

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.3.201

증발디젤분무의 혼합기 형성과정에 대한 열역학적 접근

염 정 국[†]

(2008년 11월 27일 접수, 2009년 2월 10일 수정, 2009년 2월 11일 심사완료)

Thermodynamic Approach to the Mixture Formation Process of Evaporative Diesel Spray

Jeongkuk Yeom

Key Words: Diesel-Free Spray(디젤자유분무), Evaporative Spray(증발분무), Exciplex Fluorescence Method(엑시플렉스형광법), Phase Change(상변화), Mixture Formation Process(혼합기형성과정)

Abstract

The focus of this work is placed on the analysis of the mixture formation process under the evaporative diesel-free spray conditions. In order to examine homogeneity of mixture within the vapor phase region of the injected spray, image analysis was carried out based on the entropy of statistical thermodynamics. As an experimental parameter, the injection pressure and ambient gas density were selected, and effects of the injection pressure and density variation of ambient gas on the mixture formation process in the evaporative diesel spray were investigated. In the case of application of the thermodynamic entropy analysis to evaporative diesel spray, the value of the dimensionless entropy always increases with increase in time from injection start. Consequently, the dimensionless entropy in the case of the higher injection pressure is higher than that of lower injection pressure during initial injection period.

기호설명

- k : 볼츠만상수
- p : 분사압력, MPa
- R : 반경방향 거리, mm
- T : 주위온도, K
- S : 무차원 엔트로피
- M : 전체 픽셀수
- Z : 노즐로부터 거리, mm

그리스문자

- ρ : 주위기체 밀도, kg/m^3

하첨자

- a : 주위기체
- inj : 분사
- t : 전체

1. 서론

디젤기관에서는 연료분사에 의한 혼합기형성의 최적화를 통하여 연소제어를 시도하는 수법이 증시되고 있다. 이를 위해서는 디젤분무 거동특성 해석에 기초한 혼합기형성 기구의 규명이 매우 중요하다. 디젤분무에 관한 연구로서 Hiroyasu,⁽¹⁾ Dan,⁽²⁾ Siebers⁽³⁾와 Kim⁽⁴⁾ 등이 있으나 Hiroyasu와 Dan 등의 실험조건은 저온의 분무 상변화가 일어나지 않는 비증발장이고, Siebers와 Kim 등은 증발장에서 증기의 농도에 대해서 연구를 행하였다. 따라서 본 연구에 있어서는 노즐에서 분사된 연료의 증기와 주위기체와의 상호작용으로 형성된 혼합기 자체의 연료 증기분포 상태에 대한 확산정도에 대한 해석 방법의 한 수단으로써 통계열역학에 기초한 무차원 엔트로피(dimensionless entropy)⁽⁵⁾의 개념을 도입한다. 무차원 엔트로피는 상태의 확률을 나타내고, 확산이 진행함에 따라 증가하는 경향을 가진다. 그래서 이 지표(index)를 이용해 확산상태의 해석을 행하였다. 어

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

편 시스템, 즉 관측공간에 있어서 휘도(輝度) 값의 적산(積算)값에 상당하는 물질입자가 이미지(화상) 전체에 낮은 농도의 기상이 균일하게 분산한 상태의 엔트로피를 1로, 관측공간으로부터 구한 이미지에서 높은 농도의 연료증기가 가장 응집한 상태(응집메시수=휘도값의 적산값/최대휘도값)의 엔트로피가 0으로 되도록 정규화(正規化)를 실시하였다.(식 7참조) 실험변수로서는 분사압력과 주위기체밀도를 변화시켰다. 또한 해석용 이미지의 획득을 위해서는 Melton⁽⁶⁾이 제안한 엑시플렉스형광법(exciplex fluorescence method)을 이용하여, 분무의 액상과 기상을 동시에 독립적으로 가시화촬영을 행하였으나, 혼합기형성은 증발분무의 기상이 주로 관여하기 때문에 무차원 엔트로피 해석은 획득 이미지의 분무 기상부에 대해서만 실시하였다.

2. 통계열역학적(統計熱力學的) 엔트로피개념

증발분무 기상부의 확산정도, 즉 혼합기균일화 정도의 지표인 무차원 엔트로피를 도입해 해석하기 위하여 통계열역학에 기초한 엔트로피개념을 이용한다. 본 연구에서는 이 지표를 엑시플렉스형광법에서 얻은 기상부의 화상에 적용하고, 분사연료 기상부의 확산진행의 거동특성에 대해서 해석을 행한다.

엔트로피는 혼란의 정도를 나타내는 물리량이고, 혼합 상태가 진행함에 따라 증가하는 특징이 있다. 공간을 M개의 메시(mesh)로 분할하고, 그 중에 N개의 입자 또는 분자가 분포하는 경우, 각 메시에 입자가 각각 N_1, N_2, \dots 로 존재하는 상태 $\{N_1, N_2, N_3, \dots, N_m\}$ 에 상응하는 미시상태(微視狀態)의 조합수 W는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = {}_N C_{N_1} \times (N - N_1) C_{N_2} \times \dots \times {}_{N_M} C_{N_M} \\ = \frac{N!}{N_1! N_2! N_3! \dots N_M!} = \frac{N!}{\prod_i N_i!} \quad (1)$$

엔트로피는 W의 자연대수로서 표시되고, $N \gg 1$ 로 가정할 수 있다면 스타링(Stirling)의 근사식을 적용할 수 있기 때문에 볼츠만상수(Boltzmann constant) k를 이용해 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$W(N_1, N_2, N_3, \dots, N_M) = \frac{N!}{\prod_i N_i!} \quad \sum_i N_i = N$$

$$\ln n! \approx n \ln n - n \quad (n \gg 1)$$

$$\ln W(N_1, N_2, N_3, \dots) = \ln N! - \sum_i \ln N_i! \\ = M \ln N - N - \sum_i N_i \ln N_i + \sum_i N_i \\ = M \ln N - \sum_i N_i \ln N_i$$

$$S = k \ln(W) = k [M \ln(N) - \sum_i \{N_i \ln(N_i)\}] \quad (2)$$

각 메시 내의 입자수 N_i 는 화상의 휘도 $I(i)$ 에 비례한다고 가정하면 다음과 같이 표시된다.

$$S = \alpha \sum_i I(i) \ln \left\{ \alpha \sum_i I(i) \right\} - \sum_i [\alpha I(i) \ln(\alpha I(i))] \\ = \alpha \sum_i I(i) \ln \left\{ \sum_i I(i) \right\} - \alpha \sum_i I(i) \ln(I(i)) \quad (3)$$

여기서, α 는 볼츠만정수, 입자수 및 휘도와 관련된정수를 포함하는 정수이다. $I(i)$ 는 M개로 분할한 메시 내의 입자수에 대응하는 휘도값이고, 메시 내의 각 픽셀(pixel) 휘도값의 합이다. 입자가 화상전체에 균일하게 분산한 상태를 고려한 경우의 평균휘도는 공간 분할수(메시 수)를 M으로 하면 다음과 같이 된다.

$$\overline{I(i)} = \frac{1}{M} \sum I(i) = \frac{I_t}{M} \quad (4)$$

여기서, I_t 는 공간전체 휘도의 합이다. 이 균일 상태의 엔트로피는 아래와 같이 된다.

$$S_1 = \alpha I_t \ln(M) \quad (5)$$

한편, 화상전체의 휘도값 합이 일정이고, 0과 256인 두개의 휘도값으로 분할한 상태, 즉 완전히 2개 값으로 분리한 경우의 엔트로피 S_0 는 P를 휘도값 256이 차지하는 메시 수라고 하면 다음식과 같이 된다.

$$S_0 = \alpha [I_t \ln(I_t) - P 256 \ln(256)] \\ = \alpha [I_t \ln(I_t) - I_t \ln(256)] \quad (6)$$

S_1 과 S_0 를 이용해 엔트로피가 최대로 될 때를 1로, 최소로 될 때를 0으로 하여 정규화⁽⁷⁾를 실시하면 다음과 같이 된다.

$$S = \frac{S - S_0}{S_1 - S_0} = \frac{I_t \ln(256) - \sum_i \{I(i) \ln(I(i))\}}{I_t \{\ln(M) - \ln(I_t) + \ln(256)\}} \quad (7)$$

정규화를 행하는 전·후 엔트로피에 동일한 기호 S를 사용하지만, 본 연구에서는 정규화한 것만을 사용한다.

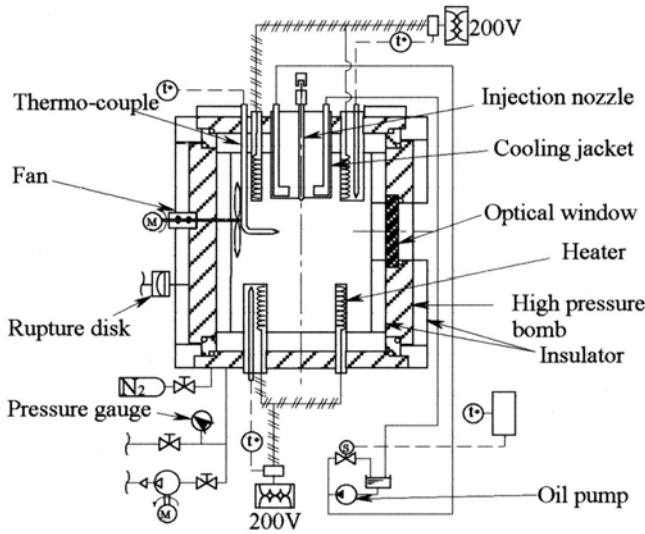


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

3. 실험장치 및 실험조건

3.1 고온·고압 정적용기(constant volume chamber, CVC)

Fig. 1에 본 실험에 사용한 고온·고압용기의 개략을 나타낸다. 용기의 재질은 SS41이고, 설계압력은 3.4MPa, 최대사용압력은 3.0MPa이다. 고압용기에는 레이저 시트(sheet)광 입사 및 관측용 유리창(Φ120, t45)이 서로 직각이 되도록 설치되어 있다. 유리창은 자외선의 투과성 및 내열성을 고려해서 합성석영유리로 제작하였고, 또한 입사 레이저 광의 감쇠를 막기 위하여 무반사 코팅을 하였다. 용기 내 체적은 분사된 분무체적보다도 훨씬 크므로 분무에 대한 용기 벽의 영향은 무시할 수 있다.

3.2 실험조건

Table 1에 본 연구의 실험조건을 나타낸다. 용기내의 분위기조건은 실제 소형 고속직접분사식 디젤기관에 있어서 분사개시 때의 실린더 내 분위기를 모사한 고온·고압의 분위기이고, 분위기 온도는 $T_a=700\text{K}$ 이다. 또한 분사압력은 $p_{inj}=22\text{MPa}\sim 112\text{MPa}$ 로 변화시켰고, 주위기체압력(배압)이 $p_a=1.04\text{MPa}$, 1.70MPa 및 2.55MPa 일 때 주위기체밀도는 $\rho_a=5.0\text{kg/m}^3$, 8.2kg/m^3 및 12.3kg/m^3 로 각각 변화한다. 또한 분위기가스로는 연료[경유 대표성분인 n-tridecane($C_{13}H_{28}$)]의 착화

Table 1 Experimental conditions

Injection nozzle	Type : Hole nozzle DLL-p	
	Diameter of the hole d_n [mm]	0.2
	Length of the hole L_n [mm]	1.0
Ambient gas		N_2 gas
Ambient temperature T_a [K]		700
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
Injection duration t_{inj} [ms]		2.82, 1.98, 1.54, 1.20

및 형광제[Tetramethyl-p-phenylene diamine(TMPD), $C_{10}H_{16}N_2$]의 산화를 방지하기 위해 고순도 질소가스(순도 99.9%)를 이용했다.

4. 결과 및 고찰

4.1 분사압력변화에 대한 엔트로피 해석

Fig. 2에 분사압력(p_{inj})을 변화시킨 경우의 엑시플렉스형광법으로부터 구한 비정상·증발자유분무의 기상 및 액상 2차원 형광강도분포화상을 보인다. Fig. 2 중의 (i)와 (ii)는 증발분무의 기상과 액상을 각각 나타낸다. 각 분사압력에 있어서 촬영시간은 분사된 연료량이 거의 같게 되는 시간, 즉 무차원시간 t/t_{inj} 이 거의 같게 되도록 설정했다(부록 참조). 각 분사압력의 촬영시간에 대한 이미지를 서로 비교하면 분사압력의 증가와 함께 분무상류부에 있어 저회도의 연료증기가 분무반경방향으로 넓게 분포함에 따라 분사연료와 주위기체와의 전단작용에 의한 미립화의 촉진 및 증발이 활발하게 일어나고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 비증발자유분무⁽⁸⁾의 경우와 같이 분사압력이 높아지면 미립화의 촉진, 즉 액적경의 감소 효과 때문이라고 판단된다. 또 각 분사압력에 있어 노즐선단에서 $Z=40\text{mm}$ 부근부터 액상의 형광강도가 급격하게 감소하고, 분무의 반경방향으로의 성장과 함께 분무축을 중심으로 좌·우로 요동치는 분무주류부의 사행(蛇行, meandering flow)이 시작된다. 이 부근에서는 비증발분무와 같이 분사된 연료와 주위기체와의 운동량 교환이 현저하게 되고, 주위기체의 분무내부로의 도입(entrainment)이 활발하게 일어난다. 이러한 분무

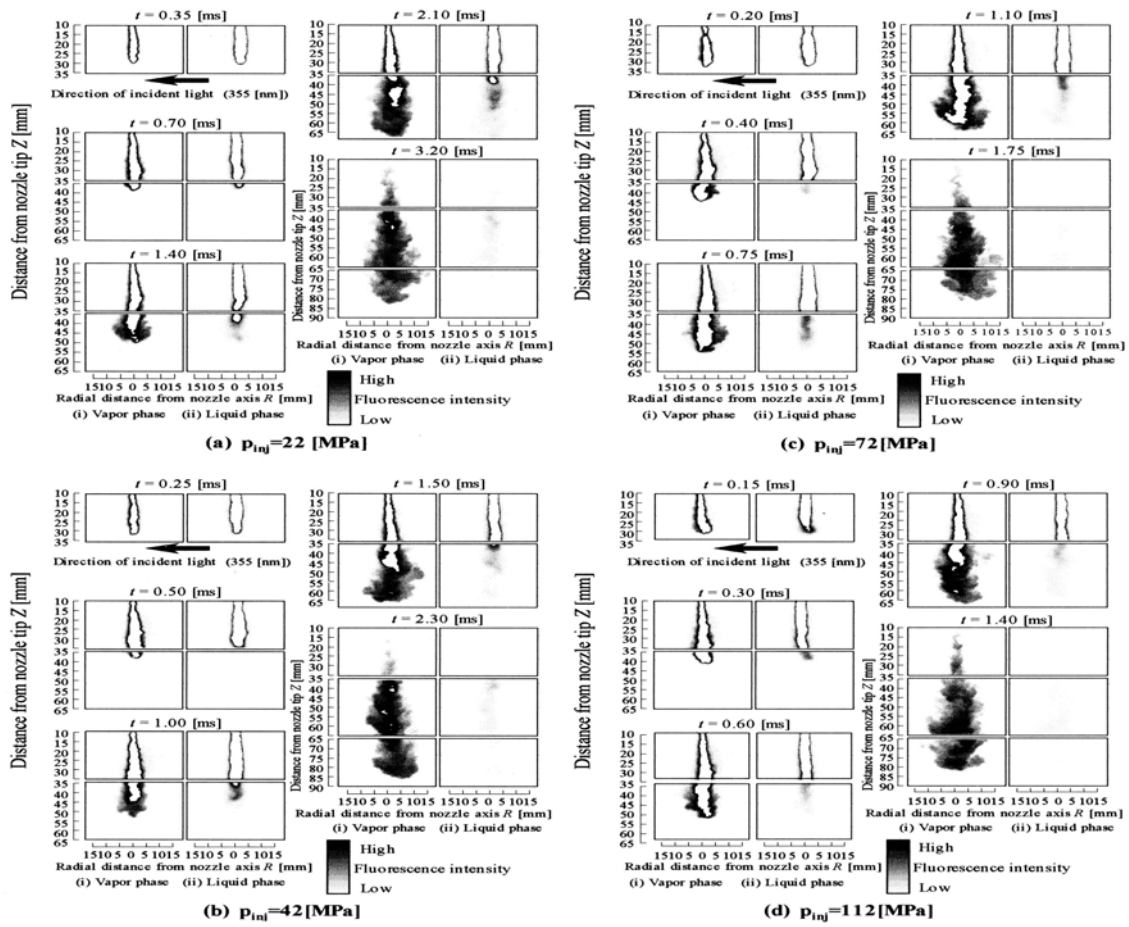


Fig. 2 Temporal change in free spray images taken by the exciplex fluorescence method

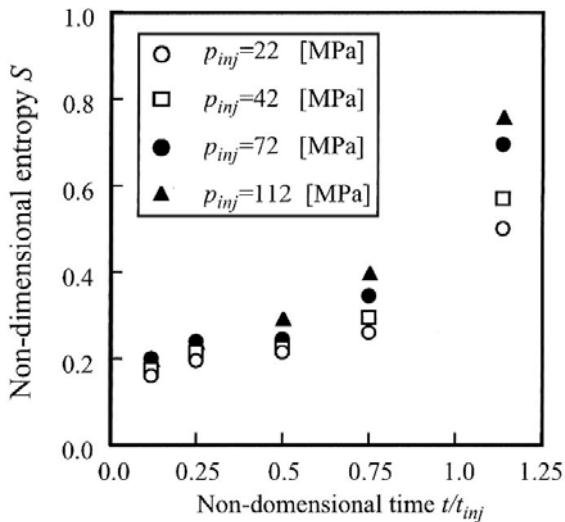


Fig. 3 Temporal change in dimensionless entropy

의 거동 해석으로부터 노즐에서 거리 약 $Z=40\text{mm}$ 인 지점이 주위기체의 와(渦, vortex)유동이 분무의 성장을 지배하게 되는 천이점이라고 생각된다.

Fig. 3에 분사압력을 변화시킨 경우, 무차원시간 경과에 대한 Fig. 2의 엑시플렉스형광법으로 구한 기상부의 무차원 엔트로피변화를 나타낸다. 그리고 엔트로피를 구할 때, 원래 해석윈도우(analysis windows)는 한 개이지만, 본 실험의 경우 실험장치 관측창의 제약 때문에 분무를 두 장의 화상에 담은 경우가 있다. 그래서 형광화상이 두 장인 경우는 각각의 무차원 엔트로피를 구하여 산술평균하였다. 시간경과와 함께 엔트로피는 증가한다. 이것은 분사된 연료의 일련의 분무성장과정, 즉 미립화·증발·확산·주위기체와의 상호작용에 의한 혼합기형성을 보여준다. 여기서 주목할 것은 분사초기에 있어서 저분사압력의 경우 ($p_{inj}=22, 42\text{MPa}$)와 고분사압력($p_{inj}=72, 112\text{MPa}$)의 경우와의 차는 미비하지만 시간의 경과와 함께 저분사압력과 고분사압력의 차이가 확연하다. 분무 선단도달거리가 분무의 액상길이(liquid-phase

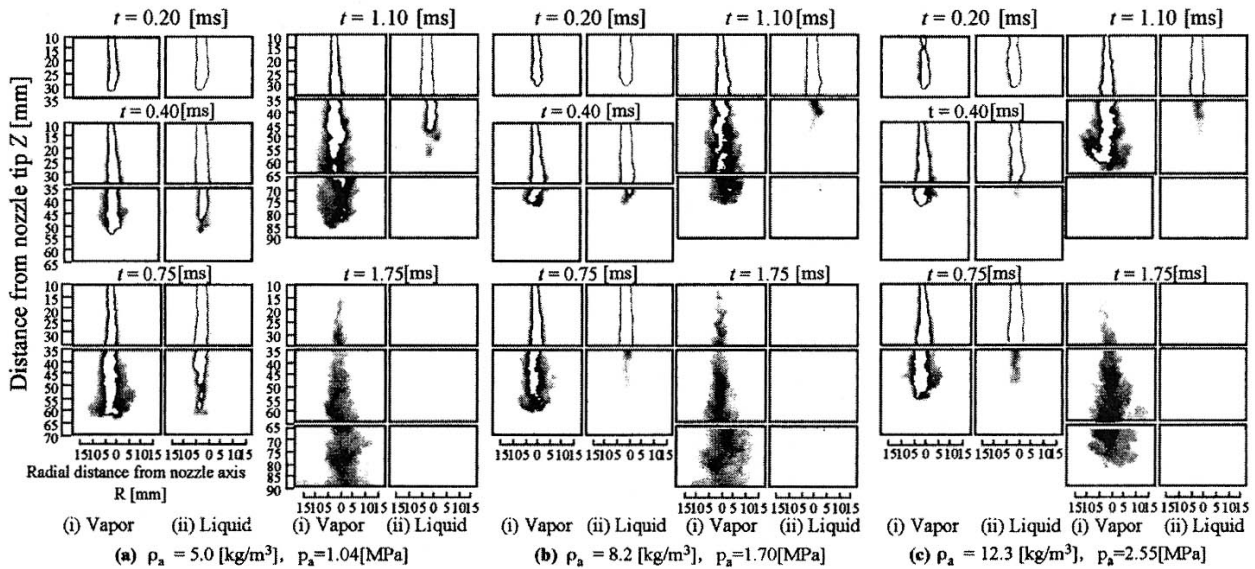


Fig. 4 Temporal change in diesel spray with exciplex fluorescence method at $p_{inj}=72\text{MPa}$

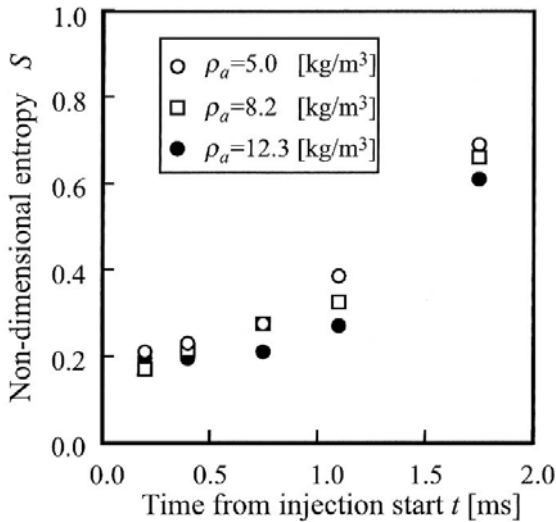


Fig. 5 Temporal change in dimensionless entropy

length)⁹⁾까지 도달할 때 까지 무차원시간, 약 0.25 이전에는 분사압력의 차에 의한 영향이 거의 보이지 않지만, 이 시간 이후에 있어서는 그 분사압력의 변화가 분무기상부의 확산과정에 의해 큰 영향을 미친다. 그 이유로서 분무액상길이 영역까지는 주위기체의 도입보다 주로 분사된 연료와 주위기체와의 상호작용, 즉 운동량교환이 지배적으로 일어나고 있기 때문이다. 따라서 공간영역으로서 $Z=40\text{mm}$ 부근인 무차원시간 약 0.25이후부터 주위기체의 분무내부로의 도입에 의한 확산

및 혼합기형성이 활발히 일어나고, 따라서 Fig. 3의 무차원 엔트로피 변화곡선으로부터 분사압력 차에 의한 증발분무의 발달특성차이를 명확히 알 수 있다. 이상의 결과로부터 증발분무해석에 있어 통계열역학에 기초한 엔트로피개념의 도입은 유효하고, 분사압력이 높아짐에 따라 분무의 미립화촉진과 함께 연료 증기의 확산 및 주위기체의 분무내로의 도입이 증가하고, 보다 균일하고 희박한 혼합기형성이 가능함을 알 수 있다.

4.2 주위기체밀도변화에 대한 엔트로피 해석

Fig. 4에 분사압력 $p_{inj}=72\text{MPa}$ 에서 주위기체밀도를 변화시킨 경우의 2차원 형광강도분포를 나타낸다. 각 설정 밀도에 있어 분무 상류부에서 차이는 거의 보이지 않는다. 그러나 시간의 경과와 함께 주위기체밀도가 증가함에 따라 주위기체의 저항이 증가하여 분무선단거리가 짧아지고, 분무 중류부 및 하류부에 있어 분무가 반경 방향으로 넓어지면서 발달하게 된다.

Fig. 5에 주위기체의 밀도를 변화시킨 경우의 무차원 엔트로피 변화를 나타낸다. 주위기체밀도가 낮으면 전 분사기간에 걸쳐서 보다 큰 무차원 엔트로피를 가진다. 이것은 분위기밀도, 즉 주위기체의 밀도가 낮은 경우, 분무의 축방향 및 반경방향으로의 성장이 용이하고 보다 균일한 혼합기형성에 기인한다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 디젤분무를 대상으로 엑시플렉스형광법을 이용하여, 엔트로피 개념의 도입에 의한 증발분무에 있어서 분사연료 기상의 확산 거동 특성에 대하여 해석을 행하였고, 그 결과를 아래에 정리한다.

(1) 증발분무해석에 있어 통계열역학에 기초한 엔트로피개념의 도입은 유효하고, 분사압력이 높아짐에 따라 분무의 미립화촉진과 함께 연료 증기의 확산 및 주위기체의 분무내로의 도입이 증가하고, 그 결과 높은 엔트로피 값을 가진다. 이것은 높은 분사압력의 경우가 보다 균일하고 희박한 혼합기형성이 가능함을 나타낸다.

(2) 엑시플렉스형광법을 이용하여 획득한 증발분무 기상의 확산 거동특성은 주위기체의 밀도가 낮은 경우, 전 분사기간에 걸쳐서 밀도가 높은 경우 보다 큰 무차원 엔트로피를 가진다. 이것은 밀도가 낮은 경우가 분무의 축방향 및 반경방향으로의 성장이 용이하고 보다 균일한 혼합기의 형성에 기인한다.

후 기

이 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

(1) Hiroyasu, H and Arai, M, 1980, "Fuel Spray Penetration and Spray Angle in Diesel Engines," *JSAE*, No. 21, pp. 5-11(in Japanese).
 (2) Dan, T., Takagishi, S., Senda, J. and Fujimoto, H., 1997, "Organized Structure and Motion in Diesel Spray," *SAE Paper*, No. 970641.
 (3) Siebers, D. L., 1999, "Scaling Liquid-Phase Fuel Penetration in Diesel Sprays Based on Mixing-Limited Vaporization," *SAE Paper* 1999-01-0528.
 (4) Kim, T. W. and Ghandhi, J. B., 2003, "Quantitative Vapor Phase Exciplex Fluorescence Measurements at High Ambient Temperature and Pressure," *KSME International Journal(JMST)*, Vol. 17 No. 1, pp. 157~167.

(5) 池田 和義, 1975, *統計熱力學*, 共立出版株式會社, 日本, 東京.
 (6) Melton, L. A., 1983, "Spectrally Separated Fluorescence Emissions for Diesel Fuel Droplets and Vapor," *Applied Optics*, Vol. 22, No.14, pp. 2224~2226.
 (7) 湯山亮, 近久武美, 菱沼孝夫, 2000, "噴霧内の擴散現象のマイクロ構造と空氣導入," 第16回内燃機關シンポジウム講演論文集.
 (8) Dan, T., Takagishi, S., Onishi K., 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).
 (9) Yeom, J. K., Park, J. S., Kim, S. P., Chung, S. S. and Ha, J. Y., 2007, "A Study of the Behavior of Liquid Phase Spray Considering Critical Condition of the Fuel," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 31, No. 5, pp. 467~472.

부 록

다음에 본 실험에 사용한 분사시스템의 분사압력 변화에 대한 분사율의 변화를 도식으로 나타낸다. 분사량은 12mg으로 일정하다.

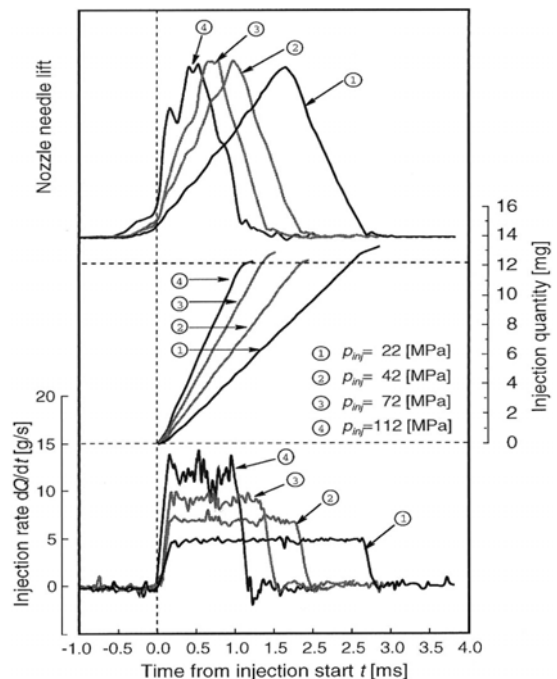


Fig. A Temporal change in fuel injection rate and injection quantity