

증발디젤분무의 발달 과정에 관한 연구

염정국·박종상·정성식·하종률·김시범*

동아대학교 기계공학부

A Study on Development Process of Evaporating Diesel Spray

Jeongkuk Yeom · Jongsang Park · Sungsik Chung · Jongyul Ha · Sipom Kim*

Division of Mechanical Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

(Received 9 October 2006 / Accepted 16 November 2006)

Abstract : In this study, the effects of change in ambient gas viscosity on spray structure have been investigated in the high temperature and pressure field. To analyze the structure of evaporative diesel spray is important in speculation of mixture formation process. Emissions of diesel engines can be reduced by the control of the mixture formation process. Therefore, this study examines the evaporating spray structure in the constant volume chamber. The viscosity of ambient gas was selected as the experimental parameter, is changed from 21.7 mPa · s to 32.1 mPa · s by changing in ambient gas temperature. In order to obtain images of the liquid and vapor-phase of injected spray, exciplex fluorescence method was used in this study. The liquid and vapor-phase images were taken with 35mm still camera and CCD camera, respectively. Consequentially, it could be confirmed that the distribution of vapor concentration is more uniform in the case of the ambient gas with high viscosity than in that of the ambient gas with low viscosity.

Key words : Liquid phase(액상), Vapor phase(기상), Diesel spray(디젤분무), Viscosity(점성), Exciplex fluorescence Method(엑사이플렉스 형광법)

Nomenclature

I : fluorescence intensity(형광강도)
 t : time from injection start, ms(분사 후 시간)
 X : mole fraction(몰분율)
 ρ : density, kg/m³(밀도)
 μ : viscosity, Pa · s(점성계수, 점성)

l : liquid phase(액상)
 N_2 : nitrogen(질소)
 v : vapor phase(기상)

Subscripts

a : ambient gas(주위기체)
 f : fuel(연료)
 inj : injection(분사)

1. 서론

디젤엔진의 연소배출물(Emissions) 저감방법에는 연소전의 분무 제어에 의한 방법과 연소진행 중 및 연소후처리에 의한 방법이 있으나, 본 논문에서는 연소전의 분무제어에 의한 배출물저감에 목적을 두고 있다. 따라서 본 논문에서는 이를 위하여 엔진 실린더 내에 분사된 연료와 주위기체와의 상호작용 즉, 혼합기형성기구(Mixture formation mechanism)를 명확히 하여 분무제어를 위한 기초연구 결과를

*Corresponding author, E-mail: spkim@dau.ac.kr

제공한다.

실제 엔진의 경우와 같이 고온·고압의 분위기에서 분사되어진 연료는 두개의 발달영역을 가진다. 즉, 증발디젤 분무구조는 분사연료와 주위기체와의 상호작용이 활발히 일어나는 운동량교환영역과 분류(噴流)유동의 특성을 가지며 와운동(渦運動)이 지배적인 가스분류영역으로 나눌 수 있다. 전자에 있어서는 분무와 주위기체간의 상호작용의 원인인 전단응력과 주위기체의 점성계수가 영향을 미친다. 이 점성계수는 분무상류부에서 발생하는 와핵(渦核)의 생성¹⁾ 및 분무하류부의 와운동에도 영향을 미친다고 생각된다. 주위기체의 점성이 디젤분무구조에 미치는 영향에 관한 연구로서는 Dan²⁾의 비증발 디젤분무의 경우가 유일하며, 상변화(相變化)가 일어나는 증발장에 있어 증발분무 발달과정에 점성이 미치는 영향에 관한 연구는 없는 실정이다.

· 본 논문에서는 주위온도의 변화에 의해 연료 및 주위기체의 점성계수를 변화시켜 상변화가 일어나는 비정상·증발분무의 구조 및 혼합기형성과정에 미치는 영향에 대해서 해석을 한다. 각 실험 조건의 주위온도를 설정할 경우, 주위기체압력을 변화시켜 주위밀도(ρ_a)를 12.3 kg/m^3 로 일정하게 했다. 실험 장치는 실제 소형고속디젤엔진의 실린더내 연료분사 직전의 고온·고압의 분위기가 모사 가능한 정적용기를 사용했다. 그리고 연구영역을 분무의 액상과 주위기체의 영역(액상·기상의 영역)과, 분무의 기상과 주위기체의 영역(기상·기상의 영역)으로 나누어 분무의 구조해석을 행하는 것에 의해 증발분무의 혼합기형성과정을 명확히 한다.

2. 실험조건

표 1에 본 실험에 사용한 실험조건을 보인다. 그림 1은 실험연료 n-tridecane의 상태도를 나타낸다. 그림에서 ①, ②, ③ 및 ④는 실험조건이 400 K, 500 K, 600 K 및 700 K일 경우에 해당된다. 실험조건 $p_a=2.55 \text{ MPa}$ 과 $T_a=700 \text{ K}$ 의 경우는 n-tridecane의 임계점(Critical point)을 넘는 초임계영역(Supercritical region)이다. 따라서 연료의 임계조건이 증발분무의

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		N ₂ gas		
Ambient temperature T_a [K]	400	500	600	700
Ambient pressure p_a [MPa]	1.46	1.83	2.19	2.55
Viscosity of ambient gas μ_a [$\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$]	21.7	25.4	28.9	32.1
Kinematic viscosity of ambient gas ν_a [$\mu\text{m}^2/\text{s}$]	1.76	2.07	2.35	2.61
Ambient density ρ_a [kg/m^3]	12.3			
Injection pressure p_{inj} [MPa]	72			
Injection quantity Q_{inj} [mg]	12.0			
Injection duration t_{inj} [ms]	1.54			

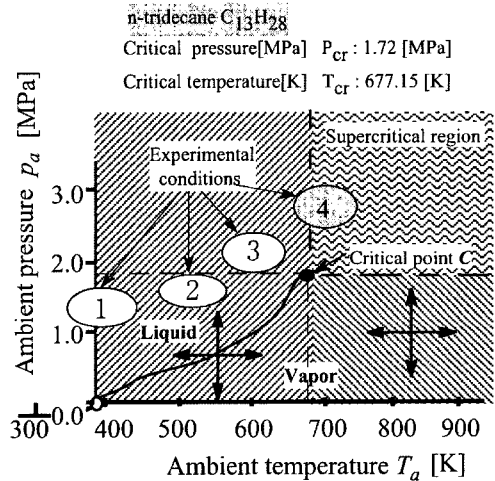


Fig. 1 Phase equilibrium for n-tridecane fuel in P-T diagram

발달과정에 미치는 영향도 함께 조사한다. 그림 2는 주위온도와 그 점성계수의 관계를 보인다. 이 계산은 탄화수소혼합물의 물성정수(物性定數) 예측 프로그램인 NIST Thermophysical Properties of Hydrocarbon Mixtures Database³⁾(이하, NIST)를 사용했다.

그림 3에 주위온도에 대한 n-tridecane의 액상인 경우는 NIST를, 기상에 대해서는 기체의 점성추산법⁴⁾에 의한 점성계수를 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 주위기체의 점성변화가 분무구조 및 유동특성에 미치는 영향 [분무의 액상과 주위기체의 영역(액상·기상의 영역)]

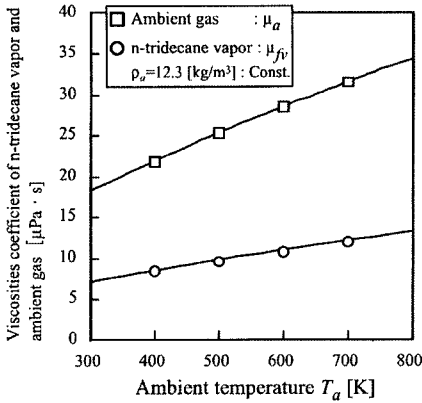


Fig. 2 Temperature dependence of viscosity coefficient for ambient gas

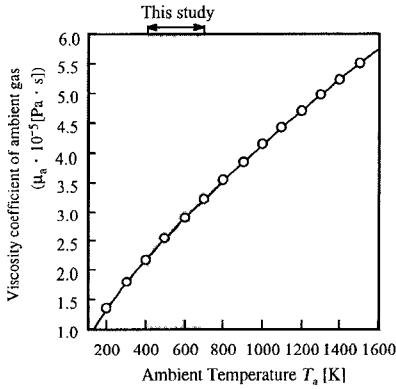


Fig. 3 Temperature dependence of viscosity coefficient for ambient gas and n-tridecane vapor

그림 4에 주위온도를 변화시킨 경우에 있어 액상 이플렉스 형광법에 의해 촬영한 분무액상의 시간경과 이미지를 보인다. 액상에 의한 여기광(勵起光)의 이미지 촬영에는 레이저 입사방향에 대하여 직각으로 설치한 35 mm 스틸카메라(Still camera)[Nikon F-301, 후지필름 네오판(Fuji film neopan 400)흑백, 선해상도 : 60~80 lines/mm]를 사용했다.

그림 4의 이미지에서 얻은 분무액상의 선단도달거리의 시간변화를 주위온도변화를 변수로 해서 그림 5에 보인다. 이 도달거리는 이미지 상에 형광강도가 나타난 지점까지로 정의했다. 분무의 액상선단도달거리는 주위온도가 낮은 경우($T_a=400\text{ K}, 500\text{ K}$)는 시간의 경과와 함께 증가한다. 한편, 주위온도가 높은 경우($T_a=600\text{ K}, 700\text{ K}$)의 액상선단도달거리는 주위온도의 변화에도 불구하고 거의 변화가 없다. 즉, 이 선단도달거리의 변화는 주위기체의 온도가 연료의 임계조건($\approx T_{cr, fuel}=677\text{ K}$)에 근접함에 따라 어떤 일정한 값에 수렴하는 경향을 보인다. 다음으로 주위온도의 변화에 의해 주위기체의 점성을 변화시킨 경우, 분무의 액상과 주위 기체의 영역(액상과 기상의 영역)에 있어서 분무구조특성을 조사한다.

그림 6에 그림 4의 분사개시 후 시간 $t=0.77\text{ ms}$ 경우의 분무액상 상류부의 확대사진을 보인다. 그림 2에 나타난 바와 같이 주위기체(질소)의 점성계수는

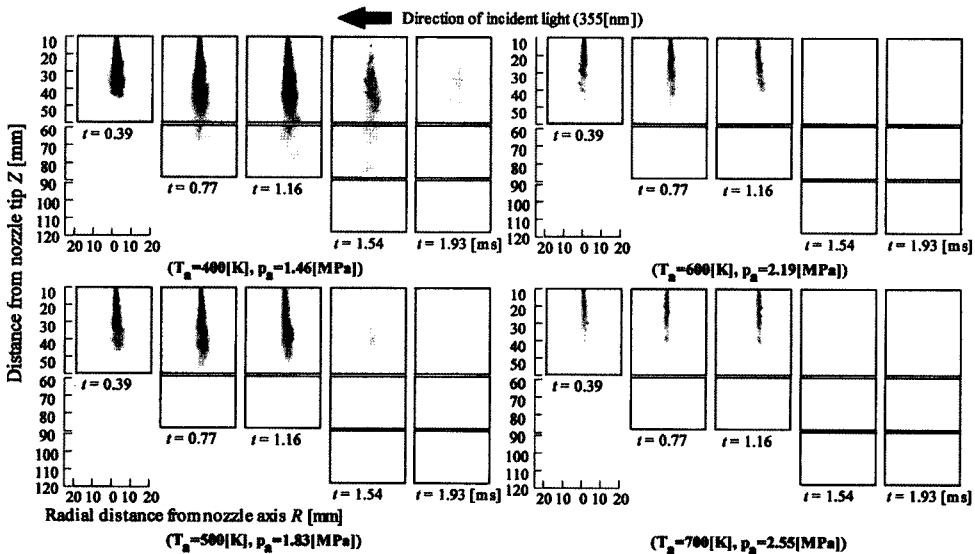


Fig. 4 Liquid phase fuel images taken by exciplex fluorescence method ($P_{inj}=72\text{ MPa}, Q_{inj}=12.0\text{ mg}, \rho_a=12.3\text{ kg/m}^3, T_a=700\text{ K}$)

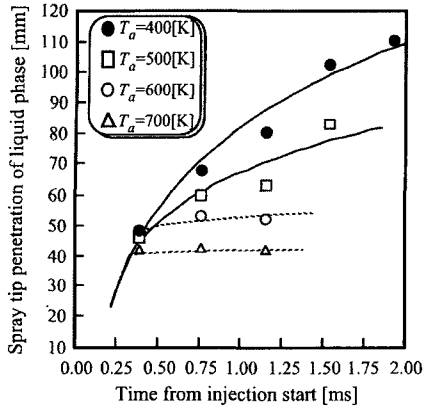


Fig. 5 Change in tip penetration of liquid phase against for ambient gas temperature

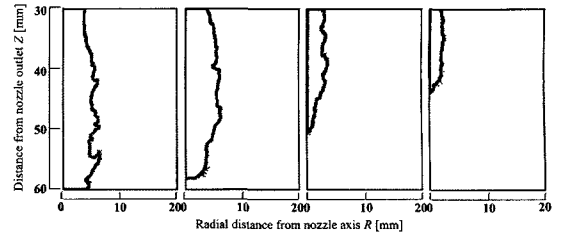


Fig. 7 Profile images of fuel liquid phase for temperature variation

감소에 의해 레이놀즈수($Re=\rho v d/\mu$) 증가로부터 분무액상과 주위기체의 계면(界面)에 있어서 흐트러짐이 증가하기 때문이라고 생각된다. 한편, 높은 온도의 주위기체 경우($T_a=600\text{ K}, 700\text{ K}$)는 점성계수 μ_a 의 증가에 의해 전단응력은 증가하지만, 레이놀즈수의 감소에 의해 분무액상과 주위기체의 계면에서는 층류화된 유동을 알 수 있다. 즉, 점성계수 μ_a 의 변화에 의한 전단응력(t) 보다 레이놀즈수의 효과가 보다 지배적이라고 판단된다. 이 때 액상주위에는 기상이 많이 존재한다고 예상되어지기 때문에 분무기상부의 외곽선이 보다 복잡한 형상으로 되는 것을 충분히 예상할 수 있다.

그림 7에는 분사개시 후 시간 $t=0.77\text{ ms}$ 에 있어서 분무 외곽선의 형상들을 보인다. 이 경우(a)의 증발의 정도가 낮은 조건 I(그림 1 참조)에서는 점성계수 μ_a 가 작기 때문에 레이놀즈수의 증가에 기인하는 난류성유동에 의해 요철이 심한 분무 외곽선을 볼 수 있다. 또한, 주위조건이 고온·고압이 됨에 따라 점성계수 μ_a 가 증가하고, 레이놀즈수 감소에 의해 분무 외곽에서는 매끈한 형상을 갖는 층류성유동이 지배적으로 된다.

그림 8에 분사개시 후 시간 $t=0.77\text{ ms}$ 일 때, 노즐로부터 거리 40 mm에서 분무반경방향으로의 이미지 형광강도 변화를 보인다. I_{max} 는 분무 기조건이 $T_a=400\text{ K}, p_a=1.46\text{ MPa}$ 경우의 최대강도이다. 또 분무화상은 액상의 강도가 최대치(255)의 약 10% 이상의 영역(30~255) 이미지이다.

그림 9에 각 조건에 있어서 이진화(Threshold) 처리한 분무 이미지를 보인다. 이 처리에는 화상 application [NIH Image ; America 국립의료기관(National Institute of Health) 배포 소프트웨어]을 이용했다. 저온·저압의 경우($T_a=400\text{ K}, p_a=1.46\text{ MPa}$ 과 $T_a=500$

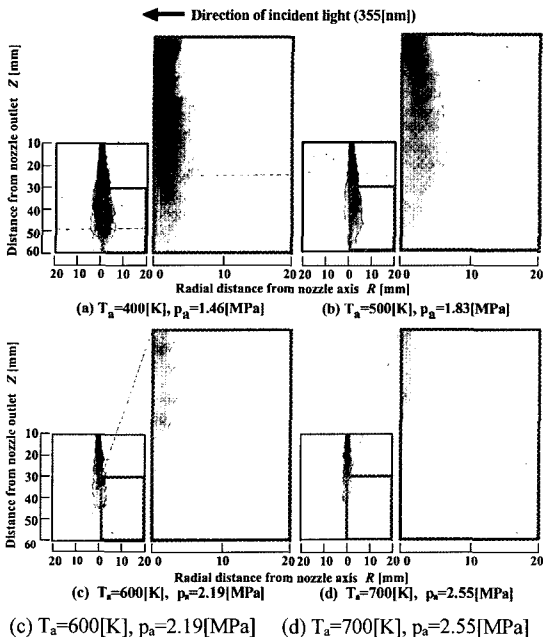


Fig. 6 Liquid phase images corresponding to fluorescence intensity of exciplex taken by 35mm still camera ($Q_{inj}=12.0\text{ mg}, \rho_a=12.3\text{ kg/m}^3, t=0.77\text{ ms}$)

주위온도가 상승함에 따라 증가한다. 따라서 낮은 주위온도($T_a=400\text{ K}, 500\text{ K}$)에 있어서는 점성계수를 변수로 하는 전단응력($t=\mu du/dy$)의 감소에 기인하는 운동량교환 감소에 의해 평탄한 외곽선을 갖는 분무를 예상했으나, 높은 주위온도의 경우($T_a=600\text{ K}, 700\text{ K}$)와 비교해 보다 복잡한 외곽선을 갖는 분무가 형성되어짐을 알 수 있다. 이것은 낮은 주위온도($T_a=400\text{ K}, 500\text{ K}$)의 경우 주위기체의 점성계수 μ_a 의

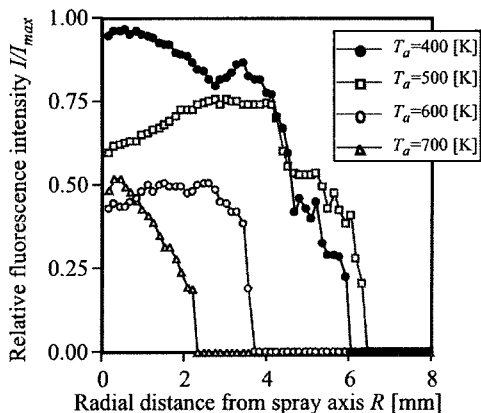


Fig. 8 Relative fluorescence intensity radial direction (at 40mm from nozzle outlet, $t=0.77\text{ms}$)

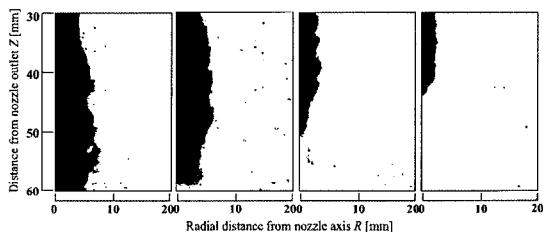


Fig. 9 Threshold images of liquid phase

K, $p_a=1.83\text{ MPa}$) 형광강도의 축방향 변화를 고온·고압의 경우($T_a=600\text{ K}$, $p_a=2.19\text{ MPa}$ 과 $T_a=700\text{ K}$, $p_a=2.55\text{ MPa}$)와 비교하면 그 변화가 불규칙적이다. 특히, 저온·저압의 경우, 분무외곽부에 있어 강도변화는(약 $5\text{ mm}<R$ 의 범위) 그 변화특성을 잘 나타내고 있고, 그러한 불규칙변동은 분무외곽부에서 점성계수 μ_a 의 감소에 의한 계면에서의 유동 난류화를 보인다.

3.2 분무기상부의 점성변화가 분무구조 및 유동특성에 미치는 영향 [분무의 기상과 주위기체의 영역(기상·기상의 영역)]

실린더 내에 분사된 연료는 확산과 주위기체의 도입에 의해 분무기상부는 점차 희박으로 되고, 이와 함께 점성도 변화한다. 이 절에서는 분무기상부 점성계수의 변화가 분무구조에 미치는 영향을 조사한다.

그림 10에 NIST로부터 구한 분무에 도입된 주위기체인 질소의 물분율과 n-tridecane의 점성계수의 변화를 보인다. 분무내로 도입된 주위기체의 양이

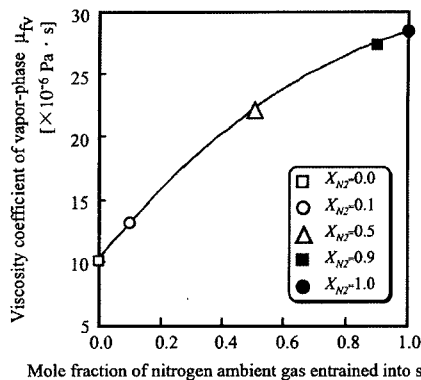


Fig. 10 Relation between viscosity coefficient of vapor phase fuel and mole fraction of ambient gas entrained into spray

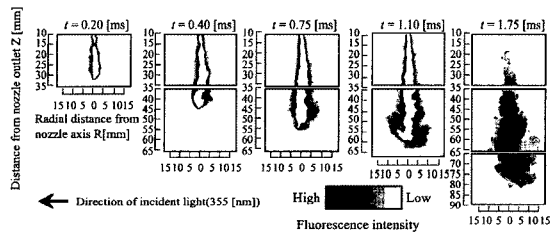


Fig. 11 Temporal change in vapor phase of free spray image taken by exciplex fluorescence method($p_{inj}=72\text{ MPa}$, $Q_{inj}=12.0\text{ mg}$, $p_a=12.3\text{ kg/m}^3$, $T_a=700\text{ K}$)

많아질수록 점성계수는 증가한다. 분무발달과정에 있어서는 분사 후, 분무중기의 확산에 의한 고온의 혼합기형성으로 그 점성이 높게 된다.

주위조건($T_a=700\text{ K}$, $p_a=2.55\text{ MPa}$, $p_a=12.3\text{ kg/m}^3$)에 있어서 기상의 이미지를 그림 11에 보인다. 분사 개시 후 시간 $t=0.20\text{ ms}$ 에서 기상부의 외곽부분은 비교적 평탄한 형상을 나타낸다. 이 시간을 초과하면 분무외곽부 특히, 그 측면에 요철부가 나타나지만, 분무이미지 전영역에 있어서 낮은 농도의 증기 존재를 확인할 수 있다. 시간 $t=1.75\text{ ms}$ 에서는 분무기상에 도입된 고온의 주위기체 양의 증가 때문에 점성이 높은 혼합기가 형성되어져 분무외곽부가 보다 복잡한 형상으로 된다. 즉, 기상의 점성증가에 의해 분무 내에 있어서 희박혼합기의 형성이 예상된다. 또한, 분무의 기상과 주위기체의 영역(기상·기상의 영역)에 있어서는 분무의 액상과 주위기체의 영역(액상·기상의 영역)과는 상이하게 계면에서 레이놀즈수의 감소 효과(유동의 층류화)보다 분무

기상부의 점성계수(μ_a) 증가에 따른 전단응력의 증가효과가 지배적으로 됨을 알 수 있다.

3.3 연료의 초임계조건이 비정상·증발분무의 액상발달에 미치는 영향

그림 12에 이전의 밀도변화에 대한 실험연구⁵⁾ 및 본 연구에서 구한 분무 액상선단도달길이 변화거동에 대한 결과를 정리해서 보인다. 액상길이의 증가율은 주위온도의 상승과 함께 감소하지만 $T_a=700$ K의 경우는 거의 일정으로 된다. 낮은 주위기체 밀도 $\rho_a=5.0$ kg/m³에서 액상길이는 최대값을 나타내지만 $\rho_a=8.2$ kg/m³과 $\rho_a=12.3$ kg/m³의 경우 액상길이는 높은 주위기체온도와 같이 거의 일정한 값을 보인다. 이와 같은 결과의 한 요인으로써 분사연료인 n-tridecane의 임계분위기조건($T_{a,cr}=677$ K, $p_{a,cr}=1.72$ MPa)을 들 수 있다. 실험에서 설정한 주위온도 $T_a=600$ K, $T_a=700$ K과 주위기체의 밀도 $\rho_a=8.2$ kg/m³, 12.3 kg/m³은 연료의 임계점근방 및 초임계영역이다. 따라서 증발디젤분무에 있어 분무액상부의 발달과정에 대한 연료 임계조건에 영향을 고려되어야 한다.

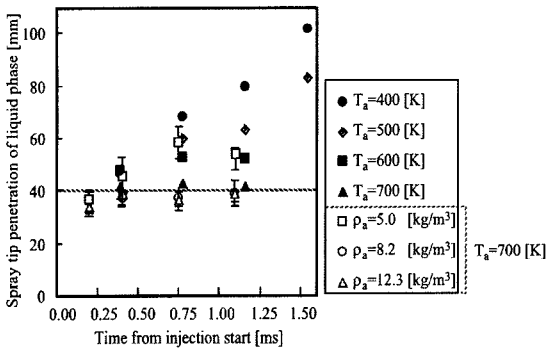


Fig. 12 Summary of liquid phase length as functions of ambient gas temperature and its density

4. 결론

본 연구에서는 주위기체의 온도변화에 의한 주위 기체 점성 및 연료의 점성이 증발디젤분무구조에 미치는 영향을 조사했고, 그 결과를 아래에 정리한다.

1) 주위기체온도의 증가와 함께 주위기체의 점성 계수가 크게 되고, 이것에 의해 분무의 액상과 주위기체(액상·기상의 영역)의 계면에서는 주위

기체의 레이놀즈수의 감소에 의해 층류화 된 유동이 지배적으로 된다.

- 2) 분무기상부의 점성계수는 주위기체의 도입에 의해 증가한다. 이 효과에 의해 분사초기의 분무 외곽부는 평탄한 형상을 가지지만 시간경과와 함께 기상부에 도입된 고점성의 주위기체 때문에 외곽부는 보다 복잡한 형상으로 된다. 이것으로부터 주위기체의 도입에 의한 분무의 확산과 함께 희박한 혼합기의 형성을 알 수 있다.
- 3) 주위기체의 온도와 밀도는 증발분무액상의 발달과정에 영향을 미친다. 이 경우 주위 분위기 조건이 연료의 임계조건 내에 있으면 액상선단도달거리는 주위의 온도와 밀도 등의 영향을 받는다. 그러나 실험조건이 연료의 임계점을 넘어 설계 경우 분무 액상의 선단도달거리는 주위조건변화의 영향을 받지 않게 된다.

후 기

이 논문은 2005학년도 동아대학교 학술연구비(공모과제)에 의하여 연구되었음.

References

- 1) A. Azetsu, S. Dodo, T. Someya and C. Oikawa, "A Study on the Structure of Diesel Spray (2-D Visualization of the Non-evaporating Spray)," COMODIA 90(Kyoto), pp.199-204, 1990.
- 2) T. Dan, "Turbulent Structure and Formation Mechanism of Diesel Sprays," Doshisha University, Ph. D. Dissertation, 1996.
- 3) J. F. Ely and M. L. Huber, "NIST Thermophysical Properties of Hydrocarbon Mixture Database(SUPERTRAPP) Version 1.0 Users' Guide," National Institute of Standards and Technology, 1992.
- 4) 大江 修造, 設計者のための物性定数推算法, pp.228-234, 日刊工業新聞社, 1985.
- 5) J. K. Yeom, J. S. Park and S. S. Chung, "A Study on the Mixture Formation Process of Diesel Fuel Spray in Unsteady and Evaporative Field," KSME Int. J., Vol.19, No.12, pp.2253-2262, 2005.