

디젤유분무의 초기분산과정에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Initial Dispersion Process of Diesel Fuel Spray

허 중 칠* ; 구 자 왕** ; 이 규 영*** ; 양 옥 룡****
J. C. Huh, J. W. Ku, G. Y. Lee, O. Y. Yang

ABSTRACT

This study is to investigate the dispersion characteristics of diesel fuel spray in the initial stage of the beginning of the injection under the condition of room temperature and atmospheric pressure.

It is difficult to analyse that the diesel fuel spray in diesel engine has unsteady intermittent spray. So author installed a fuel accumulator and an electromagnetic controller in order to keep the constant fuel injection rate with the time variation. With this modified fuel injection system, spray tip penetration, spray angle and initial spray development process are investigated by instantaneous photographic method.

The results obtained in this study are as follows :

- 1) The initial shape of injection of diesel fuel spray shows the form of non-disintegrated intact core, but the formation of ligaments increasingly grows as the time increases. It can also be shown that fine droplets become disintegrated out from the ligaments.
- 2) The slope of spray tip penetration was changed to two different tendencies with time. The transition point of the slope is shown at the time of around between 0.09 msec and 0.4 msec from the beginning of injection. This is transition time from non-disintegrated intact core to formation of ligaments.

1. 서 론

디젤연료의 미립화는 디젤기관의 연소 전 단계에서 연소과정을 제어할 수 있는 혼합기의 형성을 지배하며, 연소생성물중의 Soot,

미연탄화물(HC)과 NO_x 등의 오염물질 배출과 밀접한 관련이 있다.^{1,2)} 또한, 오염물질의 배출은 가연성혼합물 상태에 따라서 영향을 받으므로, 분사된 디젤연료의 분무형태, 입도 분포, 분무와 주위기체와의 상호작용에 관한

* 정회원, 제주대 기관공학과

** 정회원, 인하대 대학원

*** 정회원, 인하공전 기계과

**** 정회원, 인하대 기계공학과

연구는 디젤연소의 기초연구로서 널리 활발하게 수행되고 있다. 소형 고속 디젤기관의 경우에 있어서는 연료분사개시후 약 1 msec의 착화지연기간중에 연료가 충분히 미립화되어 증발되어야 하며, 연소실 크기의 제한으로 인하여 분사된 연료의 비행거리도 제한받게 된다. 그러므로 연료가 충분히 미립화되는데 필요한 시간, 시간적 공간적으로 연료분무의 발달상태 및 분열과정을 정확히 파악해야 한다.

연료분무의 미립화 및 분열현상은 고압의 연료가 노즐내부를 통과하면서 발생된 난류, 와류등의 영향을 받아 분사직후 미분열 액주상태에 표면에 파³⁾가 발생하여 점차 액사(Ligament), 액적으로 분열되며, 그후 주위기체와 분류간 전단력등의 유체역학적 상호작용^{4,5)}이 분류의 미립화를 완성하는 것으로 알려져 있다. 이러한 현상들은 노즐형상, 주위기체의 압력, 밀도, 온도, 분사연료의 물성, 분사압력(분사유량) 등 여러 인자의 중첩과 분무유동시 물리적 현상의 복잡성으로 인하여 아직도 뚜렷한 미립화기구(Atomization mechanism)는 설명되지 않고 있다.

분무형상의 시간적 변화인 분무선단도달거리와 분무각은 이미 수행된 여러 실험식⁶⁾으로 예측이 가능하다. 그러나 분사과정이 불완전

한 천이구간, 분사후 0.5 msec 이내의 분사초기,에서는 실험식과 일치하지 않는다는 보고도 있다.^{7,8)} 또한, 분무의 분열 및 미립화 과정은 입경분포⁹⁾, Intact length³⁾, Breakup length¹⁰⁾, 미립화된 입자의 속도¹¹⁾등이 계측되고 있으나 분사초기의 연료의 미분열 액주상태가 분열되면서 분무류를 형성하여 미립화되는 과정인 분무초기 분산과정에 관한 연구는 아직 미비한 실정이다.

본 연구에서는 상온대기압하에서 단공노즐을 통하여 일정압력으로 분사된 연료분무가 시간경과에 따라 어떠한 분열과정을 거쳐 완전히 발달되는지를 구명하여, 디젤연료의 분사초기 분무, 분산특성에 관한 기초자료를 얻고자 한다.

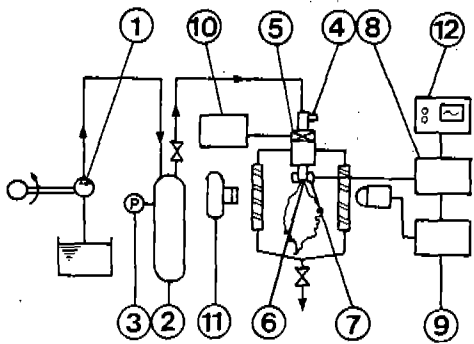
2. 실험장치 및 방법

2.1 연료분사장치

본 연구에 사용된 연료분사펌프 실험장치는 차량용, 선박용 및 산업용 디젤엔진에 사용되는 디젤연료분사펌프의 분사시기 및 분사량등을 시험, 조정하는 연료분사펌프 시험장치이며, 연료분사펌프 시험장치에 자동차용 분사펌프를 장착하여 플러저펌프 1개만을 연료의 가압장치로 사용하였다.

Fig.1은 본 실험에 사용한 실험장치의 개략도이다. 연료는 플러저펌프(1)로부터 축압실(2)로 압송되며 소정의 분사압력까지 가압된다. 축압실의 내부용적은 5.1리터이다. 축압실에서 가압된 연료는 고압연료관을 통하여 전자제어분사노즐(5)에 이른다.

Fig.2는 전자제어분사노즐의 상세도이다. 이 전자제어분사노즐은 Fig.1의 노즐제어장치(10)에 의해 제어된다. 즉 연료분사는 전자밸브를 작동시키지 않은 상태에서 분사개시신호가 노즐제어장치에 입력시키면 전자밸브가 자화되어 분사노즐의 니들밸브를 끌어 당기게 되며, 노즐제어장치에 설정된 시간동안 연료가 고압용기내로 분사되도록 하였고, 설정시간은 1 μsec로부터 1sec까지 조절이 가능하다.



- | | |
|-------------------------|----------------------|
| 1 Plunger Pump | 7 Interrupter |
| 2 Accumulator | 8 Retarder |
| 3 Pressure Gauge | 9 Stroboscope |
| 4 Pressure Transducer | 10 Nozzle Controller |
| 5 Solenoid | 11 Camera |
| 6 Fuel Injection Nozzle | 12 Oscilloscope |

Fig.1 Experimental Apparatus

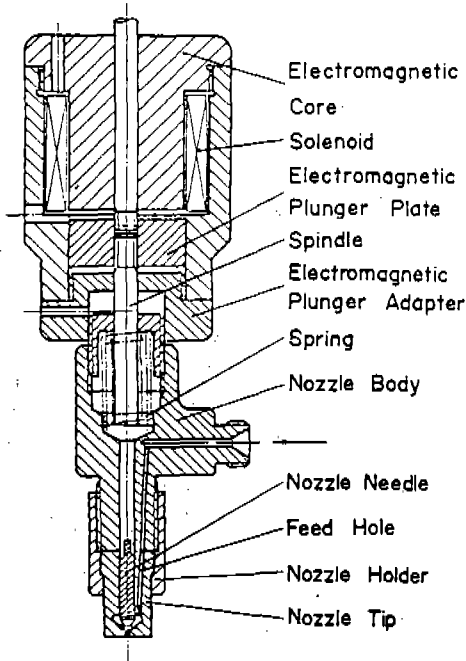


Fig. 2 Sectional Drawing of Modified Spray Nozzle

분사관측용 용기는 내부직경 196mm, 길이 500mm로 양측면에 사진촬영이 가능하도록 길이 230mm, 폭 130mm의 관측창을 부착하였다.

연료분사압력은 노즐홀더의 연료입구측에 부착한 Fig.1의 압력변환기(4)에 의하여 측정되며, 축압실에 압력계(3)를 부착하여 분사압력의 설정에 정확성을 기하였다.

Photo.1은 솔레노이드(Solenoid)에 12 Volt로 통전시킬 경우 시간경과에 따른 분사압력의 변동을 나타낸 오실로스코프 사진이다. 종축은 전압, 횡축은 시간을 나타내고 한 눈금은 5msec이며, 채널 1(CH1)은 압력변환기의 분사압력의 강하를 표시하며, 채널 2(CH2)는 전자제어분사노즐의 솔레노이드 개폐시기이다. 사진으로부터 솔레노이드에 통전되고 나서 2msec 이후에 분사가 시작되며 분사직후 2msec 동안 압력강하가 급격하나 그 이후는 거의 일정하여 연료분사율이 일정함을 알 수 있다. 이때 분사압력이 210 atg, 압력강하는 15 atg이다.

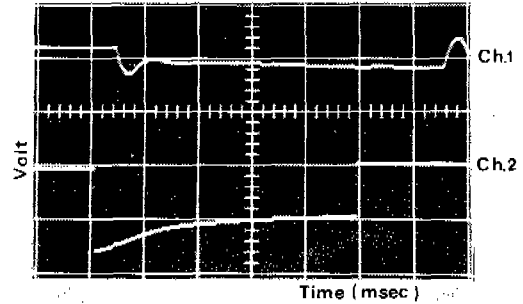


Photo.1 Photographs of Oscilloscope (Pi = 210 atg)

2.2 사진촬영방법 및 실험조건

본 실험에서는 투과광에 의한 사진촬영법을 이용하였다. 사진촬영시 Fig.1의 노즐(6)의 선단에 포토인터럽터(Photo-interrupter) (7)를 부착하여 분사가 개시되면, 분무의 선단이 포토인터럽터의 빛을 차단하게 된다. 이 순간 포토인터럽터에서 분사개시신호가 발생하며, 발생한 신호는 신호지연장치에서 증폭되고, 설정된 시간만큼 지연된 후에 스트로보스코프(Stroboscope) 혹은 나노라이트(Nanolite) (9)에 입력되어 적정노출광량이 순간 발광한다. 이때 카메라는 B.Shutter 상태로 이 순간광을 받아들여 분무상태가 감광되어 촬영된다. 신호지연장치의 지연시간은 1 μsec로부터 10 msec 까지 조절이 가능하며 스트로보스코프 순간광의 발광시간은 3 μsec이고 나노라이트는 약 50 nsec이다.

Table 1 Experimental Condition

구 분	측 정 조 건
분사압력(atg)	70, 140, 210
분 위 기 조 건	상온 상압
실 험 용 연 료	디젤유(비중 : 0.84)
카메라(Lens)	NIKON F-2(105mm Micro, 개도 : 4)
	NIKON F-2(Tele-Micro, 확대배율 : 4.5)
필름	KODAK Tri-X(ASA-400)

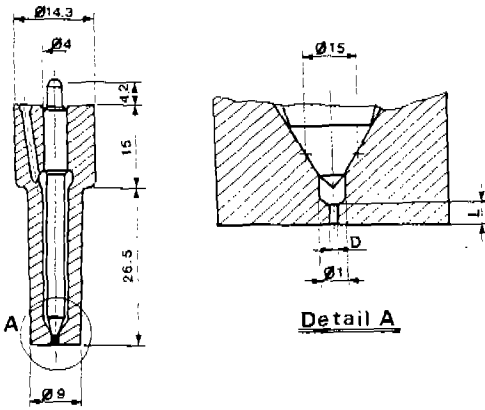


Fig. 3 Injection Nozzle

Fig. 3은 실험용 분사노즐의 상세도이며, 이 노즐은 단공노즐로써 분공경 0.45mm, 오리피스 길이 0.90mm(노즐 형상비: 2)이다. 실험조건은 Table 1과 같다.

3. 실험결과 및 고찰

Photo. 2는 노즐 형상비 2, 분공경 0.45mm인 노즐을 사용하여 상온대기압 상태의 용기내로 디젤연료를 각각 70, 140, 210atg으로 분사시켰을 때 투과광에 의해 촬영한 사진으로 분무가 발달하고 있는 형상을 보여주고 있다. 이 사진으로부터 Fig. 4의 정의에 의해 분무선단 도달거리와 분무각^θ을 측정하였으며, 그 결과 분무선단 도달거리는 시간경과에 따라 분사압력에 비례하여 증가하고 있다. 그러나 분사 초기에서 분무각의 변화폭은 넓으나 1.0msec 이후에는 거의 변화가 없다.

Photo. 3-a, 3-b는 나노라이트 광원, Tele-micro lens(확대배율: 4.5배)를 사용하고 각각 70, 210atg의 분사압력하에서 분사시켰을 때 노즐선단으로부터 7mm까지 촬영한 사진으로 분무류의 분열과정과 분산특성에 관한 정보를 제시해 주고 있다.

Photo. 3-a는 210atg의 분사압력으로 분사시켰을 경우 분사직후인 6μsec에서 액주(Liquid column)가 노즐로부터 약 1.5mm 성장했음을 보여주며 액주선단은 공기저항을

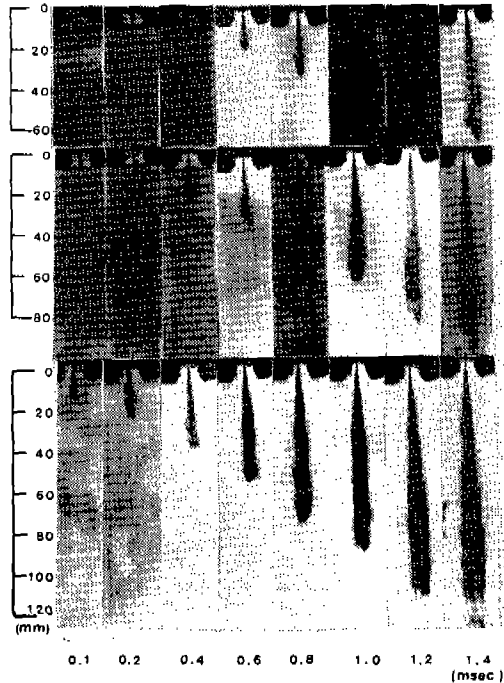
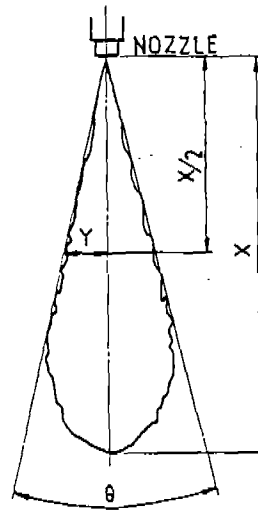


Photo. 2 Photographs of Diesel Fuel Spray (Upper Pi=70 atg, Middle Pi=140 atg, Lower Pi=210 atg, L/D=2, D=0.45mm)



$$\theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X/2} \right)$$

Fig. 4 Definition of Spray Angle & Penetration

받아 리벳 형태이다. 0.01msec에서 0.08msec 사이에서는 분무선단의 속도가 감소(Fig. 6 참조)하는 동시에 분사유량의 증가로 분무류는 노즐분공방향과 주위공기의 저항에 의한 반경방향의 속도 Vector의 합성한 방향으로 성장하며 비교적 안정된 형상을 나타내고 있다. 분사시간이 경과함으로써 액사형성이 시작되며 0.5msec에서는 액사형성과 함께 액사로부터 분산되어 나온 액적들이 존재함을 알 수 있었다. 1.0 msec에서는 Fully Developed 분무의 형태이며, 노즐 분공근처에서 액주가 1mm미만임을 확인하였다.

Photo. 3-b는 분사압력이 70 atg인 경우

분사시간이 0.06 msec에서 분무류는 나사머리 모양을 보이고 있으며, 이때 미약하나마 주위공기의 저항을 받고 있음을 식별할 수 있다. 0.08 - 0.20 msec까지는 분사된 분무류 표면에 연속적인 파형(Sinusoidal wave)을 띠며, 분사시간이 경과함에 따라 분무선 단속도가 감소하나 분사유량의 증가로 파형이 성장하며 분사표면이 상당히 불안정하게 관찰되고, 이로 인하여 액사형성이 활발하게 진행되고 있으며 0.80 msec에서는 액사로부터 분리되어 나온 액적들이 산재함을 확인하였다.

Photo. 2와 3-a과 3-b로부터 분무의 형상을 분사개시후 시간경과에 따른 분무선단도

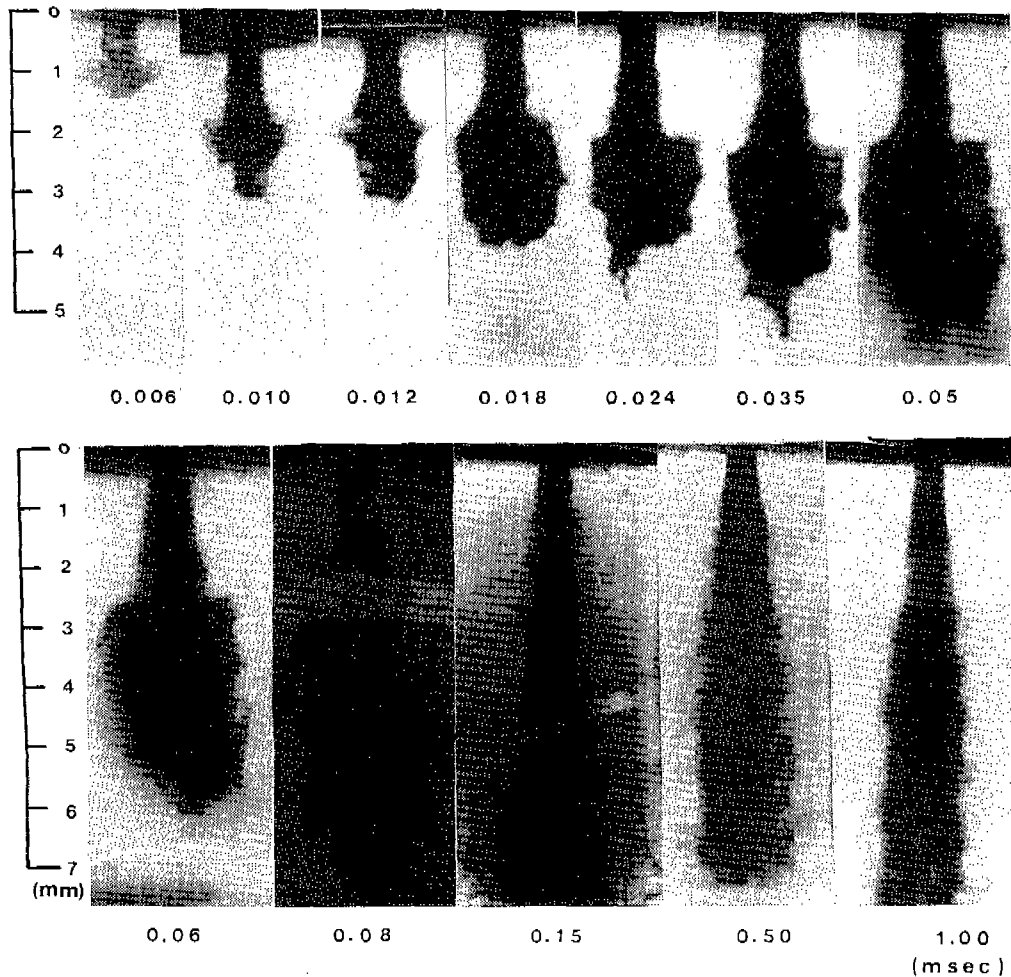


Photo.3-a Magnified Photographs of Diesel Fuel Spray ($P_i = 210$ atg)

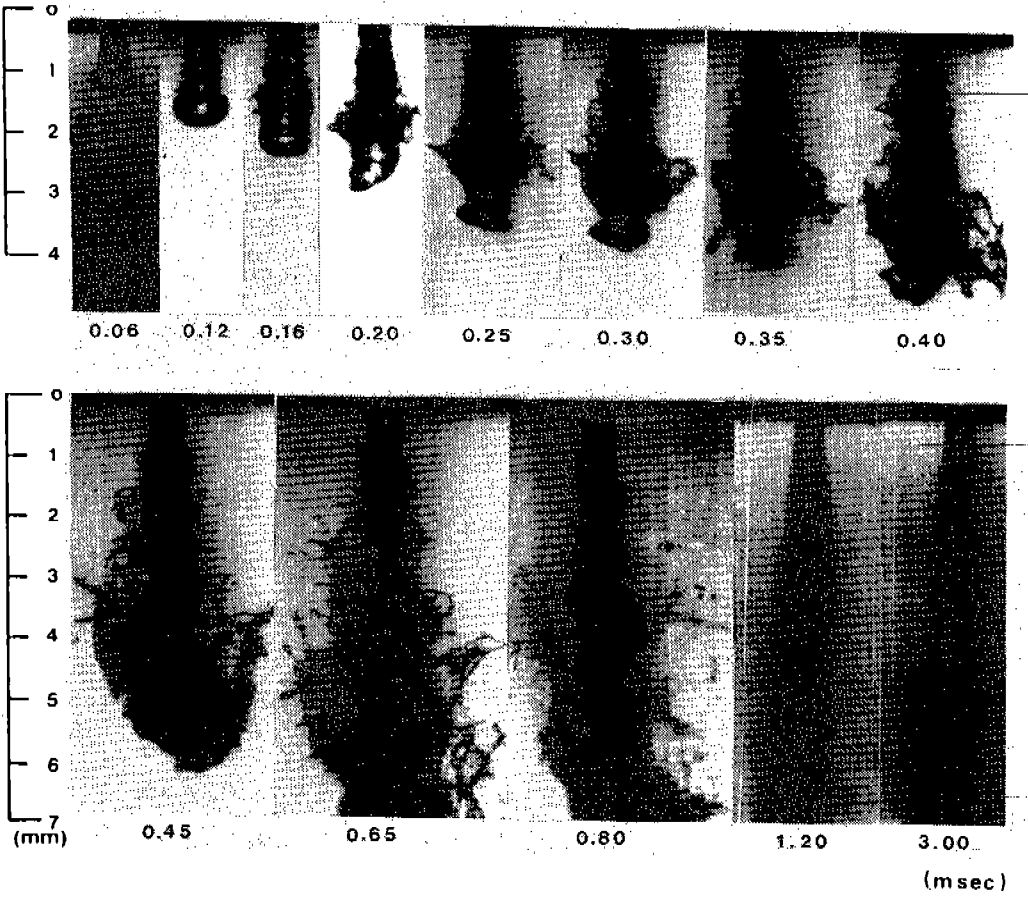


Photo.3-b Magnified Photographs of Diesel Fuel Spray ($P_i=70$ atg)

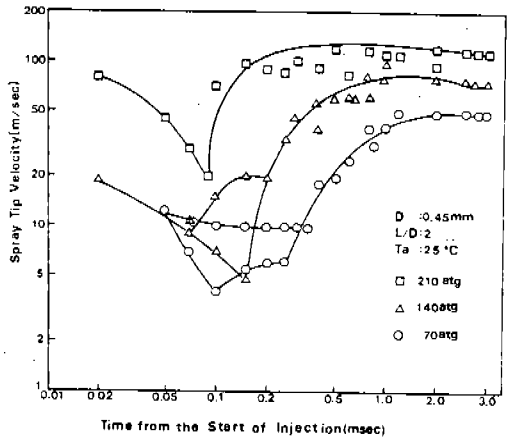
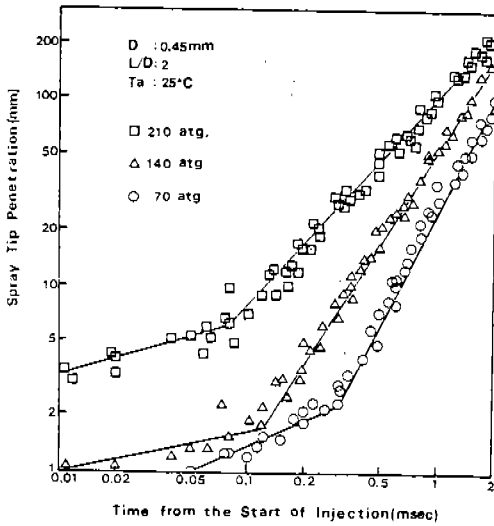


Fig. 5 Effect of Injection Pressure on Spray Penetration

Fig. 6 Relation between Injection Pressure and Spray Tip Velocity

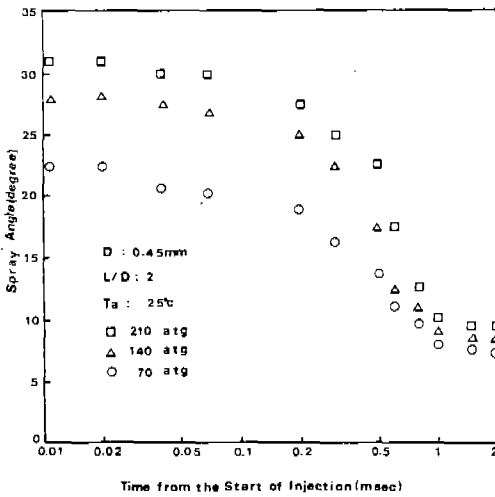


Fig. 7 Effect of Injection Pressure on Spray Angle

달거리, 분무선단속도 및 분무각을 각각 Fig. 5, 6 및 7에 도시하였다.

Fig. 5는 Log-Log 좌표로 나타내었으며, 횡축은 분무선단이 포토인터럽트의 빛을 차단하는 순간으로부터의 경과시간이며, 종축은 분무선단도달거리이다. 그림으로부터 분사압력이 높을수록 연료에 주어지는 운동량이 크게 되므로 분무선단도달거리는 증가하는 것으로 생각되며, 특히 분사초기에 분무선단도달거리에 미치는 영향이 현저함을 알 수 있다. 이는 연료의 분열이 일어나기 전인 분사초기의 액주형태이므로, 분무선단도달거리가 분사압력크기에만 의존하기 때문이라고 생각된다. 또한 기울기가 약 0.5인 직선영역과 기울기가 1인 직선영역이 존재하며, 분사개시후 약 0.09-0.4msec 사이에서 기울기가 다른 두 직선영역이 존재한다. 분무선단도달거리-경과시간의 그림에서 기울기가 변하고 있는 천이점이 나타나며, 천이점이 발생하는 천이시간은 연료의 분사압력이 높을수록 분사개시후 빨리 발생함을 알 수 있다.

Fig. 6는 경과시간 변화에 따른 분무선단의 속도변화 곡선이다. 그림에서 분무선단의 속도가 감소하다가 어느 시간을 지나면서부터 증가하기 시작하며 분사압력이 높을수록 분사개시후로부터 분무선단의 최저속도점이 빨

리 발생하였다. 이는 분사압력이 높을수록 운동량이 크기 때문이라고 생각되며 이 점은 Fig. 5의 천이점과 일치한다. Fig. 5, 6에서 천이점이 발생하는 원인은 선행의 연구에서 지적했듯이 분사 초기에 니들 개방의 불안정하고 공급압력의 맥동에 의한 Injection과정의 천이와, 본 연구의 확대사진촬영에서 나타난 바와 같이 분사직후 공기저항을 받아 리벳모양의 액주가 시간경과에 따라 액사형성과 더불어 액적으로 분리되는 과정 즉 갑작스런 체적증가에 의한 속도감쇠 현상으로 분사압력이 속도에너지로 변환하는데 소요되는 시간지연에 기인하는 것으로 생각된다. 분사압력이 높은 210atg인 경우는 속도에너지로의 변환이 빠르기 때문에 안정된 분무형상을 나타내고 있고, 분사압력이 낮은 140, 70 atg인 경우에는 속도에너지로 변화되는데 지체시간이 필요로 하며, 약 1.0 msec 이후에는 분무가 완전히 발달되기 때문에 속도가 일정함을 알 수 있다.

Fig. 7은 Semi-Log 좌표로 횡축은 분사개시후의 경과시간을, 종축은 분무각을 나타낸 것이다. 이 그림에서 분사개시후 경과시간이 동일할 때, 연료의 분사압력이 높을수록 분무각은 증가하며 약 1 msec에 도달하면 분무각은 일정하게 유지되는 경향을 보여주고 있다. 또한 Photo. 3-a, 3-b로부터 분무선단속도가 불안정한 시간동안의 분무각은 변하고 있으나 분무가 완전히 발달된 시간후 부터는 일정함을 나타내며 이는 분무가 분사초기에 분무각을 결정함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 상온대기압하에서 단공노즐을 통하여 디젤연료분사시 투과광에 의한 사진촬영에 의해 분무형상의 발달과정을 관찰하고 연료분사개시후 시간경과에 따라 분무선단도달거리와 분무각 사이의 관계를 규명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 연료분무는 분사직후 미분열상태인 액주를 형성하나, 분무선단속도가 감소 증가하는 동안 리벳 모양의 반경방향으로부터 액사

형성이 활발하여지고 이 액사로부터 미세한 액적이 분열되며, 분무선단속도가 일정하게 확립된 후 분무각이 일정한 분산현상을 관찰할 수 있었다.

2) 시간경과에 따른 분무선단도달거리의 분사압력이 높을수록 증가하며 기울기가 완만한 직선영역과 기울기가 비교적 급격한 직선영역으로 구분되는 천이점이 존재하였다. 천이점부근에서 분무선단속도가 최저가 되며, 분사압력이 낮을수록 천이점부근에서 분무선단속도가 불안정하며, 액사형성이 활발하게 진행되었다.

3) 분무각은 분사개시직후에 각각의 210 atg, 140 atg, 70 atg 의 분사압력에 31°, 28°, 23°로 최대가 되며, 분사후 0.20msec 까지는 분무각은 일정하게 유지되다가, 1msec까지는 급격하게 감소하며 1msec 이후에는 일정하다.

후 기

본 연구는 1989년도 문교부 학술연구 조성비 지원에 의해 이루어졌으며 연구에 사용된 노즐은 한국디젤공업주식회사에서 제작되었습니다.

이에 관계제위께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. M. Arai, M. Tabata, H. Hiroyasu and M. Shimizu, "Disintegrating Process and Spray Characteristics of Fuel Jet by a Diesel Nozzle", SAE Paper No. 840275, 1984.
2. J.B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Book Company, pp. 586-591, 620-621, 635-637, 1988.
3. Reitz, R.D., "Atomization and Other Breakup Regimes of a Liquid Jet", Ph.D., Thesis, Princeton University, 1978.
4. 河鍾律, "테이저셀噴霧의形式およびその周圍氣體の流動と着火れとの關係に關する研究", 慶應義塾大學工學博士學位論文, 1984.

5. H. Kuniyoshi, G.T. Sato, et al., "Investigation on the Characteristics of Diesel Fuel Sprays", SAE Trans., 800968, 1960.
6. H. Hiroyasu, "Diesel Engine Combustion and Its Modeling", Special Lecture at International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Reciprocating Engines, Tokyo, 1985.
7. J.C. Dent, "A Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for Studying Spray Penetration", SAE Paper No. 710571, 1971.
8. 神本武征, 松岡信, 志賀聰, "テューセル機關の燃料噴霧の噴射初期における到達距離", 日本機械學會論文集, 41卷 342號, 1975.
9. 千田二郎, "テューセル噴霧の噴霧特性に關する實驗的研究", 同志士大學博士學位論文, 昭和59年9月.
10. H. Hiroyasu, "Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines", SAE Paper, No. 900475, 1990.
11. C. Arcoumanis, "Transient Characteristics of Multihole Diesel Sprays", SAE Paper, No. 900480, 1990.