

## 분위기 조건이 직접분사식 인젝터의 미립화에 미치는 영향

### Effects of Ambient Conditions on the Atomization of Direct Injection Injector

이 중 순\*

J. S. Lee

#### ABSTRACT

Several efforts to meet the exhaust gas regulation have been undertaken by many researchers in recent years. Main researches are on development of design techniques of intake port and combustion chamber, atomization of fuel and precise control of air-fuel ratio, post-treatment of exhaust gas and so on. Engine technology is changed from PFI to GDI to correspond with exhaust gas regulation. GDI technique makes it possible to preserve lean air-fuel ratio and control accurate air-fuel ratio. Nevertheless, It is not cleared that information of spray characteristics and atomization process are very dependent on fluctuation of pressure and change of temperature in intake stroke. In this study, a constant volume combustion chamber is manufactured to investigate various fluctuations of in-cylinder pressure for injection duration. It is taken photographs of injection process of conventional GDI injector using PMAS. Then, it was verified experimently that ambient conditions as temperature and pressure of combustion chamber have effects on process of spray growth and atomization of fuel.

**주요기술용어** : Gasoline direct injection(가솔린 직접분사), Ambient temperature and pressure (분위기온도와 압력), Spray tip penetration(분무선단 도달거리), Spray angle(분무각), Atomization(미립화), Particle motion analysis system(입자유동 해석장치)

#### 1. 서론

대기환경 개선이라는 측면으로부터 자동차 선진국의 배기 규제 기준이 날로 강화됨에 따라 우리나라에서도 2002년부터는 가솔린 엔진에 대하여 자발적으로 미국의 저공해자동차(Low Emission Veicle) 배기가스 규제를 상회하는

규제를 적용할 계획이며, 2006년부터는 모든 가솔린 엔진 장착 차량에 대하여 엄격한 규제를 적용할 계획이다.

배기가스 규제를 만족할 수 있는 저공해 자동차를 개발하기 위한 기술은 세계적인 과제이며, 이를 위하여 흡기포트 및 연소실 설계기술 개발, 연료의 미립화, 정밀 공연비의 제어, 배기 후처리 등과 같은 요소 기술에 대한 연구가 수년전부터 활발히 진행되고 있다.<sup>(1~2)</sup>

\* 정회원, 동명대학

이러한 요구를 만족하기 위한 수단 중 하나로 기존의 PFI(Port Fuel Injection) 방식에서 연소실 내에 직접 연료를 분사하는 GDI(Gasoline Direct Injection) 방식으로 엔진 기술이 변화하고 있는 상태이며, 이 기술은 정확한 공연비의 제어는 물론, 냉간시동시의 촉매 활성화 촉진 및 희박한 공연비의 유지를 위해 광역산소센서(UEGO)를 필요로 한다.<sup>(3-5)</sup>

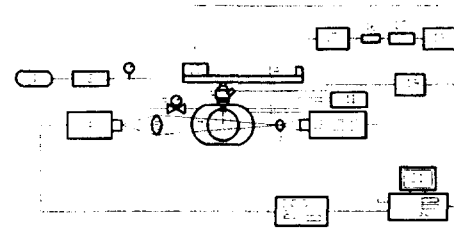
선행 연구에 의하면 김 등<sup>(6)</sup>은 분사각에 따른 고압 가솔린 인젝터의 분무 미립화 특성을 고찰한 바 있고, 박 등<sup>(7)</sup>과 이 등<sup>(8)</sup>은 분사 조건에 따른 직접 분사식 가솔린 인젝터의 분무 특성에 대한 연구 결과를 제시하고 있다.

그러나, 흡기 행정중의 실린더 내 압력 변동에 따른 분무 특성 및 미립화 과정에 대한 정보는 충분하지 못한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 분사시기에 따른 실린더 내의 압력 변화를 모사할 수 있도록 정적연소기를 제작한 후, 상용의 가솔린 직분식 인젝터에 의한 분사 과정을 입자해석장치(PMAS)를 이용하여 거시적 촬영을 수행한 후, 연소실의 온도 및 압력 등과 같은 분위기 조건이 분무의 성장 과정과 연료의 미립화에 미치는 영향을 규명하여 보다 향상된 성능의 인젝터 개발에 필요한 기초 정보를 제공하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig.1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험장치는 직분식 가솔린기관의 분무장인 실린더를 모사하여 제작한 지름 91.1mm, 폭 74.5mm, 체적 485cc의 정적연소기와 저압 및 고압연료 공급장치, 공기 공급장치, 온도 조절장치, 제어 및 화상 취득장치로 구성하였다. 또한, 연료가 분사되는 분위기의 온도제어를 위하여 정적연소기의 외주면에 0.3

kW 용량의 히터를 장착하고 CA 열전대를 이용하여 분위기 온도를 측정하였다.



- |                             |                       |
|-----------------------------|-----------------------|
| 1. Air compressor           | 2. Air control unit   |
| 3. Pressure gauge           | 4. Light source       |
| 5. Condenser lens           | 6. Solenoid valve     |
| 7. Chamber                  | 8. Microscopic lens   |
| 9. Fuel injector            | 10. Thermo couple     |
| 11. Temp. controller        | 12. CCD camera        |
| 13. High pressure regulator | 14. Delivery pipe     |
| 15. High pressure pump      | 16. Fuel filter       |
| 17. Low pressure pump       | 18. Fuel tank         |
| 19. Inj. controller         | 20. Trig. synchronize |
| 21. Computer                |                       |

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

연료탱크 내의 연료는 저압 연료펌프에 의해 0.31MPa의 압력으로 고압펌프에 공급된 후 고압펌프의 2차 펌핑에 의하여 고압으로 분사된다. 본 연구에서는 고압펌프의 유량특성 변화를 방지하기 위해 고압펌프의 구동을 위한 별도의 구동장치를 제작하여 고압펌프의 회전수를 일정하게 제어하였고, 저압 및 고압펌프는 물론, 인젝터의 구동을 위한 솔레노이드의 인가전압도 일정하게 제어하였다.

인젝터로부터 분사되는 분무형상의 가시화를 위하여 정적연소기의 양쪽 측면에 두께 20mm의 석영창을 설치하였고, 이미지는 Fig.2와 같은 분무입자 해석장치를 사용하였다. 측정장치는 광지속시간이 50ns인 레이저 광원과 렌즈, 필터, CCD 카메라, 이미지 보드 및 제어보드가 내장된 컴퓨터로 구성하였다.

영상처리(image processing)를 이용한 측정이란 분무영역에서 CCD 카메라에 포착된 액적

의 순간 영상을 디지털 처리하여 분무 형상을 측정하는 방법으로 본 연구에서는 영상처리기법과 영상인식 알고리즘(pattern recognition algorithm)을 사용하였다.

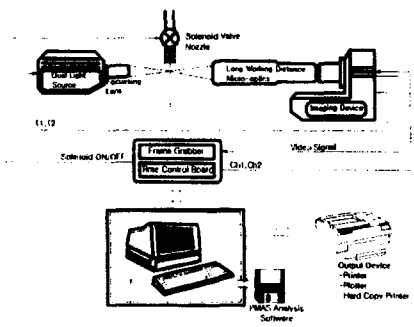


Fig.2 Schematic diagram of particle motion analysis measuring system

Fig.3은 컴퓨터의 출력신호를 이용하여 인젝터를 구동하기 위한 회로를 나타낸 것으로 주변의 노이즈 제거를 위하여 전원을 분리하여 사용하였다.

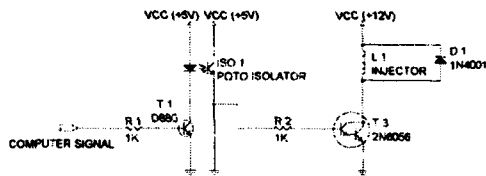


Fig.3 Circuit of synchronization for computer signal and injector driving

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 인젝터의 분무특성

Fig.4는 제어의 신뢰성 확인을 위하여 컴퓨터로부터 출력되는 제어용 신호와 인젝터에 인가되는 전압파형을 4채널 오실로스코프를 이용하여 동시에 측정한 파형을 나타낸 것이다.

이 때, 광원과 분사신호의 동기화를 위하여  $1 \times 10^{-12}$  [second]의 시간 분해능을 가진 4채널 제어보드를 사용하였고, 인젝터의 구동을 위하여 Fig.3과 같은 드라이빙 회로를 사용하였다.

본 조건은 M사에서 제작한 상용의 고압 스월 인젝터에 연료분사시간을  $1700 \mu s$ 로 제어한 결과이다. 파형에서 볼 수 있는 바와 같이 컴퓨터의 출력 신호를 기준으로 인젝터의 구동을 위하여 다링톤 회로의 베이스와 이미터에 인가되는 기간, 즉 실제 인젝터의 구동 시간의 의미하는 컬렉터와 이미터에 인가되는 신호가 동일함을 볼 수 있는데, 이는 정밀한 제어가 이루어지고 있음을 보여주는 결과이다.

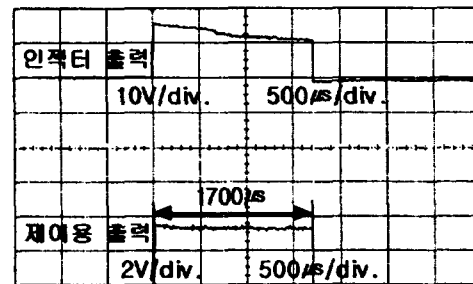


Fig.4 Typical wave forms of each signal

Fig.5는 인젝터의 분사개시 압력 확인을 위하여 실험한 결과를 나타낸 것이다. 연료압력 센서의 출력단에 오실로스코프를 연결하여 측정한 결과 딜리버리 파이프 내에 압력이 증가함에 따라 일정하게 증가하는 경향을 나타내었다. 또한,  $1000 \mu s$ 의 간격으로 연료를 1000회 분사한 결과 연료의 분사에 따른 연료압력의 강하는 감지되지 않았으며, 연료압력센서의 출력전압은 3.03V의 일정한 값을 나타내었다. 이 결과를  $0.98 MPa$ 의 범위 내에서 측정한 출력전압의 결과로부터 구한 식에 대입한 결과, 본 실험에서의 분사개시압력은  $5.04 MPa$ 인 것으로 판단하였다.

Fig.6은 실험에 사용된 인젝터의 분무특성

확인을 위해 컴퓨터로부터 출력되는 분사신호 펄스 폭을 2000 $\mu$ s 영역까지 50 $\mu$ s 간격으로 변화시키면서 측정한 결과를 나타낸 것이다.

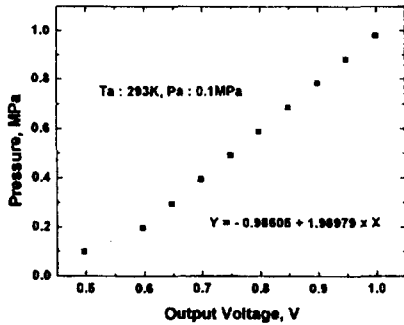


Fig.5 Calibration curve of gasoline direct injector

사용된 연료는 가솔린이며, 대기중에 1000회의 자유분무를 수행하여 전자저울로 질량을 측정 후 분사회수로 나누어 1회 분사량을 산출하였다.

또한, 동일한 전원을 사용할 때 저압 연료 펌프의 구동을 위한 전압 강하가 인젝터 구동을 위한 솔레노이드에 가해지는 전압에 영향을 미치게 되어 동일한 분사기간에 대한 연료분사의 불균형을 초래할 수 있기 때문에 각각의 구동을 위한 전원을 분리하여 사용하였다.

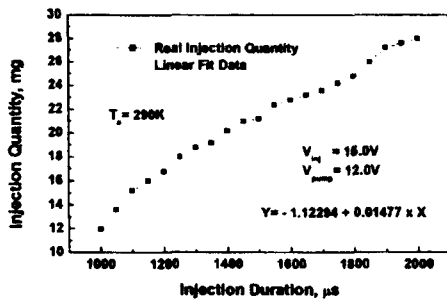


Fig.6 Comparison of injection quantity and injection duration

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 인젝터의 통전시간이 증가함에 따라 연료분사량도 선형적으로 증가하는 현상을 볼 수 있다. 본 조건에서는 인젝터의 통전시간이 700 $\mu$ s인 영역을 최소분사기간으로 결정하였고, 이 때의 연료 분사량은 0.6mg임을 확인하였다.

그러나, 분사기간이 1000 $\mu$ s 미만인 영역까지는 분사량의 변화가 심하게 나타나는 것에 비하여, 1000 $\mu$ s에서 2000 $\mu$ s인 영역에서는 직선성을 보이고 있는데, 이는 안정적인 솔레노이드의 구동을 위한 최소한의 통전시간이 존재함을 의미한다.

### 3.2 상온, 상압 분위기에서의 분무특성

Fig.7은 분무의 성장과정을 확인하기 위하여 거시적 촬영을 한 결과를 나타낸 것으로, 사진의 촬영은 제어용 컴퓨터로부터 100 $\mu$ s 간격으로 50ns의 지속시간을 가진 레이저 광원을 조사하면서 CCD 카메라로 이미지를 취득한 것이다. 사진은 분위기 온도 293K, 분위기 압력 0.0MPa인 조건에서 연료의 분사기간을 1700 $\mu$ s로 설정한 상태이다.

사진에서 보는 바와 같이 인젝터의 분사를 위한 시그널을 출력한 후, 일정 기간의 지연시간이 경과한 다음에 연료분사가 개시됨을 알 수 있다. 또한, 분사가 개시되는 아주 짧은 순간인 700 $\mu$ s 영역에서 액주의 형상으로 분사되던 연료는 800 $\mu$ s 영역에서 액주의 분열현상을 보인 후, 1000 $\mu$ s 영역에서는 거의 구체적인 분무각의 형상을 나타내면서 발달되어 가는 과정을 볼 수 있다. 또한, 1100 $\mu$ s 영역에서는 인젝터 내부의 유동에 의한 스월이 강하게 발생하는 현상을 관찰할 수 있다.

전체적인 분무기간을 통하여 액적의 분산도, 분무의 침투, 분무각 등에 대한 정보를 확인할

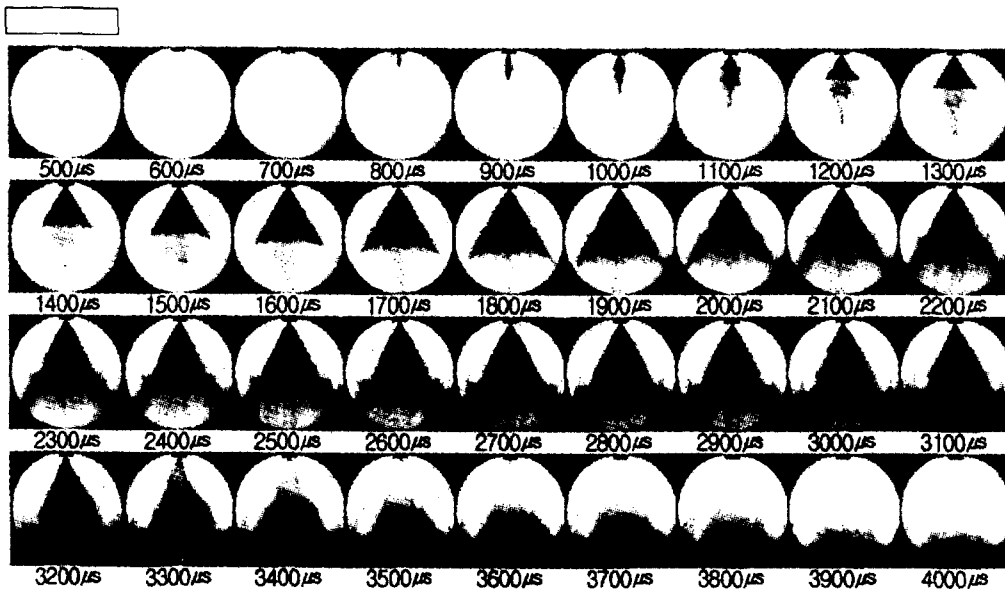


Fig.7 Images of spray structures in quiescent ambient for GDI injector at 5MPa

수 있으며, L. W. Evers가<sup>(9)</sup> 분류한 바와 같은 분무선단(leading edge), 원추영역(cone region), 미단영역(trailing edge), 와류영역(vortex cloud region) 과 같은 4가지 분무영역을 볼 수 있다.

분무현상에 있어서 분무의 침투깊이란 정지된 기체 내로 분사된 액체 분무의 선단이 도달하는 최대 거리를 의미한다. 일반적으로 침투깊이는 분출되는 액체의 운동에너지와 주위 기체에 의한 공기역학적 저항의 상대적인 크기에 의해서 결정되는 요소이다.

Fig.8은 연료의 분사를 위한 신호를 인가한 이후에 계측 가능한 범위 내의 분무의 선단 침투깊이(spray tip penetration)를 나타낸 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 연료의 분무선단은 시간의 경과에 비례하여 거의 선형적으로 증가하는 경향을 볼 수 있다.

또한, Fig.7의 1100 $\mu$ s 영역에서부터 분무의

선단 침투깊이를 육안으로 확인할 수 있는 영역까지의 이미지는 거의 정삼각형의 형태로 발달되는 현상을 볼 수 있는데, 이러한 결과로 볼 때, 시간 경과에 따른 분무의 반경방향 침투깊이(radial spray penetration)도 일정 영역까지는 분무의 선단 침투깊이와 거의 같은 크기로 증가함을 알 수 있다.

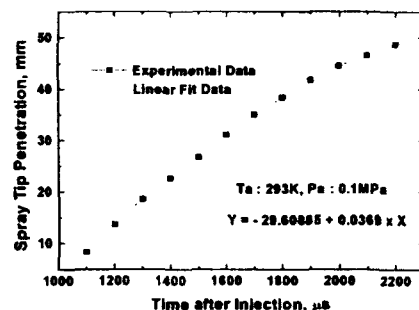


Fig.8 Relationship between spray tip penetration and time after injection

일반적으로 분무각은 인젝터의 중심이 있는 축방향 위치에서 분무의 양측 외곽 지점과 인젝터의 출구를 이은 두 직선 사이의 각도를 말한다.<sup>(10)</sup>

분무각의 측정은 이미지의 취득에 의한 육안 식별방식을 사용하였는데, 실제로 이 경우에는 분무 주위에 액적들이 부유한 상태로 존재하기 때문에 분무 경계를 정확히 결정한다는 것이 용이하지 않다. 따라서, 본 연구에서는 다수의 이미지를 취득하여 소프트웨어적으로 분무의 외곽선을 선택한 후 분무각을 결정하였다.

Fig.9는 시간경과에 따른 분무각을 나타낸 것이다. 분무각은 인젝터의 중심이 있는 축 방향을 기준으로 대칭인 분무 형태를 보였다.

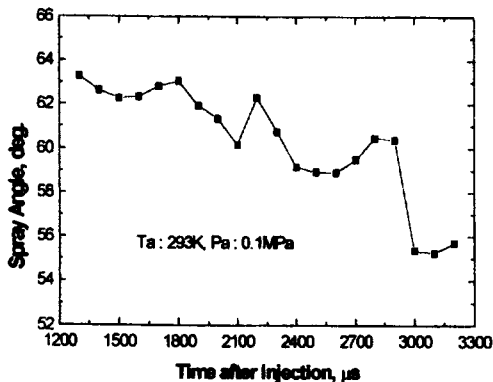


Fig.9 Relationship between spray angle and time after injection

일반적으로 분무각에 영향을 미치는 변수들은 인젝터의 기하학적 형상 외에도 분무 액체의 물성치, 주위 기체의 분위기 조건 및 분사 압력 등을 들 수 있는데, 본 실험에서는 초기 조건을 일정하게 둔 상태에서 측정한 결과이기 때문에 분사 시간 동안의 일반적인 분사각의 이력을 나타내는 것이다.

분무가 개시되는 순간부터 측정 가능한 영역

까지 분무각은 시간의 경과에 따라서 지속적으로 변화하고 있으며, 분무가 충분히 발달한 영역에서의 평균 분사각은  $59^{\circ} \sim 62^{\circ}$ 의 범위를 나타냄을 알 수 있다.

그러나, 이론적으로는 분무가 개시되는 순간에 인젝터 출구 근처의 액막이 표면장력에 의하여 안쪽으로 수축되는 효과가 있다. 또, 연료의 미립화가 활발하게 일어나는 하류 영역에서도 주위 기체의 반경방향 유입에 의하여 액적의 궤적이 안쪽으로 휘어 들어오는 효과에 기인하여 실제 분무면적이 줄어드는 경향이 있다. 이러한 점을 고려할 때, 분무각은 단순하게 표현할 수 없으며 향후 이 부분에 대한 보다 심도있는 고찰을 위하여 미시적 촬영기법을 통한 해석이 필요할 것으로 판단된다.

### 3.3 온도와 압력장에서의 분무특성

Fig.10은 분무장의 온도 변화에 따른 분무의 형상 변화를 확인하기 위하여 거시적 촬영을 한 결과를 나타낸 것이다.

직분식 가솔린 기관에서 연료가 분사되는 상황을 고려할 때, 연료는 냉시동 조건에서부터 서모스탯이 동작하는 전 영역에서 분사가 이루어지기 때문에 온도의 변화에 따른 분무 특성을 고찰하는 것은 의미가 있다고 판단된다.

즉, 분무가 이루어지는 분위기 기체의 물성치 중에서 가장 중요한 것은 기체의 압력과 밀도 조건을 들 수 있다. 따라서, 분위기 조건의 온도 증가는 밀도의 증가를 초래하기 때문에 분사각과 분무 선단 침투길이 및 분산도 등과 같은 거시적 해석에서 확인할 수 있는 부분과 함께 분무 입경 등과 같은 미시적 해석에 절대적인 영향을 미친다.

그림의 종축과 횡축은 분무장내의 온도와 경과시간을 각각 나타낸 것이다.

그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 상온의 온도 조건에 비하여 분위기 기체의 온도가 증가할수록 인젝터의 중심축 방향으로의 분무장 선단 침투깊이의 미세한 변동과 함께 반경방향의 침투깊이가 감소하는 현상을 볼 수 있다. 이와 함께 분사의 외곽을 다루는 주분무장 침투깊이(main spray penetration)도 함께 감소하는 현상을 보인다.

또한, 액적 체적에 대한 전체 분무체적의 비

인 산포도를 나타내는 액체 분무의 분산도(spray dispersion)도 감소되는 현상을 보인다.

이러한 현상은 동일한 그레이 레벨로 이미지를 취득하였음에도 불구하고 분무의 주류 부분의 색상 농도가 높게 나타나는 것으로도 확인할 수 있다.

한편, 주위 분위기의 온도가 높아짐에 따라 분산도와 분무각이 작아지는 현상은 분무 외곽에 존재하는 연료의 미립자가 주위 기체의 온

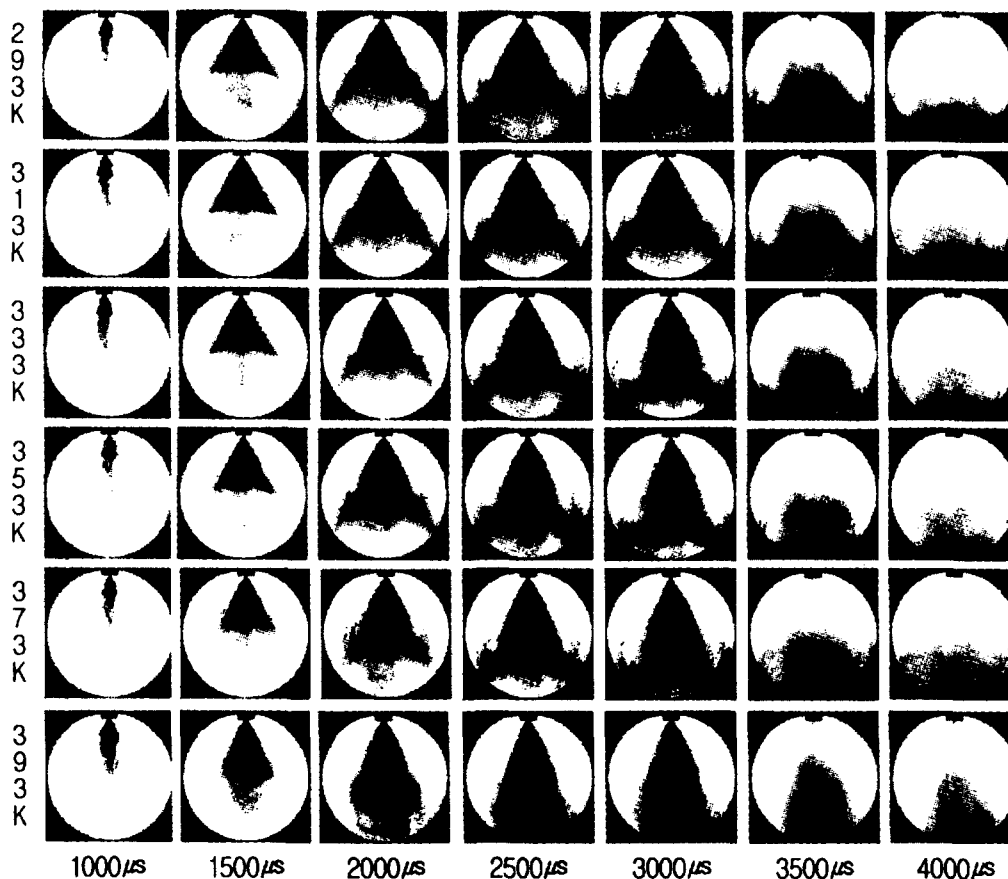


Fig.10 Images of spray structures in each ambient temperatures

도 상승에 의한 열전달 현상이 활발히 이루어진 것에 기인하는가에 대한 것에 대한 명확한 규명을 위해서는 향후 분무 외곽 부분에 대한 미시적인 해석이 필요한 것으로 보인다.

Fig.11은 동일 조건에서 분사각의 변화를 나타낸 것이다. 분위기 기체의 온도가 증가함에 따라 전체적으로 감소하는 현상을 보인다.

특히, 동일 온도 조건에서 시간의 경과에 따른 분사각의 감소폭은 353K 영역까지는 10% 내외임에 비하여, 분위기 온도 조건이 373K인 영역에서는 15%, 393K인 영역에서는 44%의 감소폭을 각각 나타내는 경향을 볼 수 있다. 이와 같은 결과로 미루어 볼 때, 분위기 기체의 온도가 일정 이상인 영역에서는 분사각이 급격히 감소하는 사실을 알 수 있다.

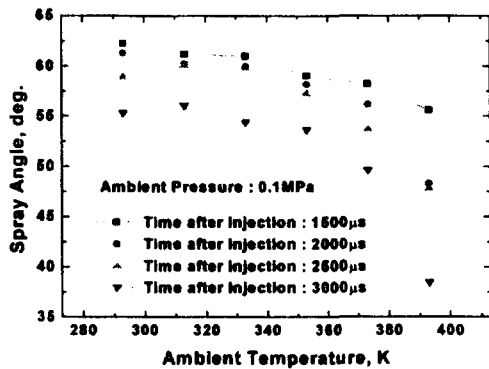


Fig.11 Relationship between spray angle and ambient temperature

Fig.12는 분무장의 압력 변화에 따른 분무의 형상 변화를 확인하기 위하여 거시적 촬영을 한 결과를 나타낸 것이다.

직분식 가솔린 기관에서의 연료분사시기는 운전 조건에 따라 다르지만 실린더 내의 압력 조건이 순간적으로 변화하는 비정상 상태이다.

즉, 분무장의 주위 기체 압력이 증가함에 따라 분위기의 밀도가 증가하는 현상을 초래한

다. 이 때, 주위기체의 반경방향 유입효과에 의해 액적들이 분무 반경방향으로 휘어지는 현상이 심해지기 때문에 결과적으로 분무각의 수축효과를 유발하게 되고, 분무 영역 내의 액적의 수밀도는 증가하게 된다.

그림은 본 실험의 범위 내에서 온도에 의한 영향을 가장 많이 받는 영역으로 판단되는 393K인 조건에서 분위기 기체의 압력변화가 분무의 형상에 미치는 영향을 고찰한 것이다.

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 압력이 증가함에 따라 영향을 가장 많이 받는 분무의 특성은 인젝터의 끝부분과 주와류가 발생하는 분무장의 끝부분 사이의 거리인 주분무장 침투깊이 임을 알 수 있는데, 이는 분위기 압력의 증가로 인해 항력이 강하게 증가하여 분무의 저항으로 작용하기 때문인 것으로 판단된다.

이러한 결과는 분사의 역방향으로 분무의 형상이 말려 올라가는 듯한 분무 이미지로도 확인이 가능하다.

Fig.13은 분사개시 후 2500μs인 영역에서 분사각에 미치는 분위기 기체의 압력의 영향을 확인하기 위하여 실험한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 동일 조건에서 압력의 증가에 따른 분사각의 변화는 19~25% 정도 감소하는 경향을 나타내었다.

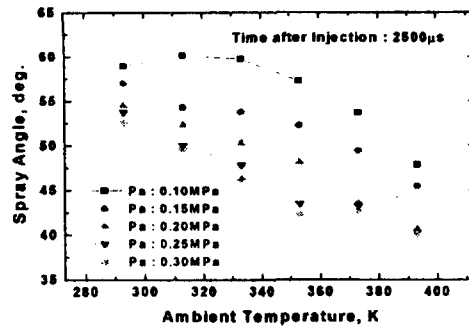


Fig.13 Relationship between spray angle and ambient temperature at each pressures



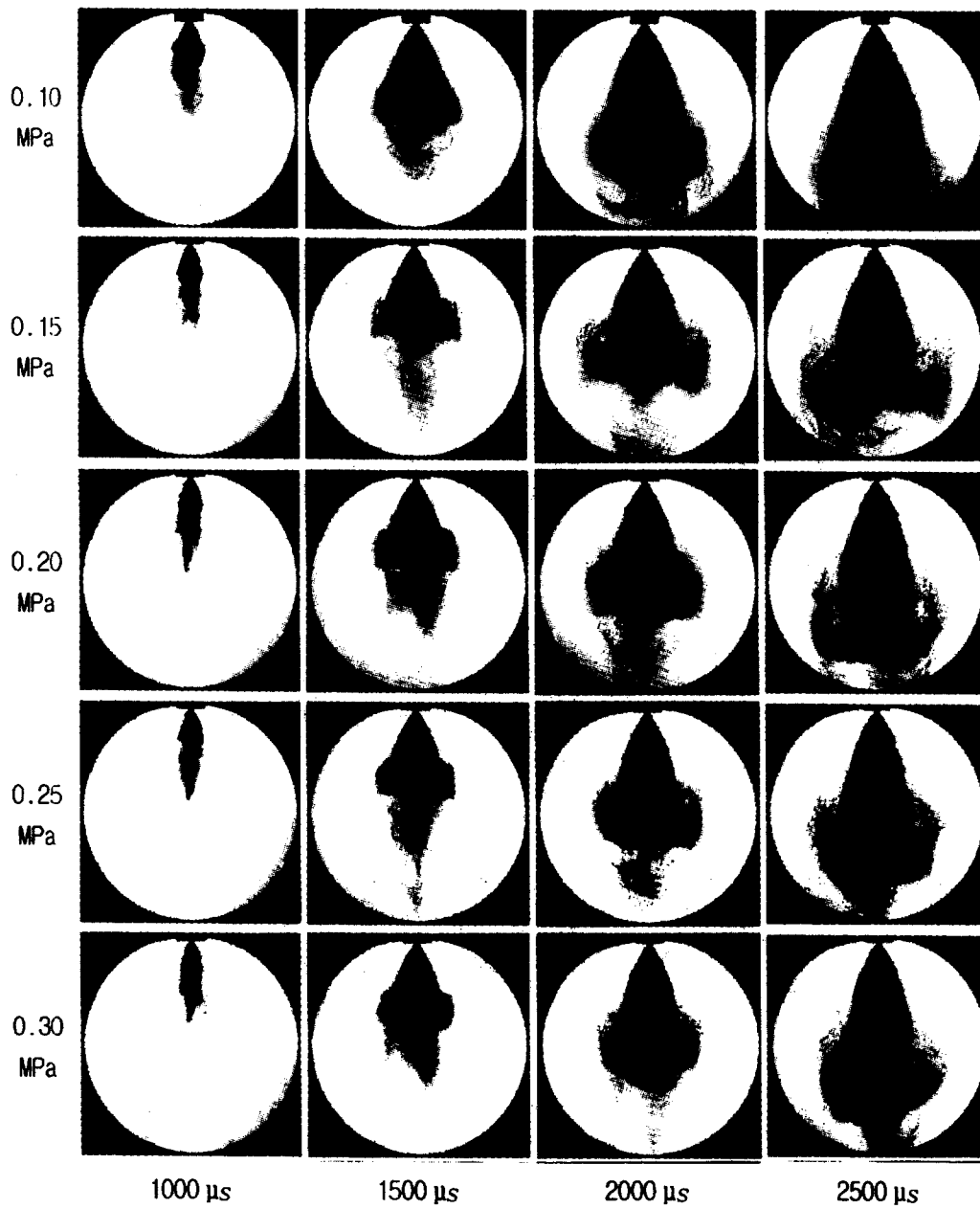


Fig.12 Images of spray structures in each ambient temperatures and pressure at 393K

이에 비하여 동일 조건에서 온도의 증가에 따른 분사각의 변화는 14~26% 정도 감소하는 경향을 보였다.

이러한 결과로 미루어 볼 때, 주위 기체의 온도와 압력이 분사각의 변화에 미치는 영향은 거의 동일한 것으로 보이지만, 온도의 증가에 따른 분사각의 변동이 큰 것으로 판단된다.

이러한 결과는 일반적으로 알고 있는 바와 같이 압력형 단공 인젝터의 경우에는 주위 기체의 밀도가 높을수록 분무 액적들에 대한 항력이 커지기 때문에 분무각이 커지지만, 와류형 분무 인젝터에서는 주위 기체의 밀도가 증가함에 따라 급격히 분무각이 줄어들었다가 일정 이상의 압력 조건에서는 변화가 나타나지 않는 현상과 동일한 경향을 보였다.

#### 4. 결론

- (1) 분무의 거시적 해석을 통하여 액적의 분산도, 분무의 침투, 분무각 등에 대한 정보를 확인할 수 있었다.
- (2) 분무장 선단 침투 깊이는 분위기 온도의 영향을 크게 받지 않는 반면, 분사 후 1500 $\mu$ s 영역에서 2000 $\mu$ s 영역이 분무의 성장이 활발히 이루어지는 주분사 영역임을 알 수 있다.
- (3) 주위 기체의 온도와 압력이 분사각의 변화에 미치는 영향은 거의 동일한 것으로 보이지만, 온도의 증가에 따른 분사각의 변동이 큰 것으로 판단된다.

#### 5. 참고문헌

- (1) Iwamoto, Y., Noma, K., Nakayama, O., Yamauchi, T. and Ando, H., "Development of Gasoline Direct Injection Engine", SAE paper

No.970541, 1997

- (2) M. Wirth, W. F. Ploock, G. J. Fraidl, P. Schoeggel and E. Winkhofer, "Gasoline DI Engine", SAE paper No.970541, 1997

(3) 박심수, "강화되는 자동차 배기 관련 및 대응 방법", 한국자동차공학회지 제22권 제호, pp.22~27, 2000

- (4) Micheael H. S., Brad A. Van DerWege and Simone H., "Early Spray Development in Gasoline Direct Injection Spark Ignition Engines", SAE paper No.980160, 1998

(5) Toshharu Nogi, Takashi Shiraishi et. al., "Stability Improvement of Direct Fuel Injection Engine under Lean Combustion Operation", SAE paper No.982703, 1998

- (6) 김민규, 이창식, 이기형, "분사각에 따른 고압 가솔린 인젝터의 분무 미립화 특성", 한국액체미립화학회 학술강연 논문집, pp.29~34, 2000

(7) 박준현, 이재준, 전문수, 윤정의, "분사 조건 변화가 직접 분사식 가솔린 기관의 분무 거동에 미치는 영향", 한국액체미립화학회 학술강연 논문집, pp.35~40, 2000

- (8) 이기형, 이창식, 이창희, 배재일, 백승국, "직분식 가솔린 인젝터의 분사 조건에 따른 분무 특성에 관한 연구", 한국액체미립화학회 학술강연 논문집, pp.204~209, 2000

(9) L. W. Evers, "Characterization of the Transient Spray from a High Pressure Swirl Injector", SAE Technical Paper No.940188, 1994

- (10) 이상용, 액체의 미립화, 민음사, pp.233~285, 1996