

디젤噴霧特性에 관한 實驗的 研究(I)

Experimental Studies on Atomization Characteristics in Diesel Fuel Spray(I)

朴 浩 俊* 張 英 俊**
H. J. Park, Y. J. Chang

ABSTRACT

To study diesel fuel spray behavior, an experimental study was undertaken to investigate injection characteristics in varying back pressure and atomization mechanism in a non-evaporating diesel spray.

Generally, injection characteristics is the curve of fuel flow plotted against time. The area under this curve is equal to the total quantity of fuel discharged for one injection. The method that measures rate of injection is long tube-type fuel rate indicator.

Diesel spray injected into a quiescent gaseous environment under high pressure is observed by taking high speed camera by the focused shadow photographs. The results show that, at the start of injection, as the injected fuel rushes into the quiescent atmosphere the spray angle becomes large. Finally the spray stabilizes at a constant cone angle. Spray penetration length increases with the injection pressure.

Key word :

Diesel Spray(디젤噴霧), Rate of Injection
(噴射率)

High Speed Shadow Photograph (高速度
陰影寫眞),

Penetration Length(噴霧先端 到達距離),
Spray Angle(噴霧角)

fps : 1 초 당의 필름수(frame per second)

L : 노즐오리피스부의 길이

L/D : 노즐孔의 形狀比

P : 噴射壓力

P_b : 背壓

P_0 : 噴射開弁壓

Q : 噴射 1 회 당의 噴射量

t : 噴射 開始 後 時間

X : 噴霧先端 到達距離

Y : $X/2$ 에서 噴霧의 半徑方向 距離

θ : 噴霧角

ΔP : 噴射差壓

記 號 說 明

D : 노즐 噴口徑

dq/dt : 噴射率

* 정회원, 부산대학교 대학원

** 부산대학교 정밀기계공학과

1. 緒 論

디젤機關은 熱効率이 높기 때문에 차량용, 선박용, 발전용등 원동기로서 그 용도가 다양하고, 에너지 節約이라는 점에서도 그 有用性이 점점 增大되고 있다.

디젤機關內에 燃燒過程은 噴霧特性, 空氣流動, 燃燒室 形狀 등의 3가지 要因에 크게 지배를 받고 있다. 즉, 高溫高壓의 燃燒室에 燃料이 噴射되어 燃料의 微粒化, 分散, 蒸發, 混合氣 形成, 着火등의 物理的, 化學的 현상이 매우 복잡하게 關聯되어 進行된다.

따라서 이와 같이 복잡한 디젤噴霧 및 火焰의 運動을 잘 理解한다는 것은 디젤機關의 性能 改善과 向上을 위해서 아주 중요한 일이다. 실제 機關에서의 研究로서는 각종 計測이 곤란 할 뿐만 아니라 그 要因들이 복잡하게 간섭되어 일어나고 있기 때문에 각각의 因子가 燃燒過程에 어떻게 關聯되고 있는가를 파악하기가 쉽지 않다.

디젤機關의 燃燒는 微視的으로 보면 噴霧內의 燃料과 空氣의 亂流 混合이 燃燒를 지배하고 있다. 이 국소적인 混合狀態는 실린더內의 空氣 流動과 벽면 층들에 의해서도 영향을 받지만 噴霧 자체가 갖는 運動量이 噴霧의 거시적 特性 즉, 噴霧先端 到達거리와 噴霧角, 나아가서는 미시적 混合 狀態를 지배하고 있다.

따라서 디젤機關內의 燃燒현상을 기초적으로 조사하기 위해서는 空氣流動과 벽면층들 효과가 없는 單純化된 空間中에 噴射된 單發 自由噴霧의 거동을 상세히 조사할 필요가 있다.

중래의 디젤機關의 研究에 있어서는 噴霧의 측정에 관하여 디젤噴霧의 時間的, 空間的 特性을 미시적으로 조사하는데 유리한 光學的方法이 Webster¹⁾등 많은 研究者들에 의해 이루어졌으나, 주로 高濃度의 噴霧測定에 이용되었다. 또한 晝像解析法이 清水²⁾등에 의해 도입되었으나, 실제 디젤噴霧에 가까운 분무를 대상으로 해서 噴霧內의 時間的, 空間的 分布와 密度를 측정한 예는 많지 않다. 그리고 Soot生成 및 燃燒에 관해서는 Matsuoka³⁾

등에 의해 研究되어 왔으나, 디젤機關의 연소에 관해 응용한 측정 예는 적고, 기초 연구에 있어서도 現在로서는 正성적인 濃度측정 단계에 있다.

그리고 시간이나 크랭크 각에 대한 噴射量, 즉 噴射率은 그 적분치가 1회 噴射되는 연료량과 같으며 엔진 出力을 결정하는 重要 因子이다. 연료噴射率은 噴射에서 燃燒에 이르는 과정에 있어서 重要한 인자의 하나로 噴霧先端 到達距離, 噴霧體積, 噴霧角등의 噴霧 특성과 燃燒특성에 큰 영향을 미친다. 따라서 디젤燃燒 연구에 있어서 분사율 측정은 주요 課題의 하나이다.

本 研究은 이와같이 복잡 다기한 디젤燃燒過程의 규명 및 디젤엔진 設計의 기초 자료를 얻기 위하여 펌프 驅動式 單發 噴射系를 設計 製作하고, 그 噴射率을 W. Bosch式으로 측정하여 분사율에 미치는 開弁壓, 背壓, 噴射量, 噴射 期間 등의 影響을 조사 하였다. 또 內部를 관측 할 수 있는 투명 高壓 容器를 제작하고 이 용기에서 실현된 디젤單發 自由噴霧를 高速 陰影 寫眞으로 촬영하여 噴射 壓力, 噴射量, 노즐噴口徑 등이 噴霧에 미치는 巨視的 特性을 조사 하였다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

2.1 噴射率 측정장치

噴霧특성 및 燃燒특성에 큰 영향을 미치는 분사율을 측정하는 方法中 현재 널리 사용되는 것으로는 ①Matsuoka의 분사된 연료를 回收하는 方法, ②Schaffitz의 噴流의 運動量에서 구하는 方法, ③Zeuch의 壓力容器속에 분사하는 方法, ④Bosch의 파이프속에 분사하여 壓力變化에서 구하는 方法등이 있다.

本 實驗에서는 분사율 측정을 위해 高背壓下의 분사율 측정에 適當하다고 알려진 W. Bosch式의 분사율 측정장치를 製作하였으며 그 개략도는 Fig. 1과 같다. 이 方法의 原理는 管內를 전파하는 1次元 單一進行波의 理論을 응용한 것으로 노즐에서 분사된 燃料를 管속으로 흘러보내면 噴射率은 管의 斷面積에

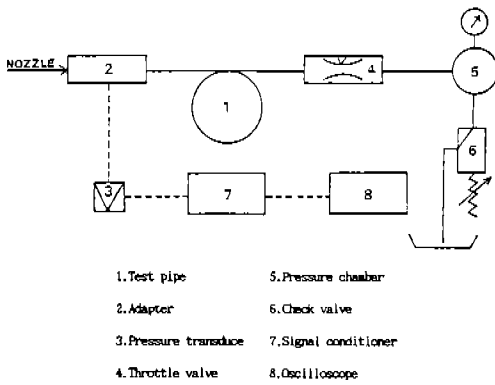


Fig. 1 Fuel injection rate measuring apparatus

流速을 곱한 것에서 구해진다는 것이다. 테스트 파이프①의 길이는 反射波의 간섭을 排除할 수 있는 최소 길이인 6000mm이고 內徑은 4.6mm, 두께는 0.5mm인 鋼材이고 압력 변환기③은 스트레인 게이지式으로 최고 100kg/cm² (KYOWA PG-100KU)까지 측정가능한 것으로 사용하였다.

아답타②에 부착된 노즐에서 噴射된 연료의 壓力은 압력 변환기와 시그널 컨디셔너⑦를 통해 오실로스코프⑧의 畫面に 噴射率 波形으로 나타난다. 本 實驗에서는 시임조정홀형의 KDAL型 노즐 홀더와 단공홀형인 DLS型 노즐을 사용하였고 供試燃料은 輕油로 실험하였다.

2. 2 單發噴射裝置

單發噴射裝置의 개략도는 Fig. 2와 같다. 분사펌프②의 回轉數는 0.5馬力の V. S모타①을 RPM조절기로 조정하였다. Tow-position 間接 作動式 솔레노이드 밸브⑤에 의해 작동되는 에어 실린더④의 로드에는 분사펌프의 制御 레크③를 연결하여 에어 실린더를 작동시켜 레크의 움직임으로 單發을 얻었다.

이때 噴射파이프內의 殘留壓力을 連發일 때와 같이 필요한 殘留壓力으로 유지시켜 주기 위해 어큐뮬레이터⑩를 분지관으로 연결하였다.

분사시기와 고속 카메라⑧의 작동 기간의 同期는 PC⑨로 조절하였다. 그리고 高壓容器⑦는 單發 自由噴霧 및 火焰의 거동을 광학적

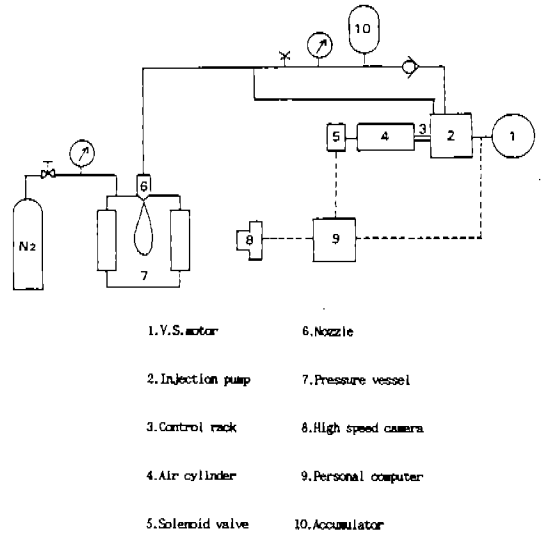


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

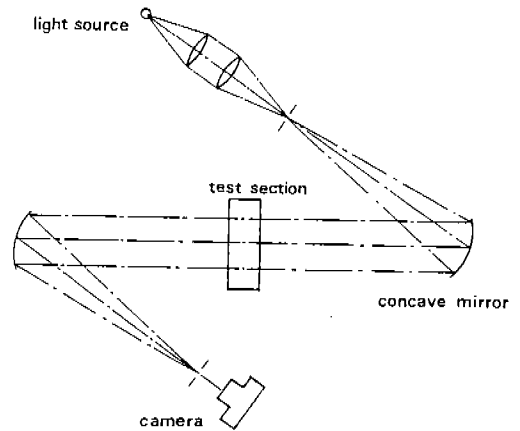


Fig. 3 Schlieren arrangement with concave mirror

으로 측정할 수 있도록 제작된 압력용기로서 兩面に 강화유리를 부착했으며 容器內部는 直徑 130mm, 두께 40mm인 Pan cake type 이다.

2. 3 高速度 寫眞 촬영 장치

사진 촬영은 Fig. 3과 같이 슈리렌 光學系를 이용하여 平行光을 만들어 影寫眞法으로 실시하였으며 2개의 오목 거울의 軸점 거리는 1500mm이고 거울면의 有效徑은 200mm 였다.

그리고 카메라는 Hitach社의 16mm High Speed Motion Analysis 카메라로 촬영했으며 이때 촬영 速度는 5000fps 였다. 사용한 렌즈는 Polar 200mm F 3.9이고, 필름은 Kodak Negative 필름 100ft를 이용했으며 光原으로서는 500W 白熱光으로 실험하였다.

그리고 單發장치와 고속도 카메라의 作動은 카메라의 正常速度도달에 소요되는 時間만큼 지연기간을 두고 同期시켰다. 카메라의 特性上 5000fps 速度까지 도달하는데 約 0.57秒 정도의 時間이 소요되었다.

Table 1 은 고속 촬영시 噴霧의 噴射條件을, Table 2 는 雰圍氣의 條件을 나타내고 있다.

Table 1 Experimental condition (600 rpm, L/D=3.4)

Nozzle diameter (mm)	Opening pressure (MPa)	Injection duration (ms)	Fuel amount (mg)	Average Inj. rate (g/s)	Average Inj. pressure (MPa)
0.40	10.0	5.6	70.0	12.5	25.0
	30.0	4.4	65.6	14.9	30.0
0.54	10.0	4.8	84.9	17.7	33.0
	30.0	3.4	70.0	20.6	41.0
0.64	10.0	4.0	71.2	17.8	33.0
	30.0	3.2	74.6	23.3	45.0

Table 2 Surroundings condition

Atmosphere	N ₂
Pressure	3.0 MPa
Temperature	293 K
Density	17.3 kg/m ³

3. 實驗 結果 및 考察

3.1 燃料 噴射率

W. Bosch式으로 本 研究의 조건에 적합하게 燃料 분사율을 측정할 때는 基本波에 前回의 反射波의 影響이 없도록 트로틀 밸브를 조정하여 噴射率 波形이 나타나도록 해주어야 한다.⁵⁾

Fig. 4는 노즐 噴口徑이 0.4mm (노즐孔의 形狀比 L/D=3.4)인 노즐에 分사량을 70mg으로 일정하게 하고 分사 開弁壓을 10.0MPa와 30.0MPa의 두가지 조건에 대해서 噴射率을 측정 한 結果이다.

分사 開弁壓이 30.0MPa인 경우가 10.0MPa보다 分사압은 높고 分사기간은 짧게 나타나는데 이것은 開弁壓이 높을수록 分사압이 높아져 分사율도 크게 나타나는 것이다. 따라

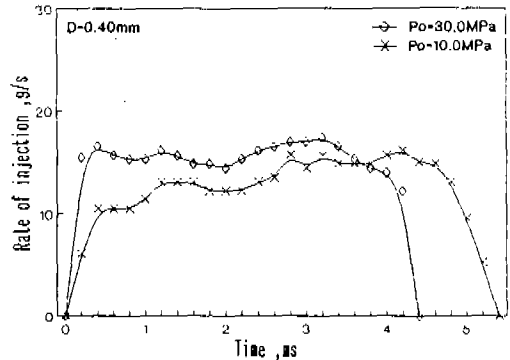


Fig.4 Injection rate change in opening pressure

서 分사장치의 제어레크를 소정의 위치로 조정하여 分사량을 일정하게 할때는 開弁壓이 높을수록 噴射率이 크게되고 結果적으로 分사기간도 짧아지게 되는 것이다.

Fig. 5. 6. 7. 8. 9는 背壓이 分사기간 및 分사율에 미치는 影響을 나타낸 것이다. Fig.5는 노즐 噴口徑이 0.4mm이고, 分사 開弁壓이 10.0MPa인 경우에 背壓을 1.0MPa, 2.0MPa, 3.0MPa로 변화 시키면서 分사율을 측정 한 것이고, Fig. 6은 Fig. 5와 同一條件에서 開弁壓을 30.0MPa로 하여 分사율을 측정 한 結果이다.

Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 背壓이 1.0MPa에서 3.0MPa로 변화하여도 분사기간은 약 5.0ms, 平均 噴射率은 약 12g/s 정도로 큰 변화가 없었다. 開弁壓을 30.0MPa로 변화시킨 Fig. 6에서도 背壓에 관계없이 분사기간은 약 4.4ms, 平均 噴射率은 약 15 g/s 정도로 나타났다. Fig. 7.8은 노즐噴口徑이 0.54mm이고 開弁壓을 각각 10.0MPa,

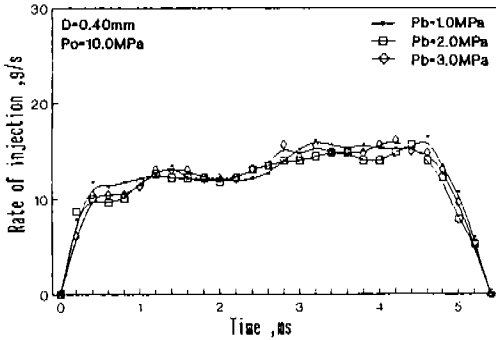


Fig.5 Influence of varying back pressure (I)

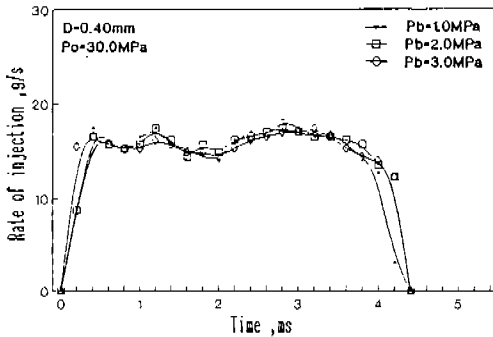


Fig.6 Influence of varying back pressure(II)

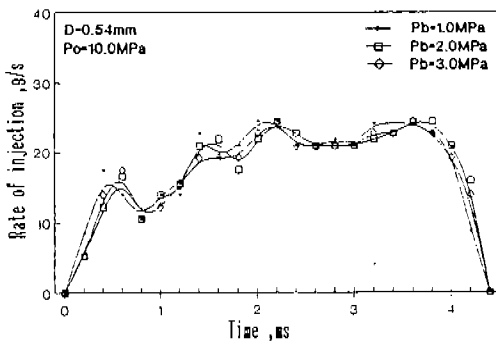


Fig.7 Influence of varying back pressure (III)

30.0MPa로 하고 背壓을 1.0MPa, 2.0MPa, 3.0MPa로 변화시켰을 때 분사율을 측정한 결과이다. 背壓의 변화에 대한 분사율의 차이는 크게 나타나지 않음을 알 수 있다.

Fig. 9는 노즐噴口徑이 0.64mm이고 開弁壓이 30.0MPa, 背壓을 1.0MPa, 2.0MPa, 3.0MPa로 변화시켰을 때 분사율을 측정한 결과이다. 背壓의 변화에 대한 분사율은 큰

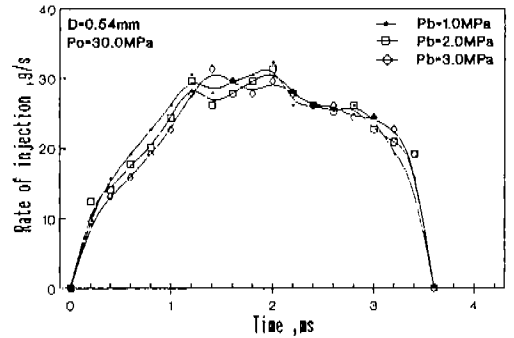


Fig.8 Influence of varying back pressure (IV)

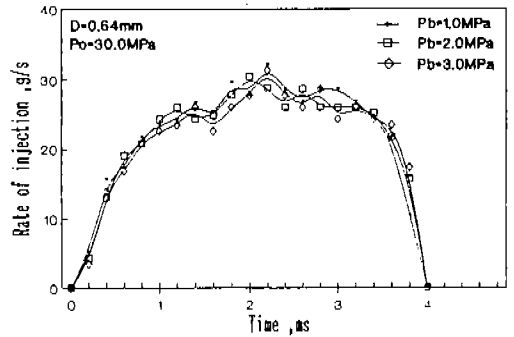


Fig.9 Influence of varying back pressure (V)

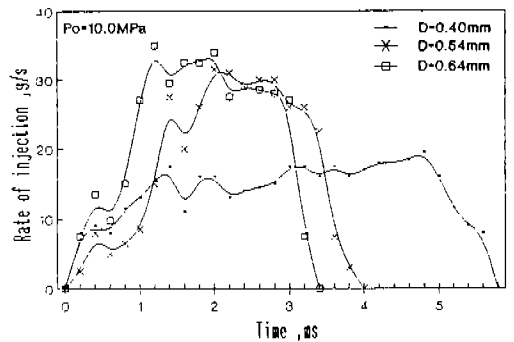


Fig.10 Injection duration of various diameters

변화가 없음을 여기서도 알 수 있다. 따라서, 噴射壓력과 背壓의 차이가 20.0MPa 以上인 本 實驗의 조건에서는 배압의 변화가 분사율에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

Fig. 10은 噴射量 및 開弁壓를 각각 70mg, 10.0MPa로 일정하게 하고 노즐噴口徑의 변화가 噴射期間에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 노즐噴口徑이 클수록 분사기간이 짧아지고, 분사율은 증가함을 알 수 있으며, 또 最大 噴射壓이 噴射初期로 점점 빨라짐을 알 수 있다.

이것은 노즐噴口徑을 크게 할수록 噴射差壓이 커지게 되어 분사율은 크게 나타나는 것이고, 또 분사차압이 커짐에 따라 開弁壓과의 압력차가 작아져서 분사기간은 짧게 나타나게 되는 것이라 생각된다.

3. 2 噴霧 特性

디젤機關의 燃焼는 분사된 燃料의 噴霧特性에 의해 크게 지배받기 때문에 噴霧特性과 分裂過程에 대한 理解는 디젤엔진 設計에 있어서 중요한 因子 中の 하나이다. 非正常 噴霧인 디젤噴霧의 特性은 噴霧先端 到達距離, 噴霧角, 噴霧 粒子의 크기, 分布등에 의해 평가된다.

本 實驗에서는 噴霧特性中에서 가장 중요한 분무선단 도달거리, 분무각 및 분무체적등에 대해서 高速度 陰影 寫眞을 촬영하여 조사하였다.

各各의 實驗條件에 대하여 5000fps의 速度로 4회씩 고속 촬영을 하여 얻어진 필름을 投影機(SIGMA, HF 750)에서 25倍로 확대한 像을 스크린에 투영시켜 측정 한 값을 算術平均하여 시간에 따른 變化를 밝혔다.

Fig. 11은 噴霧特性中 분무선단 도달거리와 분무각을 정의한 것으로 노즐噴口에서 분사된 연료 噴霧 先端까지의 거리를 噴霧先端 到達距離로, 噴霧角은 그림에서와 같이 $2\tan^{-1}(Y/X/2)$ 로 하였다.

Fig. 12는 Table 1의 條件中에서 노즐噴口 0.40mm, 開弁壓 10.0MPa, 噴射量 70.0mg으로 분사된 분무를 影寫眞法에 의하여 촬

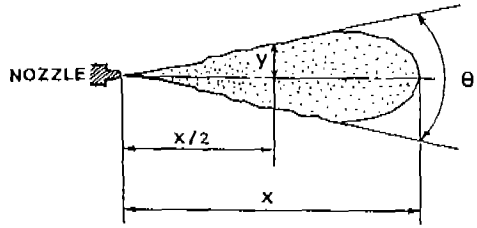


Fig.11 Spray tip penetration and spray angle as measured

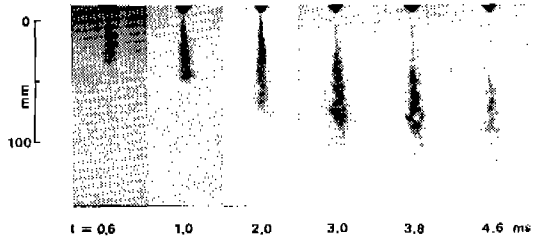


Fig.12 Diesel spray in quiescent chamber taken by the focused shadow techniques

영한 고속도 사진의 一例이다. 時間의 경과에 따른 분무각 및 분무선단 도달거리의 變化를 알 수 있다.

3. 2. 1 噴霧角

噴射의 形狀을 量的으로 표시하는 方法의 하나로 분무의 폭을 나타내는 噴霧角을 들 수 있다. 분무각은 噴射條件과 霧團氣의 性質에 따라 다르다.

Fig. 13과 Fig. 14는 背壓이 3.0MPa, 開弁壓이 10.0MPa과 30.0MPa일 때, 노즐噴口徑이 각각 0.54mm, 0.64mm인 경우 분무각의 시간에 따른 變化를 나타낸 것이다.

Fig. 13에서 알 수 있는 바와 같이 분사初期에는 液滴들이 급격한 分散을 일으키면서 噴霧角이 매우 크나, 時間이 경과함에 따라 감소하여 時間이 0.8-1.0ms 정도 지나면 분무각은 거의 일정한 값에 이르게 되어 큰 변화가 없다. 또, 開弁壓이 클수록 噴射 初期의 분무각은 조금 크나 일정한 분무각에 도달한 후에는 開弁壓에 의한 차이는 보이지 않았다.

Fig. 14에서도 같은 경향을 보이며 噴射壓을 크게 하면 初期 분무각은 약간 큰 값을 가

짐을 알 수 있었다. 一般적으로 噴射壓力이 높을수록 霧團氣와 噴流의 相對速度가 크게 되므로 분무각이 증가하여 分散度가 크게되어 微立化 狀態가 양호해 진다.

噴射 初期의 분무각이 時間의 경과에 따라 점점 작아져서 일정한 값에 도달하는 것은 噴射 初期는 분무의 半徑方向의 速度가 噴射方向의 速度보다 크나 時間이 경과함에 따라 두

방향의 速度가 비슷해져서 일정 모양을 유지하며 安定되는 것이라 생각된다.

3. 2. 2 噴霧先端 到達距離

Fig. 15는 Table 2와 같은 霧團氣 條件에서 노즐開弁壓이 30.0MPa일 때 노즐噴口徑의 변화에 대한 분무선단 도달거리를 나타낸 것이고, Fig. 16은 노즐噴口徑이 0.64mm일 때 개변압의 변화에 따른 噴射開始부터의 時

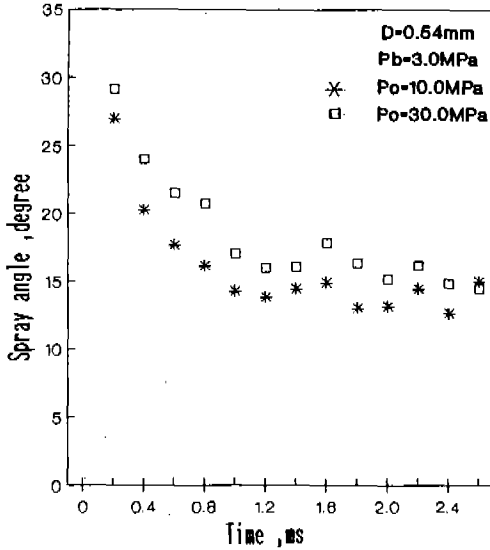


Fig.13 Spray angle change in time(I)

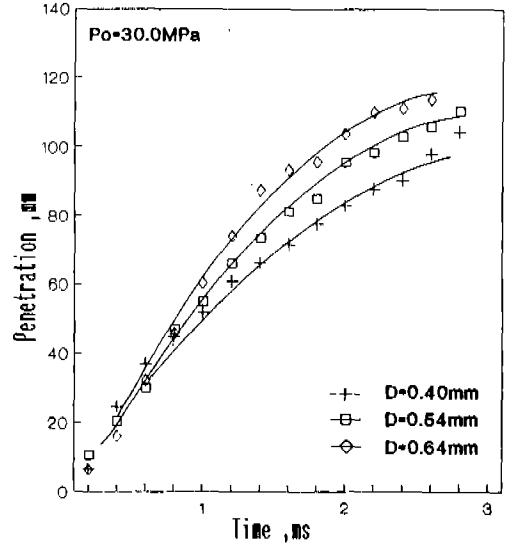


Fig.15 Penetration length change in time (I)

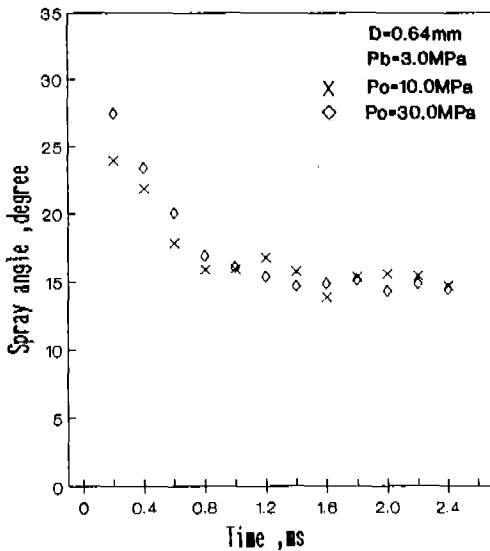


Fig.14 Spray angle change in time(II)

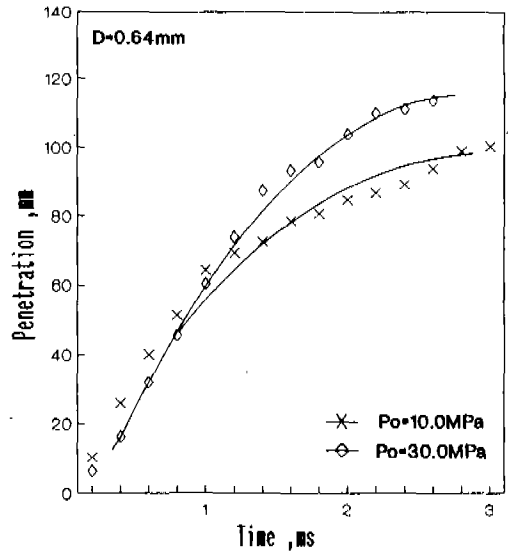


Fig.16 Penetration length change in time (II)

間과 분무선단 도달거리의 관계를 나타낸 것이다.

Fig. 16에서 보는 바와 같이 전반적으로 평균噴射壓이 증가함에 따라 분무선단 도달거리는 커짐을 알 수 있고, Fig. 15에서 無次元 노즐孔의 形狀比를 $L/D=3.4$ 로 일정하게 하고 노즐噴口徑에 따른 분무선단 도달거리의 변화를 살펴보면 노즐噴口徑의 감소에 따라 도달거리가 짧아짐을 알 수 있다.

또한, 噴射開始後 約 0.8-1.0 ms까지는 實驗條件에 관계없이 분무선단 도달거리가 거의 시간 t 에 比例하지만 그 以後에는 차츰 기울기가 작아져서 $t^{1/2}$ 에 比例함을 알 수 있다.

이것은 앞서 說明한 분무각이 일정하게 되는 時間과 거의 一致하는 것으로서 最初 液柱狀態의 噴流가 시간이 경과함에 따라 分裂되어 液滴狀態로 變化함으로써 噴霧가 갖는 運動量의 減少에 起因한다고 생각된다.

3.2.3 噴霧體積

Fig. 17은 噴霧가 軸對稱인 回轉體라고 假定하여, Fig. 16과 대응하는 분무에 대해 噴射開始부터의 時間과 噴霧體積의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 분무체적은 噴射 初期를 除外하고는 時間 $t^{3/2}$ 에 近似함을 알 수 있다.

噴射開弁壓이 클수록 분무체적이 커지는 것은 동일한 노즐噴口徑에 대해 분사개변압을 크게 함으로서 噴射差壓이 증가하여 噴霧의 分散을 增大시키는 것이라 생각된다.

분무체적에 噴霧內의 霧圍氣密度를 곱하고 그 때까지 분사된 燃燒量을 빼주면 噴霧內로 유입된 空氣流入量을 구할 수 있다. Fig. 17을 근거로 하여 噴霧內의 空氣流入量을 나타낸 것이 Fig. 18이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 本 實驗의 범위에서는 噴霧內로의 空氣流入量은 분사개변압의 증가에 따라 增加함을 알 수 있다. 결국 噴射開弁壓의 증가로 인하여 噴射差壓이 增加함으로써 噴霧內로의 空氣流入이 촉진되리라고 생각된다.

또한 Fig. 19는 噴射開始부터의 時間經過에 따른 噴霧內의 平均當量比를 나타낸 것이다. 분사가 開始되어 분무각이 일정하게 되는 시

간까지는 噴霧內의 平均當量比가 무한대에서 급속히 감소하며, 噴射終了時는 約 1에 달하고 점차 낮아져 감을 알 수 있다.

噴射開弁壓이 30.0MPa인 경우가 10.0MPa인 경우에 비해 平均當量比가 약간 낮게 나타나는 것은 분사개변압이 클수록 平均噴射壓이 증가하여 燃料과 周圍氣體와의 混合이 신속하게 행해지기 때문이라고 사료된다.

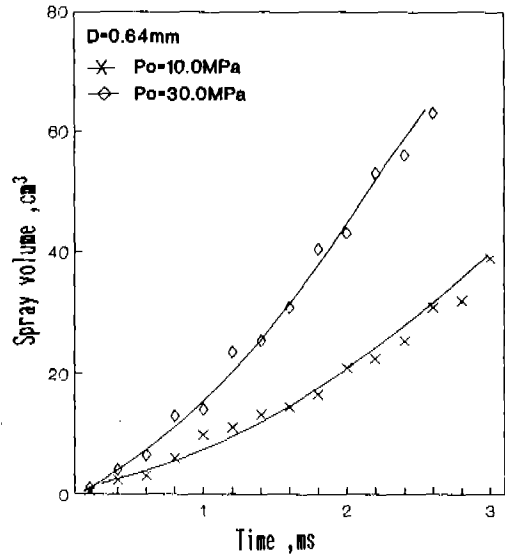


Fig.17 Spray volume change in time

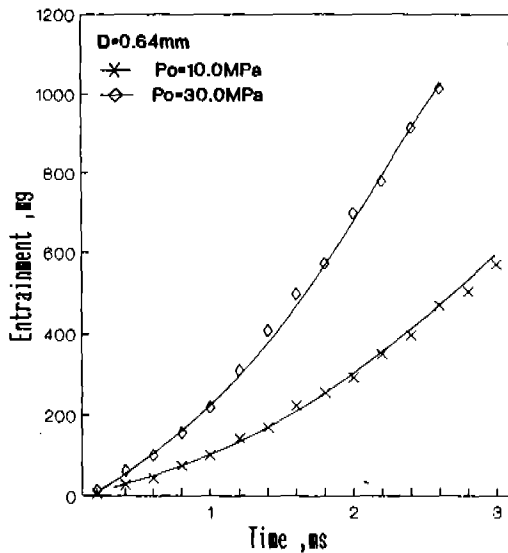


Fig.18 Air entrainment change in time

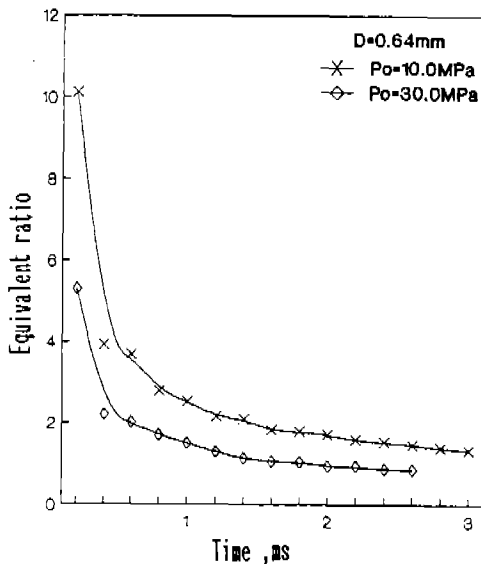


Fig. 19 Average equivalent ratio change in time

4. 結 論

以上の噴射率測定장치 및 單發噴射장치를 이용하여噴射率特性和噴霧特性에 대하여 실험한結果, 다음과 같은結論을 얻었다.

1. 동일한燃料量의噴射에 있어서噴射開弁壓이 높을수록平均噴射壓은 높고噴射期間은 짧아진다.
2. 噴射壓力과背壓의 차이가 20.0MPa 이상인 경우는背壓의 변화에 대한噴射率의 차이는 없다.
3. 噴霧角은噴射壓 및 노즐噴口徑에 관계없이噴射直後に最大값을 갖고 시간이 지나면 일정한 값에 도달하게 된다.
4. 噴霧先端到達距離는平均噴射壓이 증가함에 따라 커지고 노즐噴口徑이減少함에 따라 짧아진다.

5. 噴射差壓이 높은噴霧일수록噴霧内の空氣流入量을增加시키고, 燃料과周圍氣體와의混合이 신속히進行된다.

參 考 文 獻

1. Webster J.M., et al., "Combustion and Flame", 1976.
2. 清水, et al., 第 8 回 液體의 微粒化에 關する 講演集, pp. 97~102. 1980.
3. Matsuoka S., et al., VDI-Ber., pp. 67-370, 1980.
4. 林洋, "Bosch式噴射率計", 內燃機關, pp. 58~64. 1968.
5. Bosch W., "The Fuel Rate Indicator: A New Measuring Instrument for Display of the Characteristics of Individual Injection", SAE., 660749, 1966.
6. Dent J.C., "A Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for Studying Spray Penetration", SAE., 710571, 1971.
7. Takeuchi K., Senda J. and Shikuya M., "Transient Characteristics of Fuel Atomization in Diesel Fuel Spray", SAE., 830449, 1983.
8. 橫田克彥, "ディーゼル 機關の燃料噴射の實驗的研究", 日本機械學會論文輯, pp. 3455~3464. 1977.
9. 大久保義雄, "燃料噴射製置入門", 1982.
10. Taylor C.F., "The Internal Combustion Engine in Theory and Practice", 1984.
11. Rajaratnam N., "Turbulent Jets", 1976.
12. Melton R.B., "Diesel Fuel Injection Views as a Jet Phenomena", SAE., 710132, 1971.