

<論 文>

디젤기관의 분무선단 도달거리에 관한 모델링

안 수 길* · 배 종 욱**

(1988년 10월 22일 접수)

A Modeling about Penetration Behavior of Diesel Engine Liquid Fuel Spray

S. K. Ahn and J. U. Bae

Key Words : Diesel Spray Penetration(디젤분무도달거리), Heterogeneous Spray Model(비균질 분무모델), Spray Outrunning Model(분무의 추월모델), Transition Point(전이점), Intact Core Length(분열장), Spray Jet Angle(분사각)

Abstract

The study on the penetration of sprays during the initial phase of injection period, i.e. ignition delay period, in high speed small D.I. diesel engines has been performed, since the thermal efficiency and emission of D.I. diesel engines are strongly affected by such behavior. To investigate the penetration of the sprays injected through single cylindrical orifice, a mathematical model was developed and compared with experimental results. In this model, radial heterogeneity of fuel density in the spray, transiency of injection pressure difference, and spray outrunning phenomenon were considered simultaneously. Experiments on the behaviors of sprays in the high pressure air chamber were conducted at various injection pressure differences and different levels of back air pressure. The behaviors of sprays injected into the chamber through the conventional Bosch injection pump were visualized with side stroboscopic illumination. Comparison of the experimental results with predictions from the mathematical model confirmed the validity of the model. It was also found that during the initial phase of the injection period the penetration of sprays vs. time appeared to have two transition points; one corresponded to disintegration point of liquid fuel jet, the other to the beginning of steady state injection.

기 호 설 명

c	: 노즐공의 단면 수축 계수	m, n	: 분무 원추를 입체각이 같은 동심 원추로 분할 할때 분무축으로부터의 번호 및 분할 수
d	: 노즐공 직경	Δp	: 노즐공 전후의 압력차
F_x	: x 위치의 분무 단면적	p_b	: 고압 용기 내의 공기 압력(배압)
k, k_1	: 분포 밀도 계수	p_o	: 니들 밸브 개방시의 분사 차압
k_2	: 상수	q, Q	: 연료의 유량
L, L_o	: 분무 원추의 정점으로부터 분무 선단 및 노즐공까지의 거리	q_a	: 분무 반경 방향 연료 농도 분포
M_o, M_x	: 노즐공 및 단면 F_x 에서의 운동량	r, r_o	: 분무 축에서 반경 방향의 거리 및 최대 거리
*정회원, 부산수산대학 기관학과		t	: 분출 후의 경과 시간
**정회원, 한국해양대학 기관학과			

- t_0 : 분사 개시로부터 p_0 에 이를 때까지의 경과 시간
- u_0, u_x : 노즐공 및 단면 F_x 에서의 분무의 속도
- X : 노즐공으로부터의 거리
- X_b : 분열장
- x : 분무 축 방향의 좌표
- α : 분무 축과 분출 방향의 사이각
- β : 비균질 분포지수
- θ : 분사각의 1/2
- ρ_f, ρ_g : 연료 및 주위 기체의 밀도
- σ : 표준 편차
- ϕ, ϕ_0 : 2α 및 2θ 입체각

1. 서 론

소형 고속 디젤기관에서의 분사 초기의 분무선단 도달거리는 공해 배출가스 제어와 열효율 향상에 크게 영향을 미치며 이와 같은 분사 초기의 분무 거동을 명확히 함으로써 최적의 연소실 설계와 연료 분사 장치의 개발을 가능케한다. 또 실제 문제로서 분무선단의 액적이 연소실 벽에 충돌하는 시각을 예측하는 것은 매우 중요하다.

분무선단의 도달거리를 예측하는 식은 많이 제안되어 있다. Schweitzer⁽¹⁾를 비롯한 실험식들^(2,3)과 정상 분무에 주목한 Wakuri 등의 식⁽⁴⁾과 같은 이론식⁽⁵⁻⁸⁾ 등이 있다. 한편 Hay와 Jones⁽⁹⁾의, 상기 관계식들의 비교 분석적 연구에 의하면 디젤 기관의 운전 조건 하에서는 Wakuri의 식이 가장 실제에 부합된다고 한다. Wakuri의 식은 분사 기간이 긴 대형 저속 기관에 주목하여 정상 분무의 연료 공기 혼합기가 이동하는 거리와 시간 관계를 운동량 보존의 법칙에 의해 유도한 것으로 도달 거리는 시간의 제곱근에 비례한다는 결론을 얻었다. 그러나 이 식은 분사 초기의 비정상 분무와 분무 단면의 연료 농도 분포를 고려하지 않았기 때문에 분사 기간이 짧고 연소실의 공간이 작은 소형 고속 기관에 적용하기에는 무리가 있다고 생각된다.

또한 분사 초기의 분무 거동에 관한 연구는 廣安 등⁽¹⁰⁾과 神本 등⁽¹¹⁾의 모델링 연구가 있다. 廣安 등은, '분무의 전 운동량은 매 시간 요소에 분사된 연료의 운동량 총합과 같다'는 운동량 이론에 의해 소형 고속 기관의 분사 초기의 분무 선단 도달 거리를 예측하여 실험치와 비교하였다. 이 방법에는 분사 차압 뿐 아니라 노즐에서의 연료 운동량의 시

간 경과를 실측하여 계산에 입력시켜야 한다.

神本 등은 분사 조건에 따른 유립의 SMD를 실험식에 의해 결정하고 비상 중인 유립군의 각 액적에 작용하는 공기 저항과 유립의 관성력 사이의 운동 방정식과 유립 및 공기의 운동량 방정식을 차분법으로 계산함으로써 매 시간 요소에 분사된 분무의 유립군의 포락선을 분무 선단 도달 거리로 예측하고 이를 실험치와 비교하고 있다. 그러나 이 경우에도 분사율(injection rate)의 실측치 뿐 아니라 유립의 SMD 예측식의 수정 계수, 유효분무각의 분무각에 대한 비율 및 분무내의 최대 유립경의 SMD에 대한 비율 등 보정 계수를 사전에 실험적으로 결정하여야 한다. 또한 상기의 실험들은 전자 밸브에 의한 단발 분사와 분무를 관찰한 것으로서 실제 운전 중의, 분사 잔류압이 확립된 상태의 분무와는 일치하지 않을 가능성이 있다.

따라서 본 논문에서는 소형 고속 디젤 분무의 변경 방향의 연료 농도 분포를 고려한 비균질 분무의 분무 선단 도달 거리에 대한 관계식을 유도하고, 비정상 분무인 디젤 분무의 분사 차압-시간 곡선을 입력시킴으로써, 분사 초기 뿐 아니라 전 분사 기간의 분무 선단 도달 거리를 예측할 수 있는 새로운 모델을 제안하여 실험치와 비교 분석하였다. 그리고 분사각과 분열장의 무차원 실험식을 도출하여 계산에 사용하였고 분무 선단 도달 거리의 천이점과 분열장에 대하여 고찰하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 운동량 이론의 수정

Wakuri의 운동량 이론은 다음의 두 가정을 전제로 하여 수립되었다. 첫째, 디젤기관의 경우와 같이 미세한 유립의 군상으로, 밀도가 큰 기체 중에 분사되는 분무는 분무를 구성하는 유립과 그 주위 기체와의 상대 속도를 무시한 하나의 혼합된 단일 기체로 취급한다. 둘째, 노즐공에서 액상으로 분출될 때 갖고 있던 운동량은 기액 혼합체인 분무의 각 단면에서의 운동량으로 보존된다.

Fig. 1에 나타낸 것과 같이 원추각이 2α 인 분무의 정점 P로부터 x축 방향으로의 거리 x인 구면 상에서 분무의 연료 밀도 분포가 균일하고 분무에 도입되는 공기류의 x축 방향 운동량 성분을 무시하면 노즐 출구의 분출 액상의 운동량 M_0 는 거리 x의 구면 단면을 통과할 때의 분무의 운동량 M_x

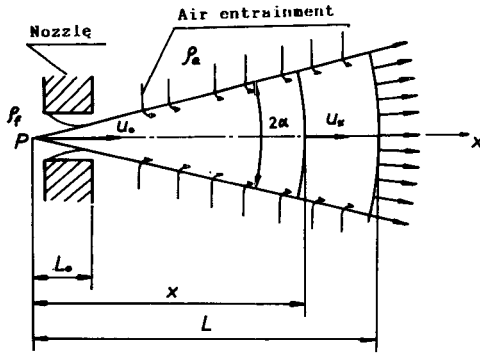


Fig. 1 Homogeneous spray model

와 같다.

$$M_o = \rho_f q u_o = M_x \quad (1)$$

2α 가 크지 않을 때에는 x 위치에서의 구면 단면의 면적 F_x 는 근사적으로

$$F_x \approx \pi x^2 \alpha^2$$

이다. 분무 단면 x 에서의 분무의 운동량 M_x 는, 연료와 공기의 운동량의 합으로서, 분무가 상당히 발달한 후에는 공기의 체적 유량이 분무의 체적 유량과 근사적으로 같고 분사 초기에는 공기의 운동량 자체가 미소하므로 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$M_x = \rho_f q u_x + \rho_g F_x u_x^2 \quad (2)$$

위의 식에서 u_x 에 관한 2차 방정식의 근은 다음과 같다.

$$u_x = \frac{-\rho_f q + (\rho_f^2 q^2 + 4\rho_g \rho_f q u_o \alpha^2 x^2)^{0.5}}{2\rho_g \alpha^2 x^2} \quad (3)$$

따라서 노즐공 출구의 L_o 로부터 거리 L 까지의 진행 시간 t 는

$$t = \int_{L_o}^L \frac{1}{u_x} dx \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 한편 노즐공 전후의 분사 차압을 Δp , 분구경을 d , 단면 수축율을 c 라고 하면

$$u_o = \left(\frac{2\Delta p}{\rho_f} \right)^{0.5} \quad (5)$$

$$q = \frac{\pi}{4} d^2 c \left(\frac{2\Delta p}{\rho_f} \right)^{0.5} \quad (6)$$

이고, 식 (3)의 제곱근 항을 이항 정리하고 분사 초기 즉 x 가 매우 작을 때와 분무가 성장하여 x 가 클 때를 나누어서, 미소 항을 생략하여 식 (4)를 계산하면, x 가 매우 작을 때에는

$$\rho_f^2 q^2 \gg 4\rho_g \rho_f q u_o \alpha^2 x^2$$

이므로

$$t \approx \frac{L - L_o}{u_o} = \left(\frac{\rho_f}{2\Delta p} \right)^{0.5} X \quad (7)$$

x 가 클 때에는

$$\rho_f^2 q^2 \ll 4\rho_g \rho_f q u_o \alpha^2 x^2$$

이므로

$$\begin{aligned} t &\approx \left(\frac{\rho_g}{2d^2 c \Delta p} \right)^{0.5} \alpha (L^2 - L_o^2) \\ &\approx \left(\frac{\rho_g}{2d^2 c \Delta p} \right)^{0.5} \alpha X^2 \end{aligned} \quad (8)$$

으로 된다. 식 (7), (8)을 X 에 관하여 나타내면

분사 초기

$$X_1 \approx u_o t \quad (9)$$

분무 성장기

$$X_2 \approx \left(\frac{2c\Delta p}{\rho_g} \right)^{0.25} \left(\frac{td}{\alpha} \right)^{0.5} \quad (10)$$

으로 된다. 이것은, 분사 개시 직후의 분무 선단 도달 거리는 시간 t 에 비례하여 廣安 등⁽³⁾의 실험 결과의 분사 초기 경향을 나타내며, 충분한 성장 후의 분무 선단 도달 거리는 시간 t 의 제곱근에 비례하는 Wakuri와 Fujii⁽⁴⁾의 식과 廣安 등의 실험에 일치하게 된다.

2.2 비균질 분무 모델에 의한 운동량 이론

실제 분무의 반경 방향 연료 농도 분포는 균일하지 않으며 Yokoda와 Matsuoka⁽¹²⁾의 실험에 의하면 정규 분포에 가깝다고 하였다. Fig. 2에서 나타낸 것과 같이 원추각 2θ 인 분무의 정점 P 로부터, 분무축과의 사이각 α 방향으로 진행되는 분무의 반경 방향 거리를 r 이라 할 때 r 방향 연료 농도 분포 q_d 를 다음 식과 같이 가정한다.

$$q_d = f(r) = k_1 \left\{ \frac{1}{(2\pi)^{0.5} \sigma} \cdot \exp\left(\frac{-r^2}{2\sigma^2} \right) \right\}^\beta \quad (11)$$

식 중의 상수 k_1 은 연료 농도 분포가 정규 분포인 경우에 연료의 존재할 확률이 99.7%되는, 표준편차의 3배의 영역에서 누적 밀도

$$\int_{-3\sigma}^{3\sigma} f(r) dr = 1$$

로 되는 분포 밀도 계수이며 β 는 필자들이 정의한 비균질 분포 지수로서 분포 밀도 함수의 모양을 지

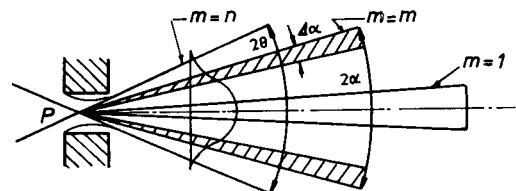


Fig. 2 Heterogeneous spray model

정한다. Fig. 3에는 β 의 값의 변화에 따른 q_d 의 형상 특성을 나타내는데, β 가 0일 때 균일 분포, 1.0일 때 정규 분포, 1.0보다 큰 값일 때 중심에 연료가 집중된 분포를 나타낸다.

분무의 외측 경계까지의 거리 r_0 를 3σ 즉 $r_0 = 3\sigma$ 라 한다면

$$r = k_2 x \alpha \quad (12)$$

이므로 식 (11)의 변수 r 을 α 로 치환하면 r 방향 연료 농도 분포는 다음과 같다.

$$q_d = f(\alpha) = k \left\{ \frac{3}{(2\pi)^{0.5} \theta} \cdot \exp\left(\frac{-4.5\alpha^2}{\theta^2}\right) \right\}^\beta \quad (13)$$

또 원주각 2θ 및 2α 의 입체각을 ϕ_0 및 ϕ 라고 하면

$$\theta^2 = \frac{1}{\pi} \phi_0, \quad \alpha^2 = \frac{1}{\pi} \phi \quad (14)$$

이므로 식 (13)을 입체각 변수들로 치환하면 다음과 같다.

$$q_d = f(\phi) = k \left\{ \frac{3}{(2\phi_0)^{0.5}} \cdot \exp\left(\frac{-4.5\phi}{\phi_0}\right) \right\}^\beta \quad (15)$$

식 중의 k 는 분포 밀도 계수로서

$$k = \left\{ \int_0^{\phi_0} f(\phi) d\phi \right\}^{-1} = \frac{4.5\beta(2\phi_0)^{0.5\beta}}{3^\beta \phi_0 (1 - \exp(-4.5\beta))} \quad (16)$$

의 값을 갖는다. 또 ϕ_0 를 크기가 동일한 n 개의 동심 원주로 분할하여 생기는 입체각 요소들의 분무 중심으로부터 m 번째의 미소 동심 원주 층에 대하여서는

$$\frac{\phi}{\phi_0} = \frac{m}{n}, \quad \Delta\phi = \frac{\phi_0}{n} \quad (17)$$

이다. 노즐에서 분출되는 연료 유량 Q 는 입체각 ϕ_0 내에서 모든 방향으로 균일한 속도로 분출된 후에 식 (15)의 연료 농도 분포를 형성한다고 가정하면 입체각 요소 $\Delta\phi$ 내로 분출되는 유량 요소는 식 (15), (16), (17)을 이용하여

$$\Delta q = Q q_d \Delta\phi = 1.125\pi \frac{d^2 c \beta}{n} \left(\frac{2\Delta\phi}{\rho_f} \right)^{0.5} \times \frac{\exp(-4.5\beta m/n)}{1 - \exp(-4.5\beta)} \quad (18)$$

로 나타낼 수 있다.

컴퓨터에 의하여 원주각이 2θ 인 분무의 축으로부터 m 번째 입체각 요소 내로 분사된 분무의 진행 시간을 계산하려면 식 (3)과 (6)의 α^2 에 θ^2/n , q 에 식 (18)의 Δq 로 치환하고 식 (4)를 적분하는 프로그램을 작성하면 된다.

한편 분무가 성장한 후에 있어서의 분무 선단의

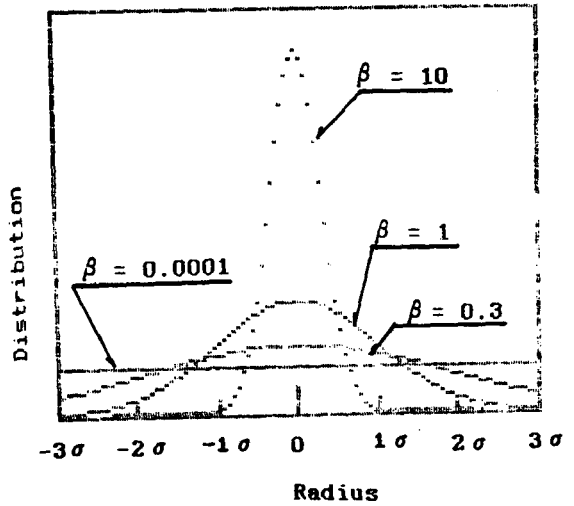


Fig. 3 Distribution curves according to β

도달 거리 X 는 $n \rightarrow$ 무한대, $m=1$ 로 하고, 전술한 방법으로 유도하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X = 1.456 \left\{ \frac{\beta}{1 - \exp(-4.5\beta)} \right\}^{0.25} \left(\frac{2c\Delta\phi}{\rho_g} \right)^{0.25} \left(\frac{td}{\theta} \right)^{0.5} \quad (19)$$

식 (19)는, 분무 내의 반경 방향 연료 농도 분포가 균일이라고 가정할 때에는 $\beta=0$ 로 하여

$$X_{\beta=0} = \left(\frac{2c\Delta\phi}{\rho_g} \right)^{0.25} \left(\frac{td}{\theta} \right)^{0.5} \quad (20)$$

으로 되어 Wakuri의 식과 같으며 정규 분포라고 가정할 때에는, $\beta=1.0$ 으로 하여

$$X_{\beta=1} = 1.46 \left(\frac{2c\Delta\phi}{\rho_g} \right)^{0.25} \left(\frac{td}{\theta} \right)^{0.5} \quad (21)$$

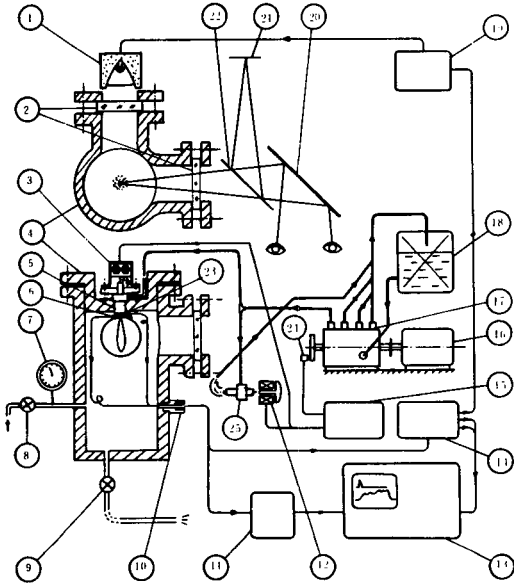
으로 되어 Wakuri의 상관 관계식에 계수 1.46을 곱한 크기의 상관 관계식을 얻게 된다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

Fig. 4는 실험 장치의 개략적 구성도를 나타낸다. 본 장치는 분무 관찰용 고압 용기 계통, 단발 분사 계통, 순간 발광 제어 계통, 광학 계통 및 분사 차압 측정 계통으로 이루어져 있다. 고압 용기 ④는 내경이 150mm 높이가 300mm이며 측면에 90°를 사이각으로 두 곳에 두께 15mm, 직경 80mm인 강화 유리제의 창 ②를 설치하여 조명 및 관찰을 할 수 있도록 하였으며 10MPa의 수압 시험을 행하였다. 고압 용기 내에는 공기 압축기로부터

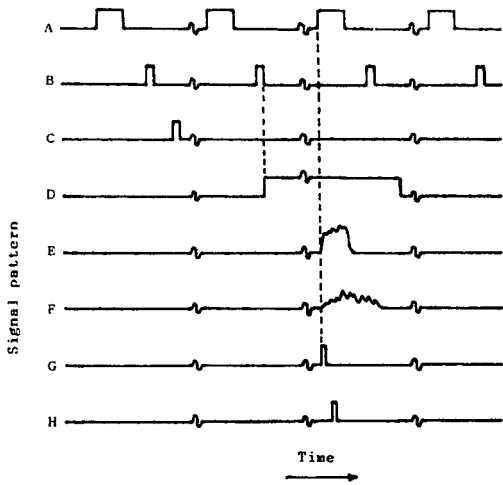
터, 밸브 ⑧과 ⑨를 사용하여 압축 공기를 대기압과 0.9, 1.7, 2.5MPa로 각각 충전하여 실험하였다. 보유식 연료 분사 펌프 ⑰에서 송출된 연료는 둘로 나누어져 그 중 1은 고압 용기 상부의 시험 분사 밸브 ⑤로 연결되고 다른 1은 연료 탱크 ⑱로

회수되는 보조 분사 밸브 ⑫에 연결된다. 실험에 사용된 분사 밸브는 YANMAR LD형 노즐을 개조한 것으로서 노즐경 0.4mm 노즐 형상비 2.75인 단공 원통형 노즐이다. 각 분사 밸브에는 니들 밸브의 동작을 외부로 연락하는 강제의 핀을 삽입하고 그 위에 솔레노이드 ③, ⑬를 부착하여 니들 밸브를 제어할 수 있도록 하였다. 각 솔레노이드가 소자되어 있는 때에는 시험 분사 밸브가 억제되며 보조 분사 밸브는 해제되어 연료 펌프에서 송출된 연료는 연료 탱크로 회수된다. 단발 분사 제어기 ⑮의 푸쉬버튼을 1회 누르면 광학 검출기 ⑭가 펌프의 분사 종료 위치에 부착 해놓은 은박지를 검출한 순간으로부터 일정 시간(10~500ms)동안 450V의 직류 전원이 각 분사 밸브들의 솔레노이드를 여자시키며 이 때 보조 분사 밸브가 억제되고 시험 분사 밸브는 해제되어 통전 시간의 조절에 따라서 1회 또는 임의의 회수 분사하게 된다. 분무의 관찰 및 촬영을 위하여서는 지연 2차 펄스 발생기 ⑭가, 노즐공 출구에 부착시킨 광학 검출기 ⑥이 분무에 의해 차단될 때에, 1차의 기초 펄스를 발생시킨 후 일정 시간(0.01~6.0ms) 지연한 2차 펄스를 스트로보스코프 ⑲에 보내어 램프 ①을 순간 발광시킴으로써 분무의 산란광을 포착하도록 하였다. 이 때 반투명 거울 ⑳와 반사경 ㉑을 이용하여 순간 발광시의 분무의 산란광과 눈금이 그려진 직선자 ㉒을 중첩시킴으로써 목측에 의하여 분무의 길이를 즉각적으로 측정할 수도 있고 50mm의 마이크로렌즈를 장착한 카메라로 분무 형상을 촬영할 수도 있게 하였다. 지연 시간의 설정은 기억형 오실로스코프 ⑬에 나타나는 1차와 2차의 펄스 사이의 시간 간격 실측에 의하여 행하였다. 단발 분사 제어기 및 지연 2차 펄스 발생기는 자작한 것으로서 그 동작 시간 특성을 Fig. 5에 나타낸다. 노즐공 전후의 분사 차압은 노즐팁의 삭코부를 얇게 가공하고 그 외벽에 스트레인게이지 ㉓을 부착하여 증폭기 ⑪ 및 기억형 오실로스코프에 의하여 검출하였다. 한편 보조 분사 밸브의 스프링의 세기는 분사관 내의 잔류 압력을 변화시키는 효과를 주므로 오실로스코프를 보면서 시험 분사 밸브의 스프링의 세기 조정과 동시에 적절히 조정하여 실제의 분사계와 동일한 분사 차압의 시간 경과를 얻도록 하였다. 본 연구에서는 니들 밸브 개방 시의 분사 차압을 4, 7, 10 MPa로 각각 설정하여 실험하였으며 사용한 연료 유는 시판의 경유였다.



- ① Lamp
- ② Reinforced glass
- ③ Solenoid
- ④ High pressure air chamber
- ⑤ Fuel nozzle
- ⑥ Photo sensor for initiation of injection
- ⑦ pressure gauge
- ⑧ Compressed air supply valve
- ⑨ Drain valve
- ⑩ Adapter for electric line
- ⑪ Strain gauge amplifier
- ⑫ Solenoid
- ⑬ Digital memory type oscilloscope
- ⑭ Delayed 2ndary pulse generater
- ⑮ Single injection controller
- ⑯ Various speed moter
- ⑰ Bosch type injection pump
- ⑱ Fuel tank
- ⑲ Stroboscope
- ⑳ Mirror
- ㉑ Scale
- ㉒ Half mirror
- ㉓ Strain gauge
- ㉔ Photo sensor for pump angle
- ㉕ Auxiliary fuel nozzle

Fig. 4 Schematic diagram of experimental system composition



- A : Action of injection pump
- B : Signal from photo sensor for pump angle
- C : Signal from push button switch
- D : Out put power of single injection controller
- E : Single injection pressuer
- F : Signal from photo sensor for initiation of injection
- G : Base pulse from delayed 2ndary pulse generator
- H : Delayed 2ndary pulse from the generator

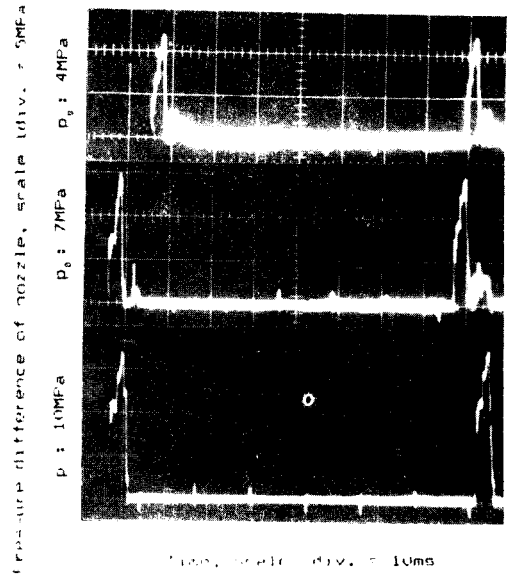
Fig. 5 Operation time chart of single injection controller and delayed 2ndary pulse generator

4. 결과 및 검토

4.1 분사 차압

본 논문에서 노즐팁 삭크(sack)부의 압력과 배압의 차를 분사 차압이라 정의한다. Fig. 6(a)는 배압 2.5MPa 하에서 시험 분사 밸브와 보조 분사 밸브의 스프링 세기를 적절히 조절하여 연속 2회 분사했을 때의, 제 1 회와 제 2 회의 분사 차압 시간 경과를 비교하여 나타낸다. 제 1 회 분사 시의 분사 차압 시간 경과와 제 2 회 분사 시의 그것이 거의 동일하므로 본 단발 분사 장치에 의해 단발 분사 만으로도 실제의 디젤 분사 시와 동일한 분사 차압 곡선이 얻어짐을 확인하였다. 이렇게 하여 종래의 단발 분사 시험 시의 단점을 보완하였다.

Fig. 6(b)는 배압과 니들 밸브 개방 시의 분사 차압의 변화에 따른 분사 차압의 시간 경과를 나타낸 것으로 배압의 크기에 관계 없이 비슷한 모양을 얻을 수 있었고 니들 밸브 개방 시의 분사 차압의 변화에 따라서는 곡선의 모양이 크게 변화하고 있다. 그러나 본 실험의 경우 분사 차압의 초기 급상승



(a) Comparison of 1st and 2nd injection by the control of single injection controller at 2.5 MPa of back air pressure

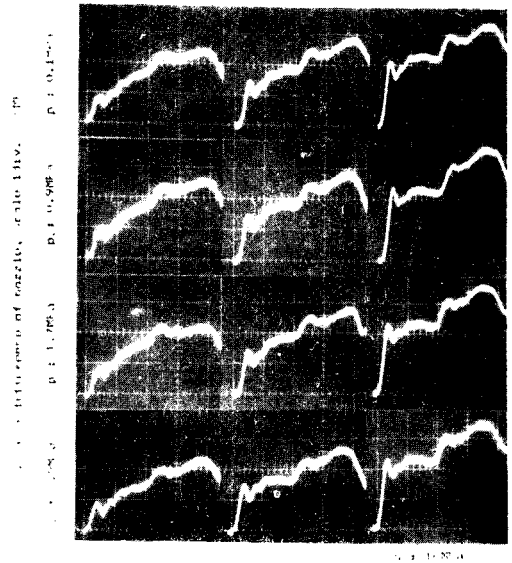


Fig. 6 (b) Injection pressure difference vs. time curves of various experimental conditions

기간(분사 차압 확립 기간)은 배압 및 니들 밸브 개방 시의 분사 차압에 관계 없이 0.23ms로 거의 일정하였다.

4.2 분무 선단 도달 거리와 분열장

Fig. 7은 니들 밸브 개방 시의 분사 차압이 10 MPa이고 배압이 2.5MPa일 때의 분무 성장 과정을 나타낸 예이다. 분사 개시 직후의 분무의 목측 및 촬영 시간 간격은 0.02ms까지 미세하게 조정하여 분사 초기의 거동을 세밀히 관찰할 수 있게 하였고 분무 선단 도달 거리는 4회 이상 측정하여 산술 평균한 값을 사용하였다. 한편 본 실험 장치의 측정 가능한 최단 분무의 길이는, 실제의 분사 개시로부터 지연 2차 펄스 발생기로부터의 기초 펄스에 의한 스트로보스코프의 발광까지의 시간 경과에 해당하는데, 배압이 대기압인 경우는 2mm이고 그 외의 배압에서는 1mm를 나타내었다. 따라서 정확한, 도달 거리에 소요되는 시간을 알기 위하여서 분사 개시 직후의 분사 차압을 미세한 시간 간격으로 분할하고 각 시간 요소의 분사 차압으로 분사되

는 분무의 이론적 도달 거리를 계산하여 상기의 분무 길이에 도달하기까지의 시간을 예측하였다. 이에 따라 실험치의 도달 거리에 소요되는 시간 값을 수정하였다.

Figs. 8, 9, 10에는 니들 밸브 개방 시의 분사 차압과 배압을 변화시켰을 때의 분무 선단 도달 거리의 시간 경과를 양대수 좌표 상에 나타낸다. 분무 선단 도달 거리의 기울기는 분사 개시 직후에 대단히 크며 배압에 관계 없이 동일하게 성장해 가다가 배압이 큰 경우부터 차례로 제 1차의 천이를 일으킨다. 제 1차 천이점 후의 기울기는 1.0보다는 작으나 0.5보다는 훨씬 큰 값으로 된다. 그 후에 다시 제 2차의 천이를 일으켜 대략 0.5에 가까운 기울기로 성장한다. Table 1은 각 실험 조건의 분무 천이점들까지의 거리, 시간 및 성장 중의 각 기울기를 나타낸다.

제 1차 천이점은, 노즐로부터 분출되는 액주가

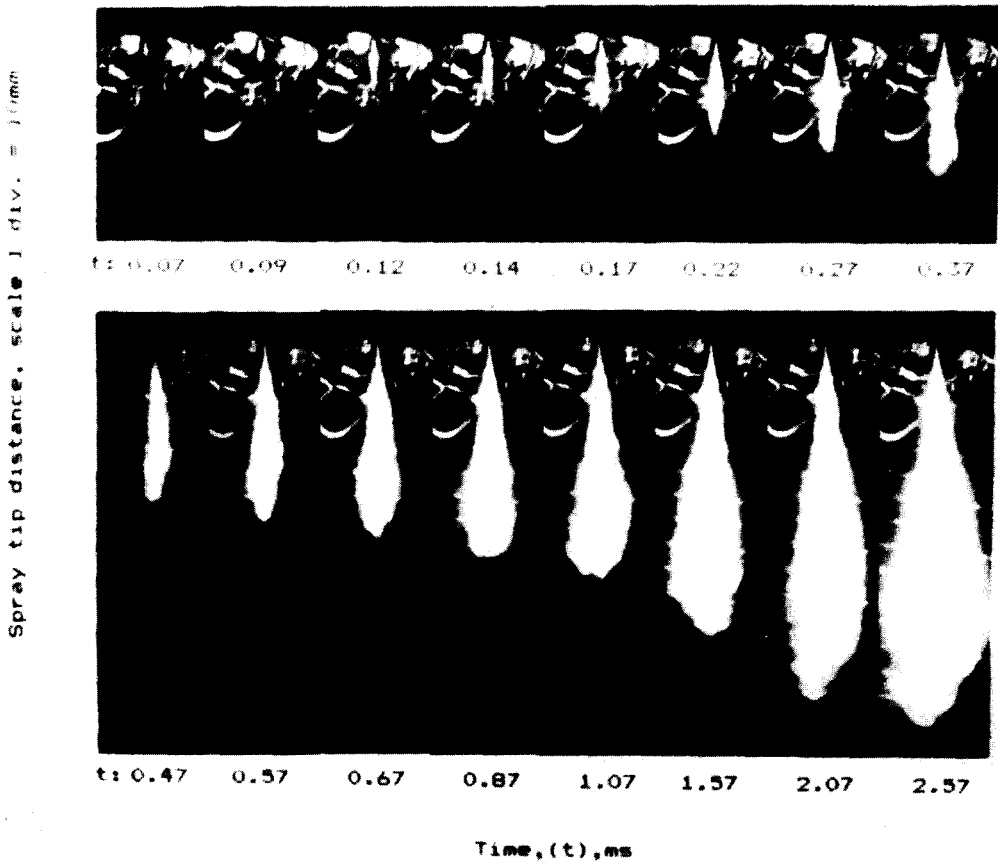


Fig. 7 Photograph of sprays injected by 10MPa injection pressure difference of nozzle, into 2.5MPa back air pressure

공기의 저항에 의해 분열되기 전까지의 공기의 저항이 분무의 진행에 큰 영향을 미치지 못하므로 배압에 관계 없이 동일한 곡선을 따라 성장하지만 일단 액주가 유립으로 분열되면 표면적이 현저히 증대되어 공기의 저항을 크게 받게 되므로 속도의 급

격한 감소가 일어나고 이에 의하여 생긴다고 생각된다. 이 천이점들은 배압이 높은 것부터 차례로 나타난다. 따라서 이 점들까지의 거리가 디젤 분무의 액주가 분열되는 점까지의 거리 즉 분열장(intact core length)이라 생각된다. 만일 분사 차

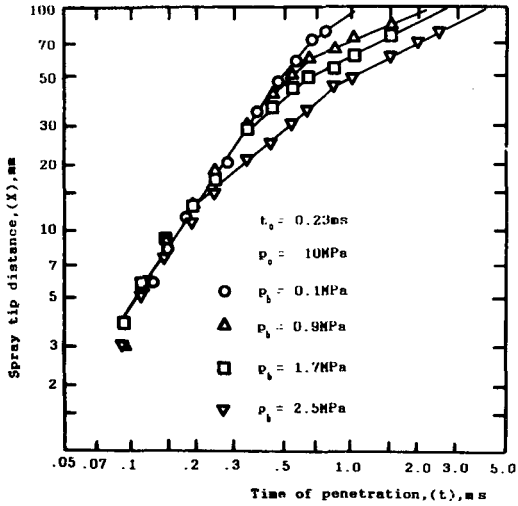


Fig. 8 Spray tip distance, 10MPa of injection pressure difference and various back air pressure

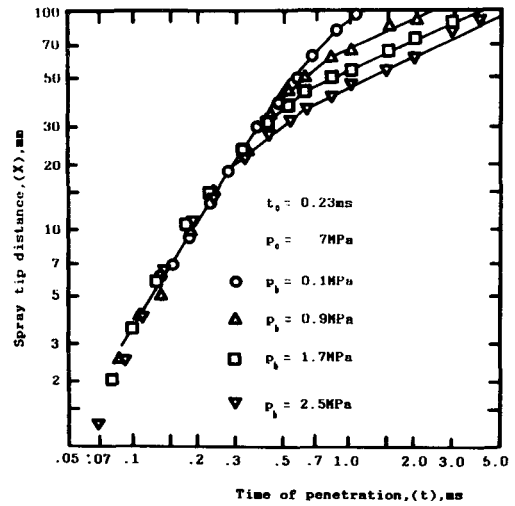


Fig. 9 Spray tip distance, 7MPa of injection pressure difference and various back air pressure

Table 1 Gradients of log X vs. log t curves

P_o (MPa)	Back air pressure (MPa)	Gradient before transition 1	Intact core length(mm)	Gradient between transitions	Gradient after transition 2
10	0.1	1.42	69	0.67	
	0.9	1.43	39	0.82	0.42
	1.7	1.36	27	0.89	0.51
	2.5	1.30	16	0.86	0.51
7	0.1	1.65	80	0.68	
	0.9	1.61	41	0.82	0.44
	1.7	1.62	28	0.75	0.49
	2.5	1.75	20	0.83	0.45
3	0.1	1.72	76	0.5	
	0.9	1.68	40	0.83	0.66
	1.7	1.63	28	0.73	0.38
	2.5	1.85	22	0.68	0.48

압이 순간적으로 확립되고 그 후에는 정상 상태를 유지한다면 廣安 등의 실험 및 본 연구의 2.1에서 이론적으로 고찰한 바와 같이 분열점을 기점으로 기울기는 1.0으로부터 바로 0.5로 변화할 것이다. 그러나 Fig. 6에서 확인한 0.23ms의 분사 차압 확립 기간은 착화 지연 시간인 약 1.0ms에 비교할 때 무시될 수 없으며 이 기간 동안 분사되는 분무는 분사 차압이 순간 순간 증가하기 때문에 한 순간에 분사된 분무는 더욱 높은 분사 차압으로 분사

되는 후발 분무에 의하여 차례로 추월되는 것이다. 따라서 관찰되는 분무의 선단은 외견상 가속도를 가지고 진행하게 되어 제 1차 천이점 이전까지의 곡선의 기울기는 1.0보다 훨씬 큰 값을 갖게 된다. 또한 제 1차 천이점 이후에도 분사 차압 확립 기간의 종료 직전의 분무가 분무 선단을 추월하게 될 때까지는 이 추월이 지속되므로 곡선의 기울기는 0.5보다 크게 되고 분사 차압의 확립 즉 0.23ms 이후 비교적 완만한 변화의 분사 차압으로 분사된 분무는 분무 선단을 추월하기가 어려우므로, 곡선의 기울기는 이론대로 0.5로 되어 성장해 가며, 이때의 기울기 변화가 제 2차 천이점으로 되는 것으로 생각된다. 따라서 분사 개시로부터 제 1차 천이점까지의 기간은 액주 상태의 분무가 추월하면서 성장하는 과정이며, 제 1차 천이점과 제 2차 천이점 사이의 기간은 분무의 액주가 분열한 후에 추월을 지속하면서 성장하는 과정이고, 제 2차 천이점 이후는 무화된 분무가 정상적으로 성장하는 과정이라 생각된다.

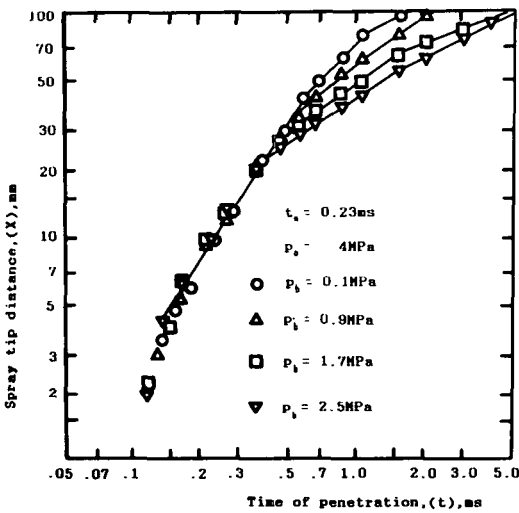


Fig. 10 Spray tip distance, 4MPa of injection Pressure difference and various back air pressure

Fig. 11은 분사 조건에 따른 분열장의 변화를, 무차원 값들로써 양대수 좌표상에 표시한 것으로 분열장은 니들 밸브 개방 시 분사 차압의 영향을 받지 않으며 주위 기체의 밀도의 증가에 따라 짧아지는 것을 알 수 있다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같으며 후술하는 모델링에서 컴퓨터 계산의 분열점 판별에 사용된다.

$$X_b/d = 14.8(\rho_f/\rho_g)^{0.403} \quad (22)$$

Arai 등⁽¹³⁾은 정상 분무의 축상에 금속망으로 된 전극을 설치하고 노즐과 전극 사이의 전류를 검출하여 측정 기간의 50% 이상 전류가 검출되는 위치를 액주의 선단이라 정의하여 실험한 결과 분열장에 대하여 다음의 식으로 제안한 바 있다.

$$X_b/d = 15.8(\rho_f/\rho_g)^{0.5} \quad (23)$$

그러나 Chehoudi 등⁽¹⁴⁾은 유사한 실험으로 노즐과 핀형의 전극 사이의 저항의 변화를 측정된 결과, 액주와 무관한 분무의 위치에서도 무시할 수 없는 전하의 수송이 액적들에 의하여 이루어짐을 확인하였으며, 따라서 Arai 등의 실험에 의한 분열장은 과대평가되었다고 주장하였다. 이러한 점들로부터 검토할 때 식 (22)의 우변의 계수는 타당한 것으로 생각되며 정상 분무와 분사 차압 확립 기간의 과도기적 현상이 동일하지 않으므로 지수의 값에 있어서도 차이가 발생하게 된다고 추측된다.

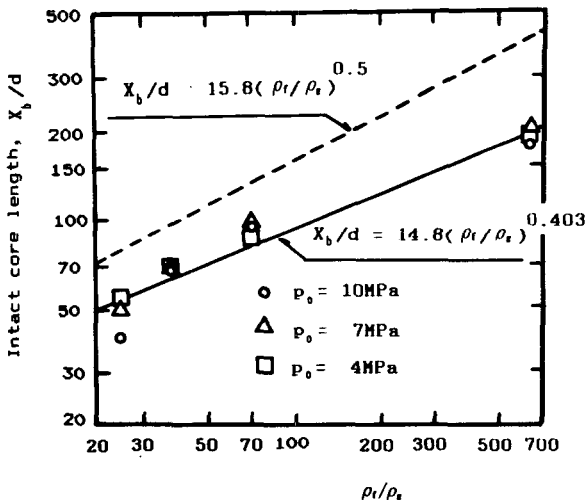


Fig. 11 Intact core length, various injection pressure difference and different level of back air pressure

4.3 분사각

본 연구에서의 분사각은 후술하는 모델링에 사용할 목적으로 종래의 연구자들이 정의한 분무각과는 달리 Fig. 12에서 나타낸 것과 같이 분사 직후 분무의 세력이 강하여, 경계가 선명한 부분인, 분무 조주부에서의 원추각 2θ 를 분사각이라 정의하였다. 그 이유는 분무의 성장 과정에서 분무의 외측 경계부에 있는 유립들은 반경 방향으로 분산을 하지만 분무축 상에 있는 유립들은 대체로 분출시의 방향을 유지하며 분무 조주부에서의 미소 입체각에 대한 연료 유량이 난류확산부에서도 유지된다고 생각되므로 분무 선단의 도달 거리를 계산할 때에 분사각 2θ 와 그 비균질 분포 지수 β 를 사용하는 것이 적합하기 때문이다. Fig. 13에는 분사각의 시간적 경과의 한 예를 나타낸다. 분사각의 확립은, 廣安 등⁽³⁾이 분무각에 대하여 확인하였던 1.2ms보다 훨씬 빠른 0.12ms에서 이루어지고 있으며 그 후에는 비교적 일정한 크기로 유지되고 있다. 따라서 본 연구에서의 분사각은 분무가 충분히 성장하여 분사각이 일정하게 유지되는, 약 78mm 정도 되었을 때의 분무 사진으로부터 측정하였다. Fig. 12에는 분사 조건에 따른 분사각의 변화를 무차원 값으로 나타낸다. 분사각은 니들 밸브 개방 시의 분사 차압에는 영향을 받지 않으며 주위 기체의 밀도의 증가에 따라 완만하게 증가하고 있다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\tan \theta = 0.284 (\rho_g / \rho_f)^{0.164} \quad (24)$$

위의 식에서 지수 0.164는 廣安 등⁽³⁾이 제안한, 분무각의 경우의 0.5에 비하여 훨씬 작으므로 분사각 2θ 의 배압의 의존성은 분무각에 비하여 훨씬 미약함을 알 수 있다.

4.4 분무의 추월 모델에 의한 컴퓨터 계산 결과와 실험치의 비교

Fig. 14에는 4.2절에서 설명하였던 분무의 추월을 고려한 분무 선단 도달 거리의 계산 모델링을 나타낸다. 이는 보수평포식 분사계의 실험(Fig. 6 (b))에서 나타난 분사 차압 시간 경과를 단순 형식화하고, 분사 기간 중의 시간을 미소 시간 요소로 분할한 다음, 각 시간 요소의 분사 차압으로 분사된 분무 요소의 선단 도달 거리를 각각 계산하여 그 중 동일 거리들까지 진행하는데 소요되는 시간이 최소인 것들을 찾아내어 거리-시간의 양대수 좌

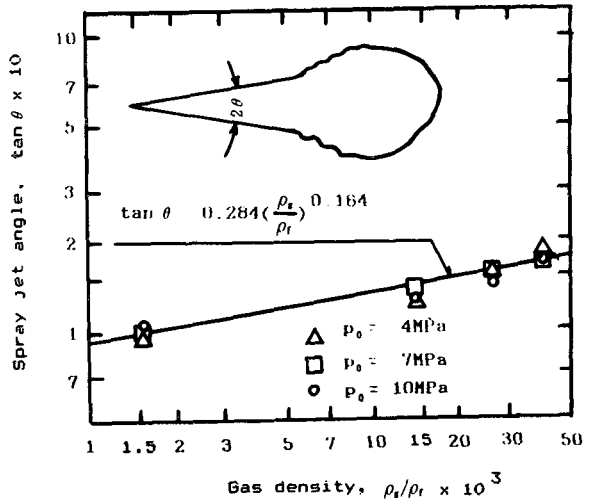


Fig. 12 Spray jet angle, various injection pressure difference and different level of back air pressure

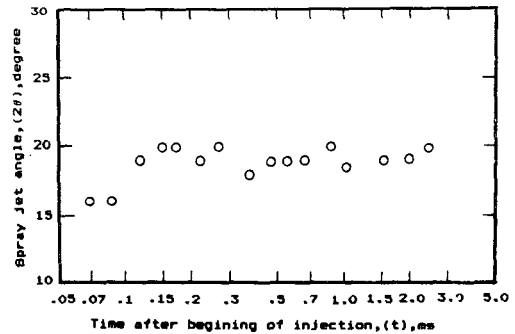


Fig. 13 Variance of spray jet angle after beginning of injection

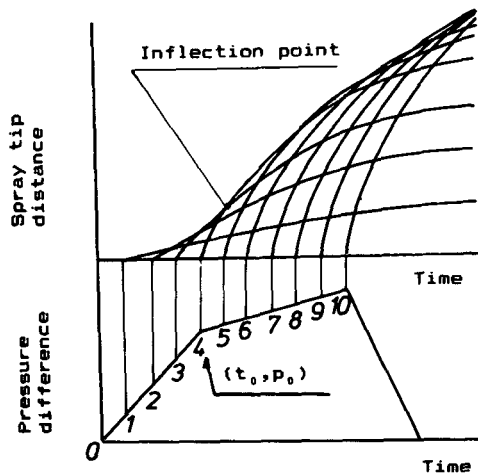


Fig. 14 Discription of spray outrunning model

표상에 나타낸 것으로서, 이의 컴퓨터 프로그래밍을 위한 흐름도는 Fig. 15와 같다.

계산에 필요한 단면 수축 계수 c 의 값은 단공 디젤 노즐로 실제의 운전 조건 하에서 행한 横田과 河村⁽¹⁵⁾의 실험 결과로부터 $c=0.75$ 를 사용하였다.

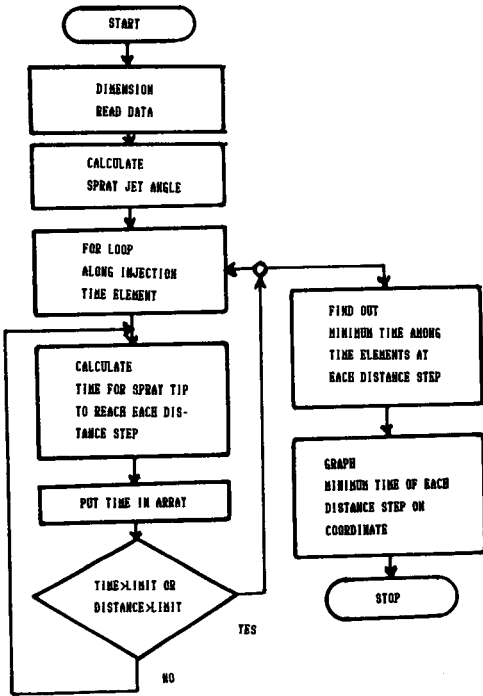


Fig. 15 Flow chart of program for spray tip distance

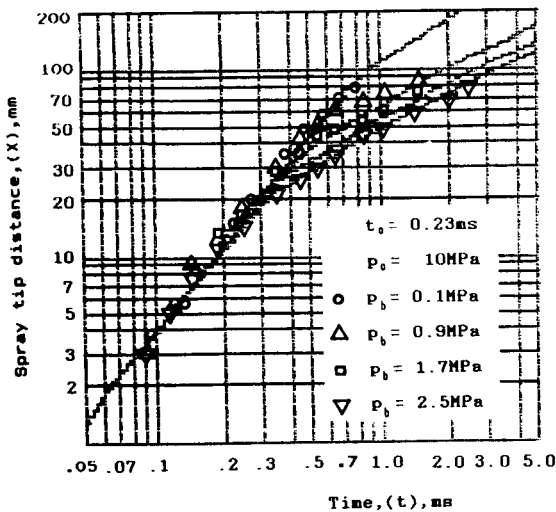


Fig. 16 Comparison of calculation and experiment, various back air pressure

β 의 값은, 여러 값의 β 에 대해 계산치와 실험치가 일치하도록 추정할 결과 식 (22)로 계산되는 분열장에 도달하기까지는, 분무 중심 축상에 연료가 집중된 액주가 존재하는 것으로 생각되어 $\beta=10$ 으로, 분열장을 통과한 이후에는, 분무 단면의 연료농도 분포가 정규 분포인 $\beta=1.0$ 으로 하였을 때, Figs. 16, 17에 나타내는 바와 같이, 추월 모델에 의한 분무 선단 도달 거리가 배압 및 니들 밸브 개

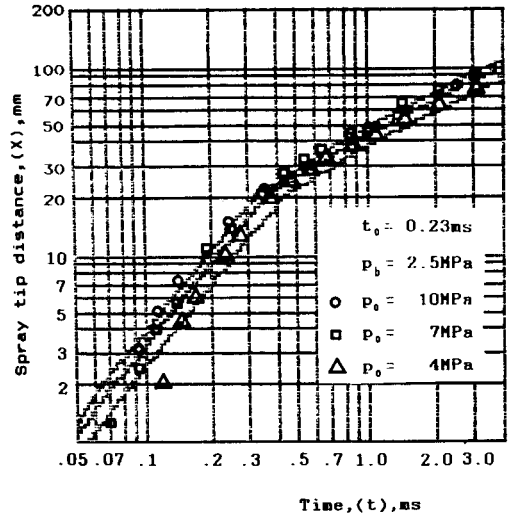


Fig. 17 Comparison of calculation and experiment, various injection pressure difference

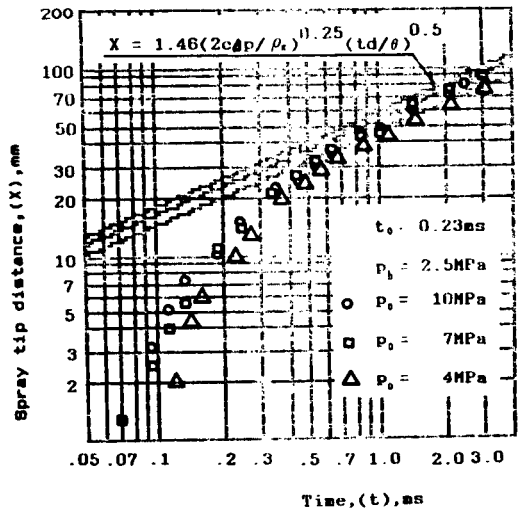


Fig. 18 Comparison of heterogeneous spray correlation and experiment, various injection pressure difference

방 시의 분사 차압에 관하여 모두 실험치와 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 Yokoda와 Matsuoka⁽¹²⁾의 실험 연구에서 확인하여 보고한 바의, 분무 단면의 연료 농도 분포가 근사적으로 정규 분포라 한 것과 일치한다.

Fig. 18는 분무의 반경 방향 연료 농도 분포를 정규 분포 즉 $\beta=1.0$ 으로 하여 비균질 분무의 운동량 이론에 의해 유도된 분무 선단 도달 거리의 식 (21)에 의해 계산한 값과 실험치를 비교한 것으로서 분사개시 후 0.23ms의 순간에서의 계산치와 실험치의 차는 분사 차압 확립 기간의 존재에 따른 분무 성장의 지연 거리라고 볼 수 있으며 Fig. 18에서 이 지연 거리 약 10mm는 그 이후에 계속 비슷한 값으로 지속되고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 분사 초기의 분무 선단 도달 거리는 식 (21)에 의한 예측치와 전혀 일치하지 않으며 분무의 추월 모델에 의한 컴퓨터 계산을 필요로 한다.

5. 결 론

디젤 분무의 선단 도달 거리에 관한 Wakuri의 운동량 이론을 보정하고 단순화하여 분사 초기와 분무 성장 후의 식으로 구분하였고 분무 반경 방향의 연료 농도 분포를 고려한 식을 유도하였다. 또한 분사 차압 확립 기간을 고려한 분무의 추월 모델을 확립하였다. 상기의 식과 모델링을 검토하기 위하여 고압 용기 내에 분사된 디젤 분무를 관찰하고 그 결과 다음의 결론을 얻었다.

(1) 분사 초기의 디젤 분무의 선단 도달 거리의 시간 경과에는 제 1 차 천이점과 제 2 차 천이점이 있다. 이는 분사 차압 확립 기간의 압력 상승기에 일어나는 액주의 분열과 추월로 특징되는 과도 현상이며, 분무 선단의 추월 모델에 의해 계산한 예측치의 실험치를 일치시킬 수 있었다.

(2) Wakuri의 운동량 이론에 의한 분무 선단 도달 거리에 관한 식을 분무 단면의 반경 방향 농도 분포를 나타내는 비균질 분포 지수를 도입하여 수정함으로써 1.0ms 이후의 분무 선단 도달 거리를 예측하는 식을 유도하였으며 실험치와 잘 일치하였다.

(3) 분무의 제 1 차 천이점인 분열장은 니들 밸브 개방 시 분사 차압의 영향을 받지 않으며 주위 기체 밀도의 증가에 따라 짧아진다.

(4) 분사각은 니들 밸브 개방 시 분사 차압의 영

향을 받지 않으며 주위 기체 밀도의 증가에 따라 완만하게 증가한다.

(5) 분무의 반경 방향 비균질 모델과 분무 선단의 추월 모델은 분무 선단 도달 거리를 예측하는 유효한 한 방법으로 제시된다.

참 고 문 헌

- (1) Schweitzer, P.H., 1937, "Penetration of Oil Spray", Pennsylvania State College Bulletin, No. 46.
- (2) Parks, M.V. Polonsky, C. Toye, R. 1966, "Penetration of Diesel Fuel Sprays in Gases", SAE Paper, No. 660747.
- (3) 広安博之, 角田每一, 田坂真一, 1978, "ディーゼル噴霧の到達距離に関する研究", 日本機械学会論文集(第2部), 第44巻, 第385號, pp. 3208~3219.
- (4) Yutaro Wakuri, Masaru Fujii, Tatsuo Amitani, Reijiro Tsuneya, 1960, "Studies on the penetration of Fuel Spray in a Diesel Engine", Bulletin of JSME, Vol. 3 No. 9, pp. 123~130.
- (5) I. Hakki OZ, 1969, "Calculation of Spray Penetration in Diesel Engines" S.A.E Paper No. 690254.
- (6) R. B. Melton, Jr. 1971, "Diesel Fuel Injeciton Viewed as a Jet Phenomenon" S.A.E Paper No. 710132.
- (7) G. Sitkei, 1964, "Kraftstoffaufbereitung und Verbrennung bei Diesel Motoren", Springer Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, pp. 89~92.
- (8) J. C. Dent, 1971 A Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for Spray Penetration", SAE Paper, No. 710571.
- (9) N. Hay and P. L Jones, 1972, "Comparison of the Various Correlations for Spray Penetration", SAE Paper, No. 720776.
- (10) 広安博之, 高橋道夫, 高橋信明, 1968, "ディーゼル・エンジンの噴霧の到達距離に関する研究", 日本機械学会講演論文集, No. 201, pp. 101~112.
- (11) 神本武征, 松関信, 志賀聰, 1975 "ディーゼル機関の燃料噴霧の噴射初期における到達距離", 日本機械学会論文集(第2部), 第41巻, 342號, pp. 672~683.
- (12) Yokoda, K., Matsuoka, S., 1977, "An Experimental Study of Spray in a Diesel Engine", Trans, of JSME, Vol. 43, No. 37, p. 3455.
- (13) M. Arai, M. Tabata, H. Hiroyasu, M. Shimizu, 1984, "Disintegration Process and Spray Characterization of Fuel Jet Injected by Diesel Nozzle", SAE Paper, No. 840275.
- (14) Behroush Chehroudi, Shih-Hsinug Chen, Frediano

V. Bracco, Yoshiaki Onuma, 1985, "On the Intact Core of Full-Cone Sprays", SAE Paper, No. 850126.
(15) 横田源弘, 河村芳平, 1983, "ディーゼル機関用燃料

噴射弁の流量特性(第1報) ホールノズル噴孔部の流量係数)", 日本舶用機関学会誌, 第18巻, 第8号, pp. 22~30.