

## 디젤분무의 모델에서 액적의 형상 및 수밀도의 영향에 관한 연구

### The Effects of Initial Droplet Shape and Number Density on Modeling of Non-evaporating Diesel Sprays

원영호\*  
Y. H. Won

#### Abstract

A number of droplet breakup models have been developed to predict the diesel spray. The capabilities of droplet deformation and breakup models such as TAB, ETAB, DDB and APTAB models are evaluated in modeling the non-evaporating diesel sprays injected into atmosphere. New methods are also suggested that take into account the non-spherical shape of droplets and the reduced drag force by the presence of neighbouring droplets.

The KIVA calculations with standard ETAB, DDB, and APTAB models predict well the spray tip penetrations of the experiment, but overestimate the Sauter Mean Diameter(SMD) of droplets. The calculation with non-spherical droplets injected from the nozzle shows very similar results to the calculation with spherical droplets. The drag coefficient which is linearly increased with the time after start of injection during the breakup time gives the smaller SMD that agrees well with the experimental result.

주요기술용어 : Diesel spray(디젤분무), Spray Modeling(분무모델), Droplet breakup(액적분열)

#### 1. 서론

디젤엔진의 연료분무의 특성은 노즐내의 유동 조건, 노즐내의 공동, 주위가스의 조건 등에 영향을 받으므로, 해석하기에 아주 복잡한 현상이다<sup>(1)</sup>. 이러한 디젤분무를 이해하기 위해서는 실험과 아울러 이론적 모델 해석이 필요하다. 디젤분무를 이론적으로 해석하기 위한 액적 분열 모

델은 여러 종류가 제안되어 있다. 그 중에서 액적변형 분열모델은 노즐 분출공(噴出孔) 직경과 같은 크기의 구형 액적이 공기 중에 분출되어, 주위공기의 공기역학적 항력에 의하여 변형되고, 이 변형 값이 한계 값을 초과하면 분열되어 보다 작은 액적으로 미립화 되는 것으로 가정한다. TAB(Taylor Analogy Breakup) 모델<sup>(2)</sup>과 DDB(Droplet Deformation and Breakup) 모델<sup>(3)</sup>이 이에 속한다. 그러나 TAB 모델을 현재 디젤엔진에서 사용되는 1000 기압 정도의 초고압 연료분무에 적용하면, 액적이 지나치게 빨리 분

\* 정희원, 울산대학교 기계자동차공학부

열하고 또한 분열된 액적의 크기도 지나치게 작아 분무의 관통력 즉 분무선단도달거리를 실험에 비하여 지나치게 작게 예측하는 결점이 있다<sup>(4)</sup>. 이러한 단점을 개선하기 위하여 ETAB<sup>(5)</sup> (Enhanced TAB) 및 APTAB (Aerodynamically Progressed TAB)<sup>(6)</sup> 모델이 개발되어 있다. 이러한 개선모델을 사용하면 제한된 조건에서 실험과 비교적 잘 맞는 결과를 얻을 수 있지만, 광범위한 분사조건에서 만족한 결과를 얻기 위해서 여전히 개선되어야 할 점이 있다고 판단된다.

위의 모델들은 분출공에서 분출되는 액적이 구형이라고 가정하였으나, 실제로는 액주에서 분열되어 순차적으로 액적을 형성하므로 분출시 액적의 형상은 럭비공이나 원반 형상으로 가정하는 것이 타당하다고 판단된다. 또한 액적에 미치는 공기항력을 계산할 때 단일 액적의 항력계수를 사용하였으나 분출공 근처에는 액적의 수밀도가 높아 이들 액적군(液滴群)에서 개개 액적에 미치는 항력계수는 단일 액적의 항력계수보다 작을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 TAB, DDB, ETAB, APTAB 모델에 대하여 분무의 특성을 예측하는 성능을 비교하였다. 또한 분출공에서 분출되는 초기 액적의 형상과 수밀도를 고려하여 액적에 작용하는 항력을 변화시켰을 때 계산결과에 미치는 영향을 검토하였다.

## 2. 수치 모델

### 2.1 DDB와 APTAB 모델에서 분열 후 액적 직경

DDB 와 APTAB 모델에서 모액적(母液滴)의 분열로 생기는 작은 액적의 직경은 다음과 같이 구한다. 모액적이 납작한 원반형태로 변형된 후 작은 조각으로 분열되고, 이 작은 조각이 표면장력으로 다시 구형 액적을 형성한다고 가정하면 에너지 보존식과 질량 보존식을 사용하여 분열 후 액적의 sauter 평균직경, SMD는 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>(7)</sup>.

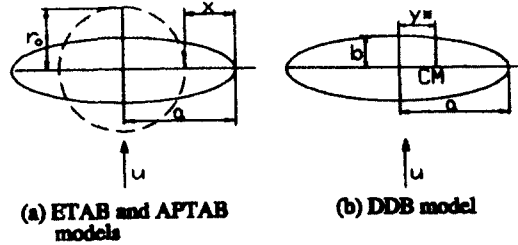


Fig. 1 Droplet deformation

$$SMD = 1.5 \cdot b \quad (1)$$

여기서  $b$  는 원반중심 두께의 1/2 이다.

### 2.2 액적의 형상을 고려한 항력계수 변화

액적이 분위기의 항력에 의하여 구형에서 Fig. 1(a)와 같이 변형될 때 항력계수  $C_D$  는 형상변화에 따른 항력계수의 변화와 투사면적의 변화를 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>(8)</sup>.

$$C_D = C_{D, sphere} \cdot (1 + 2.632y) \cdot (1 + 0.5y)^2 \quad (2)$$

위 식에서  $y = \frac{2x}{r_0}$  이고, 우변의 두 번째 항은 형상변화에 따른 항력계수의 변화를 의미하며, 세 번째 항은 투사면적의 변화를 고려한 것이다. 한편 식(2)는 Fig. 1(b)의 DDB 모델에서는 다음과 같이 된다<sup>(3)</sup>.

$$C_D = C_{D, sphere} \cdot (3.95\pi y_1 - 4.264) \cdot \left(\frac{3\pi y_1}{4}\right)^2 \quad (3)$$

여기서  $y_1 = \frac{y}{r_0}$  이고,  $C_{D, sphere}$  는 구의 항력계수로 다음과 같이 주어진다<sup>(9)</sup>.

$$C_{D, sphere} = \begin{cases} \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{1}{6} Re^{2/3}\right), & Re \leq 1000 \\ 0.424, & Re > 1000 \end{cases} \quad (4)$$

### 2.3 수밀도를 고려한 항력 변화

위에서 언급한 액적의 항력은 유동장에 놓여

진 단일 액적의 항력계수를 사용하고 있다. 그러나 분출공 근처와 같이 액적의 수밀도가 높은 영역에는 주위 액적의 영향에 의해 개개의 액적이 받는 항력은 작아진다. 이때 액적의 항력은 액적들 사이의 평균거리,  $x$  에 따라 증가하는 것으로 가정한다.  $x$  는 Habchi<sup>(10)</sup>가 제안한 방법과 액적군(parcel)이 분출 후 시간,  $t$  에 비례하여 확산되는 것으로 고려하여  $x$ 를  $t$  에 비례시키는 방법을 사용하였다. 첫 번째 방법은 직경,  $d$  인 액적들이 서로  $x$  의 거리를 두고 분포하는 경우  $x/d > 50$  이면 액적들은 서로에게 영향을 주지 않는다. 따라서 주위 액적을 고려한 수정된 항력,  $C_{D,c}$  는 다음과 같이 된다.

$$C_{D,c} = C_D \cdot \left(\frac{x}{d}\right) \cdot \frac{1}{50} \quad \text{if } \frac{x}{d} \leq 50 \quad (5)$$

위 식에서  $x/d$  의 계산은 계산격자의 크기와 계산 액적군의 개수에 따라 영향을 받는다. 본 연구에서는 Habchi 가 제안한 방법을 사용한다.

두 번째 방법은 액적이 분출공에서 분출 후 주위 액적의 영향에서 완전히 독립적이 될 때까지의 시간을 실험에서 정의하는 액적 분열시간,  $t_{br}$  로 간주하고<sup>(11)</sup>, 분출 후 경과시간,  $t$  가 액적분열시간 전까지는 항력,  $C_{D,c}$  는  $t$  에 비례하는 것으로 가정하고 다음 식으로 나타낸다.

$$C_{D,c} = C_D \frac{t}{t_{br}} \quad \text{if } t \leq t_{br} \quad (6)$$

$C_D$  는 단일 액적의 항력계수이고,  $t_{br}$  은 Hiroyasu<sup>(11)</sup>의 실험에 의하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{br} = 57.2 \frac{\rho_l}{\sqrt{\rho_g}} \frac{r_n}{\sqrt{P_{ini}}} \quad (7)$$

여기서  $r_n$  은 분출공의 반경이고,  $P_{ini}$  는 분사 압력으로 단위는 Pa 이다. 그러나 Hiroyasu의 결과는 연속분사를 대상으로 얻어진 것이며, 본 연구와 같이 간헐분사인 경우는 식(7)에서 얻은

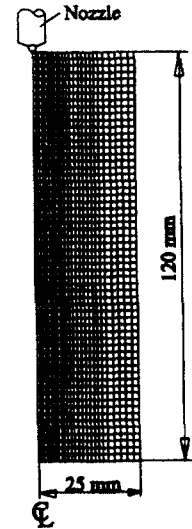


Fig. 2 Computational grid

값의 1/2 정도이다<sup>(12)</sup>.

### 3. 수치계산 방법 및 조건

#### 3.1 수치계산 방법

수치계산은 디젤분무연소 해석코드인 KIVA-II를 사용하였다<sup>(9)</sup>. 이 코드에서 계산결과가 노즐에서 분출되는 액적군(parcel) 개수에 영향을 받는다. 기존 연구들에 의하면 액적의 parcel 수가 2000 ~ 4000 개 일 때 계산 값이 실험과 잘 일치한다고 보고되고 있어 본 연구에서 3000 개를 사용하였다<sup>(13)</sup>. 유동계산 시 난류모델은  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다. 액적의 상호 충돌에 의한 액적의 합체도 고려하였다.

#### 3.2 계산격자

계산영역은 축 대칭으로 가정하고 분무의 축 방향으로 120 mm 이고, 반경방향으로 25 mm이다. 계산격자의 크기는 계산결과에 영향을 미친다. 노<sup>(14)</sup> 등에 의하면 축 방향으로 격자간격은 2 mm, 반경방향으로는 중심 축 근처에 조밀하게 할 때 양호한 결과를 얻고 있다. 본 연구에서도 이러한 격자 형태를 사용하였으며, Fig. 2 에 격자형태를 나타내었다. 격자 수는 축 방향으로

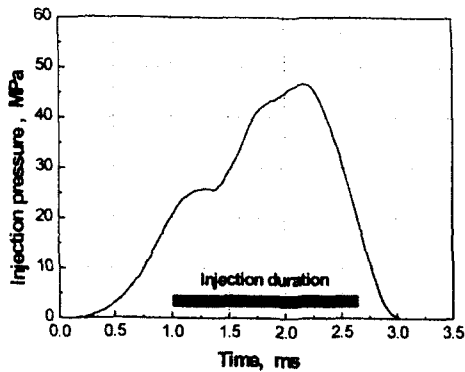


Fig. 3 Injection pressure

60 개, 반경방향으로 25 개이다. 이때 중심축 근처의 조밀한 격자의 크기는 0.75 x 2 mm 이다. 그림에서 계산영역의 중심축을 제외한 상, 하면과 우측면은 고체 경계면으로 벽면처 유동은 난류 벽면함수를 사용하였다.

#### 4. 실험

계산결과와 비교하기 위하여 분무의 가시화 실험을 수행하였다. 연료 분사펌프는 Bosch형 직렬형 jerk 펌프이며 분사노즐은 개변압이 220 bar, 분출공경 0.37 mm의 단공 노즐이다. 연료는 경유로 1회 분사량은 평균 28.9 mg 이며, 상온 대기 중에 분사한다.

분사압력의 측정을 위한 압력센서는 노즐 연료입구로부터 50 mm 지점의 고압관에 설치되어 있다. Fig. 3은 연료분사압력,  $P_{inj}$  을 나타낸 것이다. 수치계산에 필요한 노즐 출구에서 연료 액적의 분출속도,  $V_{inj}$  는 다음과 같이 구하였다.

$$V_{inj} = C_v \sqrt{\frac{2 \cdot P_{inj}}{\rho_l}} \quad (8)$$

여기서  $\rho_l$  은 연료밀도이고,  $C_v$  는 유속계수로 본 실험에서는 0.78 이다.

분무는 레이저 시트광을 이용한 여기형광법을 사용하여 가시화 하였다. 카메라의 배율을 작게

하여 전체분무의 분무선단 도달거리를 측정하고, 카메라 배율을 높여 분무의 분열과정과 액적의 크기를 측정하였다. 자세한 실험방법은 참고문헌<sup>(15)</sup>에 설명되어 있다.

### 5. 결과 및 고찰

#### 5.1 분무선단도달거리

Fig. 4는 기존모델에 의한 분무선단 도달거리를 실험결과와 비교한 그림이다. Fig. 5와 6은 초기분출 액적의 변형을 나타내는 식(2)의  $y_i$  를 변화시켰을 때의 결과이다.  $y_i = 0$  일 때 액적은 구형이고,  $y_i = -0.96$  는 럭비공 형상,  $y_i = 0.6$  는 원반형상을 나타낸다. Fig. 7과 8은 식(5)와 식(6)과 같이 주위 액적의 수밀도를 고려하여 항력계수를 수정하여 계산한 결과이다.

Fig. 4의 기존모델의 결과를 보면 분사초기에 실험보다 약간 큰 값을 보이거나  $t$  가 0.48 ms 이후에는 실험과 거의 일치한다. Fig. 5~8 에서 액적 초기형상을 변화시킨 경우나 항력을 수정한 경우에도 모든 모델에서 계산결과는 기존모델과 크게 차이가나지 않는다. 다만 TAB 모델에서  $y_i$  를 변화시킨 경우  $t$  가 0.48 ms 이후에 실험보다 약간 작은 값을 보인다.

항력이 변하여도 선단도달거리가 거의 변하지 않는 것은 Liu<sup>(8)</sup>의 계산결과와 일치하는 것으로 항력의 변화는 액적과 분위기의 상대속도와 액적의 분열 직경에 영향을 미치는데 이들은 상반적으로 선단도달거리에 영향을 미치기 때문이다.

#### 5.2 분열거리

계산에서 분열거리는 분열하지 않은 액적이 존재하는 거리로 나타낸다. 반면에 실험에서 분열거리는 명확하지 않다<sup>(15)</sup>. 분무의 확대사진을 보면 분출공부터의 거리,  $X$  가 10 mm 까지는 구형의 작은 액적들은 보이지 않으나  $X=20$  mm 에서부터 분열되지 않은 불규칙한 형상의 액적과 분열된 작은 구형 액적이 함께 존재한다.  $X=30$  mm 이상에서는 더 이상 분열되지 않은 큰 액적은 보이지 않는다. 따라서 임의적이지만  $X=20$  mm를 분열거리로 간주하였다.

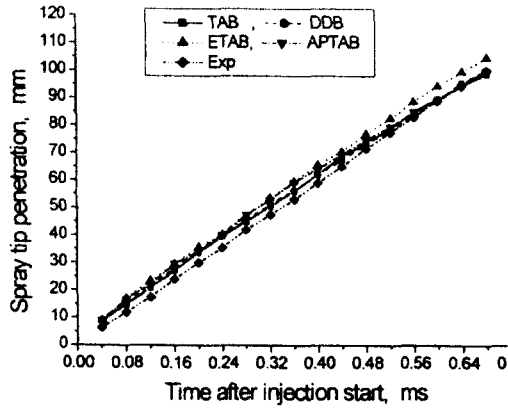


Fig. 4 Spray tip penetration,  $y_1 = 0, C_D$

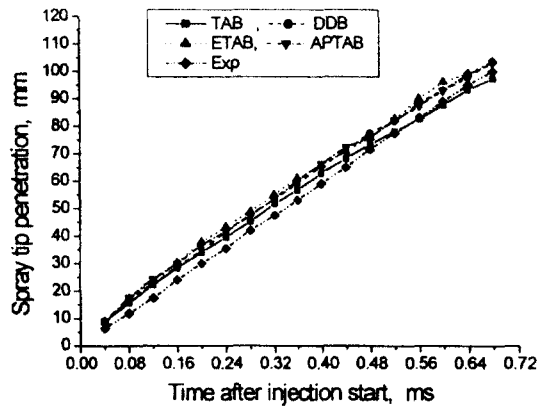


Fig. 7 Spray tip penetration,  $y_1=0, C_{D,c}$  in Eq.(5)

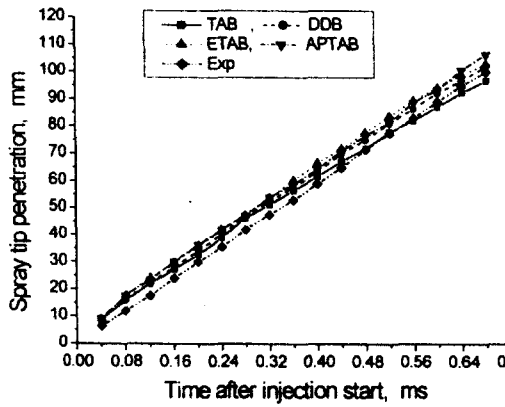


Fig. 5 Spray tip penetration,  $y_1 = -0.96, C_D$

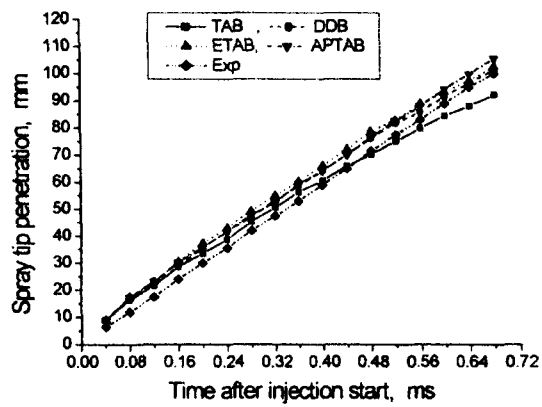


Fig. 8 Spray tip penetration,  $y_1=0, C_{D,c}$  in Eq.(6)

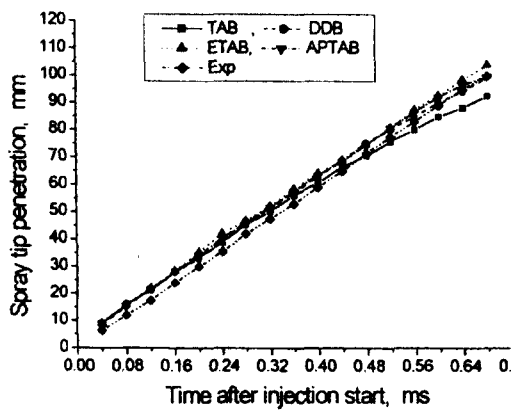


Fig. 6 Spray tip penetration,  $y_1 = 0.6, C_D$

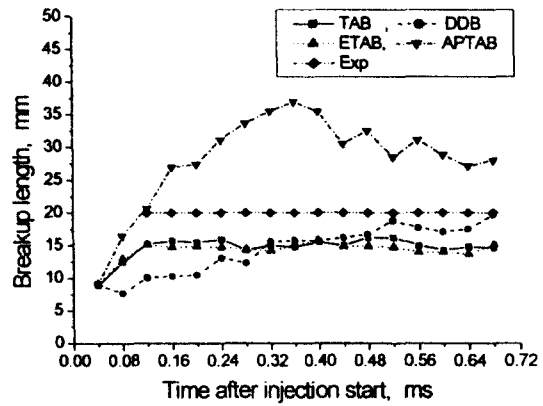


Fig. 9 Breakup length,  $y_1 = 0, C_D$

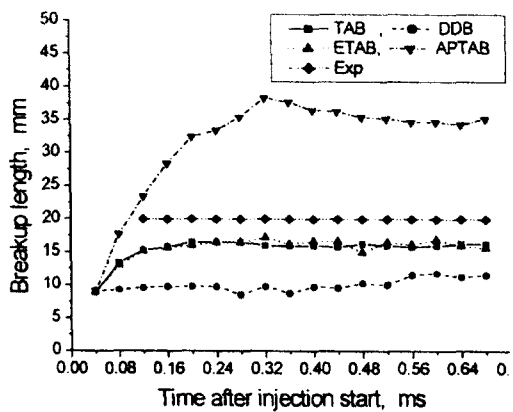


Fig. 10 Breakup length,  $y_i = -0.96, C_D$

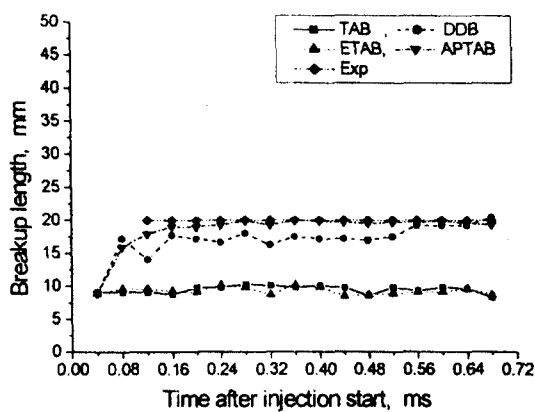


Fig. 13 Breakup length,  $y_i = 0, C_{D,C}$  in Eq.(6)

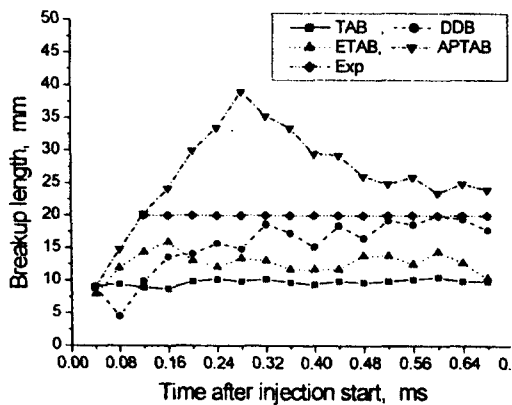


Fig. 11 Breakup length,  $y_i = 0.6, C_D$

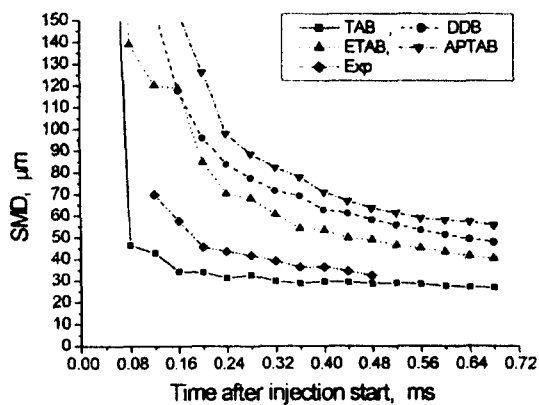


Fig. 14 Droplet Diameter,  $y_i = 0, C_D$

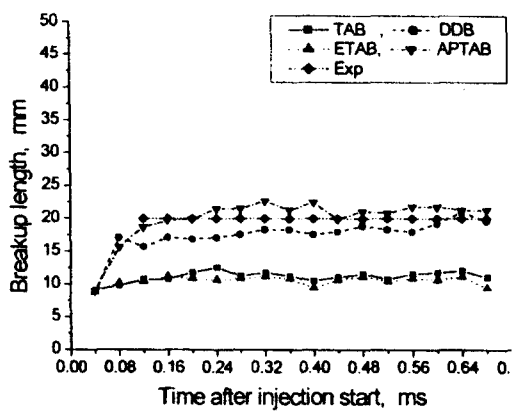


Fig. 12 Breakup length,  $y_i = 0, C_{D,C}$  in Eq.(5)

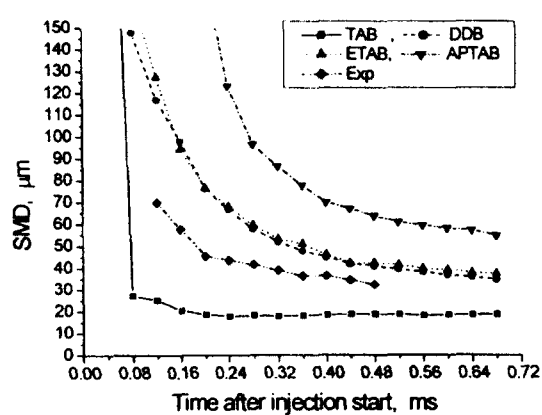


Fig. 15 Droplet Diameter,  $y_i = -0.96, C_D$

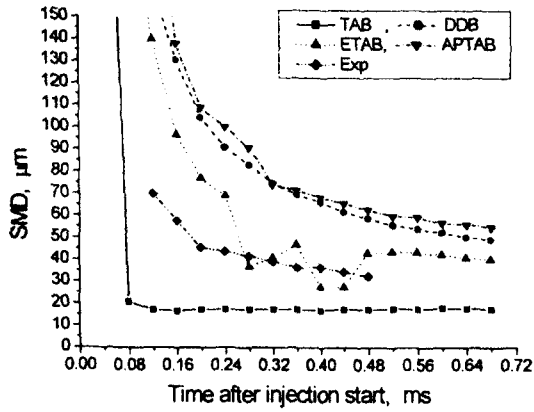


Fig. 16 Droplet Diameter,  $y_1=0.6, C_D$

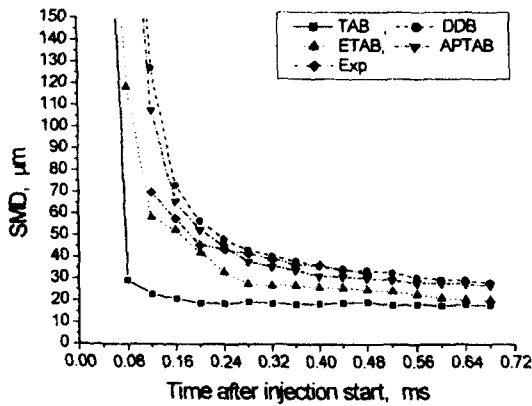


Fig. 17 Droplet Diameter,  $y_1=0, C_{D,C}$  in Eq.(5)

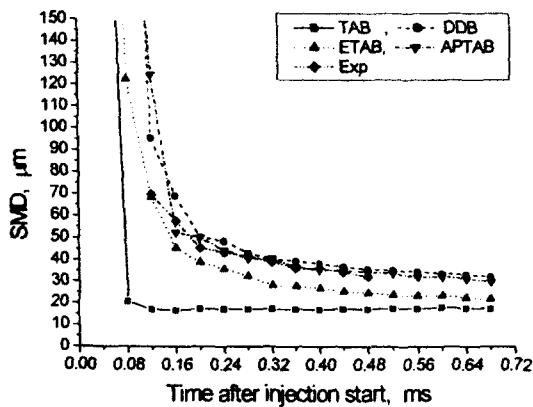


Fig. 18 Droplet Diameter,  $y_1=0, C_{D,C}$  in Eq.(6)

Fig. 9의 기존모델의 결과를 보면 APTAB 모델은 실험값에 비해 지나치게 큰 값을 보이고 나머지 모델은 다소 작은 값을 보인다. Fig. 10과 11을 보면 이러한 경향은  $y_1$  를 변화시켜도 거의 변하지 않는다. 반면에 주위액적의 수밀도를 고려하여 항력계수를 변화시킨 Fig. 12와 13을 보면, TAB과 ETAB 모델은 분열거리가 실험에 비해 반 정도로 오차가 오히려 커지나 DDB와 APTAB 모델은 실험과 잘 일치한다. 또 항력계수 수정에 식(5)를 사용하여도 식(6)을 사용하여도 차이가 크지 않다.

### 5.3 액적의 평균직경

Fig. 14~18은 모델계산에 의한 분무내 전체액적의 SMD를 실험결과를 비교한 그림이다. 실험값은 분무선단 부근의 확대사진으로 관측한 값이나 전체분무의 SMD와 큰 차이는 없을 것으로 생각된다.

Fig. 15의 기존모델의 결과를 보면 TAB 모델은 실험값보다 약간 작게, 나머지 모델은 지나치게 크게 예측하고 있다.  $y_1$  에 변화를 준 Fig. 15와 16의 결과를 보면 TAB 모델은 액적직경이 기존모델보다 작아져 오히려 오차가 커지고 나머지 모델들도 개선효과가 거의 없다. 주위액적의 수밀도를 고려한 수정항력계수를 사용하여 계산한 Fig. 17과 18을 보면 TAB 모델은 개선효과가 없지만 나머지 모델들은 실험과 잘 일치하는 결과를 보인다. 또한 식(5)와 식(6)의 차이도 거의 없다.

위의 결과를 종합하면 기존모델은 분무선단 도달거리는 잘 예측하나 분무의 미세적 성질인 분열거리와 액적의 평균직경을 동시에 잘 예측하지 않는다. 또한 분사되는 액적의 형상을 변화시켜도 기존 모델의 이러한 단점을 개선시키지 못한다. 반면에 주위액적의 수밀도를 고려하여 항력계수를 수정한 경우 기존모델보다 양호한 결과를 보인다. 특히 DDB과 APTAB모델에서 분무선단도달거리, 분열거리, 액적 평균직경 모두에서 양호한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

## 6. 결 론

디젤분무의 분열과정을 공기역학적 항력에 의한 액적변형과 이에 따른 분열모델인 TAB, ETAB, DDB, APTAB 모델로 계산하고, 결과를 실험과 비교하여 각 모델의 예측성능을 비교하였다. 또한 분출되는 액적의 형상변화와 주위 액적의 수밀도의 영향에 의한 항력변화 수정모델을 제시하여 기존모델의 계산성능 개선을 시도하였다.

본 연구에서 얻어진 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 기존모델은 분무선단 도달거리는 잘 예측하나 분무의 미시적 성질인 분열거리와 액적의 평균직경을 동시에 잘 예측하지 못하였다.

(2) 분출되는 액적의 초기형상에 변화를 준 경우 분무선단 도달거리는 기존모델과 비교하여 거의 차이가 없다. 또한 분열거리와 액적의 평균직경을 동시에 잘 예측하는 모델은 없다.

(3) 주위 액적의 수밀도를 고려한 수정항력모델을 사용하면 모든 모델에서 분무선단 도달거리의 예측에서 기존모델과 비슷한 결과를 보인다. 그리고 액적 분열거리와 액적 평균직경은 모델에 따라 차이가 있지만 DDB와 APTAB 모델이 분열거리와 액적의 평균직경을 동시에 잘 예측하는 양호한 결과를 보인다.

(4) 주위 액적의 수밀도를 고려한 항력 수정모델로 2가지 방법을 제안하였고 이들 두 방법은 유사한 계산결과를 보여주고 있다.

(5) 본 연구에서 분위기 압력과 연료분사압력은 실제 디젤분무와 비교하여 작다. 따라서 고압 조건에서도 얻어진 결과가 적용되는지에 대하여 향후에 연구가 필요하다.

## 후 기

본 연구는 2001년 한국과학재단 목적기초연구(R02-2001-01140) 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

## 참고 문헌

1. Bracco, F.V., "Modeling of Engine Sprays," SAE Trans. 850394, 1985.
2. O'Rourke, P.J. and Amsden, A.A., "The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup," SAE Trans. 872089, 1987.
3. Ibrahim, E.A., Yang, H.Q. and Przekwas, A.J., "Modeling of Spray Droplets Deformation and Breakup," AIAA J. of Propulsion and Power, Vol. 9, No. 4, pp 651-654, 1993.
4. Alloca, L.A., Corcione, F.E., and Fusco, A., "Modeling of Diesel Spray Dynamics and Comparison with Experiments," SAE Trans. 941895, 1994.
5. Tanner, F.X., "Liquid Jet Atomization and Droplet Breakup Modeling of Non-Evaporation Diesel Fuel Sprays," SAE Paper 970050, 1997.
6. 박종훈, 황상순, 윤영빈, "액적의 변형 및 분열의 정확한 예측을 위한 공기역학적으로 진보된 APTAB 모델," 한국액체미립화학회지 제5권, 제2호, pp 53-60, 2000.
7. Naitoh, K. and Takagi, Y., "Oval-Parabola Trajectories(OPT) Model of Droplet-Wall Interaction in Engines," Int. Symposium COMODIA 94, pp. 417-422, 1994
8. Liu, A. B., Mather, D., and Reitz, R.D., "Modeling the Effects of Drop Drag and Breakup on Fuel Sprays," SAE Trans. 930072, 1993
9. Amsden, A.A., O'Rourke, P., and Butler, T.D., "KIVA-II : A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays," LA-11560-MS, UC-96, 1989
10. Habchi, C., Verhoeven, C., Huu, C.H., Lambert, L., Vanhemelryck, J.L., and Baritaud, T., "Modeling Atomization and Break Up in High-Pressure Diesel



- Sprays," SAE Technical Paper 970881, 1997.
11. Hiroyasu, H. and Arai, M., "Fuel Spray Penetration and Spray Angle in Diesel Engines," Trans. of JSME, Vol. 21, 1980
  12. Chehroudi, B., Chen, S-H., Bracco, F.V., and Onuma, Y., "On the Intact Core of Full-Cone Sprays," SAE Tech. Paper 850126, 1985
  13. 김정일, 노수영, "디젤분무의 모사를 위한 혼합모델의 개발," 한국자동차공학회 논문집 제9권 제1호, pp 8-19, 2001.
  14. 노수영, "디젤분무의 미립화 및 액적분열모델(I)," 한국미립화학회지, 제4권 제1호, pp 1-12, 1999.
  15. 원영호, 김우태, "비중발 디젤분무의 분열과 미립화 과정의 가시화," 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, pp. 423-428, 2002. 5