jeon, S. J. Choi, H. J. Park, Y. J. Chang, 1994, "Combustion Analysis by Radical Intensity Measurement and Instantaneous Image in a Constant-Volume Chamber", *COMMODIA*, pp.459~464.