

분사압력변화가 분무특성에 미치는 영향에 관한 수치적 고찰

박 권 하*¹

Numerical Analysis of the Effect of Injection Pressure Variation on Spray Characteristics

K. Park

High injection pressure system has been developed as a measure to reduce harmful exhaust gases. In order to understand the effect of pressure on diesel spray injection process, wide range of high injection pressure was tested. The gas phase is modelled by the Eulerian continuum conservation equations of mass, momentum, energy and fuel vapour fraction. The liquid phase is modelled following the discrete droplet model approach in Lagrangian form.

The droplet distributions, vapor fractions and gas flows are analyzed in various injection pressure cases. The distributions of spray and vapor increase and the Sauter mean diameter decreases with increasing injection pressure quickly in a low pressure area but slowly in a high pressure area.

Key Words: 디젤분무(Diesel Spray), 분사압력(Injection Pressure), 증발분(Vapor Fraction)

기호설명

- U^i : normal flux component
- u^i : cartesian components of a velocity vector
- \sqrt{g} : Jacobian determinant
- P_{ij} : cartesian components of the area vector
- q_{ij} : geometric relations
- μ_{eff} : effective viscosity
- ϕ : void fraction
- Sh : Sherwood number
- D : diffusivity
- D_d : droplet diameter
- T_m : mean temperature

1. 서 론

디젤엔진은 우리나라 수송기관의 30%를 넘고 있으며, 대기오염의 주요 원인이 되고 있다. 대표적인 유해물질은 NOx, HC, CO 및 입자상 물질이지만, 가솔린기관에서 발생하지 않는 입자상물질은 암발생원인이 되고 있으며 심리적으로도 좋지 못한 영향을 주기 때문에 이를 저감하기 위한 기술개발은 디젤기관에서 가장관심을 가지고 진행되는 연구중의 하나가 되고 있다. 고압연료분사는 연료의 미립화를 촉진시켜 공기와 연료의 혼합을 크게 증대시킴으로써 연소효율향상과 함께 입자상물질의 배출을 억제하는 기술로서 최근 많은 연구가 진행되고 있다[1,2,3,4,5]

*정회원, 한국기계연구원 동력시스템연구부

본 논문에서는 고압분사시의 분무진행거리, 공기와의 혼합, 증발을 등을 검토하기 위하여, 분사압력을 변화시키면서 그들의 특성을 분석한다.

2. 수학적모델

기상의 유동에 대하여는 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지방정식 및 연료증발방정식이 Eulerian형으로 주어지며, 고압축성유동에 대한 $k-\epsilon$ 모델이 적용된다. 액상의 유동에 대하여는 움직이는 격자, 운동량, 질량 및 에너지방정식은 Lagrangian형으로 쓰여지며, 각 액적군은 크기, 온도, 속도 등 모든 성질이 동일한 수천 개의 액적으로 이루어진다. 액상에 대한 기상의 영향은 액상의 방정식에서 전단응력의 항으로 고려되며, 기상에 대한 액상유동의 영향은 기상의 방정식에서 생성항의 형태로 고려된다. 속도/압력쌍의 해석은 PISO 알고리즘을 사용하여 해석된다.

일반좌표계(ξ^i)로 변형된 기상의 전달방정식은 다음과 같이 일반텐서표시법과 함께 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta\rho\Phi) + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^i} (\theta\rho U^i \Phi - \frac{\theta\Gamma_{\phi} d_{ij}}{\sqrt{g}} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi^j}) = \theta S_{\phi} + S_{\phi}^d \quad (1)$$

여기에서 U^i 는 수직유동항, u^i 는 속도벡터 \vec{V} 의 직교좌표성분이며, P_{ij} 는 면적벡터의 직교좌표성분이다.

액적의 질량전달방정식(droplet mass transfer)은 El Watkil 등[6]에 의하여 실험과 이론에 의하여 제시된 식(2)를 사용한다.

$$\frac{dm_d}{dt} = -\pi D_d D \frac{P_t}{R_f T_m} \ln \frac{P_t - P_{v,\alpha}}{P_t - P_{v,s}} Sh \quad (2)$$

여기서 P_t 는 전체압력, D 는 확산(diffusivity), R_f 는 증발연료의 기체상수, T_m 은 평균액적표면온도, $P_{v,\alpha}$, $P_{v,s}$ 는 각각 자유공간 및 액적표면에서의 증발연료압력(partial pressure of the fuel vapour far from or at the surface of

droplet) 그리고 Sh 는 셔우드수를 나타낸다.

액적간의 충돌 및 분열현상은 각각 O'Rourke와 Bracco[7], Reitz와 Diwaker[8]에 의하여 제시된 모델을 사용한다.

3. 계산 조건

본 계산은 분무 및 증발연료를 실험적으로 분석한 Suzuki 등[9]의 실험조건을 기준으로 한다. 먼저 본 계산에 사용된 모델을 평가하기 위하여 그들의 실험결과와 동일한 조건에서 계산결과를 비교 검토하며, 분사압력의 효과를 비교 분석하기 위하여 10 MPa에서 고압분사시스템의 한계값인 200 MPa까지를 계산조건으로 선정하였다. 계산격자의 효과를 제외하기 위하여 기준조건에서 사용한 격자를 모든 경우에 동일하게 적용하였으며, 분사율을 동일하게 유지하기 위하여 다음 식으로부터 분공의 크기를 결정하였다.

$$\dot{Q}_{inj} = A \cdot U_{inj} = constant \quad (3)$$

여기에서 \dot{Q}_{inj} 은 분사율을 나타내며, 분공면적(A)과 분사평균속도(U_{inj})는 다음과 같이 주어진다.

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (4)$$

$$U_{inj} = C_d \sqrt{\frac{2(P_{inj} - P_{trap})}{\rho_d}} \quad (5)$$

이상의 결과로부터 계산조건은 Table 1과 같이 주어진다.

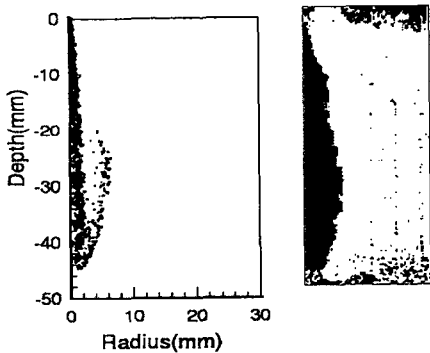
Table 1 Test cases

	Base	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Inj. press.(MPa)	19.6	10	20	30	50	100	200
Nozzle hole dia.(mm)	0.25	0.310	0.249	0.222	0.193	0.161	0.135
Gas press.(MPa)	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
Gas temp.(K)	773	773	773	773	773	773	773

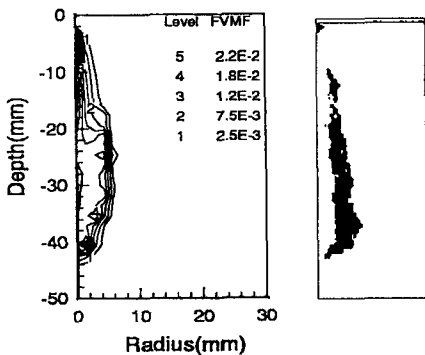
4. 결과 및 고찰

4.1 실험결과와의 비교

Fig. 1은 분사후 1.2msec에서 계산에 의한 액적분포와 가시화 실험에 의한 형상[9]을 보여 준다. 계산에 의한 액적분포는 분무축을 중심으로한 단면에서의 분포로서, 분무선단에서는 공기저항에 의한 등근형태를 하면서 분무주위의 소용돌이 유동의 영향으로 위쪽 밖으로 분산되는 분무형상을 보여 준다. 가시화에 의한 분무 실험결과는 내부액적들의 상세한 형상을 보여 주지는 못하지만 계산결과와 유사한 형태를 하고 있음을 알 수 있다. Fig. 2는 Fig. 1과 같이 분사후 1.2msec에서 계산에 의한 증발연료분포와 가시화 실험에 의한 형상[9]을 보여 준다.



(a) (b)
Fig. 1 Comparison of spray shape
(a) Calculation
(b) Photo of Suzuki [9]

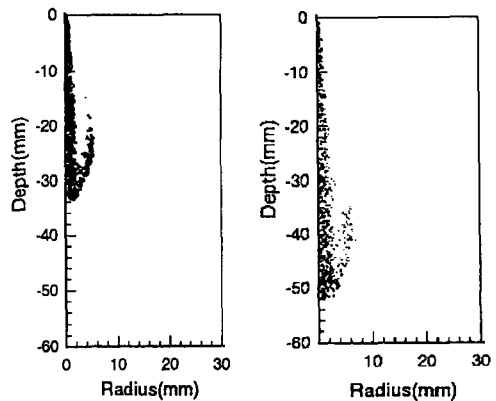


(a) (b)
Fig. 2 Comparison of vapour fraction
(a) Calculation
(b) Photo of Suzuki [9]

계산의 경우 액적분포의 경계와 유사한 형태를 하고 있으며, 가시화 결과는 분무선단부분에 좀 더 넓게 퍼짐을 보여주지만, 전체적으로는 계산결과와 유사함을 알 수 있다.

4.2 분무형상

Fig. 3은 분사후 1.0msec에서 압력이 가장 낮은 Case 1과 가장 높은 Case 6의 액적분포를 보여 주며, Fig. 4는 모든 시간에서의 분무형상을 보여 준다. 분사압력이 가장 낮은 Case 1의 경우 분무의 진행거리가 가장 작음을 알 수 있으며, 액적들의 밀도가 분무축을 중심으로 높게



(a) (b)
Fig. 3 Comparison of spray shape
(a) Case 1
(b) Case 6

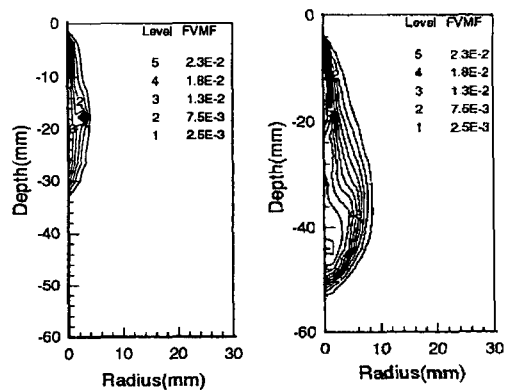


Fig. 5 Comparison of vapour fraction
(a) Case 1
(b) Case 6

나타남을 알 수 있다. 분사압력이 증가하면서 분무거리가 점점 증가됨을 보여 주며 액적밀도 역시 낮아짐을 보여 준다. 하지만 압력의 급격한 증가와 비교할 때 분무거리의 증가는 둔화됨을 알 수 있다. 분무형상은 모든 경우에 있어서 유사함을 알 수 있지만 압력의 증가와 함께 분무선단에서 위쪽 밖으로 분산되는 액적들이 현저하게 줄어들음을 보여 준다. 이는 고압분사의 경우 액적의 분사속도가 증가함으로써 많은 액적들이 활발한 주위공기유동과의 상호작용에

의하여 쉽게 증발되었음을 말해준다.

4.3 증발연료 분포

연료증발분포를 나타내는 Fig. 5, 6은 각각 1.0msec에서 Case 1과 Case 6의 형상과 시간 진행에 따른 분포형상변화를 보여 준다. 저압분사인 Case 1의 경우에는 분무형상에서 알 수 있는 것처럼 분무축을 중심으로 좁게 분포함을 보여 준다. 압력이 증가함에 따라 증발연료가 넓게 분포함을 보여 준다. 액적분포에서는 폭발

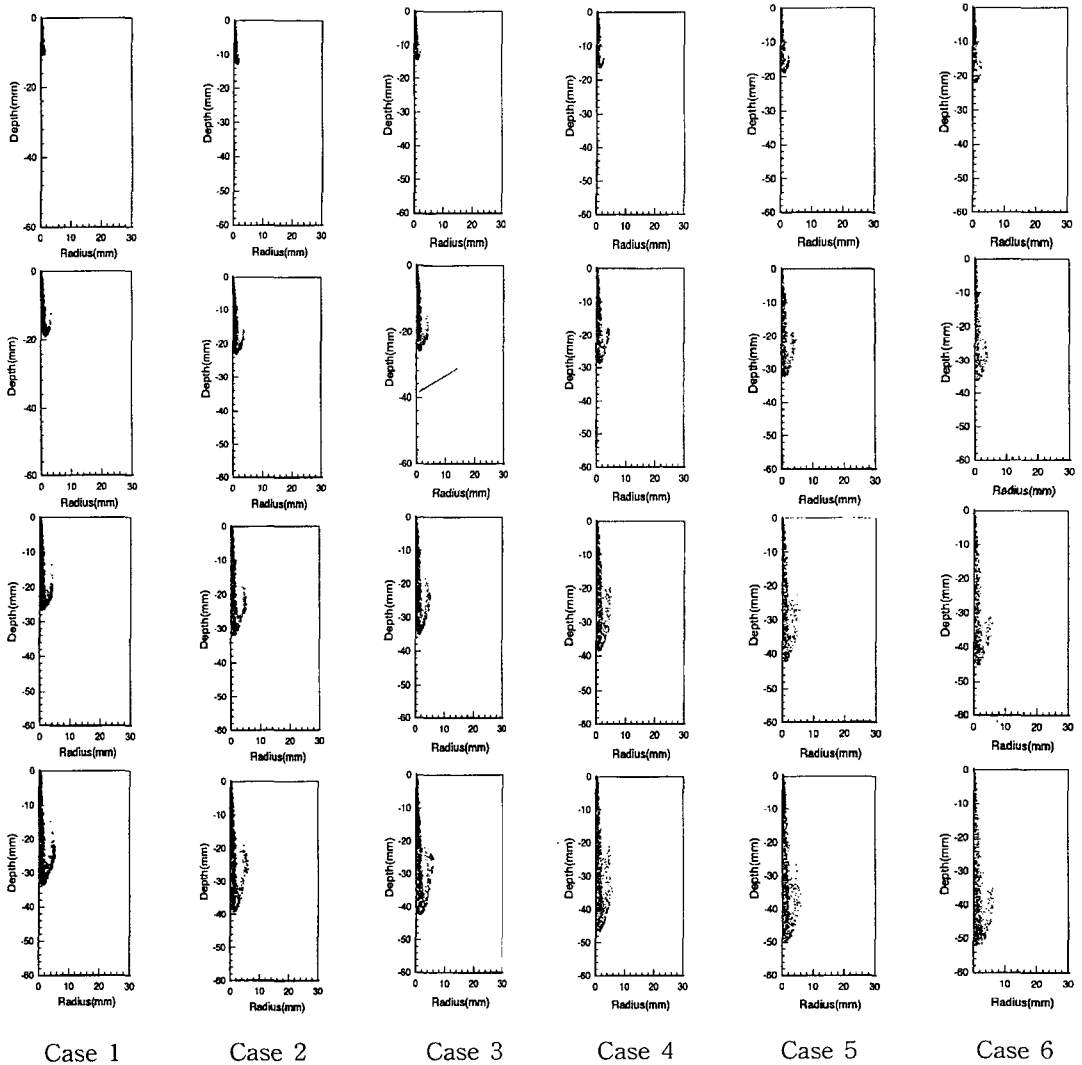


Fig. 4 Comparison of spray development at times of 0.25, 0.5, 0.75, 1.0msec from injection

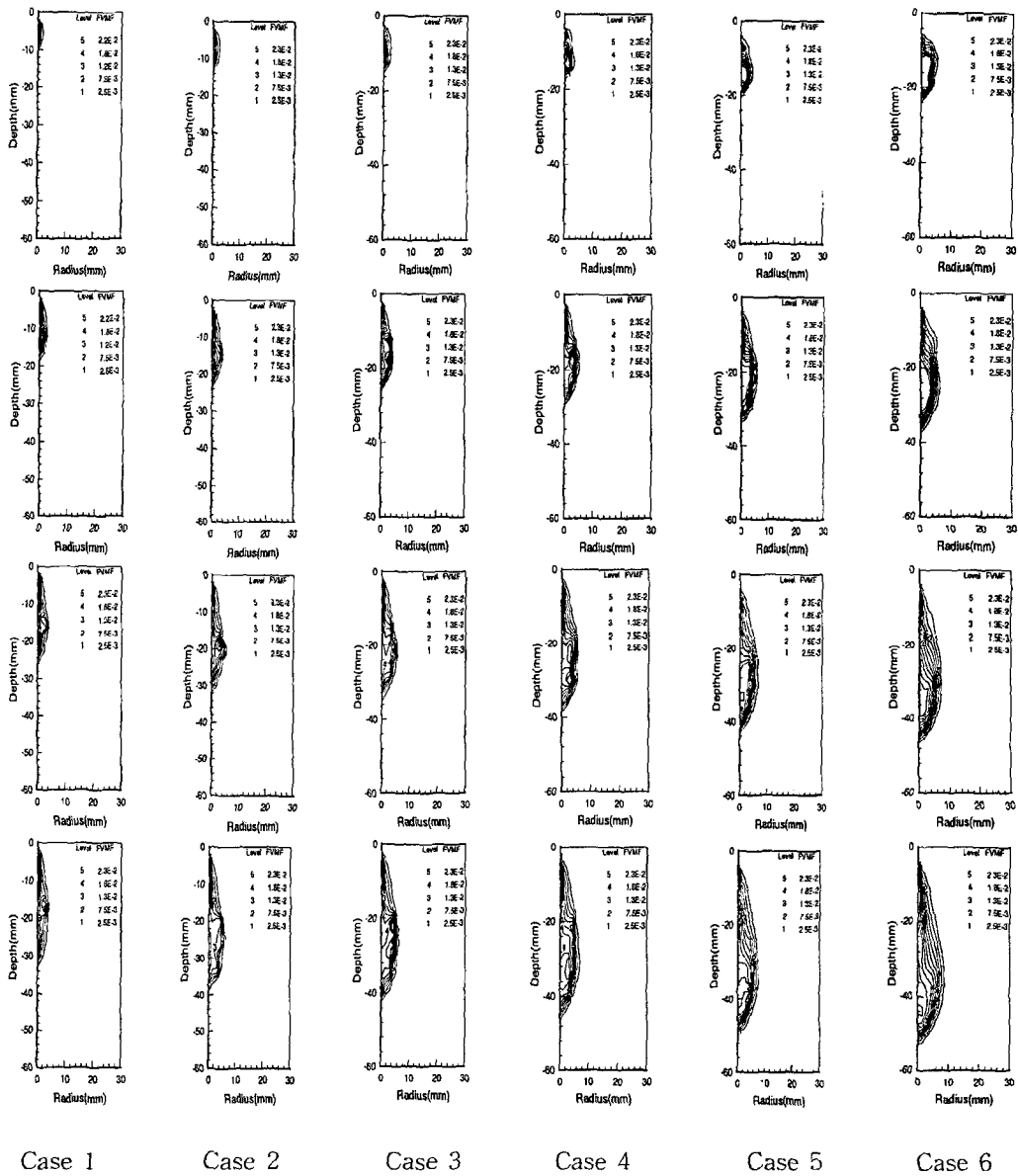


Fig. 6 Comparison of vapour development at times of 0.25, 0.5, 0.75, 1.0msec from injection

향의 퍼짐이 압력증가에 크게 영향을 받지 않지만, 증발분포에서는 압력증가와 함께 크게 증가됨을 보여 준다. 이는 폭방향으로 분사되는 액적들은 대부분 크기가 작으며 주위의 공기유동과 활발하게 상호작용하게 되기 때문에 쉽게 증발되어 액적들은 사라지게 되고 대신 증발분포는 넓게 됨을 의미한다.

4.4 유동특성

Fig. 7는 분사후 1.0msec에서의 공기유동을 보여 준다. 액적분포나 증발분포에서 보여준 것처럼 유동 역시 저압분사의 경우 분무축 근처에서만 분포되며, 고압분사의 경우는 보다 넓게 분포하며 분무선단에서 폭방향으로 소용돌이 유동을 나타낸다.

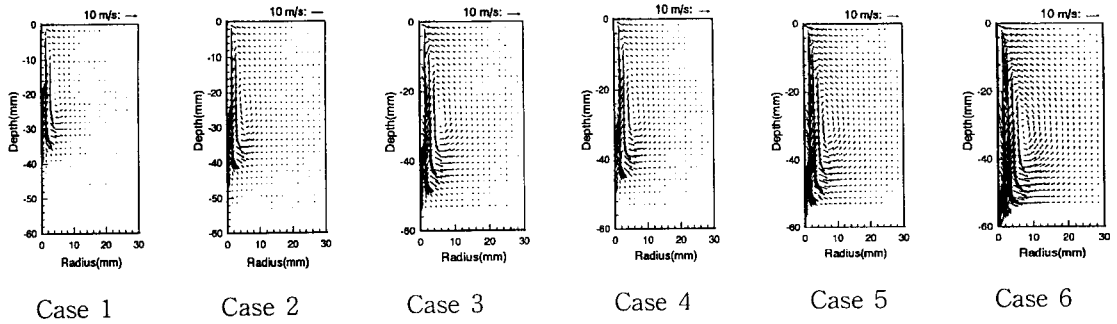


Fig. 7 Comparison of gas flows at 1.0msec from injection start

4.5 분무 진행거리 및 퍼짐

Fig. 8, 9은 각각 분사후 시간에 대한 분무선 단거리 및 분무폭의 변화를 나타낸다. 저압분사의 경우 분무관통거리가 시간의 증가와 함께 비례적으로 증가함을 보여 주지만, 고압분사의 경우에는 시간의 증가와 함께 크게 둔화됨을 보여 준다. 하지만 압력증가와 함께 모든 시간 영역에서 거리가 증가함을 알 수 있다. 한편 분무폭은 분사압력증가에 따라 전반적으로 증가하지만 그 정도가 작고 시간대에 따라 감소하기도 한다. 이는 앞서서도 언급하였지만 분무축 밖으로 분산되는 액적이 압력증가와 함께 많이 증발되기 때문으로 사료된다.

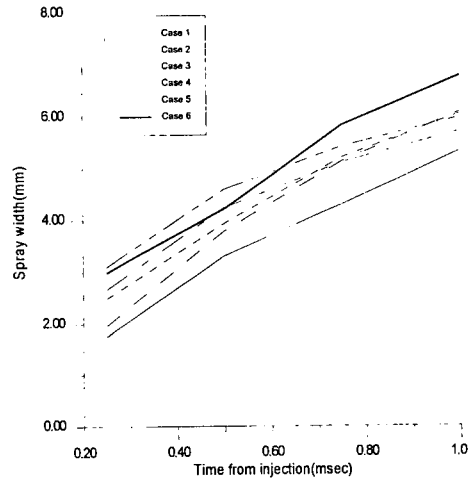


Fig. 9 Comparison of spray width

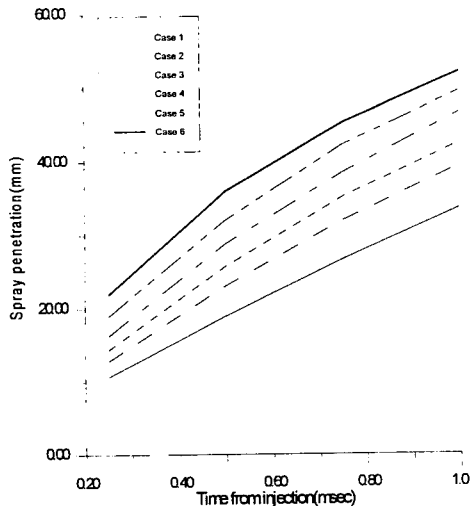


Fig. 8 Comparison of spray penetration

4.6 액적크기 및 증발

Fig. 10, 11는 각각 분사후 시간에 대한 액적 평균직경(SMD)와 연료증발량을 보여 준다. SMD는 압력증가와 함께 감소함을 보여 주는데, 이는 분사압력증가와 함께 액적이 넓은 범위에 분포되어 액적간의 충돌에 의한 응결(coalescence)기회를 감소시키며, 동시에 주위공기유동의 활성화로 증발이 가속화되기 때문으로 생각된다. 증발량은 0.1msec이전에는 거의 없지만 이후 시간증가와 함께 계속 증가한다. 또한 분사압력의 증가와 함께 증가된다.

연소에 가장 중요한 영향을 미치는 분무증발 현상이 분사압력과 어떠한 수학적 관계에 있는지를 살펴본다. 분무증발분은 초기변화를 제외하면 시간변화와 비례관계에 있으며, 다음 식으

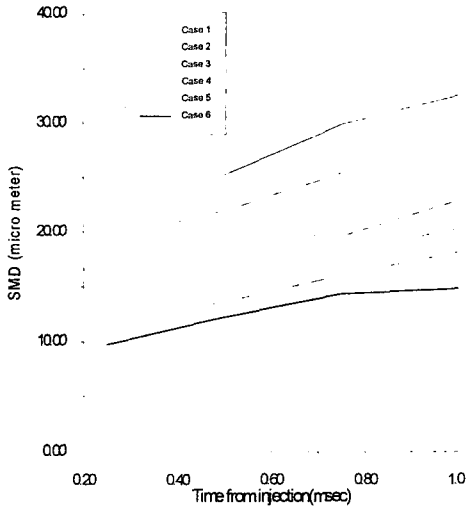


Fig. 10 Comparison of SMD

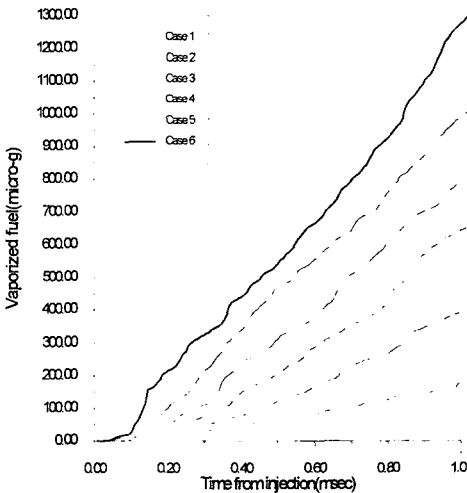


Fig. 11 Comparison of vaporized fuel

로 표현된다.

$$F_{vapor} = a(P)t \quad (6)$$

여기에서 F_{vapor} 는 연료증발량(단위: μg), t 는 분사후시간(단위: msec)이며, $a(P)$ 는 경사각에 대한 tangent값으로 압력의 함수로서 Fig. 12와 같이 나타나며, 이 그래프는 다음함수로서 주어진다.

$$a(p) = -597.8 + 396.07 \ln P \quad (7)$$

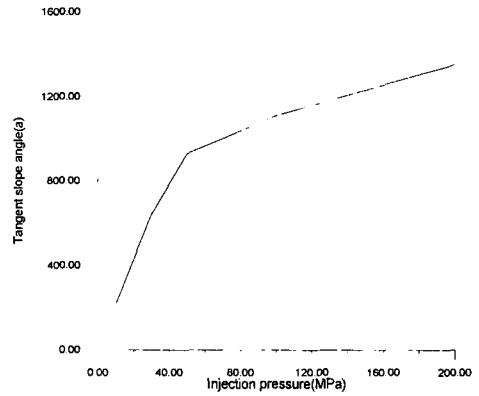


Fig. 12 a-value vs. injection pressure with pressure variation

따라서 연료증발분과 분사압력과의 관계는 식 (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$F_{vapor} = [-597.8 + 396.07 \ln P]t \quad (8)$$

4.7 분사압력의 효과

Fig. 13은 분사시작후 1.0msec에서의 압력변화에 따른 분무특성을 보여 준다. 분무폭은 큰 변화가 없었으며, 액적평균직경(SMD)은 감소하고 분무진행거리와 증발량은 증가함을 나타내었다. 분사압력 30MPa까지는 압력증가와 함께 비례적인 큰 변화를 보여주고 있지만, 이후에는 변화량이 둔감되는 것을 알 수 있다.

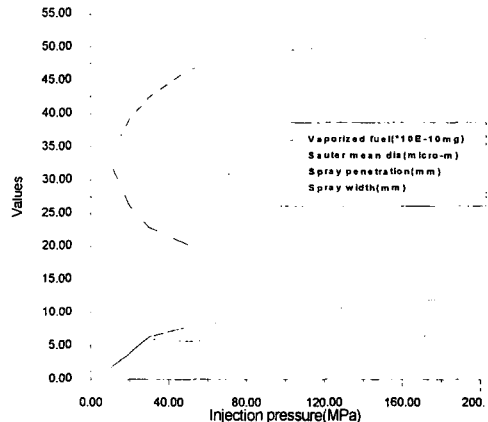


Fig. 13 Spray characteristics vs. inj. pressure

5. 결론

분사압력변화가 분무특성에 미치는 영향은 다음과 같이 정리된다.

▶저압분사의 경우에는 분무액적들이 분무축을 중심으로 밀도 높게 분포됨으로서 액적간의 응결에 의한 큰액적들을 생성하며 밖으로 분산되지 못한다. 한편 고압분사의 경우 주위공기유동의 활성화와 함께 분무액적들이 더욱 멀리 넓게 분포함으로써 액적크기를 작게 하며 많은 증발량을 가져온다.

▶압력의 증가와 함께 분무진행거리와 증발량이 증가되며, 액적평균직경은 감소함을 나타내었고, 분무폭은 큰 변화가 없었다.

▶압력증가에 따른 분무특성변화는 저압영역에서는 크게, 고압영역에서는 둔화되었다.

이상의 분석결과들로 부터 디젤분무의 고압화는 디젤기관의 연소효율향상을 가져올 것으로 예측된다. 하지만, 압력의 증가와 더불어 그 효과가 둔감함을 생각할 때, 고압화를 위하여 분사계에 부가되는 에너지소모량을 고려하여 전체 에너지효율을 최대로 할 수 있는 적절한 분사압력의 선택이 요구된다.

system ECD-U2 for diesel engines", SAE paper 910252 (1991).

- [6] El Watkil, M. M., Uyehara, O. A. and Myers, P. S., "Atomization of multi fuel sprays", ICLASS-82, No. 9.3 (1982), pp.237-244.
- [7] O'Rourke, P. J. and Brocco F. V., "Modelling of drop interactions in thick sprays and a comparison with experiment", In Stratified Charge Automotive Engine Conf. I.Mech.E (1980).
- [8] Reitz, R. D. and Kiwakar, R., "Effect of drop break-up on fuel sprays", SAE 860469 (1986).
- [9] Suzuki, M., Nishida, K. and Hiroyasu, H., "Simultaneous concentration measurement of vapour and liquid in an evaporating diesel spray", SAE paper 930863 (1993).

참고문헌

- [1] Minami, T., Shintani, I., Tsujimura, K. and Suzuki, T., "Analysis of fuel characteristics and combustion phenomena under high pressure fuel injection", SAE paper 900438 (1990).
- [2] Nishida, M., Nakahira, T., Komori, M. and Tsujimura, K., "Observation of high pressure fuel spray with laser light sheet method", SAE paper 920459 (1992).
- [3] Nishizawa, K. et al, "A new concept of diesel fuel injection timing and injection rate control system", SAE paper 870434 (1987).
- [4] Beck, N. J. et al, "Direct digital control of electronic unit injectors", SAE paper 840273 (1984).
- [5] Miyaki, M. et al, "Development of new electronically controlled fuel injection