

# 분사압력변화가 분무특성에 미치는 영향에 관한 수치적 고찰

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

박 권 하<sup>1)</sup>

K. Park

This paper addresses to the injection pressure effect on the diesel spray. The injection pressure is varied from 10MPa, in general system, upto 200MPa, in high pressured system in order to understand the effect.

The gas phase is modelled in terms of 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.

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

## 1. 서 론

디젤엔진은 우리나라 수송기관의 30%를 넘고 있으며, 대기오염의 주요 원인이 되고 있다. 대표적인 유해물질은 NO<sub>x</sub>, HC, CO 및 입자상물질이지만, 가솔린기관에서 발생하지 않는 입자상물질은 암발생원인이 되고 있으며 심리적으로도 좋지 못한 영향을 주기 때문에 디젤기관에서 가장 관심을 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]

본 논문에서는 고압분사시의 분무진행, 공기와의 혼합, 증발을 등을 검토하기 위하여, 분사압력을 변화시키면서 그들의 특성을 분석하고자 한다.

## 2. 수학적모델

기상의 유동에 대하여는 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식 및 연료증발방정식이 Eulerian 형으로 주어지며, 고압축성유동에 대한  $k-\epsilon$ 모델이 적용된다. 액상의 유동에 대하여는 움직이는 격자, 운동량, 질량 및 에너지방정식은 Lagrangian형으로 쓰여지며, 각 액적군은 크기, 온도, 속도 등 특성이 동일한 수천 개의 액적으로 이루어졌다고 가정한다. 액상에 대한 기상의 영향은 액상의 방정식에서 전단응력의 항으로 고려되며, 기상에 대한 액상유동의 영향은 기상의 방정식에서 생성항의 형태로 고려된다. 속도/압력쌍의 해석은 PISO 알고리즘을 사용하였다.

일반좌표계( $\xi^i$ )로 변형된 기상의 전달방정식은 다음과 같이 일반텐서표시법과 함께 표현된다.

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

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

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

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

1) 한국기계연구원 동력시스템연구부

여기서  $P_i$ 는 전체압력,  $D$ 는 발산(diffusivity),  $R_f$ 는 증발연료의 기체상수,  $T_m$ 은 평균액적표면 온도,  $P_{v,\infty}, P_{v,s}$ 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 사용하였다.

### 3. 계산 조건

본 계산은 Suzuki 등[9]에 의하여 실험에 사용된 분사기의 분사조건을 기준으로 하였다. 기준조건에서 계산결과와 실험결과를 비교한 후, 압력을 기준보다 낮은 10MPa에서 현재 고압분사시스템에 사용을 고려하고 있는 한계값인 200MPa까지 변화시키면서 계산하였다. 동일한 비교를 위하여 동일한 계산격자를 사용하였으며, 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. pess.(MPa)	19.6	10	20	30	50	100	200
Nozzle hole dia.(mm)	0.25	0.3096	0.2485	0.2215	0.1929	0.1610	0.1349
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

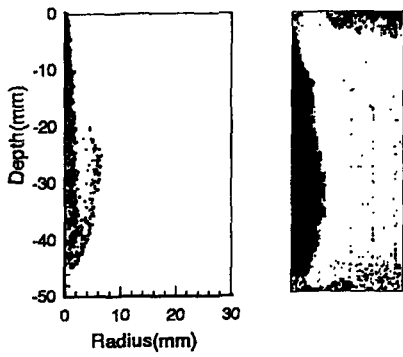
#### 4-1. 실험결과와의 비교

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 분무실험결과 역시 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. 계산의 경우 액적분포의 경계와 유사한 형태하고 있으며, 가시화 결과는 분무선단부분에 좀더 넓게 퍼짐을 보여주지만, 전체적으로는 계산결과와 유사함을 알 수 있다.

#### 4-2. 분무형상

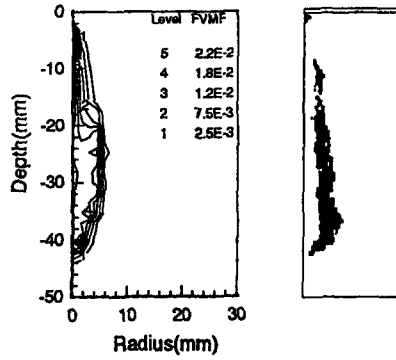
Fig. 3은 시간에 따른 분무형상을 보여 준다. 분사압력이 가장 작은 Case 1의 경우 분무의 진행거리가 가장 적음을 알 수 있으며, 액적들의 밀도가 분무축을 중심으로 높게 나타남을 알 수 있다. 분사압력이 증가하면서 분무거리가 점점 증가됨을 보여 주며 액적밀도 역시 낮아짐을 보여 준

다. 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 많은 액적들이 활발한 주위공기유동과의 상호작용으로 증발되어 사라졌음을 말해준다.



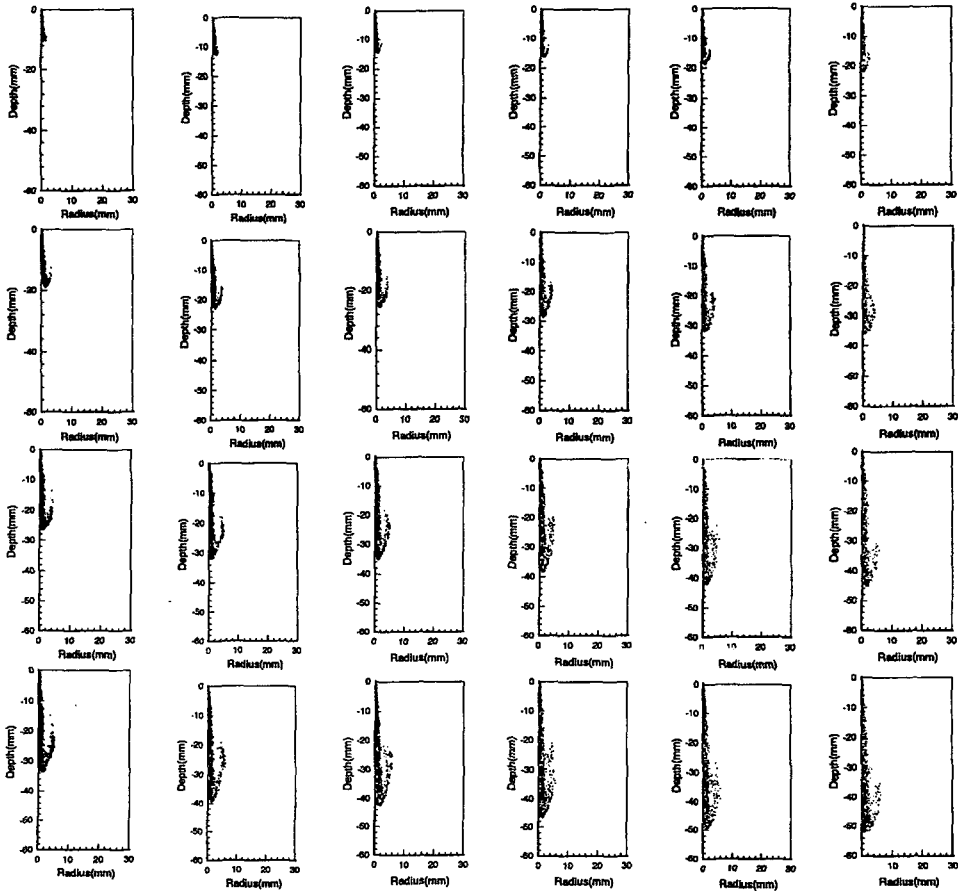
(a) (b)

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]



Case 1 Case 2 Case 3 Case 4 Case 5 Case 6  
Fig. 3 Comparison of spray development at times of 0.25, 0.5, 0.75, 1.0msec from injection

#### 4-3. 증발연료 분포

연료증발분포를 나타내는 Fig. 4는 압력증가에 따른 영향을 뚜렷하게 보여 준다. 저압분사인 Case 1의 경우에는 분무형상에서 알 수 있는 것처럼 분무축을 중심으로 좁게 분포함을 보여 준다. 압력이 증가함에 따라 증발연료가 넓게 분포함을 보여 주는 데, 이는 액적분포에서 폭방향의 액적들이 고압분사에서는 주위공기의 유동활성화에 의하여 대부분 증발하였기 때문으로 사료된다.

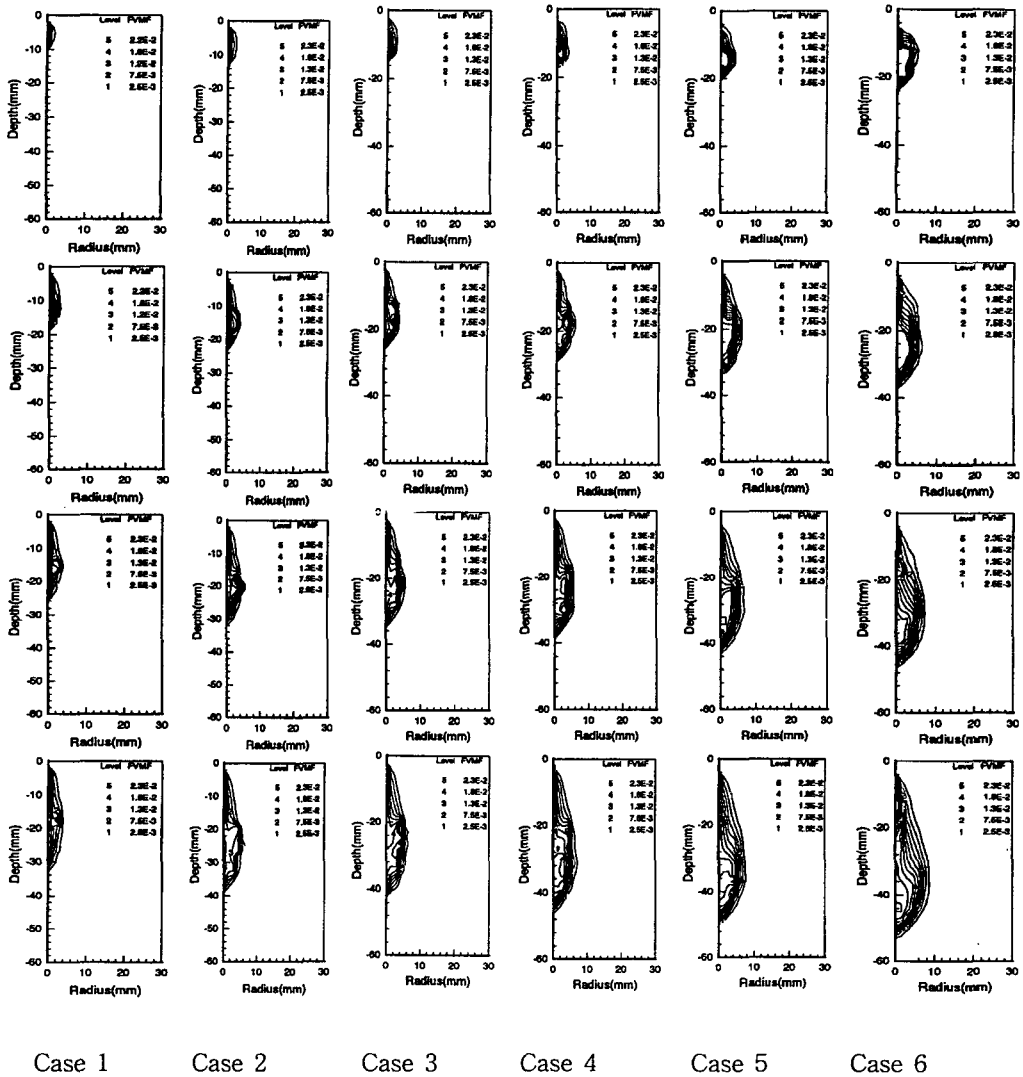


Fig. 4 Comparison of vapour development at times of 0.25, 0.5, 0.75, 1.0msec from injection

#### 4-4. 유동특성

Fig. 5는 분사후 1.0msec에서의 공기유동을 보여 준다. 액적분포나 증발분포에서 보여준 것처럼 유동 역시 저압분사의 경우 분무축 근처에서만 분포되며, 고압분사의 경우는 보다 넓게 분포하며 분무선단에서 밖으로 강한 소용돌이를 나타낸다.

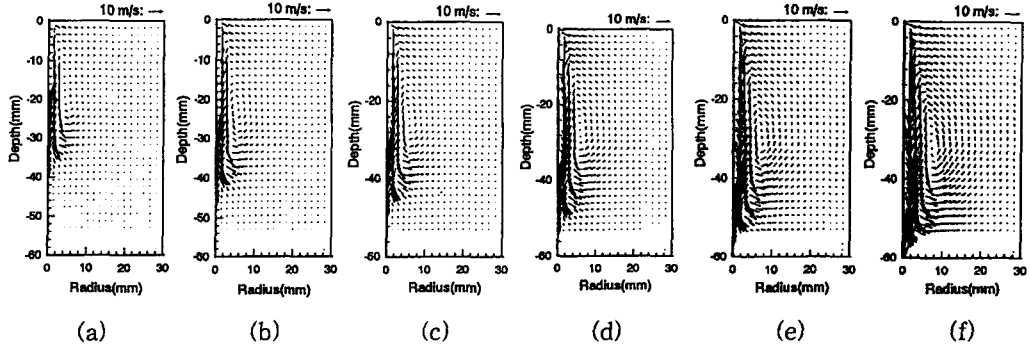


Fig. 5 Comparison of gas flows at 1.0msec from injection start  
 (a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3  
 (d) Case 4 (e) Case 5 (f) Case 6

#### 4-5. 분무 진행거리 및 퍼짐

Fig. 6, 7은 각각 분사후 시간에 대한 분무선단거리 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 시간영역에서 거리가 증가함을 알 수 있다. 한편 분무폭은 분사압력증가에 따라 전반적으로 증가하지만 그 정도가 작고 시간에 따라 감소하기도 한다. 이는 앞에서 언급하였지만 분무축 밖으로 분산되는 연료가 압력 증가와 함께 많이 증발되기 때문으로 사료된다.

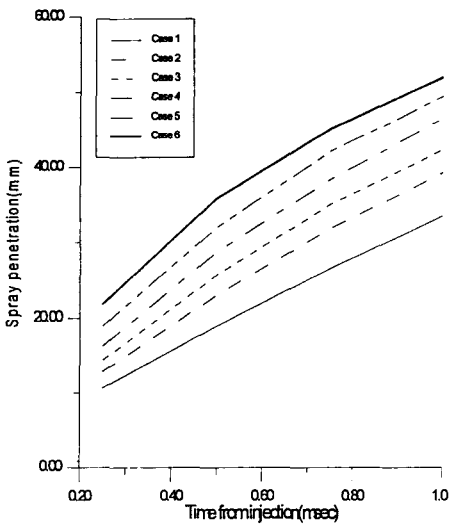


Fig. 6 Comparison of spray penetration

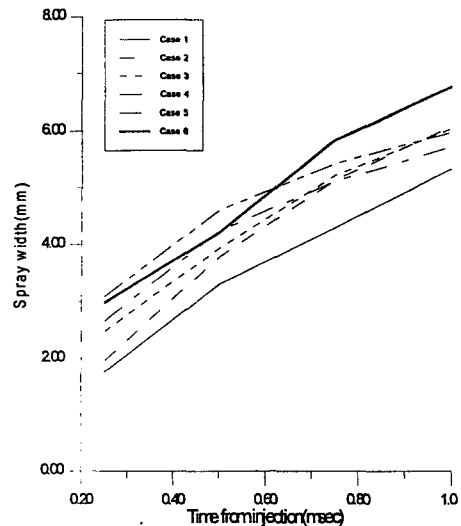


Fig. 7 Comparison of spray width

#### 4-6. 액적크기 및 증발

Fig. 8, 9는 각각 분사후 시간에 대한 액적평균직경(SMD)와 연료증발량을 보여 준다. SMD는 압력증가와 함께 감소함을 보여 주는데, 이는 분사압력증가와 함께 액적의 넓은 분포와 동시에 주

위공기유동의 활성화로 액적간의 응결(coalescence)기회를 감소하며 증발을 가속화하기 때문으로 생각된다. 증발량은 0.1msec이전에는 거의 없지만 이후 시간증가와 함께 계속 증가한다. 또한 분사압력의 증가와 함께 증가된다.

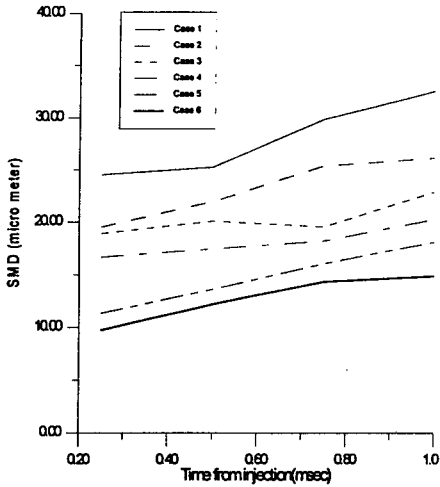


Fig. 8 Comparison of SMD

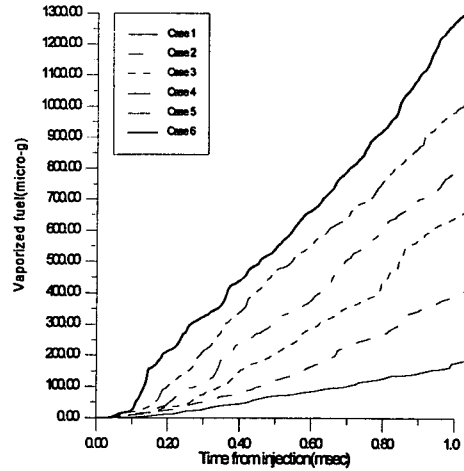


Fig. 9 Comparison of vaporized fuel

분무증발분은 초기변화를 제외하면, 시간에 따른 선형적인 비례관계에 있으며 다음 식으로 표현된다.

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

여기에서  $F_{vapor}$ 는 연료증발량(단위:  $\mu g$ ),  $t$ 는 분사후시간(단위: msec)이며,  $a(P)$ 는 경사각에 대한 tangent값으로 압력의 함수로서 Fig. 10과 같이 나타나며, 이 그래프는 다음함수로서 주어진다.

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

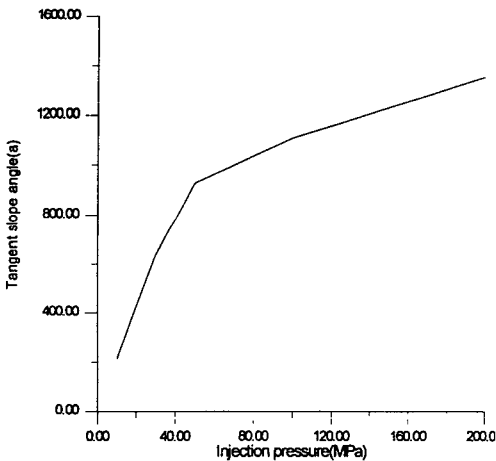


Fig. 10 a-value vs. injection pressure

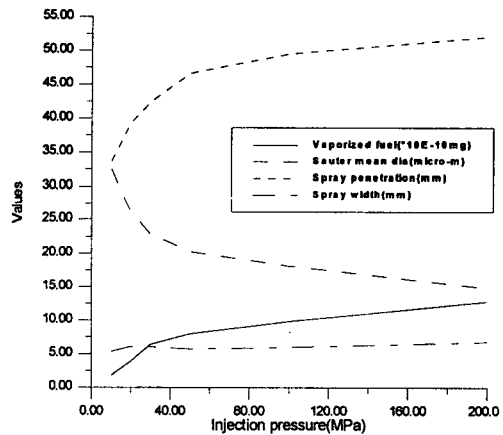


Fig. 11 Spray characteristics with pressure variation

#### 4-7. 분사압력의 효과

Fig. 11은 분사시작후 1.0msec에서의 압력변화에 따른 분무특성을 보여 준다. 분무폭은 큰 변화가 없었으며, 액적평균직경(SMD)는 감소하고 분무진행거리와 증발량은 증가함을 나타내었다. 분

사압력 30MPa까지는 압력증가와 함께 큰 변화를 보여주고 있지만, 이후에는 변화량이 둔감되는 것을 알 수 있다.

## 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 추가되는 에너지소모량을 고려하여 전체 에너지효율을 최대로 할 수 있는 적절한 분사압력의 선택이 요구된다.

## 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 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, pp.237-244, 1982.
- [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.