

화상상관법을 이용한 증발 디젤분무의 구조해석

염정국* · 정성식 · 하종률

동아대학교 기계공학과

Analysis on the Structure of Evaporative Diesel Spray by Using PIV Technique

Jeongkuk Yeom* · Sungsik Chung · Jongyul Ha

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

(Received 12 July 2004 / Accepted 4 October 2004)

Abstract : The effects of change in injection pressure on spray structure have been investigated in high temperature and pressure field. To analyze the structure of evaporative diesel spray is important in speculation of mixture formation process. Also emissions of diesel engines can be controlled by the analyzed results. Therefore, this study examines the evaporating spray structure by using a constant volume vessel. The injection pressure is selected as the experimental parameter, is changed from 72 MPa to 112 MPa with a high pressure injection system(ECD-U2). The PIV(Particle Image Velocimetry) technique was used to capture flow variation of the evaporative diesel spray. A study on the mixture formation process of diesel spray was executed by the results of flow analysis in this study. Consequentially the large-scale vortex flow could be found in downstream spray and the formed vortex governs the mixture formation process in diesel spray.

Key words : Spray structure(분무구조), Mixture formation(혼합기형성), Evaporative diesel spray(증발디젤분무), Vortex(와), PIV technique(화상상관법)

Nomenclature

- L : spray tip penetration, mm
- p : pressure, MPa
- T : temperature, K
- V : droplets velocity, m/s
- Z : distance from nozzle tip, mm

- liq : liquid phase
- R : radial direction

1. 서론

근래의 자동차용 엔진 효율향상의 핵심기술은 가솔린과 디젤엔진의 직분화이다. 실린더 내에 직접 연료를 분사하는 기술은 다양한 혼합기 형성 기구를 가능하게 했다. 직분 가솔린기관의 예로서, 종래의 흡입 공기중에 연료를 분사하는 예혼합방식에 의한 균일혼합이, 압축행정시 연료를 실린더 내 직접 분사할 경우에는 연료와 공기의 혼합정도가 분리되어진 성층연소가 실현 가능하다.¹⁾ 한편, 디젤기

Subscripts

- a : ambient
- inj : injection

*To whom correspondence should be addressed.
ejk6804@korea.com

관의 경우는 종래부터 직분식이 주류를 이루었고, 근래에는 분사압력의 고압화가 진행 중이다. 분사압력의 고압화에 의해 연소효율의 향상 및 배출가스중의 입자상물질(PM : Particulate Matter)의 저감을 유도하고 있으나, 연소가스의 고온화로 인해 질소산화물(NOx : Nitrogen Oxides)은 증가한다. 따라서, 분사기간의 지연(Retard)이나 파일럿분사(Pilot Injection)등의 혼합기 제어에 의해 질소산화물의 저감을 꾀하고 있다. 이와 같이 디젤기관에 있어서도 혼합기 형성의 최적화에 의한 연소제어를 시도하는 수법이 중시되고 있고, 이를 위해서는 디젤분무 구조에 기초한 혼합기의 형성기구의 규명이 매우 중요하다. 그러므로 본 연구에서는 보다 고도의 혼합기형성 제어를 위한 기초연구로서 고온·고압상태에서의 증발디젤자유분무구조를 해석한다. 제촉영역은 연료와 주위기체와의 혼합이 활발히 진행되는 분무의 하류영역으로 설정하고, 화상상관법(Particle Image Velocimetry : PIV)²⁾을 이용한 분무의 유동해석을 기초로 증발 디젤분무의 구조 해석을 행하였다. 실험조건으로서 분사압력을 변화시켰다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 Mie 산란광(Scattering Light)의 연속촬영 광학계

Fig. 1에 본 실험에 사용한 레이저 시트광(Laser Sheet Light)에 의한 액적 Mie 산란광신호를 이용하는 PIV 광학계를 보인다. 광원으로써는 Nd:YAG 레이저(Spectra-Physics : PIV400)를 사용했다. 본 연구에 이용한 레이저 시스템 PIV400에는 광원으로 하는 Nd:YAG 레이저(GCR170)가 2기 설치되어 있고, 발전된 2개의 레이저광은 고주파발생기(Quanta-Ray : HG-2)에 입사되어져 제 2고주파(파장532[nm])의 레이저광을 방출한다. F10[mm]의 원형빔을 핀홀(Pin Hole)에 통과시켜 F5[mm]의 원형빔으로 한 뒤, f15[mm]의 실린더리칼 렌즈(Cylindrical Lens)에 의해 타원단면의 광으로 한 후, f1000[mm]의 실린더리칼 렌즈에 의해 시트광으로 집광시킨다. 그 결과, 고온·고압 용기내의 측정부에 있어서 폭100[m], 두께 약 0.2[mm]의 레이저광이 얻어진다. 촬영에는 고해상도 고속 디지털 화상처리 시스템을 이

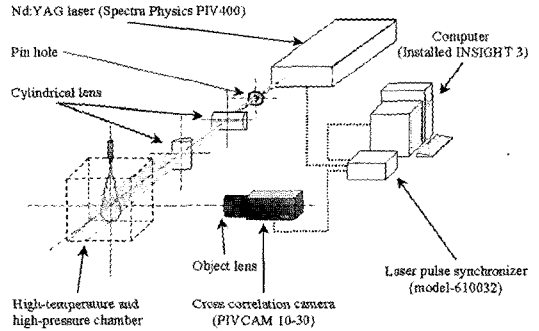


Fig. 1 Schematic diagram of laser sheet optical system

용했다. 이 시스템은 크로스 코리레이션 카메라(Cross Correlation Camera, TSI : PIVCAM10-30), 레이저펄스 싱크로나이저(Laser Pulse Synchronizer, TSI : model-610032) 및 PIV 해석 소프트웨어(TSI : INSIGHT3)가 내장되어진 컴퓨터로 이루어진다. 레이저펄스 싱크로나이저는 INSIGHT3에 의해 제어되어지고, 레이저의 발광과 카메라의 셔터 타이밍을 제어하여 임의의 시간에서의 2장의 연속화상 촬영이 가능해진다. 레이저 시트광에 대하여 직각을 이루도록 크로스 코리레이션 카메라를 설치하고, 대물렌즈를 통한 광신호를 CCD카메라에 결상한다. 크로스 코리레이션 카메라의 화소수는 1000×1012[pixel]이고, 공간분해능은 약 0.06[mm/pixel]이다. 실험에 사용한 연료는 n-Tridecane(C₁₃H₂₈, 순도 99%)이며, 주위기체로서는 질소를 충전시켰다.

2.2 연료분사장치

Fig. 2에 전자제어 축압식 연료분사장치(일본, Denso(주), ECD-U2 System, 이하 ECD-U2로 함)를 보인다. ECD-U2³⁾는 고압 펌프, 커먼레일(Common Rail), 인젝터와 이들을 제어하기 위한 ECU 및 센서들로 구성된다. 커먼레일 내의 연료압력은 고압 펌프의 연료 토출량을 전자밸브(Pump Control Valve : PCV)의 개폐를 가감하는 것에 의해 제어된다. 설정 압력으로 유지된 커먼레일 내의 연료는 Flow Damper를 통하여 인젝터에 도입된다. 인젝터에는 3방향전자밸브가 장착되어져 있고, 인젝터 내부의 니들(Needle)밸브 제어 오리피스에 의해 분사율을 제어한다. 분사노즐은 단공 홀 노즐이고, 분공경 F=0.2[mm], 분공길이 l=1.0[mm] (세장비l/F=5.0)를

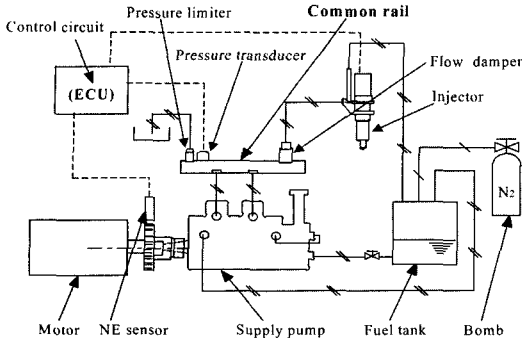


Fig. 2 Schematic diagram of ECD-U2 system

사용했다.

2.3 실험조건

Table 1에 본 실험의 조건을 나타낸다. 용기내의 분위기조건은 실제의 소형 · 고속 직분식 디젤 기관의 분사개시초기의 실린더 내 분위기를 모사한 고온 · 고압의 분위기이다. 분위기온도 $T_a=700[K]$, 분위기압력(배압) $p_a=2.55[MPa]$, 분위기밀도 $\rho_a=12.3 [kg/m^3]$ 로 설정했다. 분사압력 $p_{inj}=72, 112[MPa]$ 에 대해서 각 분사시간은 1.54, 1.24[ms]이고, 분사량은 12[mg]로 동일하다. 그리고 본 실험에서 사용한 분사장치는 직사각형(구형)의 분사울을 가지고, 각 촬영시간 ($t/t_{inj}=2/4, 3/4, 4/4$) 에 있어서 분사량은 동일하다. 또한 분사된 연료분무의 재현성은 자료 채취 전 확인을 하였다.

Table 1 Experimental conditions

Injection nozzle	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]	700
Ambient pressure	P_a [Mpa]	2.55
Ambient density	ρ_a [kg/m^3]	12.3
Induction pressure	P_{inj} [Mpa]	72,112
Induction quantity	Q_{inj} [mg]	12.0
Induction duration	t_{inj} [ms]	1.54, 1.24

2.4 화상상관법의 원리

화상상관법²⁾이란 미소의 시간차를 가지는 2장의 화상(Image)의 밝기로부터 임의의 상관 처리영역 내의 상호상관계수를 구해, 이것이 극대로 되는 위

치로부터 그 미소시간에 있어 대상으로 하는 현상의 이동량을 추측하는 것이다. 이것에 의해 분무 내의 유동 및 그 변화정도를 구하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 화상의 검은 부분을 0, 밝은 부분을 8bit(256단계)인 수치 데이터를 얻어, 분무 내의 유동을 해석했다. Fig. 3에 해석을 위한 Flow Chart를 보인다.

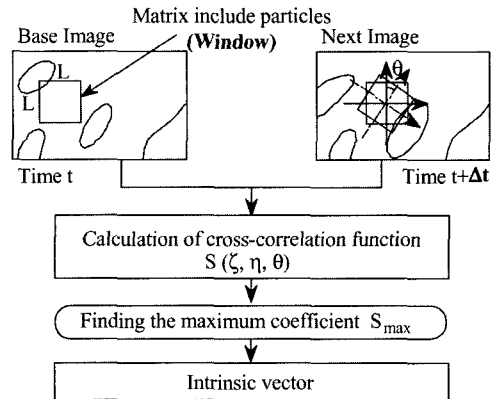


Fig. 3 Flow chart of cross-correlation

2.5 PIV 계측을 위한 트레이서(Tracer)의 유동 관찰

주위기체의 유동을 관찰하기 위한 트레이서로써, 시드(Seed)입자(Lumilight Pigment : Red, 평균입경 2~8[mm], 비중 4, 내열온도 1023[K])를 연료 분사전에 교반팬을 이용하여 주위기체에 혼입시켰다. 용기 내에서 시드입자가 측정영역 내에 균일하게 분포하고 있는 것을 화상으로 확인 하였다. 또한, 이 화상을 이용해 PIV 처리 촬영 시, 2장의 화상 획득 시간간격($\Delta t=7[ms]$)에서 시드입자의 유동은 관측되지 않았다. 그 결과, 본 연구의 분무 주위기체 유동의 관측 시에는 시드입자 자신의 유동은 무시할 수 있다고 판단했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 분무주위기체의 유동해석

Fig. 4에 분무액상의 2차원단면화상과 PIV에 의해 얻어진 주위기체의 속도분포를 보인다. 종축은 분사노즐로부터 Z방향거리, 횡축은 분무중심축에서부터 반경방향의 거리를 나타낸다. 그리고 본 연

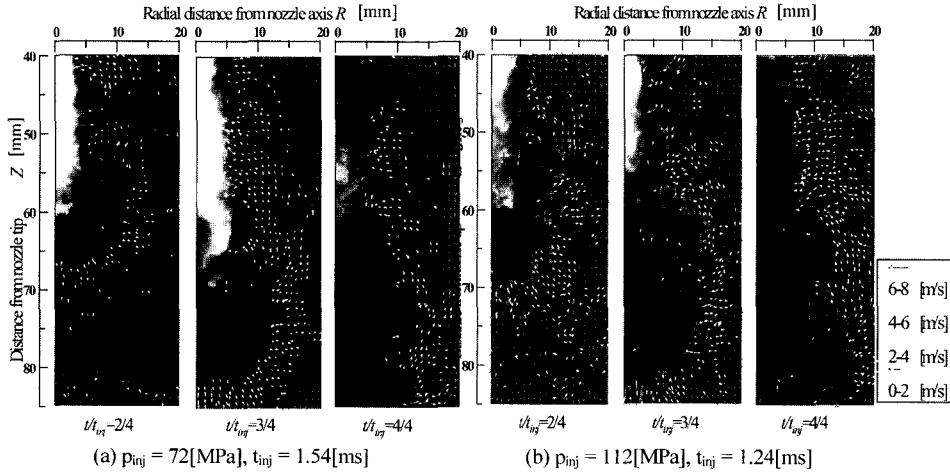


Fig. 4 Temporal change in velocity distribution of ambient gas taken by PIV

구에서는 입자의 산란신호를 트레이서로써 하고 있지만, 주위기체의 시드입자 뿐만이 아니고 분무 내 액적의 산란 신호도 측정대상으로 된다. 그러나, 분무액상내의 액적의 속도 V [m/s]는 분무주위기체와 비교해 상당히 빠르다. 따라서, 분무액상과 주위기체와의 속도차를 고려해, $V=8.0$ [m/s]의 속도를 소거 (Range Cut)했다. 분사압력이 높은 Fig. 4(b)에서는 분무액상화상과 주위기체의 속도 벡터간에 간격이 존재한다. 이것은 산란광도가 미약한 분무중기의 존재영역으로 생각된다. 그 간격은 Fig. 4(a)에 비하여 Fig. 4(b)가 더 넓게 분포하고 있다. 그리고 전체적인 액상의 산란광도도 낮고 분무액상 경계부에 있어서 그 차가 현저한 사실로부터 고압의 분사에 의해 액적의 미립화가 촉진되어, 분무 액상 경계부에서는 주위기체와의 전단작용과 그것에 따른 와운동에 의해 분무의 증발·확산이 활발히 진행되고 있다고 생각된다. 또한 비증발분무에서 밝혀진 가지구조(Branch-like Structure),⁴⁾ 즉 분무경계부의 요철부는 분무상류부에서 분무와 주위기체와의 상호작용으로 발생한 초기의 흔들림(Initial Perturbation)에 의해 생성되어진다. 이러한 가지구조는 분무내부에 있어서 혼합기의 불균일을 조래하며, 분무하류부로 갈수록 대규모의 와로 발달하여 디젤분무의 혼합기형성특성을 결정한다. 분무주위기체에 혼합된 시드의 유동은 각 분사조건의 $t/t_{inj}=2/4, 3/4$ 에 있어 분무 액상선단부근을 경계로 해서, 상류부에서

는 분무 속으로 향하는 유동, 그리고 하류부에서는 분무의 성장방향으로의 유동이 관측 되어진다. 따라서 분무 상류부에서는 주위기체가 분무 속으로도입(Entrainment) 되어지는 유동과 함께 분무경계면영역에서는 속도가 빠르고, 발생한 와운동(Vortex Motion)을 추종하는 유동이 관측된다. 한편 분무선단부에서는 분무 성장방향의 속도가 큰 벡터가 존재한다. 또한 분무선단부에 있어서는 주위기체의 저항에 의해 분무의 흐름이 반경방향으로 속도성분을 가진다. 그리고 정지분위기 기체 중에 고속으로 분사된 분무의 관성력에 의하여 분무의 선단부에서는 국소적인 압력상승이, 분무경계면의 영역에서는 분무 속으로의 주위기체도입이 일어나는 것에 의해 상대적인 압력강하가 발생한다. 따라서 용기내의 연속한 공간에 있어서 발생한 압력구배가 주위기체의 유동을 지배한다. 그 결과, 거시적으로 Fig. 4(a), (b)에서 분무 액상부로부터 떨어진 영역에 있어서도, 분무선단부에서 분무상류부로 향하는 주위기체의 대규모 와유동이 발생한다고 판단된다.

3.2 통계적처리에 의한 주위기체유동의 해석

Fig. 5에 각 축방향의 위치 Z에 있어서 같은 조건에서 5회 실시한 실험결과의 평균값인 주위기체의 속도 u_z 의 분무 축방향 평균속도 V_z 를 보인다. Fig. 6에는 Fig. 5와 같은 방법으로 처리해 얻은 주위기체의 분무 반경방향의 평균속도 V_R 을 보인다. 또한 횡

축에는 속도변화와 액상의 선단부와의 관계를 명확히 하기 위해, 측정위치를 액상의 선단도달거리 L_{liq} 로 나눈 값을 이용했다. 그러나 본 연구와 같은 증발분무의 결과는 산란광도의 변화가 급격하기 때문에 분무액상의 선단도달거리를 측정하는 것이 곤란하다. 따라서, 액상선단도달거리는 Yeom⁵⁾ 등이 실시한 Exciplex형광법의 실험결과로부터 분사량을 동일하게 유지한 경우, 분사압력 $p_{inj}=72$ 와 112 [MPa]에 있어서 각각 동일하게 $t/t_{inj}=2/4$ 에서는 $L_{liq}=65$ [mm], $t/t_{inj}=3/4$ 에서는 $L_{liq}=75$ [mm], $t/t_{inj}=4/4$ 에서는 $L_{liq}=83$ [mm]로 했다. 종축은 평균속도를 나타내고, Fig. 5에서는 분무 축방향을 정(正)으로, Fig. 6에서는 분무 중심축에서 반경방향을 정(正)으로 했다. Fig. 4(a), (b)에 분무 선단부로부터 상류로 향하는 대규모의 주위기체 유동이 관측되지만, Fig. 5의 축방향 속도에 있어서도 액상선단부 $Z/L_{liq}=1$ 부근이 속도의 천이점으로 되어 있다. Fig. 5와 6에서는 각 분사조건에 있어서 평균속도의 전체적인 경향과 범위가 유사한 값을 나타내지만, 각각의 속도 성분값의 변동(흐트러짐)은 고압분사의 평균속도가 큰 경향을 보인다. 여기서 주위기체 속도의 변동은 주위기체 유동의 변동의 세기와 상관을 가지고 있기 때문에, 값의 변동을 나타내는 표본변이계수(Sample Displacement Coefficient)⁶⁾를 Fig. 5, 6의 평균속도에 적용하고, Fig. 7에 분사압력의 차에 의한 평균속도의 변동을 정량적으로 나타낸다. 또한 그림중의 (a), (b)는 각각 축방향 속도 V_R 과 반경방향속도 성분 V_Z 의 표본변이계수이다. (a)의 축방향 속도에 대해서는 $t/t_{inj}=2/4, 3/4$ 까지 분사압력이 높은 쪽의 변동이 작은 것을 알 수 있다. 그러나 (b)의 반경방향속도에서는 각 촬영시간에 있어서 분사압력이 높은 쪽의 변동이 크게 되어 있고, (a)의 축방향 속도와는 반대의 결과가 얻어졌다. 또 그 값 자체는 (b)의 반경방향속도가 크고, 축 방향에 비해 속도의 변동이 큰 것을 알 수 있다. 확산현상에 대해서는 분자자신의 열운동에 의한 분자확산과 유체흐름의 흐트러짐(Vortex)에 의한 난류확산[또는 와 확산(Vortex Diffusion)]⁷⁾이 있지만 분무의 확산현상은 난류확산이 지배적이다. 난류확산으로는 흐름 중에 포함된 와의 움직임에 의해, 유동방향과 수직방향으로 성질이 이동하는 현상을 말한다. 이것으로부터 유동

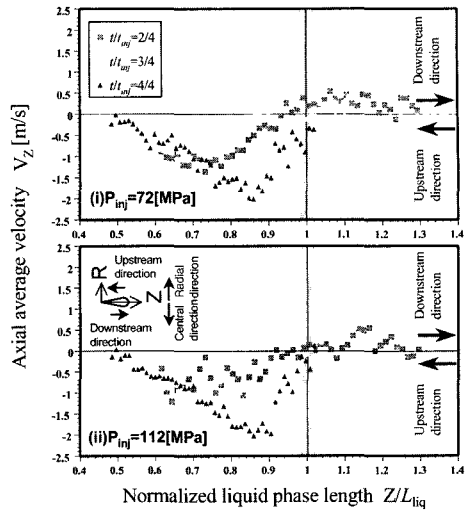


Fig. 5 Change in average velocity of axial direction

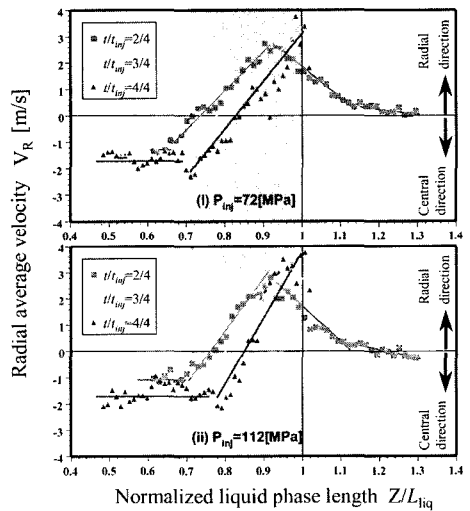


Fig. 6 Change in average velocity of radial direction

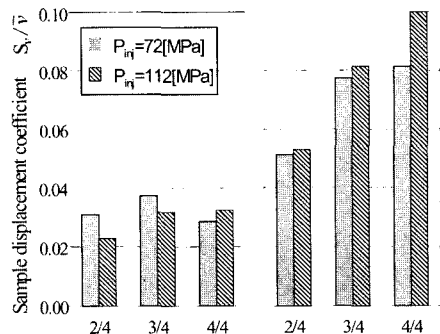


Fig. 7 Change in sample displacement coefficient

에 수직인 방향, 즉 분무반경방향의 속도는 난류 확산과 상관성이 있고, 그 결과 분사압력의 증가는 주위 기체의 흐트러짐(Vortex)의 증가를 나타내고 있다고 판단된다. 따라서 Fig. 5와 6에서 각각의 평균속도 변화거동은 분사압력에 관계없이 거시적으로는 동일한 경향을 보이지만, Fig. 7과 같이 값의 변동에 차이가 발생 하는 것으로부터 분사압력의 증가는 주위기체의 유동을 지배하는 와운동에 영향을 미친다고 생각된다. 이상의 결과에서 분무 내 연료질량이 동일하면 거시적인 분무의 유동특성 변화는 분사압력에 관계없이 동일한 경향을 나타내고, 분사압력의 증가는 주위기체의 유동을 더욱 불규칙한 난류유동으로 유인해 디젤분무의 신속한 혼합기형성을 가능하게 한다. 한편 Fig. 6의 각 시간 $Z/L_{liq}=0.7\sim 1$ 에서 $V=0$ 를 통과하는 반경방향 속도의 직선적인 증가가 보인다. 이와 같은 속도구배의 출현은 주위기체의 와운동의 존재를 나타내는 것이다. 또한 $Z/L_{liq}=0.7\sim 1$ 에 걸쳐서 속도구배가 존재하는 것으로부터 이 대규모 와는 분무 선단도달거리의 약 30%의 크기를 가진다고 판단된다. 또한 비증발분무 구조의 연구에 있어 Takagishi⁸⁾는 노즐근방에서 형성되어진 와구조가 분무 하류방향으로 진행함에 따라 그 크기가 성장하고, 분무선단부 근처에 있어서 그 크기가 분무반경에 도달하는, 즉 분무 수직단면에서 2개의 와열(Vortex Array)을 형성한다고 보고하고 있다. 이것으로부터 본 연구에서 증발디젤자유분무의 선단부에는 선단도달거리의 약 30% 정도의 규모를 가지는 대규모의 와구조가 존재하는 것을 알 수 있다. 또한 그 와구조의 규모는 분무 내 연료질량이 동일하면 분사압력에 의존하지 않는다.

4. 결론

본 연구의 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 고온·고압의 증발장에서 PIV를 이용해 주위기체유동을 관측할 수 있으며, 증발디젤자유분무의 하류부에 존재하는 거시적 와운동의 크기는 분사량이 동일한 경우, 분사압력에 관계없이 본 실험에서는 분무 선단도달거리의 약 30%이다.
- 2) 증발분무에 있어서도 비증발분무의 경우와 같이, 분사연료와 주위기체의 상호작용으로 발생한 와(Vortex)운동에 의하여 분무내부에 가지구

조(Branch-like structure)상의 액적의 분균일 분포가 존재한다. 따라서 그 가지구조로 인하여 불균일한 농도를 가진 혼합기가 형성된다.

- 3) 증발디젤자유분무의 경우, 분사압력의 증가는 분무의 반경방향(VR)으로의 주위기체의 유동을 더욱 불규칙한 난류확산 유동으로 만들고, 그 결과 분사된 연료와 주위기체와의 혼합기형성을 촉진시킨다.

후 기

이 논문은 2004학년도 동아대학교 학술연구비(공모과제) 지원에 의하여 연구되었음.

References

- 1) 安藤 弘光, “將來の自動車用パワートレインの展開方向を決めるキーワード,” 自動車技術, 第54卷, 7號, pp.7-9, 2000.
- 2) 鹽路 昌宏, 紀本 孝, 岡本 昌章, 池上 詢, “畫像處理におけるディーゼル火炎の解析,” 日本機械學會論文集(B), 54卷 504號, pp.759-780, 1988.
- 3) ディーゼル燃焼研究會, 藤谷 宣之 監修, 新ディーゼル燃料噴射, 山海堂, pp.191-198, 1997.
- 4) 段 智久, ディーゼル燃料噴霧の亂流構造とその形成機構, 同志社大學學位論文, 1996.
- 5) J. K. Yeom, T. Takahashi, T. Tanaka, S. Kusano, J. Senda and H. Fujiomoto, “The Structure Analysis of Impinging and Free Diesel Spray with Exciplex Fluorescence Method in High Temperature and Pressure Field,” The 15th Internal Combustion Engine Symposium (International) In Seoul, No.22, pp.117-122, 1997.
- 6) 添田 喬, 太田 光雄, 大松 繁, 理工學基礎シリーズ數理統計の基礎と應用, pp.177-178, 日進出版, 1992.
- 7) 寶澤 光紀, 戶田 昌之, 菊地 賢一, 米本年邦, 塚田隆夫, 擴散と移動現象, 社團法人化學工學會, pp.123-125, 培風館, 1996.
- 8) 高岸 佐代, 高橋 知宏, 段 智久, 千田 二郎, 藤本 元, “畫像相關法によるディーゼル燃料噴霧内部の流動特性の解析,” 日本機械學會論文集(B), 65卷, 631號, pp.1128-1133, 1999.