

광흡수법을 이용한 LPG 연료의 증발특성 및 연료 농도 분포에 관한 연구

김대근* · 조규백* · 오승목* · 최교남* · 정동수*

A Study on Evaporation Characteristics and Concentration Distribution of LPG fuel using Light Extinction Method

D.K. Kim, G.B. Cho, S.M. Oh, K.N. Choi and D.S. Jeong

Key Words: LPG(액화 프로판 가스), Evaporation characteristics(증발 특성), Concentration distribution(농도 분포), Light Extinction method(광 흡수법).

Abstract

Although LP gas has lots of advantages, there has been limitation in application for automotive engine due to the several disadvantages, such as power decrease, complex fuel supply unit, and back fire etc. However LP gas direct injection engine has possibility to solve the problems above mentioned.

LEM(Light Extinction Method) was employed for analysis of spacial and temporal distribution of LP gas which is directly injected into combustion chamber under various pressure and temperature conditions. The results from CVC(Constant Volume Chamber) were compared to those of RICEM(Rapid Induction, Compression and Expansion Machine) which simulate early- and late injection of direct injection engine.

LPG fuel spray is affected by temperature and pressure in evaporation characteristics but it is more benefit to direct injection engine in every way such as, fuel distribution, evaporating speed and well wetting reduction.

기호설명

- I : Light intensity
- L : Liquid phase of fuel
- V : Vapor phase of fuel
- Vis : Visible light
- U.V : Ultra Violet
- Sca : Scattering
- Abs : Absorption
- 0 : Initial intensity of light
- T : Light intensity after transmit spray

1. 서 론

* 한국기계연구원 엔진환경 그룹

연소실에 직접 연료를 분사하는 디젤기관에서는 연소특성을 개선하고 배출가스를 저감하기 위한 방법으로 연료분무의 성장, 액적 크기와 분포, 증발 특성 등을 대상으로 오랫동안 연구되어져 왔다[1-3]. 그리고 최근에는 CO₂ 규제에 대응하고 연비향상, 출력증가, 배출가스 저감 등을 위해 가솔린 기관에서도 연료를 연소실 내에 직접 분사하는 기술이 적용되고 있는 추세이며 연료 자체의 청정성 때문에 LPG나 CNG 같은 대체연료의 직분식 적용도 시도되고 있다[4-6].

직분식 전기점화 기관에서 가장 중요한 기술은 소량의 연료를 효과적으로 연소실내에 분포시켜 연소를 시키는 성층화 기술로서 연료의 효율을 높임과 동시에 출력저하를 최소화시키며 배출가스도 함께 저감시키는 것이다[4-6]. 따라서, 직분식 전기점화 기관에서도 디젤 기관과 마찬가지로

연료분무의 성장, 액적크기 및 분포 그리고 증발 특성 등이 기관의 성능을 결정하는 중요한 인자로 평가되며 이를 엔진설계에 효율적으로 반영하기 위해서 연료의 액상과 기상농도를 동시에 측정하는 기술이 필요하다.

본 연구에서는 청정연료인 LPG를 직접분사식 엔진에 적용하기 앞서 정적 연소기 및 RICEM에서 광 흡수법(LEM)을 이용하여 연료의 분무 및 증발특성을 연구하였다.

2. 광 흡수법

2.1 원리

광 흡수 법은 가시광선과 자외선의 연료 액상과 기상에 대한 흡수, 투과, 그리고 산란 특성을 이용하여 광의 투과율을 측정하여 연료의 액상 및 기상의 농도를 측정하는 기술이다[1,2].

Fig.1은 광 흡수법의 원리를 보여준다. Fig.1(a)는 연료의 액적에 의한 산란에 의해 가시광의 강도 감쇄가 일어남을 보여주며 Fig. 1(b)는 연료의 액상 및 기상에 모두 흡수되면서 광의 감쇄가 일어나는 UV광의 특성을 보여준다. 따라서 UV 화상은 연료의 액상 및 기상을 모두 포함하며 가시광 화상은 액상만 나타내기 때문에 UV 화상에서 가시광 화상을 빼면 기상의 분포를 알 수 있다. 이 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

먼저, 가시광선은 연료 액상과 기상에 의해 흡

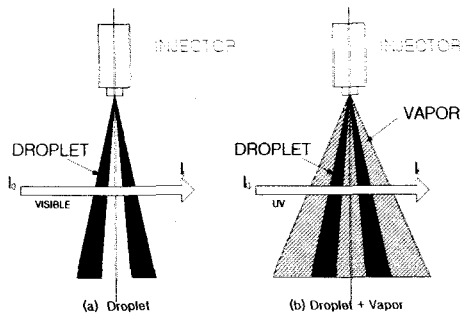


Fig. 1 The principle of light extinction method

수되지 않고 단지 액적에 의해 산란됨으로써 광의 강도가 약해진다. 따라서, 연료분무에 의한 가시광선의 투과율은 식 (1)과 같이 액적에 의해 산란되어지는 것과 같다.

$$\log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{vis} = \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)L_{sca} \quad (1)$$

자외선은 연료의 액상과 기상에 의해 흡수되어지며 연료 액적에 의해 산란되어 강도가 약해진다. 따라서, 연료분무에 의한 자외선의 투과율은 연료 액적에 의한 산란, $\log(I_0/I_t)L_{sca}$ 액적에 의한 흡수, $\log(I_0/I_t)L_{abs}$ 그리고 연료 증기에 의한 흡수, $\log(I_0/I_t)V_{abs}$ 의 합으로 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{uv} = \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)L_{sca} + \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)L_{abs} + \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)V_{abs} \quad (2)$$

여기서, 액적에 의한 흡수, $\log(I_0/I_t)L_{abs}$ 는 연료 증기에 의한 흡수, $\log(I_0/I_t)V_{abs}$ 에 비해 무시해도 좋을 만큼 작은 것으로 알려져 있다[1,2].

따라서, 분무에서 연료 증기의 농도는 자외선과 가시광선의 차를 이용해서 구할 수 있다. 가시광선과 자외선의 측정된 결과로부터, 연료 액적에 의한 산란으로 인한 투과율, $\log(I_0/I_t)L_{sca}$ 은 식(3)과 같이 나타난다. 가시광선과 자외선의 투과율 차로부터 연료 증기의 흡수에 의한 투과율, $\log(I_0/I_t)V_{abs}$ 은 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$\log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)L_{sca} = \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{vis} \quad (3)$$

$$\log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)V_{abs} = \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{uv} - \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{vis} \quad (4)$$

2.2 LPG 연료

LPG연료는 대부분 프로판과 n-부탄, 그리고 iso-부탄으로 구성되어 있으며, 이들의 조성비는 지역에 따라, 계절에 따라, 그리고 사용목적에 따라 큰 차이가 있다. 본 실험에 사용된 LPG 연료는 자동차용이며, 표1에 조성비 및 물성치를 보여준다. 상온 대기압 하에서는 기체상태로 존재하며 가압함으로써 액체상태로 만들 수 있다.

LPG 연료의 흡수 스펙트럼은 다른 탄화수소계와 마찬가지로 UV영역에서 강한 흡수 특성을 보여준다. 부탄과 가장 유사한 구조인 1,3 butadiene ((C2H3)2)의 경우 흡수 스펙트럼은 Scheibe와 Grieneisen, Price와 Walsh에 의해 연구되어졌는데 197nm~217nm로서 아주 좁은 폭을 가지는 것으로 밝혀졌다[11]. 이로부터 제논 플래쉬

Table 1. Composition & properties of LP fuels

	chemical formula	mole fraction (%)	density (kg/m ³)	viscosity
propane	C ₃ H ₈	14.38	1.840	8.113
n-butane	C ₄ H ₁₀	47.03	2.463	7.386
i-butane	C ₄ H ₁₀	32.13	2.452	7.396

램프를 사용하여 연료의 액상과 기상을 측정할 수 있음을 알 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 광학장치 및 정적 연소기

Fig.2은 정적 연소기에서 연료의 기상 및 액상의 농도를 동시에 측정하기 위해 구성된 장치이다. 먼저 광원으로는 제논 플래쉬 램프(Xenon flash lamp)를 사용하였으며 핀홀(pin hole)을 통해 조사되어진 광은 볼록렌즈(fused silica, $f=900\text{mm}$)에 의해 평행 광이 되며 연소기를 통과한 다음 다시 볼록렌즈에 의해 모여진다. 모여진 광은 UV광과 가시광으로 나누고 하나의 화면에서 촬영하기 위해 UV 거울(248 nm)와 전반사 거울을 사용하여 반사시켰다.

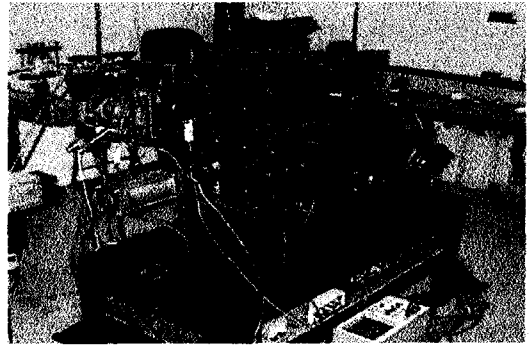


Fig. 3 The photography of RICEM

UV광을 CCD카메라로 촬영하기 위해 UV용 카메라 렌즈와 광증폭기(image intensifier)를 카메라 앞에 장착하였다. 촬영된 이미지는 모니터와 VCR을 통해 관찰되었으며 저장되어졌다.

연료를 분사하는 인젝터와 카메라, 광원을 동기시키기 위해 DG535, lamp trigger, 인젝터 구동 드라이브를 사용하였다. 그리고 정적 연소기는 상부에 인젝터를 설치하였으며 하부에는 혼합기 배출을 위해 밸브를 장착하였다. 가시화를 위해 양 측면에 두 개의 창(fused silica, $d=100\text{mm}$)을 설치하였고, 연소기 가열을 위해 4개의 히터를 설치하였다.

3.2 RICEM

Fig.3는 흡기모사형 RICEM의 사진 및 개략도를 나타낸다. 기존의 RCEM은 BDC상태에서 시작하여 압축

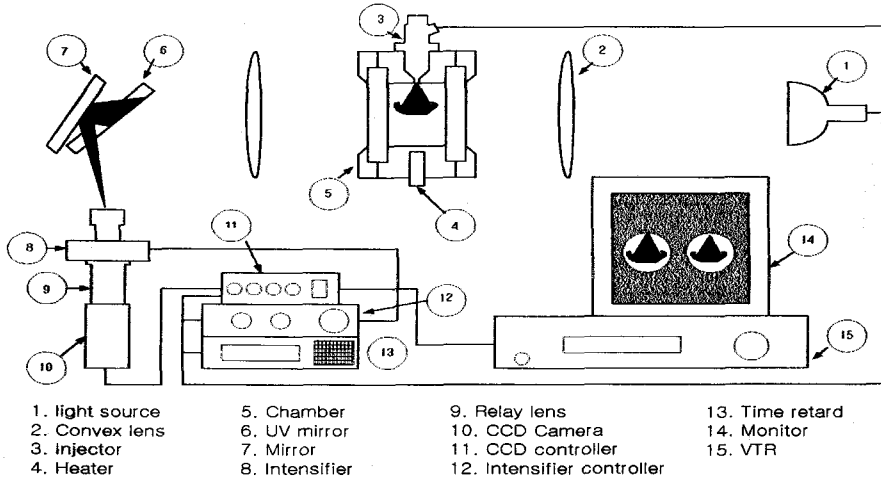


Fig. 2 The schematics of experimental set-up for CVC

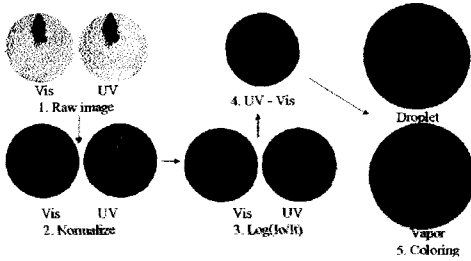


Fig. 4 The diagram of image process

행정과 폭발행정만 모사하게 설계되어 있어 혼합기의 분포나 연소 특성을 결정하는 흡기 모사가 불가능하다. 이런 문제를 극복하기 위해 RCEM에 흡기 과정의 유동패턴을 모사할 수 있는 장치를 추가하였다[12].

3.3 화상처리

Fig.4는 취득된 영상을 처리하는 과정을 보여준다. 먼저 영상취득장치를 통해 촬영된 액상 및 기상 연료분포의 원 화상(raw image, Fig.4.1)은 잡음 제거된 후 노말라이징 및 광 감소를 계산하기 위해 배경화상으로 나뉘지며(Fig.4.2), 실제 광과 배경광의 강도 차를 보정하였다(Fig.4.3).

이렇게 처리된 이미지는 Log를 취해 실제 연료 농도에 의한 광 감소율을 계산하였으며(Fig.4.4) 액상 및 기상의 연료 화상을 분리하기 위해 UV 광 사진에서 가시광선 사진을 빼고(Fig.4.5) 다시 농도를 비교하기 위해 칼라화 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 온도 및 압력 영향

Fig.5에서 Fig.7은 정적연소기내에서의 LPG 연료의 분무 거동을 촬영한 결과이다.

먼저 Fig. 5의 경우 대기압 하의 상온 조건으로 원주 방향 성장보다는 축 방향 성장이 훨씬 커 전체적으로 길쭉한 형태를 유지함을 알 수 있다. 그리고 분무 선단의 도달거리도 분무성장의 초기에 아주 큼을 알 수 있다. 이는 다른 연료에 비해 연료의 밀도가 작아 분무의 축 방향 직선 운동량이 원주방향의 각 운동량 보다 크기 때문에 분무 각이 작고 분무선단의 도달거리가 늘어난 것이다.

그리고 Fig. 5 증기부분을 살펴보면 상온임에도 불구하고 연료의 증발이 활발히 일어남을 일수

있는데 이는 LPG연료의 포화 증기압과 밀접한 관계가 있다.

Fig. 6은 대기압 조건하의 80℃에서 LPG연료의 액적 및 증기의 분포를 촬영한 결과이다. 분무각이 상온 조건에 비해 많이 줄어들었으며 분무의 형상이 원뿔형이기 보다 가는 원통형에 가까움을 알 수 있다. Fig.5와 비교하여 분무선단의 도달거리는 월등하게 길며 증발특정도 아주 양호함을 알 수 있다. 증기의 분포는 분무 초기엔 분무의 선단에 주로 분포하나 후기엔 분무의 후단에도 많이 분포함을 관찰 할 수 있으며 전체적으로 증기의 농도가 Fig. 5보다 월등히 진함을 알 수 있다.

Fig. 7은 7bar의 가압된 조건에서 80℃로 가열되었을 때의 LPG연료의 액적 및 증기의 분포를 촬영한 결과이다. 주위압력이 가압 됨으로써 초기에 곧게 뻗어 나가던 분무형상은 후반으로 갈수록 성장세가 둔화되고 선단의 형상이 뭉뚱하게 퍼짐을 관찰할 수 있다. 그리고 연료 증기의 분포는 분무의 액적 주위로 얇게 진한 농도로 퍼져 있음을 관찰할 수 있다.

4.2 분사시기 영향

Fig. 8(a)는 직접분사식 엔진에서 고속 고부하 조건에서 운전되는 조기분사 모드를 모사하기 위해 RCEM의 흡입과정인 BBDC 10° 에서 연료를 분사하여 연료특성에 따른 액적 및 증기의 분포 특성을 관찰하였다. 고속 고부하 조건에서 흡입과정중 연료를 분사하기 때문에 이 모드에서 연비 보다 출력이 우선하며, 연료를 충분한 시간을 갖고 실린더 내에서 균일하게 분포시키기 위해서이다. 때문에 이 모드에서는 연료가 빠른 시간 안에 연소실 전체에 골고루 퍼져야 한다.

정적연소기와 분무 형상은 유사하나 증발특성이 조금 다름을 알 수 있다. 정적 연소기에서 아주 우수한 증발특성을 보여 주었으나 RCEM에서는 증발이 디디고 분무의 가장자리에 얇게 분포함을 알 수 있다. 그러나 연소가 되기까지는 충분한 시간이 있기 때문에 대부분 증발할 것으로 예상되며 좋은 연소특성을 가질 것으로 판단된다.

직접분사식 엔진에서 가장 핵심적인 기술은 분사된 연료를 성층화 시켜 연료 효율을 높이면 서도 배출가스와 성능 특성을 그대로 유지하거나

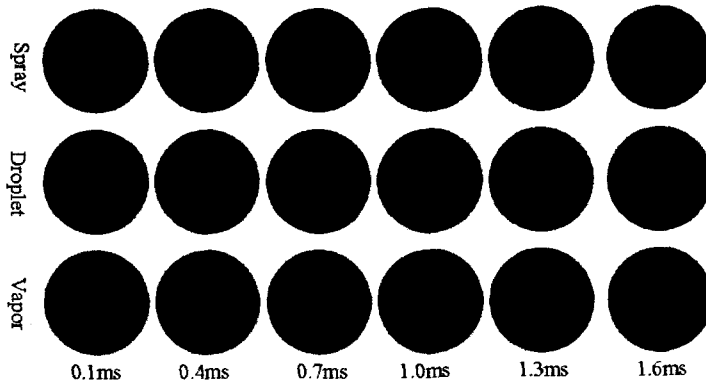


Fig.5 The droplet and vapor distributions of LPG spray ($P_{inj}=50\text{bar}$, $P_{sur}=0\text{bar}$, $dt=2\text{ms}$, $T_{sur}=\text{room temp.}$)

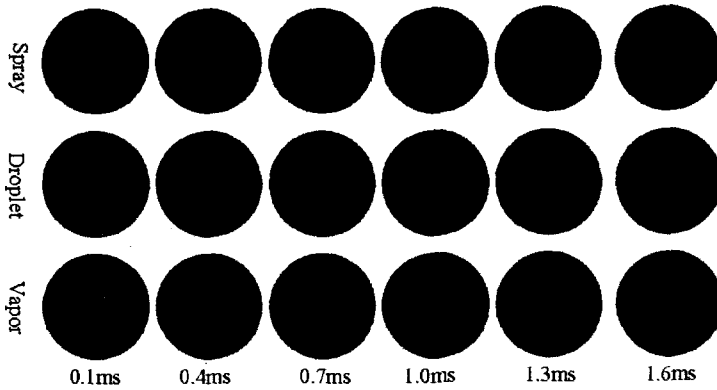


Fig.6 The droplet and vapor distributions of LPG spray ($P_{inj}=50\text{bar}$, $P_{sur}=0\text{bar}$, $dt=2\text{ms}$, $T_{sur}=80^\circ\text{C}$)

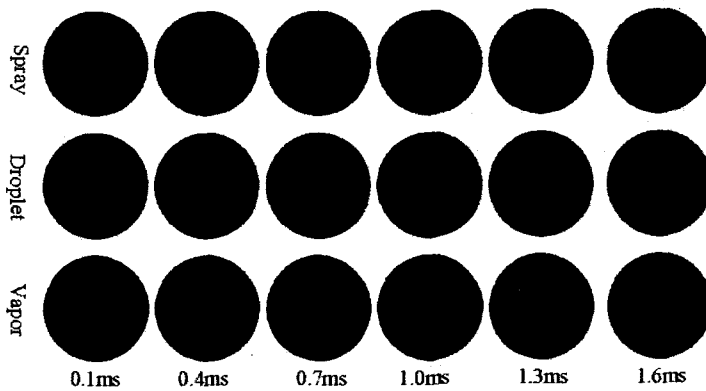


Fig.7 The droplet and vapor distributions of LPG spray ($P_{inj}=50\text{bar}$, $P_{sur}=7\text{bar}$, $dt=2\text{ms}$, $T_{sur}=80^\circ\text{C}$)

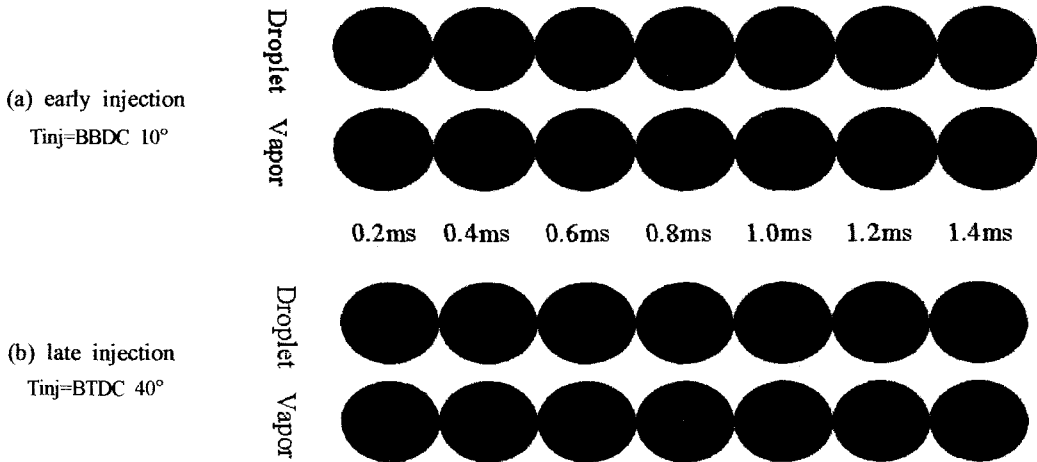


Fig. 8 The droplet and vapor distributions of LPG spray in RICEM ($P_{inj}=50\text{bar}$, $dt=2\text{ms}$, $T_{sur}=80^\circ\text{C}$)

개선시키는 것이다. 대부분 저속 저부하 운전 조건에서 적용되며 연료의 성층화를 쉽게 하기 위해 연료를 압축행정 중에 분사한다. 분사된 연료는 실린더내 내부 유동과 피스톤 캐비티, 연소실 형상의 상호작용으로 점화플러그 주위로 유도되어진다.

Fig. 8(b)는 이러한 운전 조건(후기분사)에서 분사된 연료의 액적 및 증기의 분포 특성을 관찰하기 위해 실시된 실험이며 예비 단계로 정적 연소기에서 이와 유사한 조건을 설정하여 수행하였다.

LPG 연료의 경우 정적연소실과 비슷한 분무형태를 보여주며 증발 특성도 분무주위에 얇게 분포하는 것까지 유사하다. 피스톤의 캐비티에 충돌한 연료 분무는 캐비티 형상을 따라 이동함으로써 피스톤 보울에서의 연료적심 현상이 상당히 줄어들음을 알 수 있으며, 이는 연소실험을 통해 연료 액적 및 피스톤 캐비티에서의 연료 액막 연소가 상당히 줄어들음을 확인할 수 있었다[12].

5. 결론

다가올 CO2 규제에 대응할 수 있는 엔진 기술 중의 하나인 직접분사식 엔진의 설계시 고려해야 여러 인자들을 평가할 수 있는 기초 기술로서 LPG 연료를 대상으로 실제엔진을 모사한 RICEM

내에서 연료의 액적 및 증기의 분포를 동시에 효율적으로 관찰할 수 있었다.

본 연구의 수행 결과 및 LPG 연료의 분무특성에 대한 주요결론은 다음과 같다.

1. UV광과 가시광을 이용한 광 소멸 법으로 연료 분무를 촬영한 결과, 각각의 광에서 얻은 화상을 소프트웨어를 통해 처리함으로써 연료 액적 및 증기분포에 대한 자료를 동시에 얻을 수 있었다.
2. 정적 연소기에서 실제 엔진에서 발생할 수 있는 조건에 대해 실험을 수행한 결과 주위 압력이 낮고 온도가 높을수록 연료의 증발이 잘 일어남을 알 수 있었으며 엔진 모사 장치인 RICEM에서 얻은 결과와 유사하였다.
3. LPG 연료의 경우 분무의 성장 속도가 빠르고 분무선단의 도달거리가 늘어났으며 분무각은 오히려 작았다. 또한 분무의 증발 속도가 빠르기 때문에 직분식 엔진에 훨씬 유리함을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 당 연구원의 자체연구사업으로 시행한 과제입니다.

참고 문헌

- (1) M.S.El-Beshbeeshy, J. T. Hodges, M. L. Corradin 1992, "Image Analysis of Diesel Spray", SAE Technical Paper, No. 921628.
- (2) T. Yoshizaki, K. Yuzaki, H. Hirouasu, H. Yamashita, K. Kaneda, M. Suzuki, 1996, "Model Verification of the Evaporating Diesel Spray Distribution in the Combustion Chamber of a D.I.Diesel Engine", SAE Technical Paper, No. 962054.
- (3) M. Adachi, V. G. Mcdonell, D. Tanaka, J. Senda, H. Fujiimoto, 1997, "Characterization of Fuel Vapor Concentration Inside a Flash Boiling Spray", SAE Technical Paper, No. 970871.
- (4) R. H. Stanglmaier, M. J. Hall, and R. D. Matthews, 1998, "Fuel -Spray/Charge-Motion Interaction within the Cylinder of a Direct-Injected, 4-Valve, SI Engine", SAE Technical Paper, No. 980155.
- (5) Jackson, N. S., Stokes, J., and Lake, T. H., 1997, "Stratified and Homogeneous Charge Operation for the Direct Injection Gasoline Engine - High Power with Low Fuel Consumption and Emissions", SAE Technical Paper, No. 970543.
- (6) G. K. Fraid, W. F. Piock, and M. Wirth, 1996, "Gasoline Direct Injection : Actual Trends and Future Strategies for Injection and Combustion Systems", SAE Technical Paper, No. 960465.
- (7) Y. Iwamoto, K. Noma, O. Nakayama, T. Yamauchi, and H. Ando, 1997, "Development of Gasoline Direct Injection Engine", SAE Technical Paper, No. 970541.
- (8) C. Preussner, S. Fehler, S. Kampmann, 1998, "GDI : Interaction Between Mixture Preparaton, Combustion System and Injector Performance", SAE Technical Paper, No. 980498.
- (9) M. Suzuki, K. Nishida, H. Hiroyasu, 1993, "Simultaneous Concentration Measurement of Vapor and Liquid in an Evaporating Diesel Spray", SAE Technical Paper, No. 930863.
- (10) T. Itoh, A. Kayuho, H. Hishinuma, T. Urashihara, Y. Takagi, K. Horie, M. Asano, E. Ogata, T. Yamashita, 1995, "Development of a New Compound Fuel and Fluorescent Tracer Combination for Use With Laser Induced Fluorescence", SAE Technical Paper, No. 952465.
- (11) G.Herzberg, 1966, "Molecular Spectra and Molecular Structure III", Van Nostrand Reinhold Company, pp 549.
- (12) 김재철, 조규백, 정동수, 2000, "직접분사식 LPG엔진의 연소실 형상에 따른 분무 및 연소특성", 자동차공학회 춘계학술대회, Volume I, pp. 73 ~ 78.
- (13) 조규백, 정용일, 1999, "급속압축팽창 장치를 이용한 직접분사식 가솔린 기관의 실린더내 분무 및 연소특성에 관한 연구", 자동차 공학회 논문집, 제 7권 제 7호