

## 가솔린 직접 분사식 인젝터의 미립화 특성에 관한 연구

### A Study on the Atomization Characteristics of a Gasoline Direct Injector

김 봉 규\* , 이 기 형\*\* , 이 창 식\*\* , 홍 진 성\*\*\*  
Bonggyu Kim, Kihyung Lee, Changsik Lee, Jinsung Hong

#### ABSTRACT

Recently new engine system is being required to cope with intensive emission restriction. For this reason, GDI(gasoline direct injection) engine system which can satisfy both as good fuel economy as diesel engine and the performance to surpass PFI gasoline engine is being developed. Since fuel injection system plays a significant role in GDI engine performance, the investigation of the spray characteristics injected from GDI injector above all is indispensable for GDI system development.

In this study, spray developing shape was visualized using laser sheet with Nd:YAG laser and atomization characteristics was analyzed by measuring velocities and droplet size with PDA. Utilizing these results, the basic design factor of GDI injector can be offered.

주요기술용어 : GDI engine (가솔린 직접분사식 엔진), Atomization(미립화), Spray visualization (분무가시화), PDA(위상 도플러 입경 측정장치), Recirculation (재순환 영역)

#### 1. 서 론

현재 전세계적으로 ULEV (ultra low emission vehicle)와 CAFE (corporate average fuel economy)등과 같은 갈수록 강화되고 있는 배기 규제에 대응하기 위하여 자동차 생산업체는 연료 경제성이 뛰어나고 오염 물질의 배출이 적은 차량에 대한 요구가 증대되고 있다. 그러나, 현재 연료 분사 시스템의 주류를 이루고 있는 포트내 연료 분사 시스템 (PFI : port fuel injection)에 있어서는 스톱 밸브의 제어에 의

한 엔진 제어와 흡기 포트내의 연료막 생성, 이 두가지가 가솔린 엔진의 연비와 배기 성능에 대해 악영향을 미치고 있기 때문에 희박연소를 실현하더라도 PFI시스템에 의하여는 앞으로 더욱 강화되고 있는 모든 배기 규제를 대처하기가 어려운 실정이다. 따라서 디젤 차량에 비교 될 수 있는 연비 성능과 기존의 전자 제어식 가솔린 엔진의 출력성능을 능가할 수 있는 엔진의 개발이 필수적으로 대두되고 있다. 이런 두가지 조건을 충족시키기 위하여 개발되고 있는 엔진이 바로 직접 분사식 가솔린(GDI:gasoline direct injection)엔진이다.

이 직분식 가솔린 엔진의 성능 및 배기 특성은 인젝터로부터 분사되는 연료의 분무 특성에 따라서 크게 좌우되므로 직분식 가솔린 엔진 개발에

\* 정회원, 한양대학교 기계공학과 대학원  
\*\* 정회원, 한양대학교 기계공학과  
\*\*\* 정회원, 삼성전기

있어서는 인젝터에 대한 연구가 매우 중요한 기술 과제로 부각되고 있으며, 인젝터의 분무 특성 해석이 반드시 선행되어야 한다.

일본의 자동차 회사들은 이미 GDI엔진의 상용화를 실현하였으며 전 세계적으로 이에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있으나<sup>[1]-[3]</sup>, 대부분이 엔진 시스템에 대한 경우가 많고 인젝터의 미립화 특성을 상세하게 분석한 연구는 적은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 레이저 쉬트(laser sheet) 기법을 이용하여 전체적인 분무의 발달과정을 가시화하였고, 위상 도플러 법을 이용한 입경 측정 장치인 PDA(phase Doppler anemometer)를 사용하여 입경과 속도 등의 분포를 측정하여 인젝터 전체 형상에 대한 시간적이며 공간적인 미립화 특성을 규명함으로써 가솔린 직접 분사식 인젝터로부터 분사되는 분무의 시간 경과에 따른 성장과정과 미세 구조 및 미립화 특성을 파악하였다.

## 2. 실험 장치 및 측정 방법

### 2.1 분무 해석 장치

#### 2.1.1. 분무 단면 가시화 기술

분무의 단면형상이나 분무 발달과정을 파악하기 위하여 레이저 쉬트법을 이용한 Fig.1과 같은 분무 가시화 장치를 구성하여 분무 단면의 촬영을 수행하였다. 광원은 Nd:YAG 레이저로서 최대 출력이 415mJ이고, 파장이 532nm이며, 발광 기간은 6nsec이다. 또한 이 레이저에서 유도된 레이저 쉬트의 빔 두께는 0.5~2.0mm이다. 그리

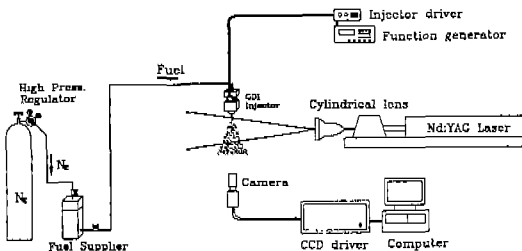


Fig.1 Schematic diagram of tomographic device using laser sheet

고 화상을 취득하는 CCD 카메라는 화상 분해능이 1008pixels×1018pixels이며, 화소간의 간격은 9.0×9.0μm이고 화소의 크기는 3.4×7.0μm이다.

#### 2.1.2. 분무 입경 및 속도 측정 기술

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 PDA를 이용하여 입경 및 속도를 측정하였다. 각 구성품들을 살펴보면, 레이저소스는 5W Ar-ion 레이저를 사용하였고, 신호 처리기는 DANTEC사 제품을 사용하였다.

인젝터에서 분무된 입자들의 입경과 속도들을 측정할 때 한 측정점에서 데이터 개수를 10000개 이상 취득하여 앙상블 평균값을 구하였다.

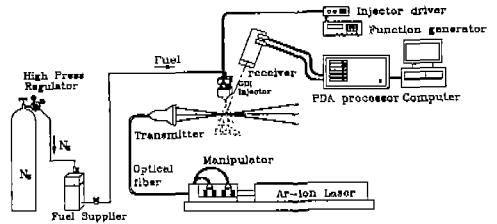


Fig.2 Schematic diagram of PDA system

### 2.2 연료 공급 시스템 및 실험 조건

#### 2.2.1 연료 공급 방식 및 시료

고압용 인젝터에 높은 연료 압력을 유지시키기 위하여 본 실험에서는 고압 펌프대신 Fig.2에 나타낸 바와 같이 고압의 질소가스를 이용한 연료 공급 방식을 채택하였으며, 이 실험 장치를 이용하여 적은 맥동과 안정된 연료압을 유지할 수 있었다. 또한 시료로서 가솔린 연료와 물성치가 비

Table1 The comparison of properties between iso-octane and dry solvent

properties	Iso-Octane	Dry-Solvent
specific weight	0.692	0.772
density [kg/m <sup>3</sup> ]	690	770
viscosity [×10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s]	1.253	1.210
surface tension [×10 <sup>-6</sup> kg/s <sup>2</sup> ]	2.653	2.901

숫한 드라이 솔벤트를 사용하였으며, 이 시료와 이소옥탄의 물성치 비교를 Table1에 나타내었다.

### 2.2.2 측정점 및 실험 조건

본 연구에서는 실험 인젝터로 시판 중인 일본 MMC사의 가솔린 고압 스월 인젝터를 사용하였으며, 전체 분무 형상에 대한 분무 입자들의 입경 및 속도를 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 반경 방향으로 2mm, 길이 방향으로 5mm로 측정점을 선정하였다. 본 실험에 사용한 인젝터의 경우에는 분무 가시화 실험결과 분무 형상이 좌우대칭을 이루고 있으므로 한쪽면만을 측정대상으로 선정하였으며, 총 283개의 측정점을 선택하여 측정

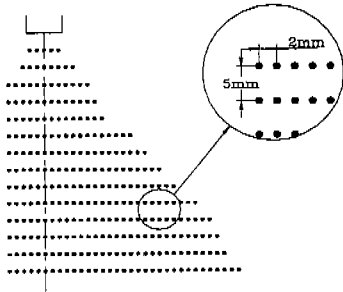


Fig.3 The positions of measurement points

을 실시하였다.

연료의 압력은 5MPa를 유지하였고, 분무 기간은 7ms로 일정하게 분사하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 가솔린 직접 분사식 인젝터의 분무 구조

인젝터의 분무각, 분무 관통도, 입자들의 순환 영역, 입자들의 분포등과 같은 분무 구조를 파악하기 위하여 전술한 레이저 쉬트법을 이용한 분무의 거시 촬영을 수행하여, Fig.4에 인젝터의 분무 발달 과정을 나타내었다. 이 분무 형상을 살펴보면 중심보다 분무 경계면 부분이 액체 연료에 의한 산란 현상이 강하게 나타나는 것으로 보아 분무의 외곽부분에 연료 분포가 밀집되어 있다는 사실을 알 수 있다. 이러한 현상은 강한 스월류에 연료가 편승하여 원을 그리며 미립화가 진행되는 과정을 나타내는 형상이며, 분무 형상은 방사형으로 대칭을 이루는 것을 확인할 수 있다. 또한 분무 경계면 외부인 분무 외곽에 재 순환 영역이 분무 초기부터 발생하기 시작하여 시간이 경과함에 따라 하류로 이동하면서 더욱 성장되고 있음

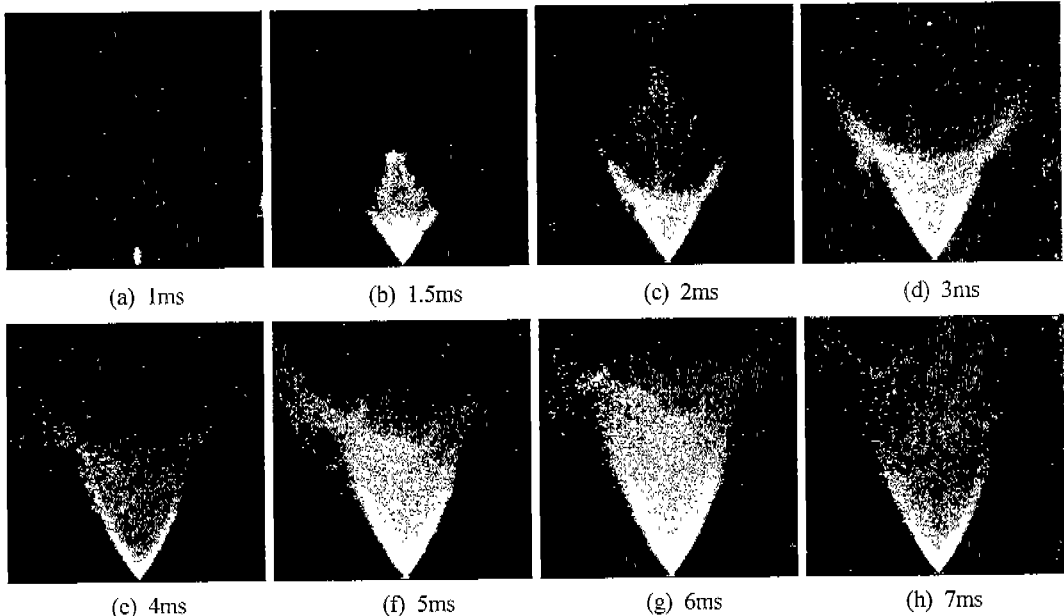


Fig.4 The time series of spray for MMC injector

을 알 수 있다.

이러한 분무 패턴은 전형적인 고압 인젝터의 분무 특성을 나타내고 있는데, 이 발달 과정들을 크게 4가지 과정으로 나눌 수가 있다. 그 첫 번째가 그림(a)의 단계인 분무 지연 기간(delay period)이다. 이 기간은 연료의 물성치와 압력뿐만 아니라 인젝터의 스프링과 솔레노이드의 성능에 의하여 크게 좌우되며, 실제 엔진의 고회전 영역에서는 실질적인 분무시기에 영향을 줄 수 있다..

두 번째 단계는 그림(b)~(c)의 경우로서, 스윌러 내부에 정채해 있던 연료덩어리가 각운동량(angular momentum)을 충분히 얻지 못한 채 hollow cone 형상이 아닌 solid jet형상으로 분무되는 경우이다. 이러한 경우는 연료가 액주 형태인 큰 연료 덩어리로 분무되기 때문에 발생하는 현상으로서 미립화에 악영향을 미칠 수 있으므로 이러한 현상을 최소화하기 위한 최적의 연료압력 설정과 스윌러의 설계가 필요하다는 사실을 알 수 있다.

세 번째 단계는 분무된 연료가 스윌러에 의해 충분한 각속도를 가지고 hollow cone 형태로 분사되는 기간으로서 (d)~(f)까지의 그림이 이 경우에 해당한다.

마지막 네 번째 단계는 (g)이후의 그림처럼 분무의 cone형상이 좁아지면서 커다란 재순환 영역이 형성되는 단계이다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 액적과 주위 공간에 유체역학적 항력과 운동량 교환으로 인하여 분무된 액적들의

속도가 감소하고 다시 상류로 향하는 와(vortex)가 형성되며, 분무 내부의 공기가 액적과 함께 빠른 속도로 하강함에 따라 발생하는 압력 강하에 기인하여 주위 공기가 분무 외부에서 내부로 유입되므로, cone형상이 좁아질 뿐만 아니라 와가 더욱 성장하고 있는 것으로 판단된다<sup>[3],[4],[5]</sup>.

### 3.2 가솔린 직접 분사식 인젝터의 분무 특성

#### 3.2.1 입경 분포

Fig.5는 실험 인젝터의 SMD분포를 PDA로 측정된 결과를 시간의 경과에 따라 나타낸 그림으로서, 모든 경우 노즐로부터 멀어질수록 입경이 증가하는 결과를 나타내고 있다. 이러한 현상의 원인은 높은 운동량을 갖는 큰 입자들이 분무 선단에 집중되는 것과, 고압에서 대기압으로 분사되는 도중에 속도가 급격히 감소하여 입자들의 충돌에 의한 재결합에 의한 것으로 사료된다. 분무 초기에는 큰 입경 분포를 나타내다가 시간이 경과할수록 분무 입자들과 공기와의 마찰이 증가하여 입경이 작아지는 경향을 알 수 있으며, 강한 스윌류의 영향으로 중심부와 가장자리 부분의 입경의 차이가 크게 나타나고 있다. 또한 초기의 분포 형상이 매우 기복이 심한 것을 알 수 있는데 이것은 분무 선단에 많은 양의 큰 연료 덩어리들이 존재하고 있어서 나타나는 현상으로 판단되며, 시간이 경과함에 따라 이 큰 입자들의 미립화가 진행되어 입경 분포가 균일하게 나타나는 현상을 보여준다.

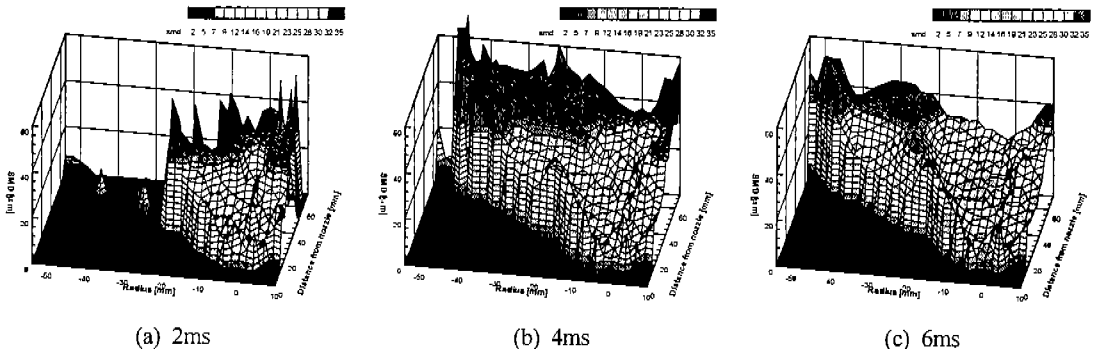


Fig.5 SMD[ $\mu\text{m}$ ] distribution

### 3.2.2 속도 분포

분사된 입자들의 실제 속도를 파악하기 위하여 PDA시스템을 이용하여 속도를 측정된 결과를 Fig.6에 나타내었다. 경과 시간에 따른 속도 분포를 살펴보면 분무 초기는 중앙부와 더불어 강한 스웰의 영향에 의해 분무 경계부분이 높은 속도 분포를 보이고 있으나, 시간이 갈수록 분무의 속도 분포가 넓게 퍼지며, 주위 공기가 분무외부에서 내부로 유입되어 cone형상이 좁아지고, 분무 외곽에 형성된 와가 더욱 커지게 되는 전형적인 Hollow cone분무 형태를 나타내고 있다. 또한 분무가 완전히 발달했다고 볼 수 있는 5ms이후의 속도분포는 급격한 변화를 보이지 않고 전체적으로 비슷한 속도 분포를 보이고 있으며, 이러한 경향은 Fig.4의 분무 거동사진과 거의 일치하고 있다.

### 3.2.3 분무 도달 거리 (penetration)

가시화 결과로부터 시간에 따른 분무 도달 거리를 구한 결과와 PDA에 의해 구한 입경의 평균 속도의 비교를 Fig.7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 높은 압력과 강한 스웰에 의해 분사된 연료 입자들의 속도가 시간 경과에 따라 급격히 감소된 후 일정한 값을 유지하고 있다. 이러한 결과로부터 초기의 높은 입자의 속도에 의한 주위 공기와의 운동량 교환과 마찰에 의해 미립화가 활발히 이루어지고 있으며, 시간이 지남에 따라 입자들의 속도가 둔화되는 현상으로 인하여

Fig.5에서 나타낸 바와 같이 분무 성장의 중반 이후 영역에서 입경 분포의 변화가 적어진다고 생각할 수가 있다. 그러나 노즐 근방의 분무 상류에서는 분무가 계속해서 이루어지므로 높은 속도 분포를 형성하여 분무 선단부보다 작은 입경분포를 이루고 있다는 것을 알 수 있다.

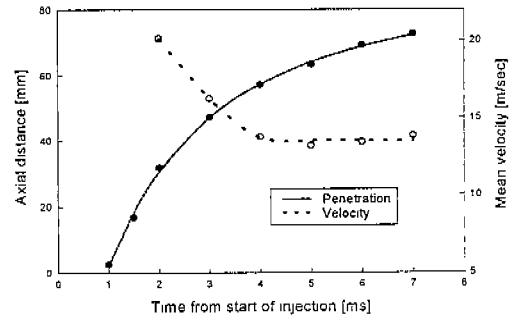


Fig.7 The comparison between penetration and mean velocity with time

## 3.3 가솔린 직접 분사식 인젝터의 미립화 기구 해석

### 3.3.1 연료 입자들의 Weber수 분포

본 연구에서는 미립화가 이루어지는 영역을 해석하기 위하여 미립화 효과를 나타내는 식(1)과 같은 정의를 가진 무차원수인 Weber 수를 도입하였다.

$$We = \frac{\rho \cdot U^2 \cdot d}{\sigma} \quad (1)$$

( $\rho$ : density [ $kg/m^3$ ],  $U$ : velocity [ $m/s$ ],  
 $d$ : diameter [ $m$ ],  $\sigma$ : surface tension [ $kg/s^2$ ])

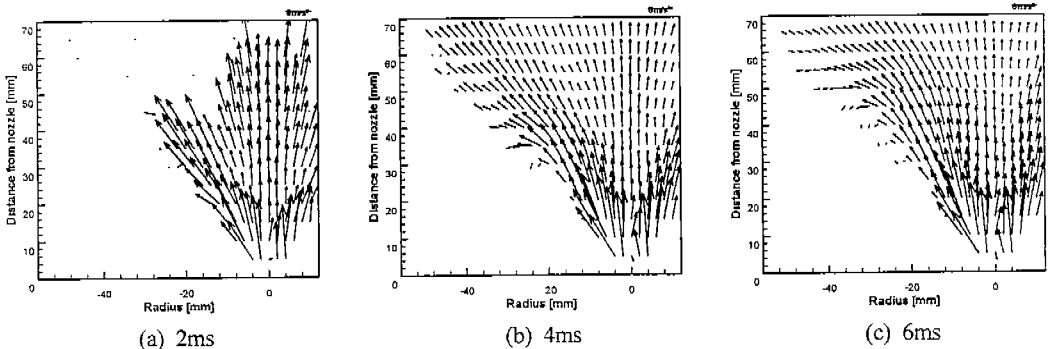


Fig.6 Velocity[m/sec] distribution

We수는 운동에너지에 대한 표면장력의 비로서 1이상이면 분열이 시작되며 그 수에 비례하여 미립화가 촉진된다고 알려져 있다. We수의 분포를 나타낸 Fig.8의 결과를 보면 분무 선단과 강한 스웰류가 형성된 경계면 영역에서는 다른 영역보다 운동에너지가 비교적 높으므로 이 곳의 We수가 높게 나타나고 있다. 이것은 이부분에서 미립화가 활발히 이루어지고 있다는 것을 의미하는 것이며, 분무가 완전히 발달한 후에도 스웰류에 의한 가장자리의 We수는 계속 높은 값을 나타내고 있으므로 본 실험에 사용된 인젝터의 미립화는 스웰류에 가장 많이 영향을 받는다는 사실을 알 수 있다<sup>[6]</sup>.

### 3.3.2 가솔린 직접 분사식 인젝터의 미립화 기구 해석

본 연구에서 사용한 인젝터로부터 분사된 분무의 분열현상이 어떠한 미립화 기구에 의해 지배

되는지를 알아보기 위하여 Ohnesorge 수(Z)를 도입하여 해석하였는데 이 무차원수는 식(2)와 같이 정의된다.

$$Z = (U_L^2 \rho_L d_o / \sigma)^{0.5} (U_L d_o \rho_L / \mu_L)^{-1} = \mu_L / (\rho_L \sigma d_o)^{0.5} = We_D^{0.5} / Re_D \quad (2)$$

Ohnesorge와 Miesse는 각 측정점에서의 Reynolds 수에 대한 Z수를 나타낸 Fig.9에서 표시한 영역 I, II, III에 대하여 액주의 분열 현상을 구분하였다. 즉 I 영역은 Rayleigh나 Weber의 해석이 가능한 액체의 표면장력과 점성력이 주로 작용하는 정맥류형 파동을 동반하는 분열현상을 나타내는 영역이고, II 영역은 기체 유동에 의한 분열 작용이 추가되는 사인함수적인 파동 (sinusoidal wave)을 동반하는 영역이며, 마지막 III영역은 노즐 출구부터 미립화가 이루어지는 영역이다<sup>[7]</sup>.

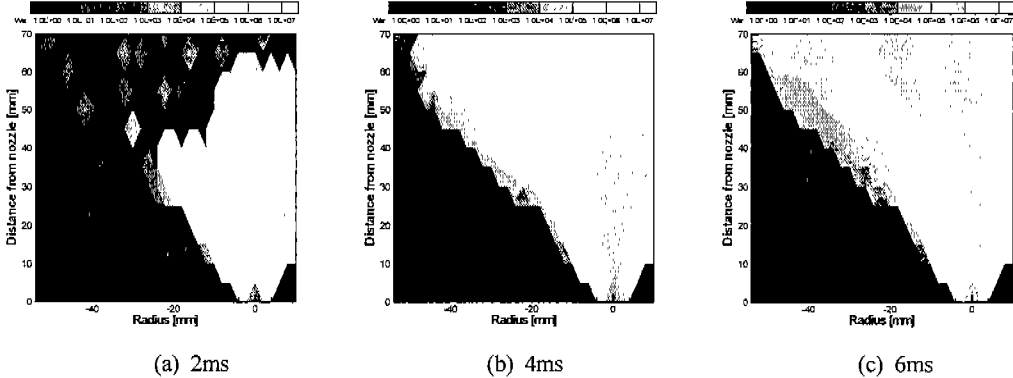


Fig.8 Weber number distribution contour

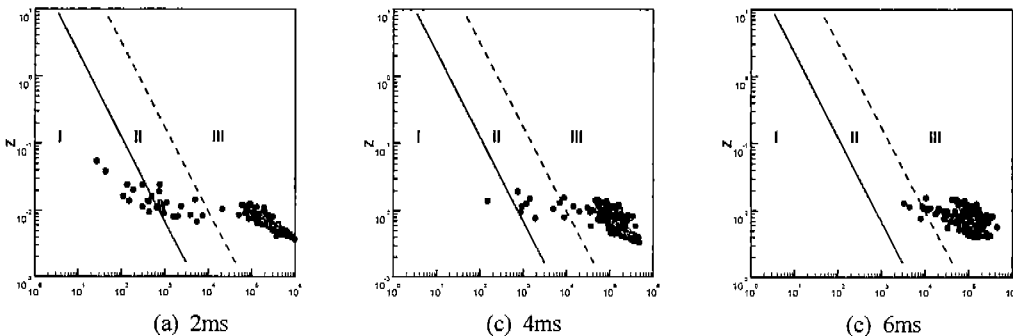


Fig.9 The correlation between Reynolds number and Z number

이 결과 그림을 살펴보면 많은 측정점들이 영역 III에 위치하고 있으므로 본 실험 인젝터는 분무의 전영역이 미립화가 활발히 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있으며, 분사 초기에는 Fig.4에서 보는 바와 같이 고압의 연료 입자가 액주형태로 분사되고 있기 때문에 I과 II영역에서 측정값이 나타나고 있지만 분무가 발달할수록 모든 측정점들이 영역 III에 치우치는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

레이저 쉬트법을 이용하여 취득한 분무 형상과 PDA를 이용하여 측정한 속도 및 입경을 기초 데이터로 하여 GDI 인젝터의 분무 특성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

- (1) PDA에 의해 취득한 속도 분포로부터 초기의 높은 속도가 시간의 흐름에 따라 감소됨을 알 수 있었으며, 이 결과 입자들의 충돌과 재부착이 발생되어 입경의 크기가 증가하는 경향을 나타내었다.
- (2) 강한 스웰류가 형성된 가장자리의 영역에서는 다른 영역보다 운동에너지가 비교적 높으므로 이곳의 We수가 높게 나타났다. 이것은 이 부분에서 미립화가 활발히 이루어지고 있다는 사실을 의미하는 결과이다.
- (3) 분무의 외부 경계면의 속도분포에서 시간의 흐름에 따라 재순환 영역이 크게 발달하는 것을 볼 수 있는데 이곳은 입자의 운동 에너지가 상대적으로 작으므로 공기와의 운동량 수수가 적어 미립화가 둔화될 것으로 판단된다.
- (4) Ohnesorge 수(Z)와 Jet수에 의한 분무 해석을 통해 GDI인젝터의 분무는 분무 초기부터 미립화가 활발히 이루어지고 있지만 부분적으로 사인함수적인 파동에 의한 분열이 이루어지고 있다는 사실을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 논문은 G7 차세대 자동차 기술 과제 의 연구비에 의해 수행된 연구 결과로서, 관계기관에 감사의 뜻을 표합니다.

#### 참 고 문 헌

1. T. Kume, Y. Iwamoto, et. al., "Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engine", SAE960600.
2. Y. Takagi, T. Teruyuki, et. al., "Simultaneous Attainment of Low Fuel Consumption, High Output Power and Low Exhaust Emissions in Direct Injection SI Engine", SAE980149.
3. Fu-Quan Zhao and Ming-Chia Lai, "A Review of Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engine", SAE970627.
4. Michael H. Shelby, Brad A. VanDerWege and Simone Hochgreb, "Early Spray Development in Gasoline Direct-Injected Spark Ignition Engine", SAE980160.
5. C. Preussner, C. Döring, et. al., "GDI : Interaction Between Mixture Preparation, Combustion System and Injector Performance", SAE980498.
6. 茂雄 山本, 棚田 浩, 平子 廉, 安東 弘光, "GDI 엔진의ための噴霧의特性解析", 日本自動車技術會 學術講演會前刷集 971, 329-332, 1997.
7. Arthur H. Lefebvre, ATOMIZATION AND SPRAYS, 1989.