

흡기매니폴드내 벽면으로의 연료수송

Mechanism of a Spray Transport on Intake Manifold Walls

이 용 길*, 전 홍 신**, 박 경 석**
G. Y. Lee, H. S. Jeon, K. S. Park

ABSTRACT

Study on the mechanism of droplet transport and the droplet eddy diffusivity in the intake manifold of internal combustion engine with carburetor has been carried out in this paper. The theory and experiments were studied and performed respectively, to elucidate the mechanism and to measure typical rates of deposition, on the walls of a straight type intake manifold, of water droplets suspended in a turbulent air streams.

Accordingly, The results are that Mechanism of a spray transport to the walls is caused by the fluctuation component of radial velocity. Deposition rate of a spray on the walls is mainly dependent upon air velocity and mean diameter of spray, and Droplet eddy diffusivity in the intake manifold is around $80\sim 105\text{cm}^2/\text{sec}$.

주요기술용어 : Liquid-Gas Two Phase (기액 2상류), Intake Manifold (흡기매니폴드)
Floating Rates (부유율), Droplet Eddy Diffusivity (와확산계수),
Mechanism of Spray Transport (분무수송기구)

1. 서 론

기화기식 또는 일점 연료분사식 가솔린기관에 있어서 흡기매니폴드내로 분사된 연료의 일부분이 흡기매니폴드내 벽면으로 부착하는 것은 불가피하다. 이와 같이 분사된 연료가 흡기매니폴드내 벽면에 부착하는 것은 기관의 과도운전시는 물론 정상운전시에도 각 실린더에 대한 혼합기분배의 악화 및 공급연료유량의 시간적변동을 일으켜 엔진출력의 저

하, 연료소비율의 증대 및 유해배기가스의 배출증대 등을 일으키는 원인이 됨을 많은 논문에서 보고되고 있다¹⁾

이의 개선을 위한 연구는 흡기매니폴드내 벽면에 부착되는 액막상의 연료를 제거하는 방법, 예를 들면 흡기매니폴드 혹은 흡입공기 가열, 흡기매니폴드내 스윙류브의 설치 및 실린더마다 연료를 흡기밸브측에 직접 분사시켜 공연비의 변동을 줄이는 다점 연료분사 시스템이 채용되기에 이르렀다. 더우기 최근에는 연

* 교통안전공단 교육원

** 경희대학교 기계공학과

료가 흡기매니폴드 또는 연소실내 벽면으로의 부착저감은 물론 연소성능의 향상을 위하여 연료의 미립화 특성이 우수한 공기-연료 혼합공급장치²⁾, 초음파 분사장치 등이 활발히 연구되고 있다.

즉 지금까지의 연구는 액막상 연료의 존재가 기관성능의 악화를 가져온다는 사실에 근거하여 이의 제거 또는 저감시키기 위한 방법에 대한 연구가 수행되었으나 흡기매니폴드내의 액적이 관벽면으로의 수송기구를 제공하는 주요한 연구는 수행되지 않고 있으며, 다만 이론적으로 난류기류중에 있어서 입경이 작은 입자의 흡기매니폴드내 관벽면으로의 수송기구에 대한 연구³⁾가 수행되어 왔을 뿐이다. 이들의 연구에 따르면 작은 입자에 대하여 입자의 와확산계수는 가스의 와확산계수와 같다고 가정하여 입자 질량 전달계수를 구하고 있다. 그러나 입자의 직경이 수십 μm 이상이 되면 기체상 와확산계수와 입자의 와확산계수의 값은 동일하다고 간주할 수 없고, 입자가 주류의 기체상 난류운동에 어느 정도 추종할 수 있는가가 의문시 되고 있다.

따라서 본 연구는 기화기식 또는 일정 연료분사식 가솔린기관에 있어서 흡기매니폴드내 연료거동을 대상으로 기체상 유동으로 취급할 수 없는 작은 입경의 연료분무가 흡기매니폴드 벽면으로의 수송기구에 대한 이론적 해석과 실험을 수행하여 연료액적의 흡기매니폴드 벽면으로의 수송기구를 명확히 함과 더불어 부유율 및 평균입경의 분무에 대한 와확산계수를 구하였다.

2. 이론적 해석

흡기매니폴드내의 난류기류중으로 분

출된 연료가 흡기관벽면으로의 수송은 연료분무의 속도가 공기의 체적평균속도와 동일한 속도로서 관의 축방향으로 운동한다고 가정하였다. 이 때 흡기매니폴드내의 연료분무가 모든 방향으로 이동하려는 수송기구는 관내에 열적구배가 없을 때 또는 무시할 수 있을 때 분자확산에 의한 이동분과 난류에 의한 이동분의 합으로서 다음 식과 같이 주어진다.

$$\left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)_r = -(D + \epsilon_p) \left(\frac{\partial C}{\partial r}\right)_x \quad (1)$$

$\left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)_r$: 액적의 반경방향 단위면적당 질

량수송율

$\left(\frac{\partial C}{\partial r}\right)_x$: 액적의 반경방향 농도구배

D : 브라운운동에 의한 입자의 확산계수

ϵ_p : 입자의 와확산계수

일반적으로 입자의 직경이 수 μm 이상인 경우의 수송기구는 브라운운동에 의한 입자의 확산수송은 거의 기대할 수 없고, 더우기 브라운운동에 의한 확산계수 (D)는 입자의 와확산계수에비하여 극히 작아 무시할 수 있게 된다³⁾. 따라서 식(1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)_r = -\epsilon_p \left(\frac{\partial C}{\partial r}\right)_x \quad (2)$$

원관내에 있어서 임의의 반경 r , 두께 dr , 길이 dx 인 체적요소에 대하여 질량평형을 고려하면 다음과 같은 미분방정식이 얻어진다.

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)_r = \epsilon_p \left[\frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \right] \quad (3)$$

미소 체적요소가 평균속도 u 로 이동한다고 고려하면, 시간 t 동안의 이동거리

x 는 다음 식으로 주어진다.

$$X = u \cdot t \quad (4)$$

경계조건은 시간

$$t = t_0 \quad \text{일 때 농도 } c = f(r) \quad (a)$$

$$t = \infty \quad \text{일 때 농도 } c = 0 \quad (b)$$

$$r = R/2 \quad \text{일 때 농도 } c = 0 \quad (c)$$

여기에서 R 은 원관의 직경이다. 식 (3)의 해석에는 베셀함수(J_0)를 사용하여 다음 식으로서 주어진다.

$$c = \sum_1^{\infty} A_n \exp(-a_n^2 \varepsilon_p t) J_0(a_n r) \quad (5)$$

경계조건(a)와(c)를 식 (5)에 대입하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$f(r) = \sum_1^{\infty} A_n J_0(a_n r) \quad (6)$$

$$J_0\left(a_n \frac{R}{2}\right) = 0 \quad (7)$$

흡기관 길이에 따라 임의의 단면에서 부유한 액적의 평균질량속도 q 는 다음 식으로 주어진다.

$$q = \frac{1}{A} \int_0^{R/2} c \cdot u \cdot 2\pi r dr \quad (8)$$

여기에서 A 는 원관의 단면적이다. 식 (8)에 식(5)을 대입하여 적분하면 식(9)가 되며, 식(9)의 수열의 초항만을 고려하면 식(10)이 된다.

$$q \cong \frac{\pi u R}{A} \sum_1^{\infty} A_n \exp(-a_n^2 \varepsilon_p t) J_1\left(\frac{a_n R}{2}\right) \quad (9)$$

$$q \cong \frac{4uA}{R} \exp(-a_1^2 \varepsilon_p t) J_1\left(\frac{a_1 R}{2}\right) \quad (10)$$

식(10)을 시간 t 에 대하여 미분하면 다음 식이 얻어진다.

$$\frac{dq}{dt} \cong -\frac{4uA}{R} a_1^2 \varepsilon_p \exp(-a_1^2 \varepsilon_p t) J_1\left(\frac{a_1 R}{2}\right) \quad (11)$$

식(11)에 식(10)을 대입하면

$$\frac{dq}{dt} = -a_1^2 \varepsilon_p q \quad (12)$$

식(3)에서

$$\frac{dq}{dt} = u \frac{dq}{dx} \quad (13)$$

식(13)을 식(12)에 대입하면 다음 식이 된다.

$$\frac{d \ln q}{dx} = -\frac{a_1^2 \varepsilon_p}{u} \quad (14)$$

식(7)에 의하여

$$a_1 = \frac{2\lambda_1}{R} \quad (15)$$

여기에서 λ_1 은 제 1종 0보다 베셀함수의 첫 번째항 값이다. 식 (15)를 식 (14)에 대입하면 결국 다음 식이 된다.

$$\frac{d \ln q}{dx} = -\frac{4\lambda_1^2 \varepsilon_p}{R^2 u} \quad (16)$$

식 (16) 은 흡기관길이에 대한 부유액적의 평균질량속도의 편대수 그래프상에서 $d \ln q / dx$ 는 $4\lambda_1^2 \varepsilon_p / R^2 u$ 의 기울기를 갖는 직선으로서 표시할 수 있다.

흡기매니폴드내로 분사된 연료의 평균 입경은 기화기 벤츨리부의 기류속도가 15~120 m/s의 범위에서 실험적으로 구한 다음과 같은 Nukiyama-Tanasawa⁴⁾의 실험식을 사용하였다.

$$\bar{d} = 585 \frac{1}{V} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} + 597 \left(\frac{\mu}{\sqrt{\sigma \rho}} \right)^{0.45} \left(1000 \frac{q_l}{q_a} \right)^{1.5} \quad (17)$$

여기서

- ρ : 밀도 (g/cm³)
- μ : 점성계수 (dyne·s/cm²)
- σ : 표면장력(dyne/cm)
- V : 공기-물 상대속도(m/s)
- q_a, q_l : 공기, 물의 체적유량(cc/s)
- \bar{d} : 평균입경(μm)

3. 실험장치 및 방법

Fig.1은 벤츠티관내 고속공기류중에 분사한 액체연료의 거동을 가시적으로 관찰하기 위하여 투명한 아크릴로 제작한 본 실험장치의 계통도이다. 이 장치는 실제 가솔린기관의 기화기 및 흡기매니폴드를 가상하여 투명한 아크릴로 제작한 직관형 가시모형 흡기매니폴드이다. 우선 공기원은 1.6 kW, 3,600 rpm 의 3상 유도전동기로 구동되는 원심형 송풍기를 사용하였으며, 흡입되는 공기는 풍속조절용 밸브를 거쳐서 서지탱크로 들어간다. 이 공기는 밸브를 거쳐 축류장치에서 정류된 후 벤츠티를 통하여 시험부를 지나서 대기로 방출된다. 흡기관내 유속의 측정은 수주 마노미터를 이용하였으며, 마노미터의 눈금과 관내 풍속과의 관계는 이미 각 온도에 대하여 구하여 놓고 사용하였다.

분사에 사용한 액(물)은 물탱크에서 펌프를 이용하여 상부의 물탱크로 순환시키며 수위조절기와 유량조절용 코크를 거쳐 플로트 유량계를 통과한 후 분사노즐에서 분출된다.

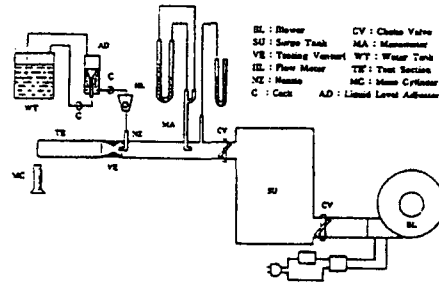


Fig.1 Schematic View of Experimental Apparatus

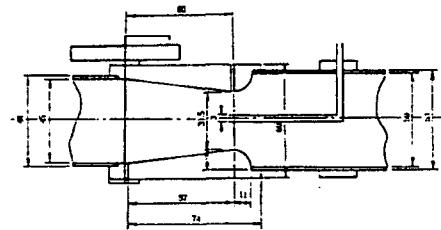


Fig.2 Schematic View of Testing Venturi (단위:mm)

3.1 시험부

시험부 (TE) 의 길이는 실기 흡기매니폴드의 총길이를 기준으로 하여 벤츠티로부터 흡기관의 끝까지 길이 (L) 이 200, 400 mm로 변화할 수 있게 하였으며 관 내경은 실기의 흡기매니폴드의 직경에 가까운 아크릴관을 사용하였다.

시험부 흡기관 내벽에 부착하여 흐르는 액막유량은 흡기관끝에서 매스실린더로 수회 반복 측정하여 평균값을 취하였다.

3.2 실험용기화기

Fig.2는 본 실험에 사용한 벤츠티의 개요도를 도시한 것이다. 벤츠티의 형상은 실용기화기와 형상이 상사되도록 하였으며, 재료는 투명 아크릴 등근봉을 사용하였다.

벤츄리 목부에 설치된 분사 노즐은 내경 D_n 이 0.5, 1, 2, 3 mm의 관을 사용하였고, 액(물)은 주류방향으로 분사하였다. 분사유량의 범위는 1~5 cc/s 이며, 벤츄리 목부의 풍속범위는 10~120 m/s로 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 연료의 부유율

1) 연료의 부유량

Fig.3은 흡기관 길이가 400 mm, 노즐 직경이 2 mm 인 경우에 연료 분출유량을 1.0 cc/s에서 4.0 cc/s까지 변화에 따른 부유율을 도시하였다. 그림에서 흡기관 내 공기의 평균속도가 24.7 m/s 이하의 저속에서는 유량이 2 cc/s 이하가 되면 공급유량의 변화가 부유율(FR)에 영향을 크게 미치고 있으나, 2 cc/s 이상에서는 공급유량의 변화가 흡기관내 부유율에 미치는 영향이 적으며, 흡기관내 공기의 평균속도가 37.0 m/s 이상으로 빨라지게 되면 점차 부유율에 미치는 공급유량의 범위가 커져감을 알 수 있다. 또한 동일한 연료유량일지라도 흡기관내의 평균 공기속도가 빠르면 빠를 수록 부유율이 높아 공기속도가 부유율에 큰 영향을 미치는 것을 나타낸 것이다.

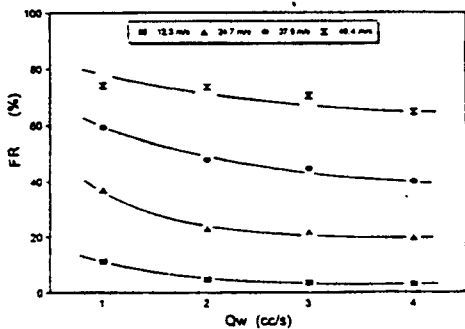


Fig.3 Effect of Fuel Supply Flow Rate on Floating Rate ($X=400, D_n=2$)

2) 분사노즐 직경 (D_n)의 영향

Fig.4는 분출유량이 일정할 때 노즐 직경의 변화가 부유율에 미치는 영향을 공기의 속도와 부유율의 관계를 도시한 것이다. 그림에서 노즐 직경의 변화는 부유율에 거의 영향을 미치지 않는 것을 보이고 있으나, 이 그림에서도 흡기관내 공기속도의 변화가 부유율에 큰 영향을 미치고 있다는 것을 나타내고 있다.

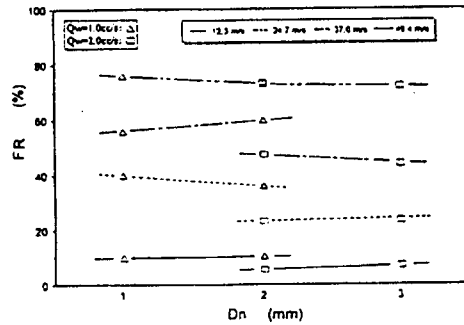


Fig.4 Effect of Nozzle Diameter on Floating Rate

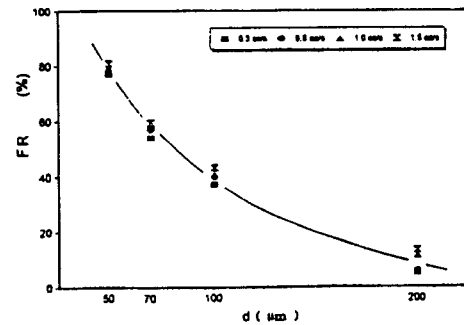


Fig.5 Effect of Mean Drop Diameter on Floating Rate

3) 연료 평균입경의 영향

분사노즐에서 분출된 연료는 분사유량, 벤츄리 목부의 공기속도 및 노즐직경에 따라 부유율이 다르게 됨을 알 수 있다. 이와 같은 모든 실험변수는 전술한 액적의 평균입경 산출(17)에 포함되어 있

어, 식 (17) 로 실험범위에서 분사된 연료의 평균입경을 구하여, 평균입경과 부유율과의 관계를 편대수 그래프상으로 Fig.5에 도시하였다. 부유율은 평균입경이 클 수록 현저하게 저하하고 있으며, 전체적으로는 이들 관계가 명확히 반비례함을 보이고 있다.

따라서 연료의 부유율은 연료의 평균입경에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 본 실험범위에서 관내로 분사된 연료의 평균입경의 범위는 40~230 μm 이었다.

4.2 흡기관길이에 따른 평균질량유속

Fig.6은 흡기관의 길이에 따라 부유한 액적의 평균질량속도를 편대수 그래프상에 도시한 것이다. Fig.6은 노즐직경이 3 mm, 흡기관내 공기류의 평균속도가 각각 24.7 m/s, 37.0 m/s, 49.4 m/s 인 경우에 있어서 분출유량이 1~5 cc/s 로 변화시켰을 때를 도시한 것이다. 흡기관 길이에 따른 부유된 연료의 평균질량속도의 기울기 ($d\ln q/dx$) 는 흡기관내 공기속도가 동일할 경우에는 분출유량에 관계없이 거의 일정한 값을 보이고 있다. 흡기관내 공기속도가 일정한 상태에서 공급유량이 변화하여도 흡기관 길이에 따라 부유액적율의 감소율이 비슷하다는 것은 분사된 연료의 미립화 특성이 거의 비슷하다는 것을 의미하고 있다. 왜냐하면 Nukiyama-Tanasawa 의 실험식 (17) 에 의하여 본 실험범위에서 평균입경을 공기유속 및 분무유량의 변화에 따라 평가하면 동일한 흡기관내 공기유속에서는 거의 동일한 평균입경값이 산출되고 있기 때문이다. 흡기관 길이에 따른 흡기관내 질량평균유속의 저하율 즉, 그림상에서 기울기는 흡기관내 공기유속이 빠를 수

록 큰 값을 보이고 있다. 이것도 공기유속이 빠르면 흡기관내로 분사된 연료의 평균입경이 작아지기 때문이라고 사료된다.

흡기관내 공기속도에 대한 입자의 와확산계수를 구하기 위하여 사용할 기율의 값은 Fig.6에 각각 나타난 4 개값의 평균값을 사용하였다.

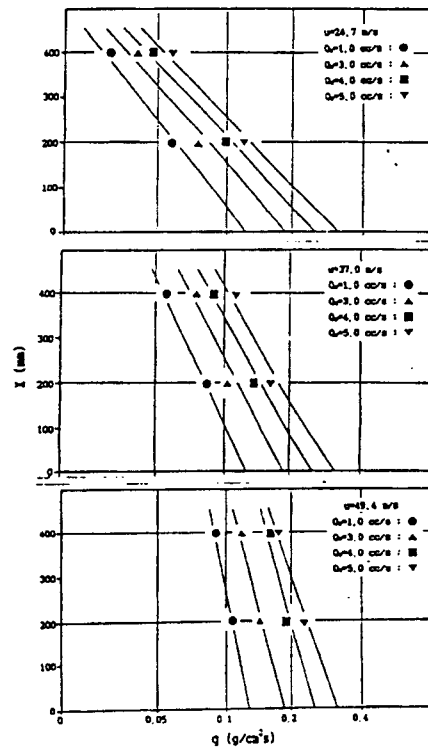


Fig.6 Distribution of Average Mass Velocity of Suspended Droplets along Intake Manifold at Various Average Air Velocity

4.3 연료분무의 와확산계수

흡기관내로 분사된 연료의 흡기관 벽면으로 유동하는 수송기구에 따른 와확산계수 (ϵ_p ; eddy diffusivity) 는 연료의 흡기관내 평균 질량속도를 흡기관길이에 따른 편대수 그래프상의 기울기

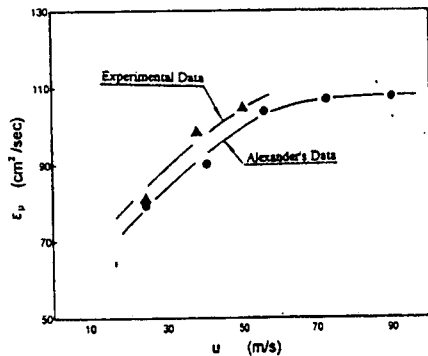


Fig.7 Eddy Diffusivity of Fuel Droplets in Intake Manifold

($d\ln q/dx$) 와 평균공기속도 (u), 흡기관 직경 (R) 으로부터 식 (16) 을 사용하여 구할 수 있다. Fig.7는 평균 공기속도에 대한 흡기관내로 분사된 연료분무의 와 확산계수를 도시한 것이다. 그림에는 Alexander²⁾ 가 본 연구와 유사한 실험장치 및 실험조건에서 구한 와 확산계수를 함께 도시하였다. 실험결과는 연료의 와 확산계수는 공기유속이 느린 곳에서는 속도가 증가함에 따라 증가되나 점차 고속이 되면 이 값들은 거의 일정한 경향을 보이고 있다. 본 실험범위에서의 와 확산계수의 값은 80~105 cm^2/sec 이었으며, Alexander가 얻은 값보다는 약간 큰 값을 보이고 있으나 그 경향은 같음을 알 수 있다. 약간 큰 값을 갖는 것은 Alexander는 원관중앙에 연료 분사 노즐을 설치한 데 비하여 본 연구에서는 벤츄리 목부에 설치하였기 때문에 벤츄리 출구부의 확대로 공기의 반경방향의 속도 변동성분이 더 크게 나타났기 때문이라고 사료된다.

5. 결 론

본 연구는 기화기석 및 일점연료 분사

식 가솔린기관에 있어서 흡기매니폴드내에 분출된 연료분무의 흡기관벽면을 따라 유동하는 액막연료의 수송기구에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 연료분무의 흡기관내 벽면으로의 수송기구는 흡기관내 기류중의 반경방향의 속도 성분에 기인한다.
- (2) 흡기관 벽면으로의 부착량은 노즐 직경의 영향 보다 주로 흡기관내 기류의 속도 및 평균입경에 크게 영향을 받는다.
- (3) 본 연구의 경우 정상운전시 흡기관내에 있어서 액적의 와 확산계수의 범위는 80~105 cm^2/sec 정도이다.

참 고 문 헌

- 1) J.B.Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals" McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, p.279, 1988
- 2) J.Emerson, P.G. Felton and F.V. Broccon, "Structure of Sprays from Fuel Injectors Part : the Ford Air-Assited Injector", SAE Paper 900478(1990)
- 3) Lin. G.S., Moulton, R.W., Putnam, G.L., "Mass Transfer between Solid Wall and Fluid Streams", Ind. Eng. Chem. 45, p.636, 1953
- 4) Nukiyama, S., and Tanasawa, Y., "Experiments of Liquid Atomization", Trans. Soc. Mech. Engrs. (Japan), 4, No.15, p.86, 1938
- 5) L.C. Alexander and C.L. Coldren, "Droplet Transfer from Suspending Air to Duct Walls", INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY, Vol. 43, No. 6, p.1325, 1951