

LIEF법을 이용한 증발 디젤 분무의 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of an Evaporating Diesel Spray Using LIEF Technique

김용래* · 김만식* · 조훈* · 민경덕**

Y. R. Kim, M. S. Kim, H. Cho, K. D. Min

Abstract

An evaporating diesel spray of a common rail injector was visualized by LIEF technique. This technique makes it possible to separate the vapor and liquid phase images. The experiment was conducted in a constant volume vessel to make a high temperature and high pressure condition. Three images(vapor and liquid phase images from LIEF and a liquid phase image from Mie scattering) were taken simultaneously in one spray event. The major experimental parameters are the injection pressure and the ambient gas pressure. Also, a relative SMD distribution in a liquid phase was obtained by the ratio of the intensities of the fluorescence and the Mie scattering. The results show that the injection pressure and the ambient gas pressure have a close relation with the spray development and air-fuel mixing process.

주요기술용어(Key Words): Exciplex(엑시플렉스), Evaporating Spray(증발 분무), Common Rail Injector(커먼 레일 인젝터), Mie Scattering(Mie 산란), Sauter Mean Diameter(사우터 평균 입경)

1. 서론

최근 환경 오염에 대한 규제가 강화되면서 자동차 엔진에 대한 연구도 성능 뿐 만이 아니라 배출물 저감과 연비 향상을 위해 많은 노력들이 이루어지고 있다.

그 중에서도 분무의 특성은 연소 현상 및 배출물 발생과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있고, 이는 연소실 설계에 중요한 자료를 제공하게 된다. 그러나 기존의 많은 연구들은 비증발상태에서의 액상 분무 연구에 치우쳐 있어 실제 연소실 내의 분무 현상에 적용하는데 한계가 있다. 따라

서 실제 분사 조건과 비슷한 고온, 고압의 환경에서의 증발 분무를 통한 분무의 성장 과정 및 혼합기 형성 과정에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 최근 주목받고 있는 소형 승용형 디젤 엔진에 사용되는 커먼 레일 인젝터(Common Rail Injector)의 증발 분무를 고온, 고압의 조건에서 관찰하였으며, LIEF(Laser Induced Exciplex Fluorescence)기법을 이용하여 분무의 기상과 액상의 이미지를 분리하여 획득하였다. 또한 한 분무에 대하여 기상과 액상의 형광 이미지와 함께 액상 분무의 계측용으로 사용되는 Mie 산란(Mie Scattering)이미지도 같이 촬영하였고, 액상에 대한 형광 신호와 Mie 산란 신호의 비를 이용하여 상대적인 SMD 분포도 구하였다.

이를 통하여 연료의 분사 압력과 분위기 기체의 압력 변화가 증발 디젤 분무의 발달 및 혼합 과정에 미치는 영향에 대해 살펴보았다.

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

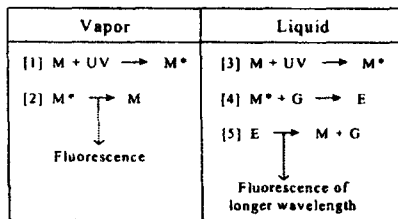
** 서울대학교 기계항공공학부

2. 원리, 실험 장치 및 방법

2.1 원리

2.1.1 Exciplex의 개념 및 LIEF법의 원리

레이저 유도 형광법(Laser Induced Fluorescence)을 이용할 때 적절한 형광 염료를 첨가하여 사용하기도 하지만, 단일 첨가제를 사용하여 가시화하는 경우에는 기상과 액상에서 나오는 형광 신호의 차이가 없기 때문에 두 상을 분리하여 가시화 할 수가 없다. 이러한 단점을 극복하여 기상과 액상을 분리하여 가시화 할 수 있는 방법이 exciplex를 이용한 가시화 방법이다. 이는 형광 신호를 낼 수 있는 첨가제(Monomer, M)와 함께 소멸제(Quencher, G)를 사용함으로써 가능해진다. 기상과 액상에서 각각 일어나는 현상을 Fig. 1에 정리하여 나타내었다. 기상에서는 직접 첨가제의 형광 신호가 나온다. 즉 여기광에 의해 여기된 분자, M^* 이 [1] 형광 신호를 내면서 다시 기저 상태로 돌아간다[2]. 그러나 액상에서는 여기된 분자, M^* 가 [3] 소멸제, G 와 결합하여 exciplex, E 를 형성하게 된다 [4]. 여기에서 exciplex란 여기된 상태의 복합물(excited state complex)의 약어로서, 반드시 여기되었을 때에만 결합하여 안정되고 기저 상태에서는 서로 반발하여 해리되는 특성을 갖는다. 이렇게 형성된 exciplex에서 나오는 형광 신호는 첨가제, M 에서 나오는 형광보다 스토크스 편이되어 약간 긴 파장으로 나오게 되는데 [5], 이는 M^* 와 G 가 결합할 때의 결합 에너지만큼 exciplex의 에너지 레벨이 낮아지기 때문이다. 이렇게 기상과 액상에서 나오는 형광 신호의 파장이 다름을 이용하여 적절한 필터를 사용하게 되면 각각의 상을 분리하여 가시화 할 수 있다.^{1), 2)}



M : monomer
G : quencher
UV : excitation laser
E : exciplex

Fig. 1 Schematic of Exciplex formation

2.1.2 평면 이미지 기법을 이용한 SMD 측정원리
분무 입경 분포 해석에 있어서 분무의 평균 액적 크기를 대표하는 값으로 SMD (Sauter Mean Diameter)가 주로 사용되며 정의는 다음과 같다.

$$D_{32} = \left(\frac{\int_0^\infty D^3 dn}{\int_0^\infty D^2 dn} \right) \quad (1)$$

한편, 레이저 유도 형광 신호의 강도는 형광 분자의 농도, 즉 체적에 비례한다. 따라서 입사되는 레이저광에 대한 단위 면적 당 형광강도를 I_{LIF} 라 할 때, 형광강도의 세기는 체적 즉 입자 직경의 세제곱에 비례하므로 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$I_{LIF} = I_0 e^{-kx} C_1 \int_0^\infty D^3 \frac{dn}{dD} dD \quad (2)$$

여기서 I_0 는 입사광 강도, x 는 평면 레이저 광이 분무 내를 진행한 거리, k 는 매질에 의한 레이저 광의 감쇠를 나타내는 계수다. 이는 분무장에서 입사광의 감쇠가 Beer의 법칙을 따른다고 가정하여 나온 결과이다. D 는 입경, dn 은 $D \sim D+dD$ 의 범위의 입자 수밀도이며, C_1 은 형광의 흡광계수와 양자수율 그리고 검출광학계 등에 의해 결정된 상수이다.

그리고 Mie 산란광 강도, I_{Mie} 는 입자직경의 제곱에 비례하기 때문에 입자 단면적과 산란계수를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{Mie} = I_0 e^{-kx} C_2 \int_0^\infty Q_{sca} D^2 \frac{dn}{dD} dD \quad (3)$$

여기서 C_2 는 검출광학계 특성에 의해 결정되는 계수이고, 산란계수 Q_{sca} 는 입경 파라미터 $\alpha = \pi D/\lambda$ (λ 는 파장), 입사광 방향과 검출 방향과의 각도 및 검출각과 관계가 있다.

식 (2)와 (3)을 이용하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있으며,

$$\frac{I_{LIF}}{I_{Mie}} = \frac{C_1}{C_2 Q_{sca}} \cdot \frac{\int_0^\infty D^3 dn}{\int_0^\infty D^2 dn} \quad (4)$$

이 식은 SMD의 정의로부터 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$D_{32} = C \frac{I_{LIF}}{I_{Mie}} \quad (5)$$

여기서 $C = C_1 / (C_2 Q_{sca})$ 이며, SMD 값은 레이저 유도 형광과 Mie 산란광 신호의 비와 비례관계에 있음을 알 수 있다. 즉 같은 분무에 대하여 형광과 산란광 강도를 동시에 획득하여 그 신호의 비를 알면 상대적인 SMD 분포를 알 수 있게 된다. 이러한 비례관계를 이용하여 구하는 SMD 값은 형광과 산란광의 강도를 나타내는 식에서 각각 입사되는 레이저광의 세기에 해당하는 항이 소거된다. 이는 실제 입사되는 레이저광의 불균일성과 분무 내에서의 감쇠를 고려하지 않아도 됨을 의미하며 형광과 산란광의 두 신호의 비만 구하면 상대적 SMD 분포를 쉽게 구할 수 있다.³⁾

2.2 실험 장치 및 방법

커먼 레일 인젝터를 사용하여 분무의 기상과 액상을 가시화하기 위한 전반적인 실험 장치를 Fig. 2 과 같이 구성하였다.

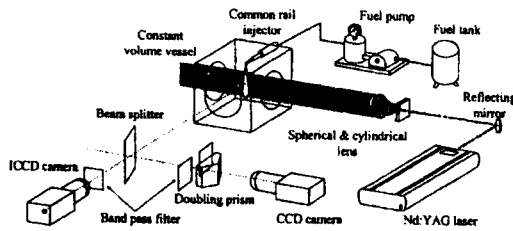


Fig. 2 Experimental apparatus

2.2.1 가시화 장치

가시화를 위한 광원으로 355 nm의 파장을 가지는 Nd:YAG 레이저를 사용하였으며, 레이저의 강도는 70 mJ/pulse가 유지되도록 하였다.

평면광을 만들기 위해 구형 렌즈와 원통형 렌즈를 사용하였다. 측정부 앞에 Beam splitter를 45°의 각도로 위치시켜서 한 쪽에서는 ICCD 카메라를 사용하여 기상의 이미지를 획득하고, 다른 방향으로는 CCD 카메라를 이용하여 액상의 이미지를 촬영하였다. 액상의 경우 산란광과 형광 이미지를 동시에 같은 화면상에 나타내기 위해 화상을 동일한 두 개의 화상으로 나누어주는 더블링 프리즘을 사용하였다. 산란광의 화상을 얻기 위하여 중심파장 354.7 nm의 대역통과필터(Band Pass Filter)를, 기상과 액상의 형광 신호를

받기 위하여 각각 중심파장 390 nm와 중심파장 532 nm의 대역통과필터를 사용하였다. 산란광의 경우 형광신호에 비해 신호가 강하므로 두 신호를 비슷한 수준으로 맞추기 위해 투과율 10%의 ND 필터(Neutral Density Filter)를 사용하였다. 카메라와 레이저는 각종 외부 동기장치를 이용하여 인젝터 드라이버와 동기 시켰다. 그리고 기상과 액상에서 나오는 형광 신호의 파장 분포를 확인하기 위하여 분광기를 사용하여 분광 실험도 실시하였다.

2.2.2 연료 및 연료 분사 장치

본 실험에서 LIEF를 위해 사용한 연료는 n-Tetradecane ($C_{14}H_{30}$, B.P.=526K)이며 첨가제로는 TMPD (N,N,N',N' tetramethylene-p-phenylene diamine, $C_{10}H_{16}N_2$, B.P.=533K), 소멸제로는 나프탈렌 ($C_{10}H_8$, B.P.=491K)을 사용하였다. 사용 연료는 상용 디젤 엔진 연료의 대표적인 성분이며 첨가제의 끓는점을 고려하여 선택하였다.

인젝터는 슬레노이드에 의해 전자식으로 개폐되는 커먼 레일 인젝터이며, 6 홀 ($d=0.22$, $l=0.8$)의 노즐을 가지고 있다. 하나의 분무만 관찰할 수 있도록 인젝터의 노즐 부분에 별도로 제작한 캡을 씌워서 나머지 다섯 홀에서 나오는 연료는 스틸관으로 빠져나갈 수 있게 하였다. 연료 펌프는 압축 공기로 구동되며 최대 1000 bar의 토출 압력을 얻을 수 있다.

2.2.3 정적 용기

증발 분무를 관찰하기 위해서는 고온의 환경이 필요하기 때문에 이를 위하여 가시화창을 장착한 정적 용기를 제작하였다. 총 3.5 kW의 히터를 장착하고 단열재를 씌워서 온도를 올릴 수 있으며, 열전대를 사용하여 내부 온도를 측정할 수 있고 온도 컨트롤러를 설치하여 설정 온도를 조절하게 된다. 연료의 연소와 산소에 의한 첨가제의 산화를 막기 위하여 질소 가스를 사용하였다.

3. 실험 결과 및 해석

분사 압력에 의한 영향을 알아보기 위해 온도는 650 K, 분위기 기체의 압력은 25 bar인 상태에서 분사 압력을 400 bar ~ 800 bar로 변화시켰으며, 분위기 기체 압력이 분무 발달에 미치는 영

향을 보기 위하여 온도는 650 K, 분사 압력은 600 bar 으로 하고 분위기 기체의 압력을 11 bar ~ 25 bar 로 변화시켰다. 1회 분사량을 8 mg (per one hole) 으로 고정시키고 분사 압력에 따른 분사 기간을 조절하였으며 이를 Table. 1 에 나타내었다.

Table. 1 Experimental Condition

| | | | |
|-------------------------|-----|-----|------|
| 분사 압력 (bar) | 400 | 600 | 800 |
| 분사 기간 (ms) | 1.6 | 1.2 | 1.0 |
| 분위기 기체 압력 (bar) | 11 | 18 | 25 |
| 밀도 (kg/m ³) | 5.7 | 9.3 | 12.9 |

3.1 분광 실험 결과

분광 실험을 통해 사용된 혼합 연료의 액상과 기상에서 나오는 형광 신호의 파장을 Fig. 3 에 나타내었다. 기상의 경우 약 400 nm 근처에서 최대값을 가지고 액상의 경우 약 480 nm 에서 최대값을 갖는다. 따라서 가운데 서로 겹치는 파장대를 피하기 위해 기상에 대하여 중심 파장 390 nm, 액상에 대하여 532 nm 의 대역통과필터를 사용하였다. Mie 산란 이미지를 얻기 위해서는 입사하는 레이저와 같은 파장의 대역통과필터를 사용하면 된다.⁴⁾

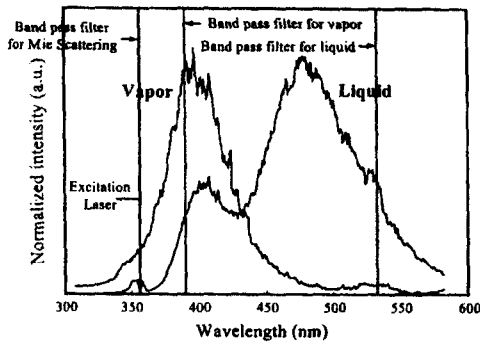


Fig. 3 Spectrum of Exciplex system

3.2 분무 이미지 결과 및 해석

3.2.1 증발 분무 구조 및 SMD 분포

Fig. 4 에 실험 결과 얻은 대표적인 분무의 이미지를 나타내었으며, 기상과 액상이 분리되어 나

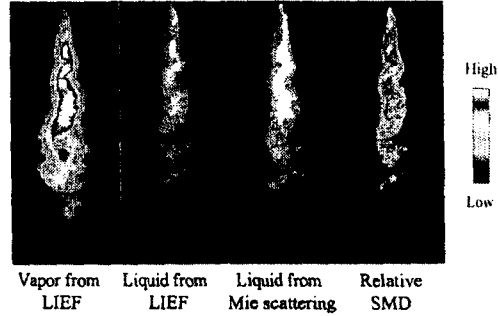


Fig. 4 Result of 3-events and a relative SMD distribution

($P_{inj}=400bar, P_o=25bar, T_o=650K, ASOI=1.6ms$)

타남을 볼 수 있다. 분무 내로 주위 기체의 도입이 발생함에 따라 분무 내부의 유동은 요철을 가지게 되는데, 이는 전형적인 디젤 분무의 구조로서 사행 유동(Meandering flow) 이라고 한다.⁵⁾ 그리고 Mie 산란 이미지가 액상의 형광 이미지와 거의 비슷한 것을 확인 할 수 있는데, 이는 LIEF를 통해서 액상의 이미지를 정확하게 얻을 수 있음을 의미한다. 또한 액상에 대한 형광 신호와 Mie 산란 신호의 비율 이용하여 상대적인 SMD 분포를 나타낼 수 있음을 보였다.

한편 분무 구조 해석을 위한 중요한 인자가 되는 분무의 길이를 나타낼 때, 기체상의 경우에는 형광 신호가 존재하는 전체 영역을 측정하였고 액체상의 경우에는 각 이미지에서 최대 형광 신호를 기준으로 신호가 낮은 10% 부분을 제외하여 측정하였다. 이를 액상 길이로 정의하였는데 이는 액상 분무의 끝부분에서 증발로 인한 불연속 구간이 존재하므로 밀도가 상대적으로 높은 부분 중심 영역만을 선택하기 위함이다.

3.2.2 분사 압력이 분무에 미치는 영향

분사 시작 후 시간 경과에 따른 기상 분무의 발달 모습을 Fig. 5 에 나타내었으며, 이를 기초로 분사 압력의 변화에 따른 기상의 길이 변화를 Fig. 6 에 보였다. 초기에는 급속히 분무가 발달하지만 시간이 경과할수록 발달하는 정도가 감소해가는 경향을 보여 주고 있다. 분사 종료 시점을 기준으로 분무의 길이를 살펴보면 분사 압력이 증가해도 분무의 길이는 큰 차이를 보이지 않는다. 액상 길이의 경우에도 분사 압력에 상관없이

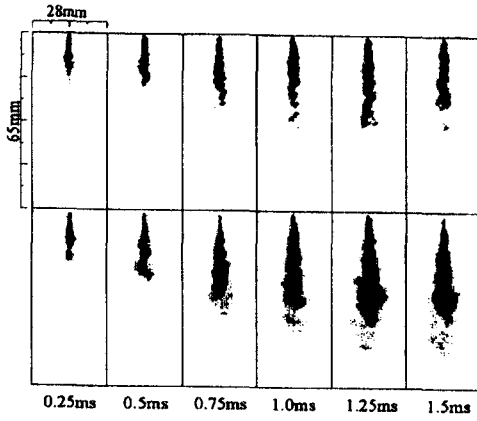


Fig. 5 Sequential images [upper:Liquid, lower:Vapor] ($P_{inj}=800bar$, $P_a=25bar$, $T_a=650K$)

비슷한 값을 가지는데 특히 위에서 정의된 분무 길이에 의하면 분무가 시간에 따라 더 이상 발달하지 않고 특정 값에서 더 이상 증가하지 않는 경향을 나타낸다. 본 실험 조건에서는 그 길이가 약 35mm 정도로 나타났다. Fig. 7 에 이 결과를 기존의 Hiroyasu에 의해 정립된 식으로 계산된 분무의 길이와 함께 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 전혀 다른 양상을 나타냄을 볼 수 있으며 이는 Hiroyasu의 식이 비증발 분무에서만 적용됨을 나타낸다. 이상의 분무 길이의 해석을 통한 결과는 분사 압력의 증가에 따른 분무의 미립화와 함께 주위 기체의 분무 내부로의 도입이 활발하게 일어나서 열에너지 유입이 증가함으로써 분사된 연료의 증발이 촉진되기 때문이라고 판단된다.

한편 분사 압력이 증가함에 따라 분무 길이의 차이는 거의 없으나 기상이 분포하는 면적이 증가함을 Fig. 8 을 통해 볼 수 있다. 이를 통하여 앞에서 설명한 분사 압력의 증가가 분무의 미립화를 촉진되고 분사 연료와 주위 기체와의 상호작용에 의한 혼합기 형성을 활발하게 함을 확인할 수 있다. 이상의 결과는 최근 디젤 엔진의 연료 압력 고압화가 연료와 공기의 혼합기 형성에 있어 유리함을 뒷받침한다고 할 수 있다.

3.2.3 분위기 기체 압력이 분무에 미치는 영향
 분위기 기체의 압력을 변화시키면서 분무의 성장 과정을 관찰한 결과를 Fig. 9 와 Fig. 10 에 나타내었다. 분위기 압력이 감소할수록 기상 분무

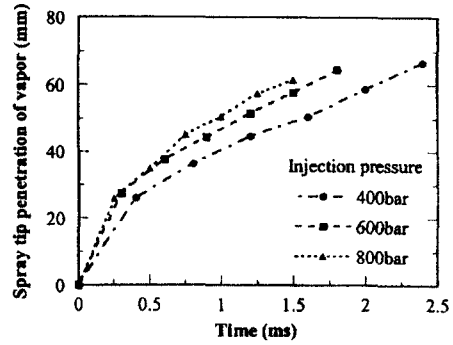


Fig. 6 Vapor phase penetration length with injection pressure ($P_a=25bar$, $T_a=650K$)

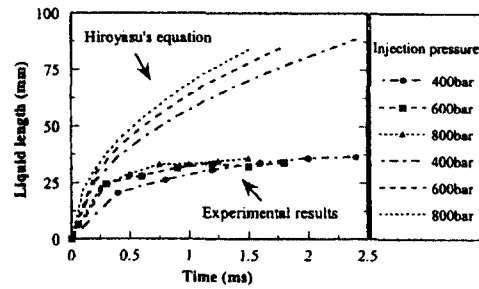


Fig. 7 Liquid phase penetration length with injection pressure ($P_a=25bar$, $T_a=650K$)

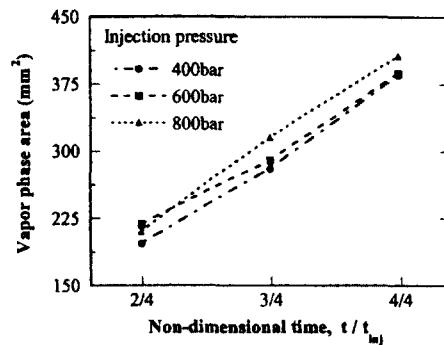


Fig. 8 Vapor phase area with injection pressure ($P_a=25bar$, $T_a=650K$)

의 길이가 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 기상 분포 면적의 경우는 분위기 압력이 감소할수록 증가함을 확인하였다.

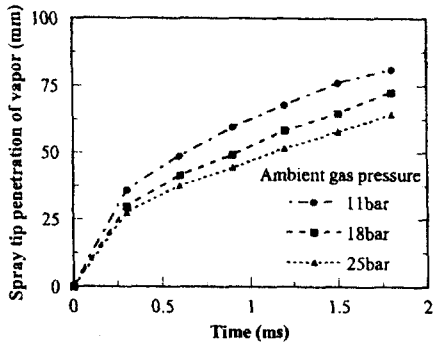


Fig. 9 Vapor phase penetration length with ambient gas pressure ($P_{inj}=600bar$, $T_a=650K$)

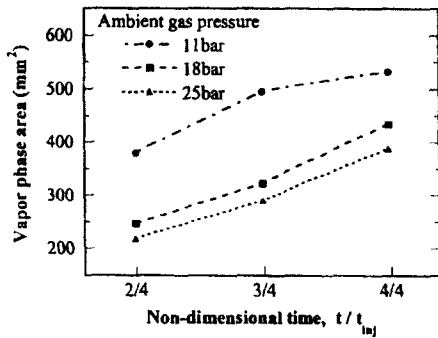


Fig. 10 Vapor phase area with ambient gas pressure ($P_{inj}=600bar$, $T_a=650K$)

4. 결론

LIEF 기법을 사용하여 커먼 레일 인젝터를 대상으로 고온 고압의 조건에서 중발 디젤 분무의 기상과 액상을 분리하여 가시화하였다. Mie 산란법을 이용한 분무의 액상 이미지를 동시에 획득하여 LIEF를 통해 얻은 액상 이미지를 비교 확인하였고 형광과 산란광의 비를 이용하여 상대적인 SMD 분포를 구할 수 있음을 보였다. 이러한 기법을 이용하여 분사 압력과 주위 기체 압력을 변화시켜가며 이들이 중발 디젤 분무의 발달 과정과 혼합기 형성 과정에 미치는 영향을 관찰함으로써 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 중발 분무의 액상 길이는 기존의 비중발 조건에서 실험했던 선행 연구들의 결과와 다른 형태를 보여준다. 즉 분사 말기에 약 35 mm의 일정한 값을 유지하면서 더 이상 발달하지 않으며 이는 분사 압력과 무관하게 비슷한 값을 가진다.

2. 분사 압력이 증가해도 기상 분무의 길이는 차이를 보이지 않으나 기상 분무의 분포 면적은 증가한다. 즉 고압 분사는 분무의 미립화 및 혼합기 형성을 촉진시킨다.

3. 주위 기체 압력이 감소할수록 분무의 길이와 기상 분무의 분포 면적은 증가한다.

후기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- Melton L. A., "Spectrally Separated Fluorescence Emissions for Diesel Fuel Droplets and Vapor," *Applied Optics*, Vol. 22, No. 14, pp. 2224~2226, 1983.
- Felton P. G., Bracco F. V., and Bardsley M. E. A., "On the Quantitative Application of Exciplex Fluorescence to Engine Sprays," *SAE 930870*, 1993.
- 윤일한, "평면 이미지 기법을 이용한 분무 입경 분포 해석에 대한 실험적 연구", 서울대학교 공학석사 학위 논문, 2000.
- Senda J., Kanda T., Kobayashi M., and Fujimoto H., "Quantitative Analysis of Fuel Vapor Concentration in Diesel Spray by Exciplex Fluorescence Method," *SAE 970796*, 1997.
- Yeom J. K., Takahashi T., Tanaka T., Kusano S., Sendai J., and Fujimoto H., "The Structure Analysis of Impinging and Free Diesel Spray with Exciplex Fluorescence Method in High Temperature and Pressure Field," *15th Internal Combustion Engine Symposium(International)* 9935248, 1999.