

고압 분위기중의 원통관내 동축류 디젤분무의 거동에 관한 연구

배 증 옥*

Behavior of Diesel Sprays Passing Through a Cylindrical tube in high pressure Air Circumferance

Jong-uk Bae*

〈目 次〉

- | | |
|------------|--------------|
| 1. 序 論 | 4. 내연기관에의 적용 |
| 2. 분무의 해석 | 5. 결 론 |
| 3. 실험 및 검토 | 참고문헌 |

Abstract

The exhaust gas emissions of internal combustion engines such as HC, CO, NOX and smoke are directly related with the both temporal and spatial distribution of fuel air ratio in combustion chamber.

The present paper provides a theoretical basis that the excess air coefficients of spray which is passing through a cylindrical tube coaxially become constant once the periphery of sprays get in touch with the tube wall. And it presents an equation to calculate the diameter of the tube in which the excess air coefficient of sprays become 0.8.

Experiments manifested the fact that the radial fuel densities of sprays that passing through the cylindrical tubes also become nearly homogeneous.

A doughnut type pre-combustion chamber that will enables stratified charge combustion is recommended as a measure of reducing exhaust gas emissions coincidentally.

1. 서 論

내연기관에 있어서 중요한 배출공해물질은 미연탄화수소, 일산화탄소, 매연 및 질소산화물이다.

* 한국해양대학교 해사대학 선박운항학과 교수

미연탄화수소는 혼합기중 연료가 희박한 영역 및 피스톤의 측면 크레비스(Crevice) 및 연소실 벽면 경계층과 같은 온도가 낮은 영역에서 주로 발생한다¹⁾. 일산화탄소는 공기량이 부족할 때 발생하며, 매연은 이론당량비보다 당량비가 높고 열분해가 일어나는 분무 중심 영역 또는 분사말기의 분무 영역등에서 주로 발생한다²⁾. 그리고 질소산화물은 공기과잉계수가 0.85정도보다 적거나 희박연소시에는 그 발생량이 적지만³⁾ 연소 온도가 높고 공기과잉계수가 1.0에 가까운 디젤분무 외연부에서 상당히 많이 발생하는 것으로 알려져 있다.²⁾

가솔린기관에서는 혼합기의 상태로 연료가 공급되기 때문에 피스톤의 측면 크레비스로 소량의 혼합기가 침투하여 들어가게 되어 미연탄화수소가 상당히 발생하게 되는 것을 피할 수가 없다. 디젤기관에서는 연료가 분무의 상태로 공급되며 분무의 반경방향 및 분무축방향의 불균일로 인하여 매연 생성 영역과 질소산화물 생성 영역이 동시에 발생하는 것을 피할 수가 없다.

따라서 피스톤의 측면 크레비스에 연료 공기의 혼합기가 침입할 우려가 없고 분무영역에서의 공기과잉계수는 0.8정도의 균질분포 상태에서 연소된 후 잔여공기에 의하여 2차 혼합되어 희박연료의 상태로 연소 된다면 미연탄화수소, 일산화탄소와 매연 및 질소산화물의 생성을 동시에 감소시킬 수 있는 이상적인 연소방식이 될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 분무의 반경방향 분산기구에 대하여 및 원통관내에 중심축을 따라 분사된 연료 분무의 공연비에 대하여 해석을 하고 이를 실험적으로 조사함으로써 이상적인 연소상태에 접근할 수 있는 방법을 모색하고자 하였다.

본 연구의 결과 분무의 반경방향 분산은 분무 주위 공기의 흡인 운동량에 대한 반작용이 그 한 요소로 되고 있다는 사실을 밝혔고, 원통관내에 동축분사된 분무의 반경방향 및 축방향 연료농도는 균질분포에 접근하고 있음을 확인하였다.

2. 분무의 해석

① 분무의 반경방향 분산기구

Fig. 1은 분무의 반경방향 분산 모형을 나타낸 것으로서 분공 O에서 분사되는 분무는 분공 및 노즐 내부의 형상 및 내부의 난류등의 영향으로 초기의 분사각 $2\theta_0$ 로 분사된 후 주위기체의 영향으로 약간 더 분산되어 분무각 2θ 로 된다⁴⁾. 그러나 주위기체가 어떠한 기구에 의하여 분무의 반경방향 분산에 영향을 미치게 되는 지에 대하여서는 아직 명확히 해석되어 있지 않다.

이의 해석을 위하여 분무의 축방향 임의의 위치 x 와 $x+dx$ 인 x' 에서 횡단면으로 절단하여 그 2 단면의 사이에 있는 공간에 대하여 생각한다. 분무는 축대칭이라 할 수 있으므로 이 체적내의 분무 및 주위공기의 횡방향 운동량의 총합은 0이다. 그리고 연료가 분공에서 분출되는 직후의 횡방향 운동량은 연료만이 갖는 운동량이지만 그 이후에는 분무의 운동량 및 주위기체의 운동량의 합으로 이루어지며 운동량보존의 법칙으로부터 일정한 값 0이다.

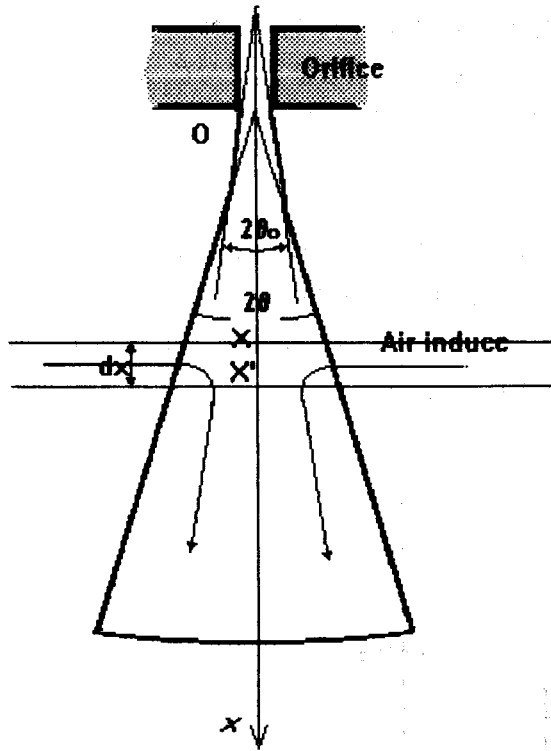


Fig. 1 Model showing dispersion of spray

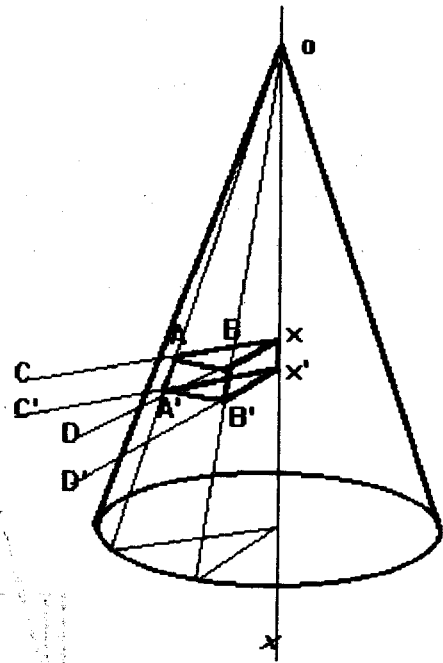


Fig. 2 Element dividing of spray

Fig. 2에서 나타낸 분무의 횡단면요소내에서 부채꼴부분요소 AXBB'A'X'X'와 그 주위공기 유입부 CDD'C'의 반경방향 운동량의 총합 또한 분무축방향으로 진행하면서 보존된다. 분무의 진행에 따른 분무표면에서의 주위공기의 유입속도 V_c 는 (1)식과 같다.

$$\begin{aligned} \text{액주 분열까지 } V_c &\approx \theta u_0 \\ \text{액주 분열 이후 } V_c &= \frac{\sqrt{C}}{2} u_0 \frac{d}{x} \end{aligned} \quad (1)$$

단, u_0 , c , d 및 x 는 분출속도, 유속계수, 분공직경 및 분공으로부터의 거리를 나타낸다.

분공 및 노즐내부의 형상 및 내부 난류등의 영향으로 결정된다고 생각되는 분공에서 분출직후의 부채꼴 체적내에서의 연료의 반경방향 운동량을 $M_{\theta y}$ (단 $M_{\theta y} \geq 0$)라 한다. 그런데 그 하류에서는 주위공기의 반경방향 운동량 $-M_{\theta y}$ (단 $M_{\theta y} \geq 0$)이 발생하므로 XX'위치에서의 분무의 반경방향 운동량을 M_y (단 $M_y \geq 0$)라 할 때 $M_y = M_{\theta y} - M_{\theta y}$ 이므로 M_y 는

$$M_y = M_{\theta y} + M_{\theta y} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있으며 분무의 반경방향 운동량은 M_{θ} 와 (1)식에 나타내는 주위공기의 유입속도에 따라 결정되는 M_{θ} 의 합으로 되어 증가하므로 그 결과 분무의 반경방향 분산은 분사각 $2\theta_0$ 보다 약간 더 큰 분무각 2θ 를 형성하게 된다고 정성적인 해석을 가할 수가 있다.

② 분무내의 공연비

Fig. 3은 원통관내에 중심축을 따라 분사되는 분무의 모형도 이다. 해석을 단순화하기 위하여 분무의 측면에서 흡인되는 공기는 분무축에 수직으로 유입하며 분무의 횡방향 단면에서 연료농도는 균질이라고 가정한다. 또한 공기의 흡인은 분무의 외연부가 관내면에 접촉할 때까지 정상적으로 이루어지며 접촉한 후부터는 공기 흡인이 없다고 가정한다.

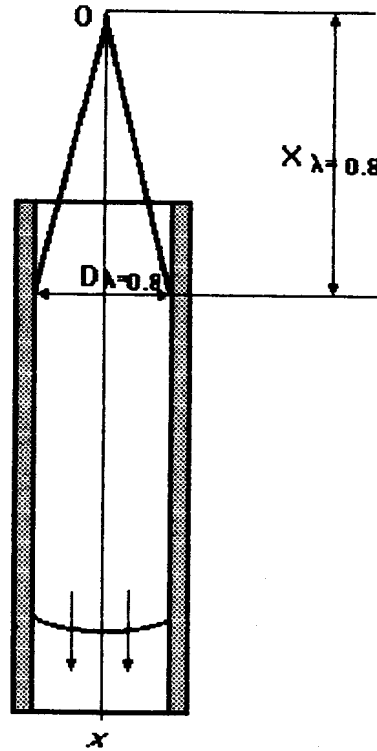


Fig. 3 Model of spray passing through cylindrical glass tube

연료와 주위기체의 밀도비 $\sigma = \rho_f / \rho_a = 40 \sim 50$ 으로서 충분히 크며, 분무의 도달거리와 분공의 직경의 비 $\delta = x/d$ 가 충분히 크다고 하면 분무의 직경이 원통관의 직경 D 와 동일하게 성장할 때까지 진행한 도달거리 x_D 의 하류에서의 공기과잉계수 λ_D

$$\lambda_D \approx \frac{2\delta\theta}{L_m\sqrt{c\sigma}} = \frac{2\theta}{L_m\sqrt{c}} \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_f}} \frac{x_D}{d} \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다.⁶⁾

단 L_m 는 이론공연비, ρ_f 는 연료의 밀도, ρ_a 는 분무 주위기체의 밀도를 각각 나타낸다. 그런데

$$x_D = \frac{D}{2\theta} \text{ 이므로}$$

$$\lambda_D \approx \frac{1}{L_m\sqrt{c}} \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_f}} \frac{D}{d} \quad (4)$$

(4)식에 의하면 분무의연부가 원통벽에 접촉한 후의 분무 단면의 평균 공기과잉계수 λ 는 가정을 따라 그 이상 공기의 흡인이 없으므로 λ_D 로서 일정하게 되어 분무각 2θ 및 분사압력 $4P$ 와는 무관하게 되며, 연료의 특성인 L_m 와 ρ_f , 압축비와 관계되는 ρ_a 및 원통형 연소실의 기하학적 특성인 D/d 에만 관계하는 값이 된다. (4)식으로 부터 $\lambda_D=0.8$ 이 되는 원통의 내경 $D_{\lambda=0.8}$ 로서

$$D_{\lambda=0.8} \approx 0.8L_m \left\{ \frac{c\rho_f}{\rho_a} \right\}^{0.5} d \quad (5)$$

를 제시할 수 있다.

3. 실험 및 검토

Fig. 4는 고압의 원통형관 내에 분사한 분무의 거동을 관찰하기 위한 실험장치의 개략도이다. 양측에 관찰창²가 부착된 고압실린더⁶의 정부에는 분사펌프¹¹로 부터 연료가 공급되어 연료분사밸브¹에 의해 분사된다. 분사되는 분무는 원통 유리관¹²를 통과한 후 LED 및 포토다이오드로 구성된 센서¹⁰의 사이를 통과할 때에 펄스발생기⁷이 1개의 펄스를 발생한다. 이 펄스를 트리거로 하여 스트로보스코프⁹의 섬광을 광원으로 하는 세도우그래프를 카메라³에 의하여 촬영하였다. 펄스발생기⁷은 리셋버튼을 누른 후의 최초의 분무가 도달할 때 단 1개의 펄스만 발생하도록 제작되었으므로 1600RPM으로 고속 정상 연발분사되고 있는 분사밸브로부터의 분무중 1발만 선택적으로 촬영하는 것이 가능하다. 고압실린더 내에 분무가 충만하여 시야가 흐리게 되는 것을 방지하기 위하여 고압실린더⁶은 내경 200mm 높이 1200mm로 내용적을 충분히 크게하였으며 분사펌프를 가동한 후 회전수가 안정되는 즉시 촬영 하였다.

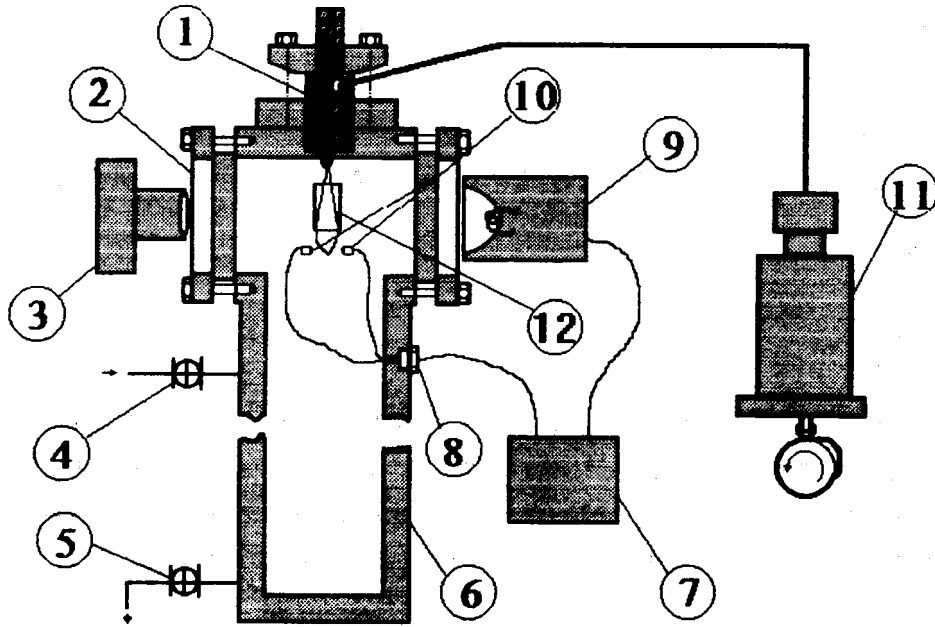
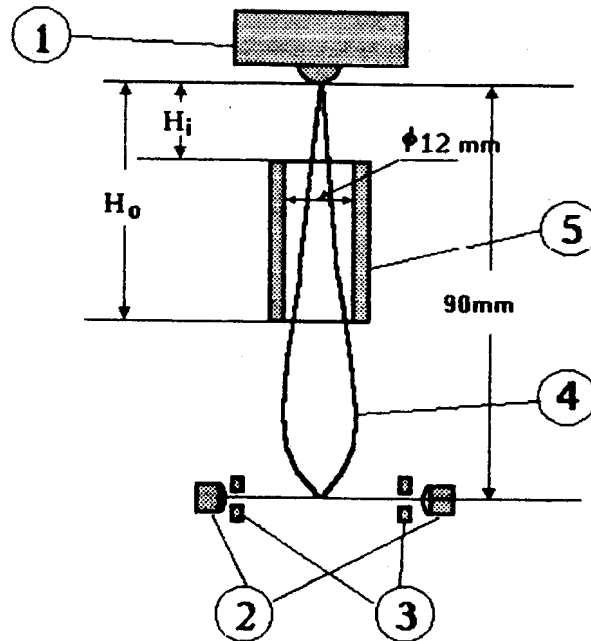


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 5에는 원통유리관내를 동축류로 분사되는 분무의 모양과 유리관의 치수와 유리관의 위치 및 센서의 위치를 나타내며, Fig. 6은 촬영된 세도그래프의 일례를 나타낸다. 식(2)에서 제시한 바와 같이 분무의 분산이 분무 주위공기 유입의 영향을 받는 것을 확인하기 위하여 분공에서 분무의 원통유리관 출구부까지의 높이 H_1 를 40mm로 하고 주위공기유입부의 높이 H_2 를 0, 10 및 40mm로 하여 도달거리 90mm로 성장한 때의 분무각 2θ 를 주위공기압력에 따라 조사 하였다. Fig. 7에는 99 $\mu\text{l}/\text{cycle}$ 인 분사펌프를 1600rpm로 운전하여 분공경 0.3mm, 포핑압 27MPa인 분사밸브로 분사한 분무에 대한 측정결과를 나타낸다. 위에서 H_1 가 40mm인 경우는 곧 원통유리관을 제거한 개방분무를 나타낸다.

주위공기 유입부의 높이의 증가 및 주위공기의 압력의 증가에 따라서 분무각 2θ 는 증가하고 있다. 이것은 주위공기 유입부의 통로 면적 증가에 따른 유입 공기 질량 유량 증가와 공기의 밀도의 증가에 따른 유입 공기 질량 유량 증가가 가중적으로 분무의 횡방향의 분산에 대하여 효과를 미치는 것을 의미하며, 따라서 이것은 유입공기의 운동량의 증가에 따른 분무의 반작용으로 횡방향의 분산이 증가하는 것을 반증하는 것이 된다.

원통유리관내에 동축류로 분사된 디젤분무의 횡방향 연료농도 분포에 관하여 조사하기 위하여 Fig. 5의 분무의 주위공기유입부의 높이 H_1 를 20mm로 일정히 하고 원통유리관 출구의 높이 H_2 를 40 및 60mm로 하여 분사한, 분무선단의 도달거리 90mm로 성장하였을 때의 분무 세도그래프에서



① Nozzle ② Photo diods ③ Windows ④ Spray ⑤ Glass tube
 Fig. 5 Position and dimension of the glass tube with spray



$H_i = 20\text{mm}, H_o = 40\text{mm}$
 $P_{\text{amb}} = 1.3\text{MPa abs}$

$H_i = 20\text{mm}, H_o = 60\text{mm}$
 $P_{\text{amb}} = 1.3\text{MPa abs}$

Open spray
 $P_{\text{amb}} = 1.3\text{MPa abs}$

Fig. 6 Shadowgraph of sprays passing through glass tubes

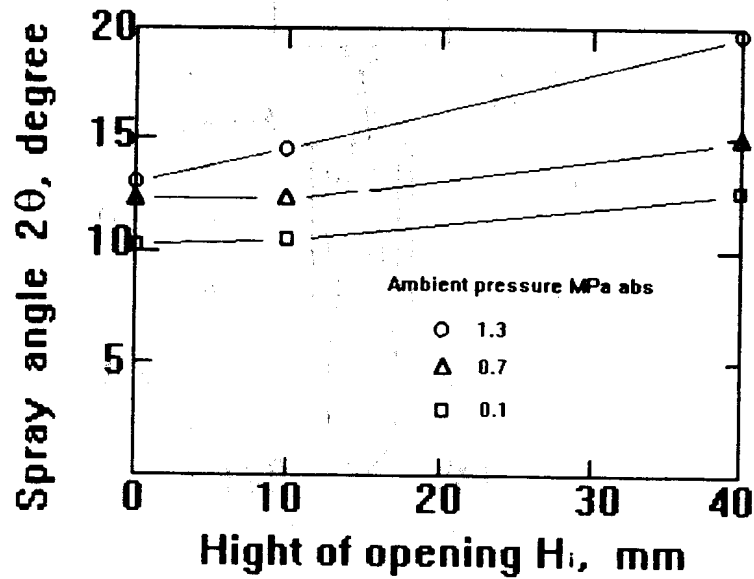


Fig. 7 Spray angle vs. height of air entrance with ambient air pressure

Fig. 8의 ③으로 표시한, 분무의 출구 하류에서의 횡방향으로 스캐닝한 투과광 감쇄율을 측정하였다. 여기서 투과광감쇄율은 (6)식으로 정의되는 값이며 분무내를 투과하는 입사광이 분무입자에 의한 산란으로 감쇄되는 비율로서 분무내의 연료농도에 관한 정보를 제공한다. 유리관의 직·출구측의 분무의 상태는 동일한 도달거리의 유리관내를 통과하고 있는 분무의 상태를 근사적으로 나타낸다고 볼 수 있다.

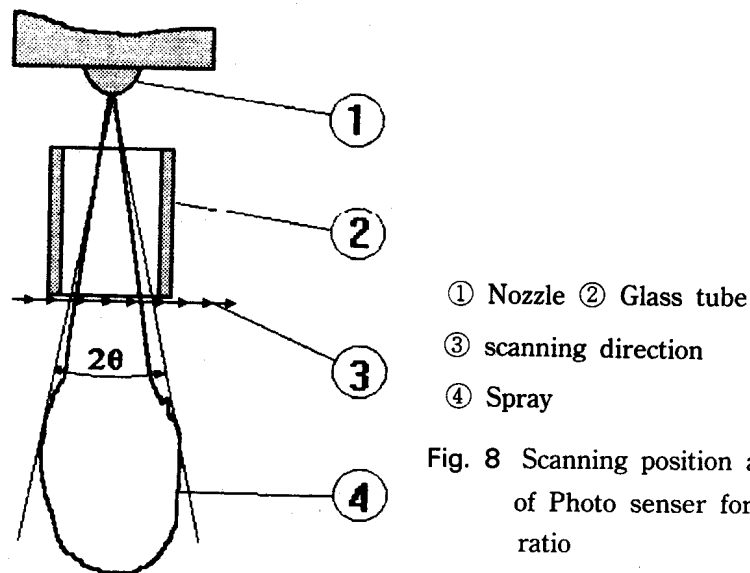


Fig. 8 Scanning position and direction of Photo sensor for Light Decay ratio

$$\phi = \frac{I_0 - I}{I_0} \quad (6)$$

단 I_0 및 I 는 입사광 및 투과광의 강도를 나타낸다. Fig. 6에는 분무가 상당히 난류상태로 성장하고 있는 것을 보인다. 따라서 이와 같은 디젤분무를 축대칭으로 취급하여 분무내 반경방향 연료농도의 계산에 사용하는 것은 무리라 생각하여 투과광감쇄율 그 자체를 비교함으로써 연료농도의 정성적 비교에 사용하기로 하였다. 측정방법은 분무의 세도그래프를 ASA 200의 포지티브필름으로 촬영한 후 슬라이드 프로젝터로써 트레이싱 페이퍼스크린상에 상영하고 스크린의 배면에서 포토다이오드를 이용하여 제작한 광측정기를 정속도 스캐닝하는 방법을 취하였다. Fig. 9 및 Fig. 10은 H_0 를 각각 40 및 60mm로 하여 원통유리관내에 분사한 경우의 주위공기압력에 따른 투과광감쇄율을 나타낸다.

Fig. 9로부터 원통유리관내에 동축 분사한 분무에서 분무축방향 40mm위치에서의 횡방향 연료농도는 투과광감쇄율의 곡선으로 보아서 분무의 중심부에서 상당히 크고 반경방향으로 나갈수록 작아지는 분포를 하고 있으나, Fig. 10에서 보는 바와 같이 분무축방향 60mm위치에서의 횡방향 연료농도는 상당히 균일하게 된 것을 추측할 수 있다. 특히 주위공기 압력이 1.3MPa의 경우는 투과광감쇄율이 횡방향으로 거의 일정하게 된 것을 볼 수 있다. 이것은 Fig. 11 및 Fig. 12에 나타낸 유리관을 통과하지 않는 경우의 각각 분 무축방향 40mm 및 60mm위치의 분무반경방향 투과광 감쇄율과 비교함으로써 분명하게 된다. 이와 같이 되는 이유는 Fig. 13에서 설명하는 바와 같이 분무축방향 거리 H_0 이하에서는 공기의 유입이 없고 유리관 벽면에 의하여 흐름이 제한되므로 유

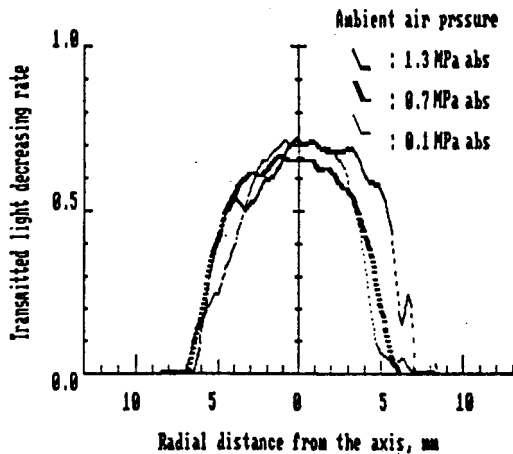


Fig. 9 Light Decay Ratio curves of sprays through cylindrical tube at distance of 40mm from orifice, radial direction with ambient air pressure

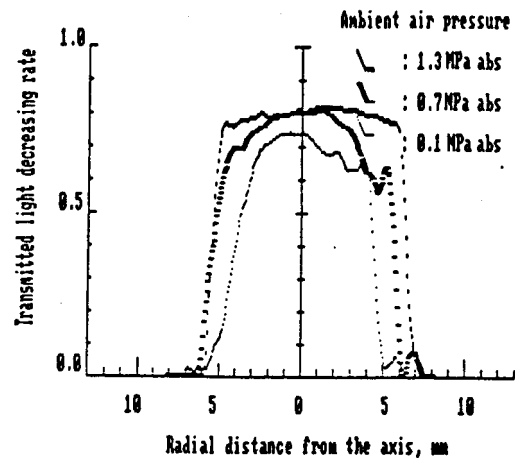


Fig. 10 Light Decay Ratio curves of sprays through cylindrical tube at distance of 60mm from orifice, radial direction with ambient pressure

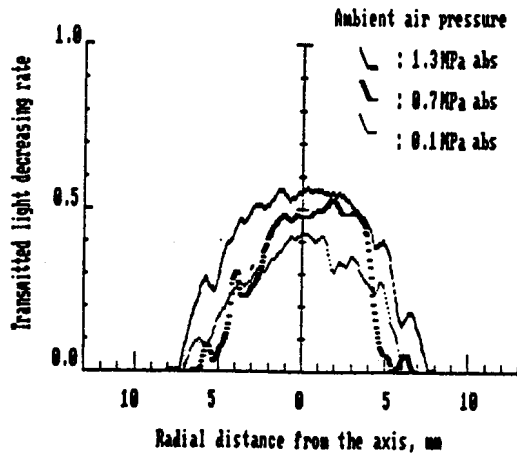


Fig. 11 Light Decay Ratio curves of open sprays at distance of 40mm from orifice, radial direction with ambient pressure

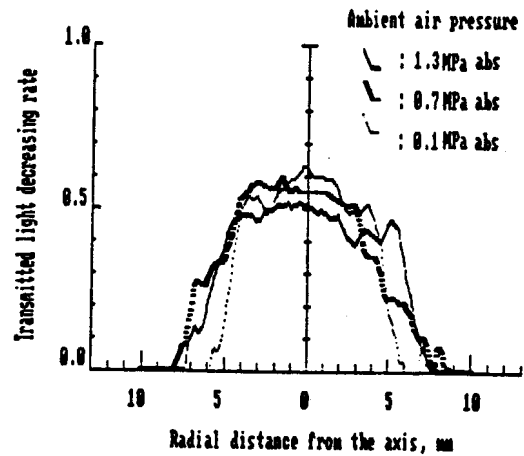


Fig. 12 Light Decay Ratio curves of open sprays at distance of 60mm from orifice, radial direction with ambient pressure

선이 휘어지면서 벽면 부근에서의 유선의 밀도가 커지는 반면 중심부는 점점 유선의 밀도가 작아지므로 분무의 하류로 내려갈수록 연료농도가 균일하게 되는 것으로 생각된다. 그러므로 유리관의 직경을 (5)식에 나타낸 $D_{\lambda=0.8}$ 이 되도록 하면 원통관형의 연소실내에 동축류로 분사된 분무 하류에 있어서의 반경방향 연료농도분포를 공기과잉계수 λ 0.8정도로서 상당히 균일하게 유지하는 것이 가능하게 될 것이다.

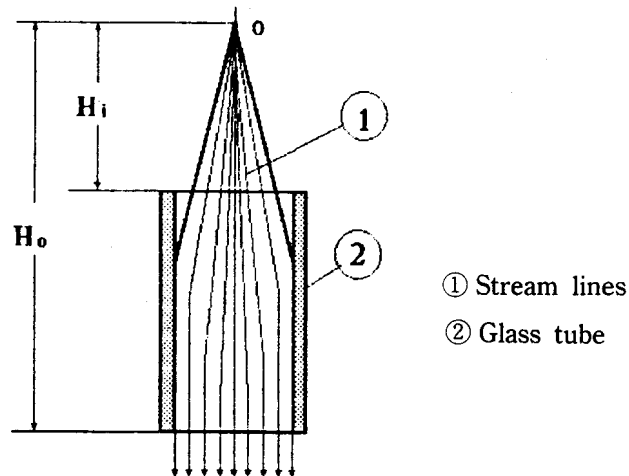


Fig. 13 Streamlines in the spray

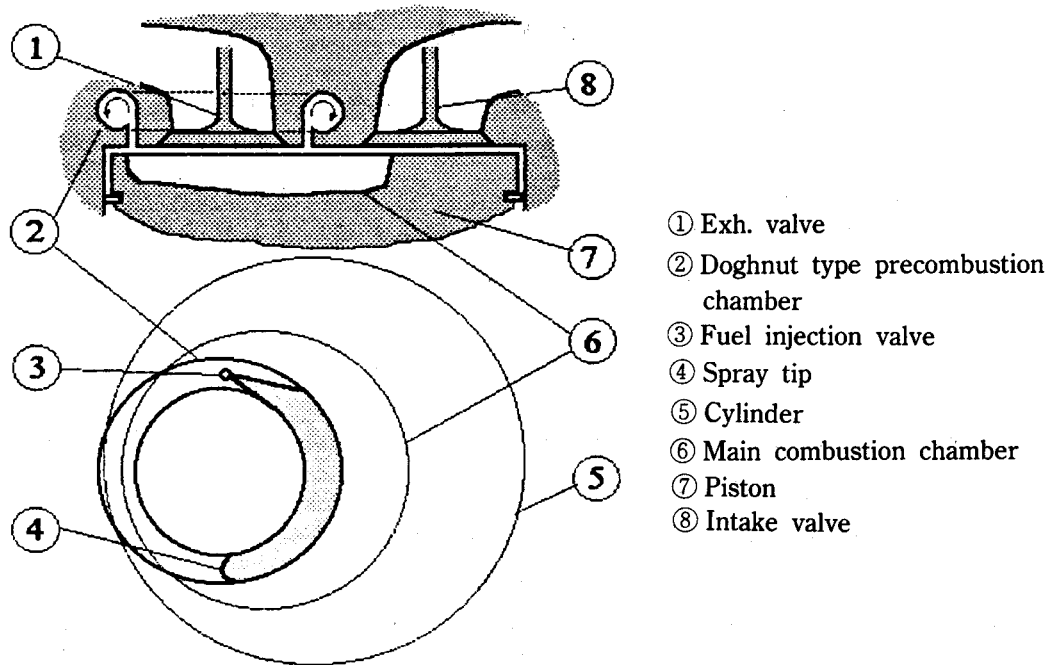


Fig. 14 Recommended configuration of combustion chamber

4. 내연기관에의 적용

원통관내의 동축류 분사를 이용한 연소실을 계획하기 위한 한 방법으로 Fig. 14에서 나타낸 것과 같은 도우넛형 예비연소실을 제안한다. 이것은 세라믹으로 제작된 예비연소실을 제작함으로써 전 열면의 증가에 따른 방열손실의 증가를 커버할 수 있는 전제하에 고려하여 불만한 것이 될 것이다. 압축과정에서 도우넛형의 예비연소실내로 진입한 공기는 와류를 발생하는 구조로 되기 때문에 만곡된 원통관내에 동축류 분사되는 분무의 분산 효과외에도 와류에 의한 혼합효과로 균질화는 더욱 촉진될 것으로 예상된다. 분무가 진행되는 동안 분무의 측면으로 부터의 공기유입이 제한되므로 분무영역내의 공기과잉계수는 균일한, 0.8정도로써 거의 일정하게 유지할 수가 있게 되어 소위 층상 급기연소가 실현될 것으로 예상된다. 일단 분무가 발화하면 팽창하여 주연소실내로 분출될 것이며 동시에 피스톤의 하강 행정 기간에 역스퀴시과정을 통하여 2차연소하여 과잉공기율이 대단히 큰 회박연소에 가까운 연소를 하게 됨으로써 완전연소와 동시에 질소산화물의 발생을 최대한 억제할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 상기의 제안된 연소실형은 본연구의 원통직관내에 분사된 분무와는 달리 만곡된 원통관내에 분사하는 것이라는 점과 분무의 속도가 음속과 비교하여 무시할 수 없는 수준이므로 관내의 압력파동현상도 발생하게 된다는 점 등으로 인하여 이에 대한 연구도 진행되어야 할 것으로 생각된다.

5. 결 론

원통관내에 동축류 디젤분무의 거동을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 디젤분무의 횡방향 분산에 영향을 미치는 요소중 1로서 주위기체의 유입 운동량은 그 증가에 따라 분무각을 증대시킨다.
- 2) 원통관내에 동축류 분사할 때의 임의의 공기과잉계수로 되는 원통의 내경을 결정하는 산식을 제시하였고 실험에 의하여 균질분사에 접근하는 횡방향의 연료농도분포를 얻을 수 있었다.

참고문헌

- 1) John B. Heywood : Pollutant Formation and Control in Spark Ignition Engines, *Prog. Energy Combust. Sci.* Vol.1, pp. 135-164, 1976. Pergamon press
- 2) Naeim A. Henein : Analysis of Pollutant Formation and Control and Fuel economy in Diesel Engines, *Prog. Energy Combust. Sci.* Vol. 1 pp. 165-207, 1976. Pergamon Press.
- 3) S. Goto, H. Fukutani and K. Koizumi : Reduction of NO in Reheat Combustor of Compound Engine, *Proceedings of the international symposium on DIAGNOSTICS AND MODELING OF COMBUSTION IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES*, SEP. 3-5, 1990, pp. 645-549
- 4) 배종욱, 안수길 : 디젤노즐의 내부구조가 분무특성에 미치는 효과, *대한기계학회논문집 제13권제6호*, pp. 1238-1249, 1989
- 5) 裴鍾旭 : 디젤機關의 燃料噴霧特性에 관한 研究, 釜山水產大學 大學院 工學博士學位論文, 1990, 2, p. 25
- 6) Wakuri Yutaro, Masaru Fujii and Tatsuo Amitani : Studies on the Penetration of Fuel Spray in Diesel Engine, *Bulletin of JSME*, Vol. No. 9 pp. 123-130