

스월 유동이 직분식 디젤엔진 내의 Soot 분포에 미치는 영향에 관한 연구

정재우* · 이기형[†] · 이창식** · 박현중***
(2001년 7월 10일 접수, 2001년 12월 3일 심사완료)

A Study on the Effects of the Swirl Flow on the Distribution of Soot in the D.I. Diesel Engine

Chung Jae-woo, Lee Ki-hyung, Lee Chang-sik and Park Hyun-jong

Key Words: Laser Induced Incandescence Method(LII법), Laser Induced Scattering Method(LIS법),
D.I. Diesel Engine(직분식 디젤엔진), Swirl Control Valve(스월 제어밸브)

Abstract

Recently, many researches have been performed to improve performances of the combustion and emission in the D.I. Diesel engine. Especially reduction of the soot formation in the combustion chamber is the essential to acquire the improvement of the emission performance. These emission of the diesel combustion is effected by the characteristics of air-fuel mixing. Thus, in this study, the distribution of soot in the diesel combustion is measured by LII(laser induced incandescence) and LIS(Laser induced scattering) method. From this experimental results, it is confirmed that the swirl flow intensified by SCV(swirl control valve) is effective on the reduction of soot in the combustion chamber.

기호설명

A : 밸브시트단면적
B : 실린더 직경
 C_F : 유량계수
D : 입자지름
 I_{sca} : Mie 산란 광강도
 I_{LII} : LII 신호 광강도
L : 밸브 리프트
 L_{max} : 최대 밸브 리프트
 L_{non} : 무차원 밸브리프트
N : 입자수밀도

N_R : 무차원 스월비
Q : 통과체적유량
 V_0 : 속도수두
 ω_R : 스월각속도

1. 서론

최근 CO₂ 저감기술로서 주목을 받고 있는 직분식 디젤 엔진은 연소실내의 국부적인 연료와 공기의 불균일 혼합을 유발시켜 soot 등과 같은 입자상 배기 물질의 생성을 생성할 가능성이 있는 것으로 알려져 있다.

이러한 배기 생성물질의 저감은 디젤 엔진의 성능향상에 있어서는 필수적인 핵심과제라고 할 수 있으므로, 엔진 연소실 내의 soot 계측을 위한 시도가 꾸준히 이루어지고 있으며, 그 중 soot 분

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과.

E-mail : hylee@hanyang.ac.kr

TEL : (031)400-5251 FAX : (031)406-5550

* 회원, 한양대학교 BK21 Post-Doc.

** 한양대학교 대학원 기계공학과

Table 1 Specifications of the visualization engine

Engine type	D.I. diesel single cylinder	Displacement volume	673cc
Combustion chamber	Bowl-in-piston	Compression ratio	17
Bore× Stroke	95× 95(mm)	No. of Intake valve	1
Nozzle hole number	5	Injection pressure	160bar

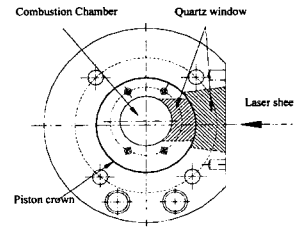
포의 가시화 기법으로서 LII법(Laser induced incandescence method)과 LIS법(Laser induced scattering method)을 이용한 연구가 꾸준히 수행되고 있다.

LII 및 LIS기법을 사용한 기존의 여러 연구를 살펴보면 Shoji⁽¹⁾는 LII를 디젤 엔진 내부연소의 soot 가시화에 사용하였으며, Dec⁽²⁾은 LIS기법을 이용하여 디젤 화염내부의 단면에 존재하는 soot를 가시화 하였으며, 최근에는 LII를 직분식 디젤 엔진에 적용하여 디젤 화염 단면에서의 soot분포를 가시화 하는데 성공하였다. Pinson은 LII와 LIS의 동시 계측법을 이용하여 정량적인 soot의 입경과 수밀도를 분석할 수 있는 방법을 제시하였으며, Dec⁽³⁾은 LII를 이용하여 분사압력에 따른 디젤 엔진내의 soot의 상대밀도를 측정하였다. 국내에서도 LII 및 LIS를 이용한 연구⁽⁴⁻⁷⁾가 수행되어 많은 연구자들이 디젤 엔진내의 soot관측에 이러한 기법을 사용하였다. 그러나 이러한 적용들은 LII 및 LIS 기법의 개선 및 단일 분사시기에서의 soot 분포 특성 등에 관한 연구이므로, 본 연구에서는 선행연구자들의 연구결과와 실험 방법을 토대로 하여 LII 및 LIS법을 사용함으로써 좀 더 다양한 운전 조건 특히 분사시기와 스윙 강도변화에 따른 soot 분포 특성을 정성적으로 파악하였다.

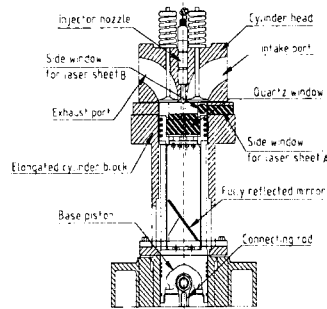
2. 실험장치와 방법

2.1 가시화 엔진시스템

실험의 사용된 가시화엔진의 주요 제원을 Table 1에 나타내었으며, Fig. 1에는 가시화 엔진의 관측창 구조와 단면도를 나타내었다.



(a) Shape of the optical window



(b) Cross section of a visualization engine

Fig. 1 Visualization engine

가시화 영역은 연소실에 해당하는 보울(bowl)의 내부이며, 연료분사는 전자 제어가 가능한 직분식 연료 분사 시스템 (COPEC system, ZEXEL)을 장착하여 분사시기를 조정하였다.

2.2 Soot 분포 및 가시화 방법

본 연구에서는 연소실내의 액적 및 soot분포를 가시화하기 위하여 LII법과 LIS법⁽⁸⁻¹⁰⁾을 적용하였다.

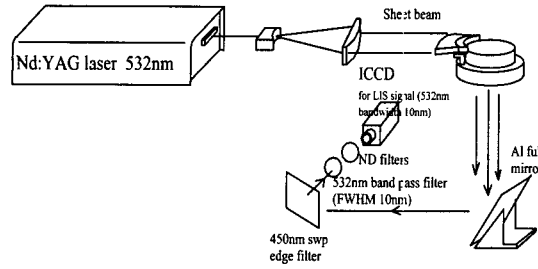
LIS법은 주로 디젤 엔진내의 분무 및 soot의 분포를 가시화 하는데 사용되어왔다.

레이저 쉬트광이 분무 연소의 soot입자에 조사되었을 때, Rayleigh의 산란 이론에 따라 탄성 산란광을 발산하며, 산란 광강도 I_{sca} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

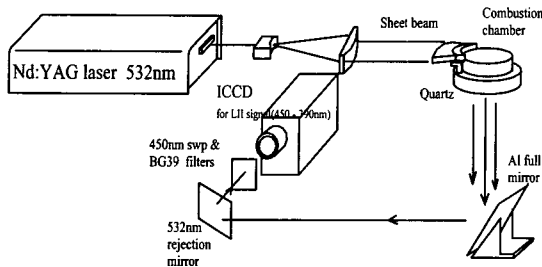
$$I_{sca} \propto D^6 N \quad (1)$$

레이저 쉬트 빔에 의하여 조사된 soot입자는 LIS 신호 즉, 탄성산란의 신호이외에도 조사된 레이저 광의 에너지를 흡수하여 자신의 온도를 높이는데 이용한다.

LII 신호는 레이저 쉬트에 의하여 가열된 soot



(a) Array of optics for LIS test



(b) Array of optics for LII test

Fig. 2 Schematic of LIS and LII optical system

입자의 복사열(heat radiation)이 모여져 얻어진다. LII신호의 강도 I_{LII} 는 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$I_{LII} \propto D^3 N \quad (2)$$

두 신호의 비교에 있어서 LIS 신호는 입자지름의 6승에 비례하며, LII신호는 입자지름의 3승에 비례하므로, LIS 신호는 LII신호보다 강한 신호를 획득할 수 있으나, 액적에 의한 신호까지도 취득되게 된다.

다음의 Fig. 2는 본 연구에서 구축된 LIS 및 LII 법을 적용한 액적 및 soot 분포 측정 실험 장치이다. Nd:YAG 레이저는 2차 고주파 영역인 532nm의 파장으로 고정되었으며, 각 장치의 광학계는 Table 2에 나타내었다.

LIS법을 이용한 실험시는 LII 신호의 제거를 위하여 레이저의 광량을 줄여서 실험을 수행하였으며, 가시화 실험 등을 위한 연소실험시 실험 조건은 엔진회전속도 400rpm, 그리고 A/F는 48이었다.

Table 2 Optics of systems

	LIS	LII
Energy of laser (W/cm^2)	1.0×10^7	1.78×10^7
Size of sheet (Width×height)	6cm×0.3mm	
Optics (Filters & mirror)	<ul style="list-style-type: none"> • 450nm SWP • 532 band pass (FWHM 10nm) 	<ul style="list-style-type: none"> • 532 rejection mirror • BG 39 filter • 450 SWP
Gate time (ICCD)	100ns	20ns

2.3 스웰 유동의 생성

본 연구에서 제작한 SCV 형상은 원형이며, 흡기관내 유동을 관로 중의 한쪽으로 편중시켜 스웰 유동을 생성시키도록 장착되었다

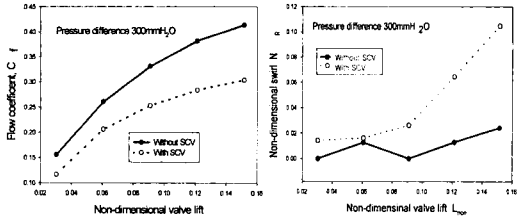
SCV를 부착한 경우, 스웰 유동의 생성을 확인하기 위하여 정상유동실험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 정상유동 실험⁽¹¹⁾은 실험대상 엔진 흡기계의 유동 발생 소질 및 흡입능력 소질을 조사하는 가장 대표적인 실험 방법이며, 본 연구에서는 일정차압법의 실험 방법을 사용하였다. 정상유동 실험 결과로서 무차원밸브 리프트에 대한 유량계수와 무차원밸브 리프트에 대한 무차원 스웰비등을 얻을 수 있으며, 각각의 수식은 식 (3)과 (5) 사이에 나타내었다.

$$L_{non} = \frac{L}{L_{max}} \quad (3)$$

$$C_F = \frac{Q}{A \cdot V_o} \quad (4)$$

$$N_R = \frac{\omega_R \cdot B}{V_o} \quad (5)$$

실험결과의 제공시에 모든 실험 결과를 무차원 밸브리프트에 대하여 나타내는 것은 대상 실험엔진 밸브계의 제원에 제약받지 않고 다른 엔진의 흡기계와 비교를 수행하기 위한 비교척도를 제공하기 위함이다. 흡입되는 공기가 밸브계를 통과할 때 그 유동특성은 유로의 상대적인 크기, 즉 밸브시트부의 길이와 밸브리프트의 비에 의하여 결정되어지며⁽¹²⁾ 따라서 대부분의 정상유동 실험 결과는 무차원 밸브리프트에 대하여 표시되어진다.



(a) Flow coefficients (b) Non-dimensional swirl

Fig.3 Results of steady flow test

실험 결과 중 무차원 스윙비는 엔진으로 흡입 되는 공기 유속에 대한 연소실내의 스윙 회전 유속의 비를 나타낸다.

실험결과 SCV를 부착하는 경우에 흡입 저항이 증대되어 흡입 유량이 저하되는 현상을 보이고 있으나, 모든 밸브리프트에서 무차원 스윙비가 향상되는 사실을 확인할 수 있었다.

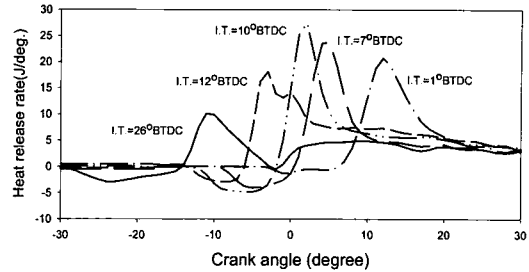
3. 실험 결과 및 해석

3.1 분사시기에 따른 연소 특성

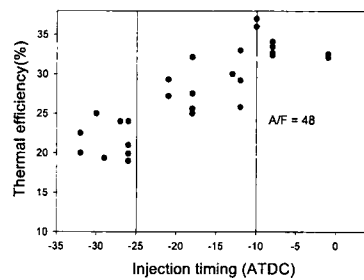
본 연구에서는 분사시기 변화 그리고 스윙유동의 유무에 따른 soot분포 특성을 파악하는 것을 목적으로 하고 있으므로, 실험용 엔진의 분사시기변화 그리고 스윙 강도 변화에 따른 연소특성을 분석할 필요가 있다.

다음의 Fig. 4에는 분사시기 변화에 대한 열발생률과 열효율 특성을 보여주고 있다. 결과에 나타난 열효율은 연소기간동안의 열발생률 적분 결과를 전체 발생 열량으로 하고 이를 공급되는 연료의 전체열량으로 나누어 준 값을 의미한다.

결과에서 보여주듯이 분사시기가 지연됨에 따라 최대 열발생률은 증가되는 경향을 보이다가 분사시기가 상사점전 10° 인 경우를 지나면서 최대 열발생률이 저감되는 경향의 변화를 나타내고 있다. 이와 같은 분사시기 변화에 따른 열발생률 결과와 열효율 결과로부터 분사시기 10° 정도를 전후하여 본 실험에 사용된 엔진의 연소 특성 및 연료 공기의 혼합 특성이 변화됨을 확인할 수 있었다. 이러한 특성을 고려하여 스윙 유동에 의한 열발생률 및 가시화 실험의 분사시기는 상사점전 12°, 9° 의 2가지 경우를 선정하여 실험을 수행하였다.



(a) Heat release rate(I.T=Injection Timing)



(b) Thermal efficiency

Fig. 4 Heat release rates and thermal efficiency with the injection timing

3.2 스윙에 의한 연소율 특성

이렇게 선정된 분사시기에서 스윙을 강화시킨 경우의 연소 특성을 고찰하기 위하여 연소율 해석을 수행하였다.

다음의 Fig. 5에는 상사점전 12°, 9° 에서의 스윙 변화에 대한 연소율 결과를 나타내었다.

스윙의 영향은 분사시기 변화에 따라 약간씩 차이를 나타내고 있다. Table 3에는 SCV가 부착되전에 대하여 SCV가 부착된 후의 열발생률의 증가 또는 감소를 비교하여 나타내었다.

Fig.5(a)의 상사점 전 12° 분사의 경우, SCV의 장착은 TDC 직전에는 최대 열발생률이 저감시키는 반면, TDC 이후에는 열발생률이 상대적으로 상승하는 경향을 보여주고 있다.

분사시기를 지연시킨 상사점전 9° 분사시(Fig.5의 (b))는 거의 대부분의 열발생이 TDC 이후에 이루어지며, SCV 부착시의 최대 열발생률과 약 10° 까지의 열발생률이 상승되는 결과를 보여주고 있다. 이러한 현상은 동일한 초기 스윙 조건이라 하더라도 피스톤의 운동으로 인하여 TDC 직전에 최대의 스윙 유속을 가진다고 알려져 있는 스윙 유동의 특성에 기인한 것으로 생각된다.^(13,14)

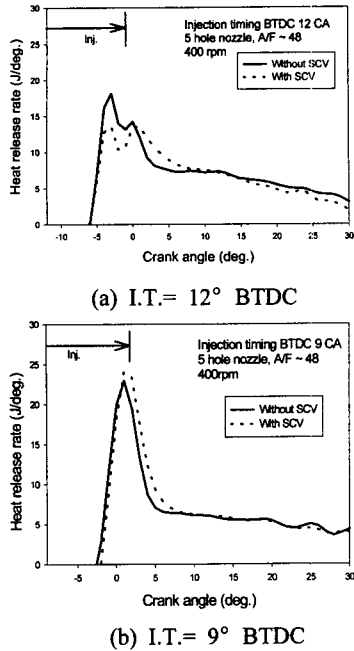


Fig. 5 Comparison of heat release rates with SCV (I.T.= injection timing, Inj.=injection duration)

Table 3 Effects on the heat release rate of swirl

Injection timing \ CA	TDC 직전 (-5° ~ TDC)	TDC 직후 (TDC ~ 10°)
12° BTDC	↓ (21.66%)	↑ (12.58%)
9° BTDC		↑ (12.96%)

* Heat release rate decrease(↓) or increase(↑).

즉, TDC 직전의 분사와 압축시 빨라진 스윙 유속은 TDC 직전의 연료와 공기의 혼합을 촉진시키며, 본 실험에서의 혼합의 촉진은 예혼합 연소기간 중의 연료의 농도를 희박하게 하는 효과가 있는 것으로 고려된다.^(15,16) 그러나 이러한 혼합은 TDC 이후의 연소에서 열발생률을 향상시키는 결과를 나타내고 있다고 여겨진다.

이상과 같은 실험 결과를 고려하면 연료와 공기의 혼합 및 연소에 스윙의 영향을 가장 많이 받는 분사시기는 상사점전 12° 인 사실을 알 수 있다.

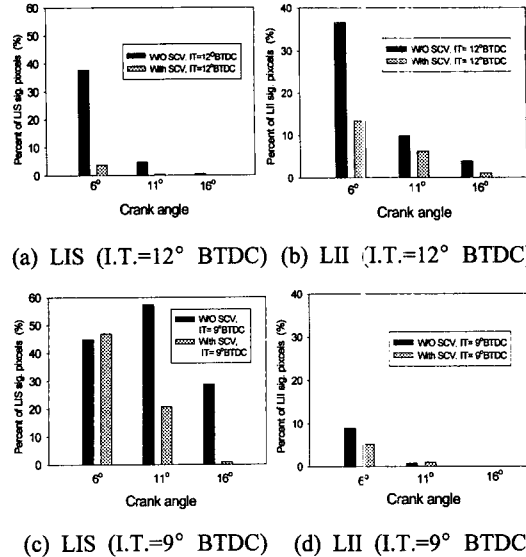


Fig. 6 Percent of pixels LII and LIS to total pixels of the visualized images (I.T. = Injection Timing)

3.3 LII 및 LIS 실험 결과의 고찰

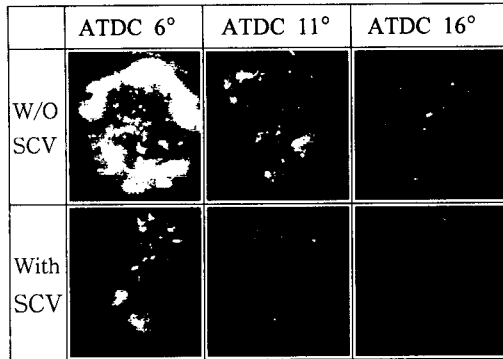
LII 및 LIS 법의 실험시 촬영 시기는 모든 분사시기 조건에 대하여 상사점 후 6°, 11°, 16° 로 하였으며, 가시화 결과를 분석하기 용이하게 하기 위하여 화상 처리 작업을 수행하였다.

이후 LIS 및 LII 신호 분포의 대소를 평가하기 위하여, 화상의 전체 픽셀에 대한 신호발생 픽셀 수를 백분율로 나타내어 Fig. 6에 나타내었다. 또한 LIS 가시화 화상은 Fig. 7에 나타내었으며, LII 가시화 결과는 Fig. 8에 나타내었다

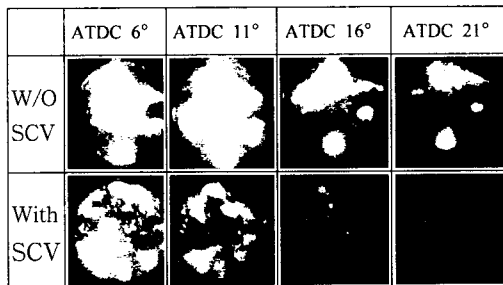
Fig. 6과 Fig. 7의 LIS 결과에서 분사시기 지연에 따라 연료 입자 신호를 포함하는 LIS 신호는 뚜렷하고, 보다 넓은 영역에서 나타남을 알 수 있으며, 오랜 발생기간을 가지는 것을 확인할 수 있다.

즉, 분사시기의 지연은 연료와 공기의 혼합시간의 저감을 의미하므로 동일한 촬영 크랭크 각도에서는 더욱 넓은 LIS 신호를 나타내는 것으로 간주된다.

그러나 SCV를 부착하여 스윙을 강화시킨 경우에는 LIS 신호가 나타나는 영역이 SCV 부착전에 비하여 감소하고 있다. 또한 SCV 부착에 의한 효과가 가장 크게 나타나는 분사시기는 (a)의 상사점전 12° 인 사실을 알 수 있다.



(a) I.T.= 12° BTDC



(b) I.T.= 9° BTDC

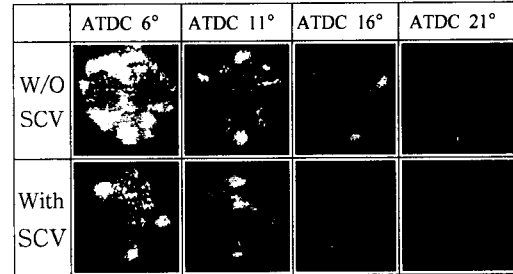
Fig. 7 Visualization results obtained by LIS
(I.T.=Injection Timing)

이에 반하여 Fig. 6과 Fig. 8의 soot 분포를 나타내는 LII 신호의 촬영 결과에서는 분사시기의 지속적인 지연에도 불구하고 Fig. 8의 (a)에 나타난 상사점전 12° 분사에서의 분포가 다른 분사시기의 LII 신호의 분포보다 더욱 크게 나타나며 오래 지속되는 결과를 보여주고 있다. 하지만 이 분사시기에서의 SCV의 부착은 soot의 저감 효과를 가장 크게 나타내고 있음을 알 수 있다.

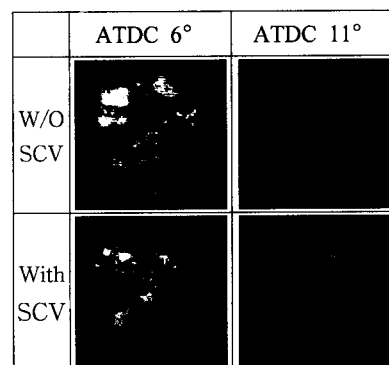
이러한 분사시기 지연시의 soot 분포 경향의 변화는 상사점전 9° 분사시의 열효율의 저감(Fig. 4의 (b)참조), 즉 연소의 불량에 기인하는 것으로 생각되며, Fig. 5의 열발생을 결과에서 알 수 있는 바와 같이 LIS 및 LII 법의 가시화 결과에서도 상사점전 12° 분사에서 가장 큰 스윙의 효과가 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

이상과 같은 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.



(a) I.T.= 12° BTDC



(b) I.T.= 9° BTDC

Fig. 8 Visualization results obtained by LII
(I.T.=Injection Timing)

(1) LIS법과 LII법의 적용을 통하여 직분식 디젤 엔진내의 soot 및 액적 분포의 가시화를 수행할 수 있었다.

(2) 분사시기가 지연될수록 연료 공기 혼합 시간의 저감으로 인하여 동일한 촬영 각도에서 액적신호인 LIS 신호가 더욱 폭넓고, 오랫동안 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 스윙이 생성 될 경우 스윙에 의한 영향으로 기화가 촉진되어 연료 액적의 양이 줄어들 뿐만 아니라, 스윙의 생성에 의하여 soot 분포의 감소 효과가 있음을 알 수 있었다.

(4) 상사점전 12° 분사시기에서의 SCV의 부착은 soot의 저감 효과가 크게 나타내고 있음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적 기초 연구 사업(R01-2000-00303)과 고등인력 양성사업(BK21)의 지원에 의하여 수행된 연구 결과의 일부로서, 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) M.Shioji, K, 1990, "Characterization of Soot Clouds and Turbulent Mixing in Diesel Flames by Image Analysis," *International Symposium COMODIA 90*, pp. 613~618.
- (2) John E Dec., 1997, "A Conceptual Model of D.I. Diesel Combustion Based on Laser-Sheet Imaging," SAE970873
- (3) John E Dec. and Christoph Espey, 1995, "Ignition and Early Soot Formation in a D.I. Diesel Engine Using Multiple 2-D Imaging Diagnostics," SAE950456
- (4) 이중순, 2000, "레이저 시트법을 이용한 디젤 엔진의 Soot 농도 측정," 한국액체미립화학회지, 제5권, 제1호, pp.23~29.
- (5) 이승, 이상협, 이병준, 한재원, 2000, "레이저 유도 백열법을 이용한 화염내부 마연 농도 측정," 대한기계학회논문집 B권, 제24권, 제5호, pp. 725~732.
- (6) 이명준, 박태기, 하종률, 정성식, 2000, 레이저시트광을 이용한 가시화 디젤 엔진에서의 Soot 측정, 제1보 : 가시화 디젤엔진의 제작 및 레이저를 이용한 Soot의 2D 화상촬영, 한국자동차공학회논문집, 제8권, 제2호, pp.64~71.
- (7) 이명준, 박태기, 하종률, 정성식, 2000, "레이저시트광을 이용한 가시화 디젤 엔진에서의 Soot 측정, 제2보 : Soot 입경 분포 및 수밀도 측정," 한국자동차공학회 논문집, 제8권, 제3호, pp. 37~45.
- (8) Bulent Alatas, John A. Pinson, Thomas A. Litzinger, Domenic A.Santavicca, 1993, "A Study of NOx and Soot Evolution in a DI Diesel Engine via Planar Imaging," SAE paper No. 930973
- (9) John E.Dec, Axel O.zur Loye, Dennis L.Siebers, 1991, "Soot Distribution in a D.I. 2-D Laser-Induced Incandescence Imaging," SAE paper No. 910224
- (10) T. Kamimoto, H. Kosaka, 1996, "Imaging Diagnostics for Thestudy of Diesel Combustion," IMechE Seminar Publication 3-4 December 1996 S433/012/96 pp. 229~244.
- (11) Partington, G.D., 1980, "Analysis of Steady Flow Tests on Inlet and Exhaust Ports," *Impulse Swirl Meter Manual*, RICARDO Consulting Engineer Ltd.
- (12) 福谷 格, 1993, "機關吸氣系の設計指針:限界容積效率 (限界給氣比)曲線の豫測," 日本内燃機關學會紙, 日本内燃機關學會, 32卷, 4号
- (13) Akira Murakami, Masataka Arai, and Hiroyaki Hiriyasu, 1988, Swirl Measurements and Modeling in Direct Injection Diesel Engines," SAE paper No.880385
- (14) William J.Smith, 1996, "Estimation of Air Motion Kinetic Energy Dissipation Rates in a D.I. Diesel Combustion System," SAE paper No.960876
- (15) C. Espey, J.A.Pinson and T.A. Litzinger, 1990, "Swirl Effects on Mixing and Flame Evolution in a Research DI Diesel Engine," SAE paper No.902076
- (16) Duane L.Abata, Bradlee J.Stroia, N. John Beck, Alan R.Roach, 1988, "Diesel Engine Flame Photographs with High Ressure Injection," SAE paper No.880298