

< 논문 >

연료의 임계조건을 고려한 디젤 액상분무거동에 관한 연구

염정국* · 박종상* · 김시범* · 정성식* · 하종률*
(2007년 2월 3일 접수, 2007년 4월 21일 심사완료)

A Study of the Behavior of Liquid Phase Spray Considering Critical Condition of the Fuel

Jeongkuk Yeom, Jongsang Park, Sipom Kim, Sungsik Chung and Jongyul Ha

Key Words: Diesel Engine(디젤기관), Diesel Spray(디젤분무), Ambient Condition(주위조건),
Exciplex Fluorescence Method(엑시플렉스 형광법), Critical Condition(임계조건)

Abstract

In this study the penetration distance of liquid phase fuel(*i.e.* liquid phase length) was investigated in evaporative field. An exciplex fluorescence method was applied to the evaporative fuel spray to measure and investigate both the liquid and the vapor phase of the injected spray. For accurate investigation, images of the liquid and vapor phase regions were recorded using a 35mm still camera and CCD camera, respectively. Liquid fuel was injected from a single-hole nozzle ($l/d=1.0\text{mm}/0.2\text{mm}$) into a constant-volume chamber under high pressure and temperature in order to visualize the spray phenomena. Experimental results indicate that the liquid phase length decreased down to a certain constant value in accordance with increase in the ambient gas density and temperature. The constant value, about 40mm in this study the, is reached when the ambient density and temperature of the used fuel exceed critical condition.

기호설명

- L : Liquid phase length(분무선단도달거리), mm
- p : Pressure(분사압력), MPa
- R : Radial distance from nozzle axis(반경방향 거리)
- T : Temperature(주위온도), K
- Z : Distance from nozzle tip(노즐로부터 거리), mm

그리스문자

- ρ : Ambient gas density(주위기체 밀도), kg/m^3

하첨자

- a : Ambient gas(주위기체)
- cr : Critical condition(임계조건)

- f : Fuel(연료)
- inj : Injection(분사)
- l : Liquid phase(액상)

1. 서론

소형 직분식 디젤기관에 있어서 연소실 내에 분사된 연료는 피스톤 캐비티(Cavity) 벽면에 충돌을 피할 수 없다. 분무가 벽면에 충돌하는 것에 의해 난류가 증가하고, 미립화가 향상하기 때문에 주위기체와의 혼합촉진이 기대되지만 벽면에 부착한 연료 액막은 다량의 배출물생성[[미연 탄화수소(Unburned hydrocarbon)와 그을음(Soot) 등의 원인이 된다. 따라서 디젤기관의 배출물저감과 기관 연소실 설계의 최적화를 달성하기 위해서는 분사연료의 액상선단도달거리에 대한 거

* 책임저자, 회원, 동아대학교 기계공학부
E-mail : laser355@dau.ac.kr
TEL : (051)200-7640 FAX : (051)200-7656
* 동아대학교 기계공학부

동특성해석은 중요하다. 디젤분무의 액상에 관한 연구^(1~4)는 많이 발표되었지만 Wakuri⁽¹⁾과 Hiroyasu⁽²⁾ 등의 연구는 연료의 상변화가 일어나지 않는 비증발 분무(Non-evaporating spray)이고, Hiroyasu⁽³⁾ 등의 연구결과는 저압 분사의 경우이다. 또한 Siebers⁽⁴⁾ 등의 경우는 분사압력, 분사노즐의 기하학적 형상, 주위가스온도, 주위가스밀도, 연료의 증발성(휘발성) 및 주위온도가 분무의 액상선단도달거리에 미치는 영향을 조사하였지만, 사용연료에 대한 실험조건인 임계조건 영향은 고려하지 않았다. 그러므로 본 연구의 목적은 분사연료의 임계조건(Critical condition)을 고려한 주위조건, 즉 실험변수(분사압력, 주위가스밀도, 주위가스온도)의 변화가 분무의 액상선단도달거리에 미치는 영향을 조사하는 것이다. 그리고 실험의 가시화 방법으로 연료의 상변화가 일어나는 증발장에 있어 연료의 액상과 기상을 동시·분리계측이 가능한 엑시플렉스 형광법(Exciplex fluorescence method)을 이용했다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 분사연료의 액상과 기상의 형광을 얻기 위하여 n-tridecane(C₁₃H₂₈, 90wt%)에 naphthalene(C₁₀H₈, 9wt%)과 Tetramethyl-p-phenylene diamine(TMPD, C₁₀H₁₆N₂, 1wt%)을 예혼합한 것을 사용했다. 또 연료의 착화와 형광제 TMPD의 산화를 방지하기 위하여 연료의 제작 및 보존은 질소분위기에서 행하였다. 실험은 실제의 소형 직분식 디젤기관의 연료분사 직전 실린더 내의 고온·고압에 상당하는 조건이 모사 가능한 정용용기(Constant-Volume Chamber, CVC)에서 실시하였다. 분사장치는 커먼레일식 연료분사장치(Denso社, ECD-U2)를 사용했고, 연료는 단공 홀노즐($l/d=1.0\text{mm}/0.2\text{mm}$)에서 정지분위기 중에 분사된다.

표 1에 본 연구의 실험조건을 보인다. Fig. 1에 Antoine⁽⁵⁾의 식으로부터 구한 n-tridecane의 증기압선도를 나타낸다. 본 연구에서 정한 실험변수는 분사압력, 주위가스밀도 및 주위가스온도이다. 분사압력이 실험변수인 경우 실험조건은 연료의 임계점을 넘은 초임계영역이고, 실험변수가 주위가스밀도와 주위가스온도의 경우는 연료상(相)의 상태

Table 1 Experimental conditions

Injection nozzle	Type : Hole nozzle DLL-p	
	Diameter of hole d_n [mm]	0.2
	Length of hole L_n [mm]	1.0
Ambient gas		Nz gas
Ambient temperature T_a [K]		400, 500, 600, 700
Ambient pressure P_a [MPa]		1.48, 1.83, 2.19, 2.55
Ambient density ρ_a [kg/m ³]		5.0, 8.2, 12.3
Injection pressure P_{inj} [MPa]		22, 42, 72, 112
Injection quantity Q_{inj} [mg]		12.0
Injection duration t_{inj} [ms]		2.82, 1.98, 1.54, 1.20

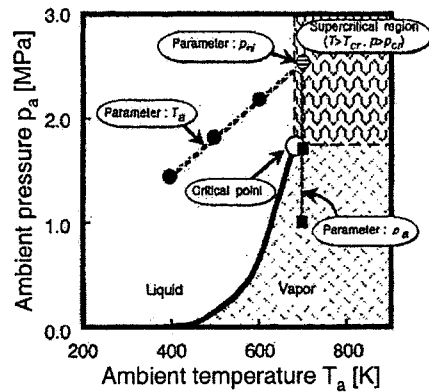


Fig. 1 Experimental point with saturated vapor line (n-tridecane critical point : $T_c=677\text{K}$, $p_c=1.72\text{MPa}$)

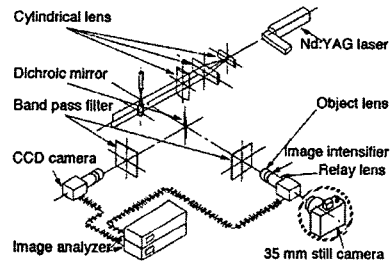


Fig. 2 Schematic diagram of laser sheet optical system and photography system

가 기·액상의 영역에서 초임계영역까지 변화한다.

Fig. 2에 본 연구에 사용한 레이저 시트 광학계의 개략을 보인다. 광원으로써 Nd:YAG 레이저(파장:355nm, 출력: 60mj/pulse, 빔직경:f=6.4mm의 doughnut빔, 펄스폭 8nsec, 최대발진주파수:10Hz)를 사용했다. 특히 분무액상관측의 경우 CCD 카메라와 Still 카메라를 함께 사용했다.

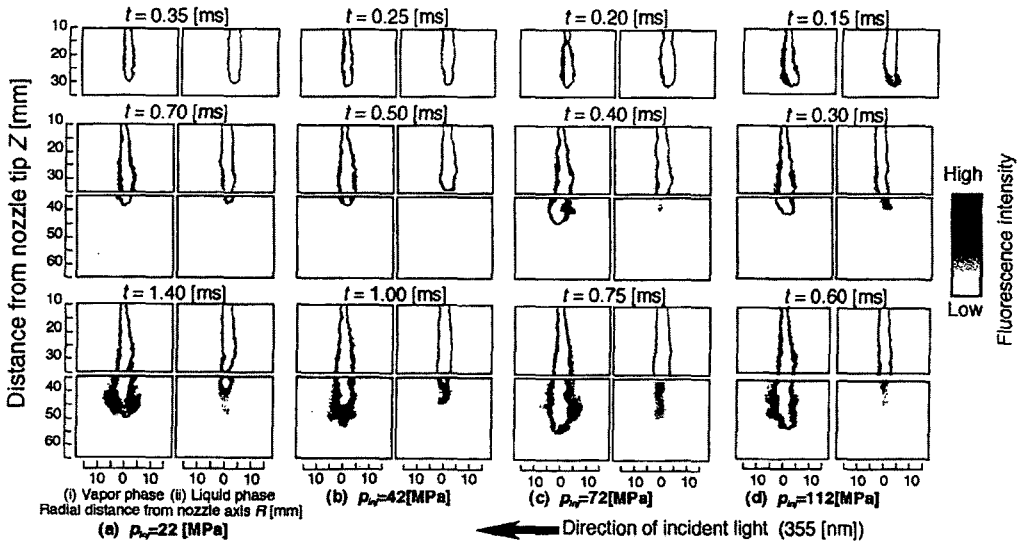


Fig. 3 Temporal change in the free spray image taken by exciplex fluorescence method ($Q_{inj}=12.0\text{mg}$, $\rho_a=12.3\text{kg/m}^3$, $T_a=700\text{K}$)

3. 결과 및 고찰

3.1 분사압력의 영향

자유분무의 분사압력 변화에 대한 2차원 형광강도화상을 Fig. 3에 보인다. 분사압력을 $p_{inj}=22\text{MPa}$ 에서 $p_{inj}=112\text{MPa}$ 까지 변화시켰다. 그림 중의 (i)와 (ii)는 각각 분무의 기상과 액상을 나타내고, 화상 획득시간은 각 분사압력에 있어서 분사된 연료의 질량이 같게 되는 시간(t/t_{inj} 가 같음)으로서 설정했기 때문에 각 조건에 따라서 그 촬영시간은 다르다. 본 실험에 있어서 분무의 액상선단도달거리를 액상화상의 형광강도가 최대치(255)의 90% 이상 영역(230~255)으로서 정의하고, 분무 중심축에 있어서 액상선단도달 거리를 구했다. 주위 가스 온도와 밀도는 700K과 12.3kg/m^3 이고 이 조건은 분사연료 n-tridecane의 임계조건을 넘은 초임계조건 영역이다. 또한 Fig. 4에 Fig. 3의 화상 처리 결과로서 무차원 시간에 대한 분무의 액상선단도달거리의 변화를 나타낸다. $Dan^{(6)}$ 등의 비증발 분무에 있어서는 시간의 경과와 함께 분무의 액상선단도달거리가 증가하지만, 증발분무에서는 Fig. 3과 4에서 알 수 있는 바와 같이 액상의 선단도달거리는 분사압력이 증가함에는 관계없이 거의 일정한 값을 가지는 경향을 알 수

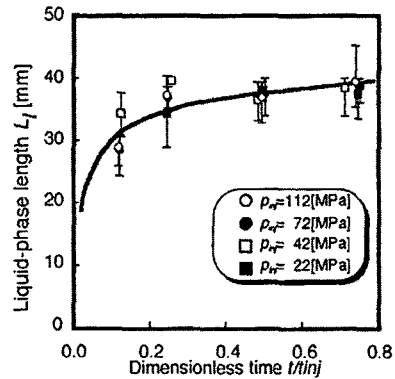


Fig. 4 Temporal change in liquid phase length

있다. 이것은 액상의 선단도달거리를 고찰함에 있어 중요한 실험결과이다. 즉, 주위조건이 연료의 임계조건을 넘은 경우에는 주위조건의 변화와 관계없이 분무의 액상선단도달거리는 일정하게 되는 경향을 보인다.

3.2 주위 가스 밀도의 영향

Fig. 5에 주위 밀도의 범위 $\rho_a=5.0\text{kg/m}^3 \sim 12.3\text{kg/m}^3$ 에 있어서 분무 기-액상의 시간변화를 나타낸다. 이 경우 주위 온도는 700K 일정으로 했

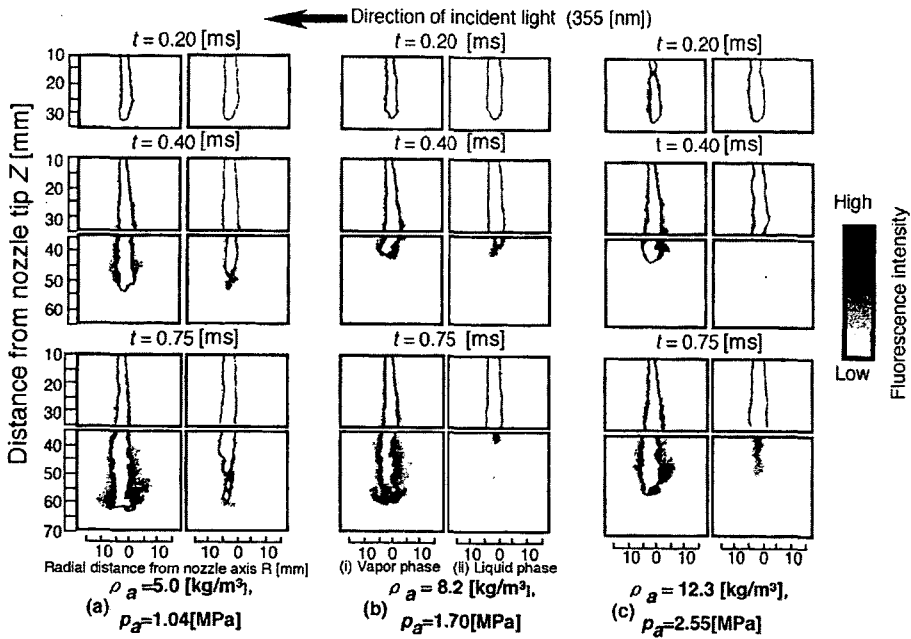


Fig. 5 Temporal change in the free spray image taken by exciplex fluorescence method ($T_a=700\text{K}$, $p_{inj}=72\text{MPa}$)

다. Fig. 5(a)에 나타난 것과 같이 주위밀도가 낮은 경우에는 주위밀도가 높은 경우에 비교해 분무의 기상과 액상 모두 선단도달거리가 증가한다. 그러나 Fig. 5(b), (c)의 주위밀도가 높은 경우, 즉 연료의 임계점을 넘은 영역에서는 분무의 액상선단도달거리가 어떤 일정한 값에 수렴하는 경향을 보인다. 이것으로부터 실험장의 주위조건이 연료의 임계점을 넘은 경우, 분무의 액상선단도달거리는 주위조건 변화에도 불구하고 어떤 일정한 값을 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 주위의 물리적 조건이 연료의 임계조건을 넘는 경우, 액상의 선단도달거리는 주위조건 변화에는 영향을 받지 않고 일정한 값을 가지게 됨을 알 수 있다.

Fig. 6에 무차원시간에 대한 분무의 액상선단도달거리를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 주위가스밀도가 연료의 임계점을 넘은 조건에 있어서는 분무액상의 선단도달거리는 거의 변화가 없다. 본 실험에 있어서 그 값은 약 40mm 이고, 액상의 선단도달거리에 관한 이전의 연구 Hodges,⁽⁷⁾ Yeh⁽⁸⁾ 등의 결과와 동일한 값을 나타내고 있다.

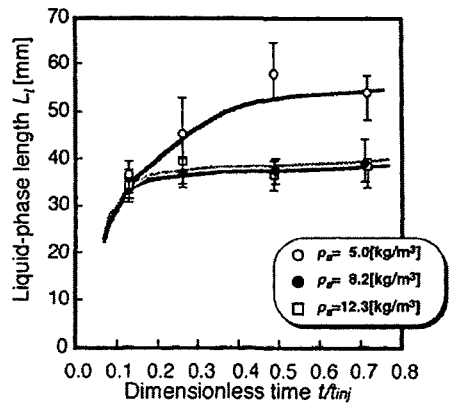


Fig. 6 Temporal change in liquid phase length

3.3 주위가스온도의 영향

Fig. 7에 주위온도를 변화 시킨 경우, 엑시플렉스 형광법을 이용해 촬영한 시간변화에 대한 분무액상의 화상을 나타낸다. 실험변수가 주위 가스 밀도의 경우와 동일한 결과로서 분무의 액상선단도달거리는 주위온도가 낮은 경우($T_a=400\text{K}$, 500K)에는 온도상승과 함께 감소한다. 그러나 주위온도가 높은 경우($T_a=600\text{K}$, 700K)에는 액상의

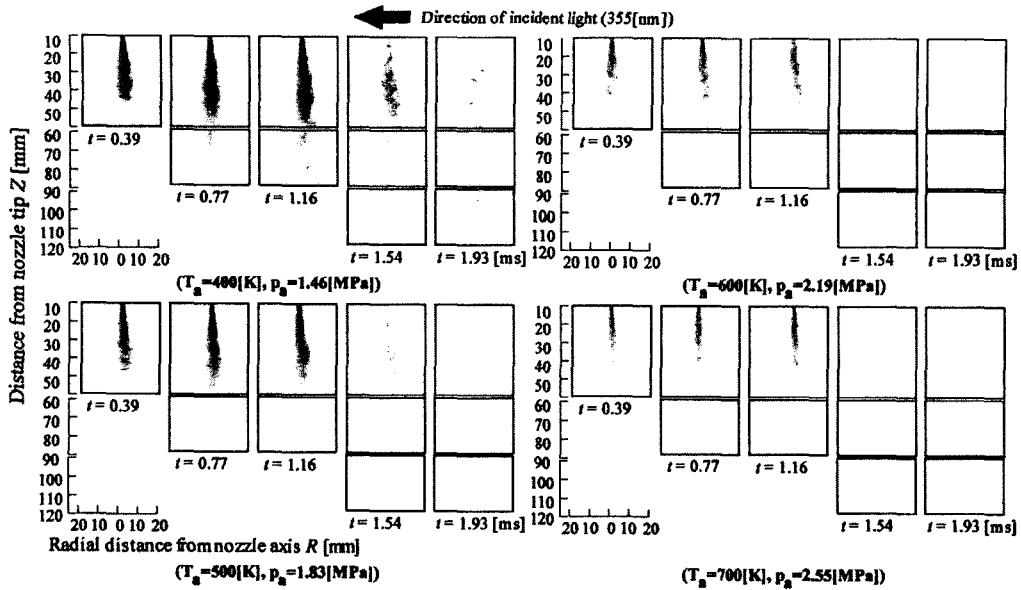


Fig. 7 Temporal change in the free spray image taken by exciplex fluorescence method ($Q_{inj}=12.0\text{mg}$, $\rho_a=12.3\text{kg/m}^3$, $p_{inj}=72\text{MPa}$)

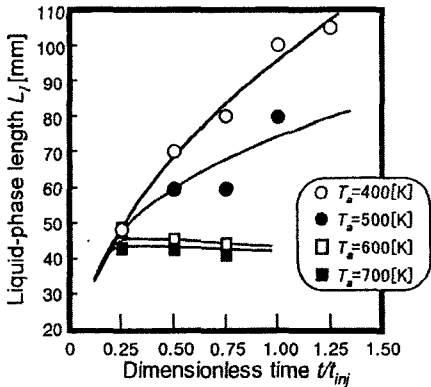


Fig. 8 Temporal change in liquid phase length

선단도달거리는 주위온도의 증가와는 관계없이 변화가 거의 없다. 이러한 결과로부터 디젤분무의 증발과정에 있어서 어떤 임계현상(Critical phenomenon)의 존재를 생각할 수 있다.

Fig. 8에 각 설정 주위온도에 있어서 무차원시간에 대한 분무의 액상선단도달거리의 변화를 나타낸다. 그림에서 분무의 액상선단도달거리의 변동은 주위가스온도가 연료의 임계조건($\approx T_{cr, fuel}=677\text{K}$)에 근접함에 따라 분사압력과 주위가스밀도 변화의 경우와 같이 어떤 일정한 값에 수렴하는

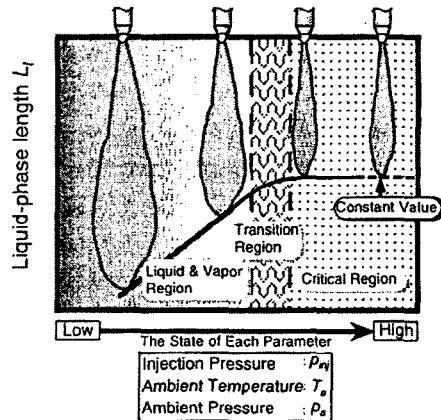


Fig. 9 History of liquid phase length for each experimental condition in evaporative diesel spray

경향을 보인다.

Fig. 4, 6과 8의 화상해석의 결과에서 관측되어진 경향을 정리한 결과를 Fig. 9에 보인다. 분무의 액상선단도달거리는 주위가스온도(T_a)와 밀도(ρ_a)에 의해 영향을 받는 것을 알 수 있다. 즉, 분무액상의 선단도달거리는 주위가스온도(T_a)와 밀도(ρ_a)가 증가함에 따라 감소한다. 그러나 주위온도와 밀도(압력)가 연료의 임계조건을 넘는 경우($T_a \geq T_{cr}$, $\rho_a \geq \rho_{cr}$)에 있어서는 분무의 액상선단도달

거리는 하나의 일정한 값을 가지는 것을 알 수 있다. 따라서 본 실험과 같이 연료의 상변화가 일어나는 증발분무의 경우, 연료의 임계조건이 분무의 액상선단도달거리변화에 중요한 역할을 하는 것을 알 수가 있다. 본 연구의 결과에서 분사되어진 연료의 액상선단도달거리의 증발과정에 있어서 연료의 임계점에 의한 액상 선단도달거리(L)의 변화가 나타나지 않는 분기점(Bifurcation)의 존재가 확인되었다. 이러한 분무거동특성을 보이는 물리적인 한 이유로서 Dan⁽⁹⁾ 등의 비증발 분무 연구의 결과와 같이 증발분무의 발달 과정에 있어서도 분사 연료 운동량의 주위기체로의 전달에 필요한 운동량 교환길이(Length of the momentum exchange)의 존재를 들 수 있다. 증발 디젤분무에 있어 이 운동량 교환길이는 분무의 발달과정을 구분하는 기준점이 된다. 즉, 운동량 교환길이 영역내의 분무거동특성을 지배하는 것은 분사된 액체연료의 유동이며, 그 길이 이후의 영역에서는 분사된 연료로부터 운동량을 얻은 주위 기체의 유동이 증발분무의 발달특성을 지배한다. 이러한 결과로부터 본 실험연구에서 정한 실험조건보다 더욱 높은 고온, 고압의 주위조건에서 증발분무의 액상선단도달거리변화도 어느 하나의 값에 수렴하는 경향을 보일 것이며, 그 길이의 변화특성은 본 실험에서 얻은 것보다 작은 값을 가질 것으로 예상된다. 또한 액상의 선단도달거리변화에 영향을 미치는 다른 중요한 요인으로서 주위가스와 연료의 열전달과정을 들 수 있고, 보다 상세한 액상분무의 선단도달거리에 관한 해석을 위해서는 그 열전달과정에 대한 실험 연구와 함께 수치해석연구도 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서 주위조건 변화가 증발디젤분무의 액상분무거동에 미치는 영향을 조사했고, 그 결과를 아래에 정리한다.

(1) 증발장에 있어서 주위가스밀도, 주위가스온도의 변화는 분무의 발달과정에 영향을 미치고,

그 영향은 주위조건이 연료의 임계조건을 넘지 않는 경우가 크다.

(2) 실험조건이 사용연료의 임계조건을 넘는 경우 분무의 액상선단도달거리는 주위조건변화에 영향을 받지 않게 되고, 어떤 일정값에 수렴하는 경향을 보인다. 본 연구에서 그 값은 약 40mm이고, 실험조건과 사용연료의 물성특성(비등점)에 따라서 그 값은 변화할 수 있다.

참고문헌

- (1) Wakuri, Y., Fujii M., Amitani, T. and Tsuneya, R., 1959, "Studies on the Penetration of Fuel Spray of Diesel Engine," *JSME(part2)*, Vol. 52, No. 156, pp. 820~826(in Japanese).
- (2) Hiroyasu, H., Katoda, T. and Tasaka, S., "Study of the Penetration of Diesel Spray," *JSME*, pp. 3208~3219, 1978(in Japanese).
- (3) Hiroyasu, H. and Arai, M., "Fuel Spray Penetration and Spray Angle in Diesel," *JSAE*, No.21, pp. 5~11, 1980(in Japanese).
- (4) Siebers, D. L., 1998, "Liquid-Phase Fuel Penetration in Diesel Spray," *SAE Paper*, No.980809,
- (5) Sato, K., 1979, *The Calculation of Property Constant*, pp. 204~205.
- (6) Dan, T., Takagishi, S., Oishi, N., Senda, J. and Fujimoto, H., 1996, "The study of the spray structure in the high injection pressure," *JSME(part2)*, Vol. 62, No. 597, pp. 2079~2085(in Japanese).
- (7) Hodges, J. T., Barutaud, T. A. and Heinze, T. A., 1991, "Planar Liquid and Gas Fuel and Droplet Size Visualization in a DI diesel Engine," *Transactions of the SAE*, Vol.100, Sect.3, pp. 1284~1302.
- (8) Yeh, C. N., Kamimoto, T., Kobori, S. and Kosaka, H., 1993, "2-D Imaging of Fuel vapor Concentration in a Diesel Spray via Exciplex-Based Fluorescence Technique," *SAE Paper*, No.932652.
- (9) Dan, T., Takagishi, S., Senda, J. and Fujimoto, H., 1997, "Organized Structure and Motion in Diesel Spray," *SAE Paper*, No. 970641.