

# 직접 분사식 가솔린 기관 인젝터의 분무 미립화 특성에 대한 해석 및 실험적 연구

## Numerical and Experimental Study on Spray Atomization Characteristics of GDI Injector

이창식<sup>\*</sup> · 류열<sup>\*\*</sup> · 김형준<sup>\*\*\*</sup> · 박성욱<sup>\*\*\*</sup>

C. S. Lee<sup>\*</sup>, Y. Rhyu<sup>\*\*</sup>, H. J. Kim<sup>\*\*\*</sup>, S. W. Park<sup>\*\*\*</sup>

### Abstract

In this study numerical and experimental study on the spray atomization characteristics of a GDI injector is performed. To carry out numerical analysis, four hybrid models that are composed of conical sheet disintegration model, LISA model, DDB model, and RT model are used. The experimental results to evaluate the prediction accuracy of hybrid models are obtained by using phase Doppler particle analyzer and spray visualization system. It is shown that the prediction accuracy of hybrid model concerning spray developing process and spray tip penetration is good for all hybrid models, but the hybrid breakup models show different prediction of accuracy in the case of local radial SMD distribution.

**주요기술용어(Key Words):** GDI engine(가솔린 직접 분사식 엔진), Hybrid-model(복합모델), Spray modeling (분무 모델링)

#### 기호설명

$a$  : ellipse major axis, acceleration

$C$  : constant of the CSD model

$C_{RT}$  : breakup constant of RT model

$C_r$  : RT breakup time constant

$d_D$  : diameter after breakup

$d_L$  : diameter of the ligament

$K_L$  : most unstable wave number of LISA model

$L_b$  : breakup length

$t_0$  : thickness of the liquid sheet at the nozzle exit

$t_b$  : sheet thickness at the breakup length

$U$  : total sheet velocity

$\lambda^*$  : wavelength for the maximum growth rate

$\Lambda$  : growth rate corresponding to maximum growth rate

$\Omega$  : maximum growth rate

### 1. 서론

연료 인젝터의 분무 미립화 특성은 GDI 엔진의 배출물 저감과 엔진 효율 향상에 중요한 영향을 미치고 있다. 그러므로, 이러한 GDI 엔진에서의 분무 미립화 특성인 SMD 분포, 분무 발달 과

<sup>\*</sup> 한양대학교 기계공학부  
<sup>\*\*</sup> 두원정공 기술연구소  
<sup>\*\*\*</sup> 한양대학교 대학원

정, 분무 선단 도달거리 등에 대한 수치와 실험적으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 현재까지 많은 분열 원리와 실험적 결과를 토대로 미립화 모델들이 개발되어져 왔다. O'Rourke와 Amsden<sup>(1)</sup>은 진동하고 변형하는 액적과 스프링 질량계 사이의 상사를 기초로한 TAB모델을 제안하였고 Kelvin-Helmholtz파의 불안정성을 바탕으로 KH 모델<sup>(2)</sup>, TAB 모델에서 고려하지 않은 비선형 효과를 고려한 DDB모델<sup>(3)</sup>, Rayleigh-Taylor 파동 불안정성 이론을 배경으로한 RT모델<sup>(4)</sup> 등 여러 가지 모델들이 개발되고 또한 발전되어 왔다. 이러한 단일적 액적 분열모델들 보다 다양한 조건에서 좋은 결과를 얻기 위해서 2가지 이상의 모델을 혼합한 복합모델들이 제안되었다. Iyer과 Han<sup>(5)</sup>은 Conical Sheet Disintegration(CSD) 모델을 1차분열로 사용하고 2차분열에는 TAB모델을 사용한 복합모델을 제안하였다. 또한 Kim<sup>(6)</sup>등은 WAVE모델과 DDB 모델을 혼합한 복합모델을 개발하였다. Zhao등과 Lee<sup>(7,8)</sup>등은 분사압력에 따른 분무 미립화 특성을 분무 입경 및 속도분포의 측정장치와 분무 가시화 장치를 통해 실험적으로 연구하였다. York등과 Fraser<sup>(9,10)</sup>등은 와류 압력 노즐에서의 여러 가지 액막의 형태에 따른 액막분열에 대해 분석하였다. GDI 엔진의 연료인젝터의 미립화 특성은 분사 압력, 각도, 분무노즐의 형태에 따라 그 특성이 많이 결정된다. 따라서 본 연구에서는 분무각에 따른 분무 형태, 분무선단 관통거리, SMD 분포등의 실험적 결과를 획득하여 KIVA-3 코드를 사용한 복합모델을 가지고 분무 미립화 특성을 수치적으로 비교하고 해석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험장치는 Fig. 1과 같이 연료 분무 액적의 입경과 속도를 구하기 위한 PDPA 시스템과 연료 인젝터로부터 분사되는 연료 분무의 거시적인 거동을 분석하기 위한 가시화 실험 장치로 구성하였다. 분무 발달과정은 새도그래프법을 이용하여 분무 형태, 분무 선단 도달거리, 분무폭 등을 가시화하고 CCD카메라로 화상을 취득하여 분석하였다. 연료공급 및 분사 시스템은 연료탱크, 0.75kW AC전동기로 구동되는 연료 고압 펌프, 인젝터 드라이버 신호 제어기등으로 구성되며

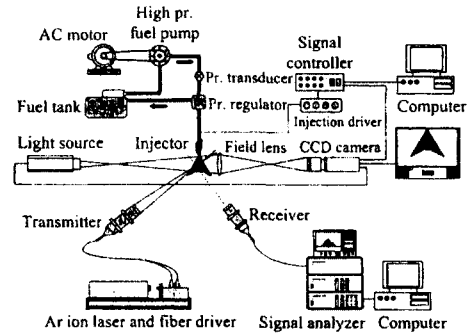


Fig 1. Schematic diagrams of PDPA system and spray visualization system

PDPA 시스템의 광원으로는 Ar-ion 레이저를 사용하였다. 분사기간은 1ms이고 분사압력 10MPa의 실험 조건에서 실험을 수행하였다.

## 3. 미립화 모델

### 3.1 1차분열 모델

#### 3.1.1 Conical Sheet Deintegration(CSD) 모델

선형 액막 분열 이론에 기초한 CSD 모델은 Iyer와 Han<sup>(5)</sup>이 제안하였다. 인젝터에서 분사된 액적은 Rayleigh 분열이론에 따라 최대성장율을 가지는 파는 계속적으로 액막의 두께가 두꺼워진다. 이후 원뿔형의 액막으로부터 링모양의 끈으로 분리되고 표면장력의 영향으로 액적으로 분열된다. 할로우콘 형태로 분사된 후 일정한 분열 길이에 도달된 후에 분열된다. 분열길이는 다음과 같이 주어진다.

$$L_b = C \left[ \frac{\rho \sigma t_b d_0}{\rho_g^2 U^2 \tan(\theta/2)} \right]^{1/3}$$

또한 분열시의 액막의 두께는 다음과 같다.

$$t_b = \frac{t_0}{1 + 2 L_b \sin(\theta/2) / d_0}$$

원뿔형 액막에서 York<sup>(9)</sup>등은 분열후 액적의 지름이 다음 식에 의해 결정된다고 제안하였다.

$$d = 2.13 (\lambda * t_s)^{0.5}$$

#### 3.1.2 LISA 모델

Linearized Instability Sheet Atomization(LISA) 모델은 Schmidt<sup>(11)</sup>등이 제안한 모델로서 이 모델에

서는 연료가 인젝터에서 분사된 후 분열길이에 도달할 때까지 분열, 합착, 항력에 영향을 전혀 받지 않는다고 가정하였다. 분열길이는 다음 식에 의해 주어진다.

$$L_{b,LISA} = \frac{U}{\Omega_{LISA}} \ln\left(\frac{\eta_b}{\eta_0}\right)$$

여기서  $\ln(\eta_b/\eta_0)$ 는 Dombrowski<sup>(12)</sup>등이 12의 값을 가질 때 분열이 일어난다고 제안하였다. 또한 분열길이에 도달하여 분열이 일어나고 새로운 액적의 지름은 다음 식에 의해 결정된다.

$$d_b^3 = \frac{3\pi d_L^3}{K_L}$$

### 3.2 2차분열 모델

#### 3.2.1 DDB 모델

Drop Deformation and Breakup(DDB) 모델은 TAB 모델에서 고려하지 않은 비선형 효과를 고려한 모델로서 Ibrahim<sup>(1)</sup>등에 의해 제안되었다. 이 모델에서 액적은 순수한 인장 유동에 의해 변형된다고 가정하고 지배방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$K \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{4N}{Re y^2} \frac{dy}{dt} + \frac{27\pi^2}{16We} y [1 - 2(\nu)^{-6}] = \frac{3}{8}$$

액적분열이 일어날 임계조건은 다음식에서 결정된다.

$$\frac{a}{r} = \frac{We}{6\pi}$$

#### 3.2.2 RT 모델

Rayleigh-Taylor 불안정성은 액체와 기체 사이의 경계면에 수직인 가속작용이 일어날 때 액체의 관성 때문에 일어난다. 이것을 기초로 Bellman과 Pennington<sup>(4)</sup>이 RT 모델 제안하였다. 액체의 점도를 무시하고 표면장력만을 고려할 때 가장 빠르게 성장하는 주파수와 파동수가 결정된다. RT 모델에서의 분열후 액적의 크기는 다음식에 의해 결정된다.

$$\tau_{RT} = \frac{1}{\Omega_{RT}}$$

$$r_c = \frac{\pi C_{RT}}{K_{RT}}$$

### 3.3 복합모델의 적용

본 연구에서 사용되는 모든 복합들은 1차분열

과 2차분열의 두 가지 단일 모델들로 구성된다. 따라서 1차분열과 2차분열의 분열 구분 기준을 설정하는 것이 중요하다. 1차분열에는 CSD, LISA 모델을 2차분열에는 DDB, RT모델을 사용하였다. CSD-DDB와 CSD-RT 모델에서는 인젝터에서 연료가 분사된 후 분사된 액적이 분열길이  $L_b$ 에 도달하면 2차분열인 DDB, RT모델에 의해 분열이 일어나도록 설정하였다. 또한 LISA-DDB, LISA-RT모델에서는 연료가 분사된 후 액적이 분열길이  $L_{b,LISA}$ 에 도달할 때 LISA 모델에 의해 새로운 액적의 크기가 정의되고 이후 2차분열이 일어나도록 설정하였다. RT모델의 분열상수인  $C_{RT}$ 는 박<sup>(13)</sup>등이 제안한 0.16으로 설정하였고, 모든 복합 모델들의 초기 조건들은 실험 조건과 동일하게 설정하였다. 그리고 계산간격은 20 $\mu$ s, 계산격자의 크기는 1mm $\times$ 1mm로 설정하였고 초기분무기간은 0.1ms이고 3°의 각도를 가지는 슬리드 콘 형태로 분사되도록 설정하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 분무의 발달과정

Fig. 3은 10MPa의 분사압력에서의 분무 발달 과정을 새도그래프법을 사용하여 측정한 실험 결과와 복합모델을 사용하여 계산한 결과의 비교를 나타낸 그림이다.

Time	EXP.	CSD -DDB	CSD -RT	LISA -DDB	LISA -RT
0.4 msec					
0.8 msec					
1.2 msec					

Fig. 2 Visualization of spray development at spray angle with 73°( $T_{inj}$ =1ms,  $P_{inj}$ =10MPa)

분사후 0.8ms에서 분무의 표면 부근에서 링형태의 와류가 분무되는 반대 방향으로 형성되는

것을 볼 수 있다. 와류가 생성되는 이유는 주위 가스와 분무 사이의 상대속도의 차이로 인해 압력이 달라져서 이러한 현상이 일어나기 시작한다고 생각된다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 와류는 분무의 가장자리에서 발생되지만 그 모양은 2차분열에 의해 달라진다. 2차분열이 DDB 모델의 경우에는 분열된 액적들이 RT 모델보다 더 작은 운동량을 가지기 때문에 주위 가스의 유동에 더욱더 쉽게 영향을 받아 강한 와류현상을 보여준다고 생각된다. 반면 RT모델은 분무끝단에서 급속한 분열이 일어나서 넓은 폭을 가지는 분무 형태를 나타내고 있으면 DDB 모델과는 전혀 다른 분열 현상을 보여주고 있다.

Fig. 4는 각 복합모델들의 각각의 분사각도에 따른 분무선단 도달거리를 실험치와 비교한 그림이다. 모든 복합모델들이 실험치와 비교적 잘 맞는 것을 볼 수 있고 특히 CSD-DDB 모델과 LISA-RT모델은 좋은 예측 결과를 보여주고 있다. 그러나 0.4~0.8ms 구간에서는 실험치 보다 짧은 도달거리를 보여주고 있는데 이는 분열길이에 도달한 액적들이 측정치 보다 더 많은 분열이 일어난 것으로 생각된다.

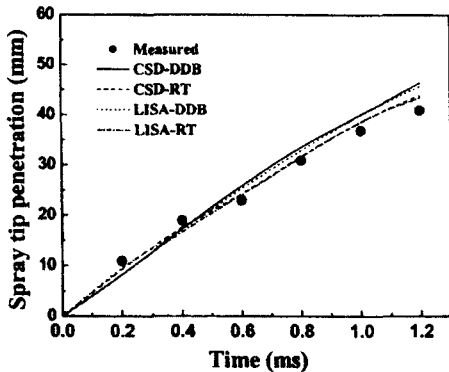
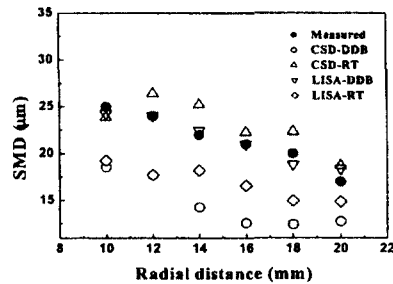


Fig. 3 spray tip penetration according to the hybrid model (T=1ms, P=10MPa)

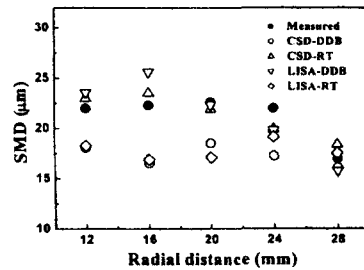
4.2 분무 미립화 특성

Fig. 4는 10MPa의 분사압력으로 분사한 인젝터로부터 축 방향 거리 25mm, 40mm에서의 SMD 분포를 실험결과와 계산 결과를 나타내는 그림이다. Fig. 4 (a)에서 LISA-DDB 모델이 실험결과와 가장 잘 일치하였고 Fig. 4 (b)에서는 CSD-RT 모델의 경우가 실험결과에 가장 근접하였다. 이러

한 경향은 2차분열인 RT 모델이 분무 끝단에서 분열이 활발히 일어나기 때문에 분열 초기에는 좋은 결과를 보여주나 40mm부근에서는 오히려 작은 SMD분포를 보여주고 있기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 DDB 모델을 1차 분열 모델로 쓴 복합 모델의 경우에는 축방향 거리 25mm에서 실험 결과보다 적은 SMD가 예측되었다. 이러한 경향이 나타나는 이유는 DDB 모델이 분무 상류에서의 액적 분열을 과대 예측하기 때문인 것으로 판단된다.



(a) L=25mm



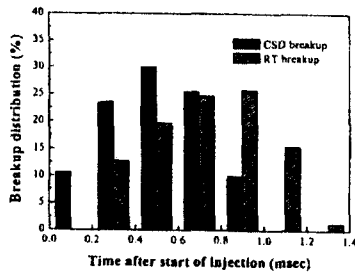
(b) L=40mm

Fig. 4 Radial SMD distribution (P<sub>inj</sub>=10MPa)

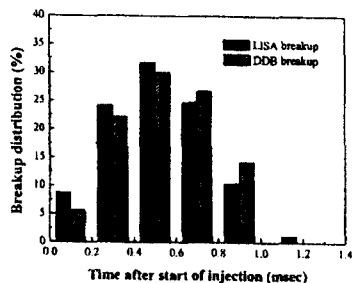
4.3 1, 2차 분열 특성 계산 결과

PDPA 시스템과 분무 가시화 시스템을 이용해서 얻은 실험 결과와 복합 모델의 실험 결과를 분무 발달 과정, 분무 도달 거리, 반경 방향 SMD 분포에 대해서 비교한 결과, CSD-RT 모델과 LISA-DDB의 예측 성능이 우수한 것으로 나타났다. 따라서 CSD-RT 모델과 LISA-DDB 모델을 이용하여 액적 분열의 시간 및 공간 분포를 조사하였다.

Fig. 5는 액적 분열의 시간 분포를 나타낸 것이다. 액적 분열의 시간 분포는 전체 액적 분열 횟수에 대해 특정 시간 구간에서의 분열 빈도의 백분율로 구한 것이다. CSD-RT 모델의 경우 1차 분열 빈도 최고점에서 0.4msec 후 2차 분열의 최고점이 나타났으나, LISA-DDB 분열의 경우 1, 2차 분열의 최고점이 거의 같은 시점에서 나타났다. 이는 RT 모델의 파동 성장 시간이 DDB 모델의 액적 변형에 필요한 시간 보다 길기 때문인 것으로 판단된다.



(a) CSD-RT model

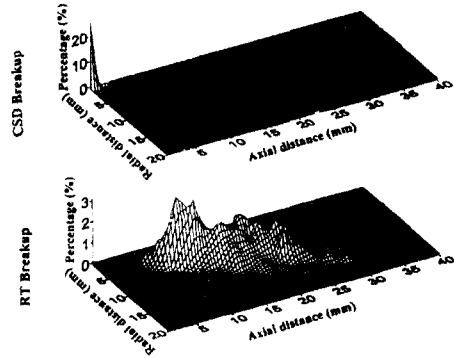


(b) LISA-DDB model

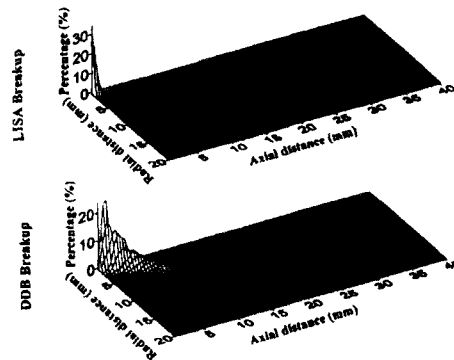
Fig. 5 Time distribution of droplet breakup

Fig. 6은 1차분열과 2차분열이 일어나는 빈도의 공간 분포를 나타낸 것이다. 분열 빈도는 전체 액적 분열 횟수에 대하여 1mm×1mm의 면적 내에서 일어나는 분열 회수로 정의하였다. 그림에서 1차분열인 CSD, LISA 모델들은 인젝터 부근에서 집중적으로 분열이 일어나는 것을 알 수 있다. 그러나 2차분열인 RT, DDB 모델은 다른 분열 경향을 보이고 있다. Fig. 6 (a)의 RT 모델은 분무 하류부근에서 많은 분열이 일어나고 있으며 (b)의 DDB 모델은 인젝터 근방에서 분열이 집중

적으로 일어나는 것을 알 수 있다.



(a) CSD-RT



(b) LISA-DDB

Fig. 6 Spatial distribution of droplet breakup

5. 결론

연료 분무의 미립화 특성을 예측하기 위해서 1차분열에는 CSD 모델과 LISA 모델을 2차분열에는 DDB 모델과 RT 모델을 사용하는 복합모델을 적용하여 실험결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) DDB 모델이 RT 모델 보다 강한 와류현상이 나타났다. 이는 DDB 모델의 경우 RT 모델보다 미립화가 빨리 진행되기 때문인 것으로 판단된다.
- (2) 분무 선단 도달거리의 경우 모든 복합 모델들이 비교적 일치하는 경향을 보여주었다.
- (3) 축방향 거리 25mm와 40mm 지점에서, 반경

방향에 따른 SMD 분포를 분석한 결과, CSD-RT 모델과 LISA-DDB 모델의 예측성능이 우수하였다.

(4) 액적 분열의 시간 분포 특성에서, CSD-RT 모델의 경우 1차 분열 빈도 최고점에서 0.4msec 후 2차 분열의 최고점이 나타났으나, LISA-DDB 분열의 경우 1, 2차 분열의 최고점이 거의 같은 시점에서 나타났다.

(5) 1차분열인 CSD, LISA모델은 인젝터부근에 집중되어 있으며 2차분열인 RT모델은 하류 부근에 분포하고 DDB모델은 인젝터부근에 집중되는 다른 분열 특성을 보여주었다.

#### 후기

본 연구는 청정생산기술사업 균일 예혼합 압축 착화 디젤 엔진의 최적 연소 기술 개발 사업(99-1-K-3)과 BK21 사업에 의하여 수행되었으며 연구를 지원해주신 관계 제위께 감사 드립니다.

#### 참고문헌

1. P.J.O'Rourke, and A.A.Amsden, The Tab Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup, SAE paper 872089, 1987.
2. R.D.Reitz, Modeling Atomization Processes in High-pressure Vaporizing Sprays, Atomisation and Spray Technology, Vol. 3, pp. 309-337, 1987.
3. E.A.Ibrahim, H.Q.Yang and A.J.Prezkwas, Modeling of Spray Droplets Deformation and Breakup, AIAA J. Propulsion and Power, Vol.9, No.4, pp. 652-654, 1993.
4. R.Bellman and R.H.Pennington, Effects of Surface Tension and Viscosity on Taylor Instability, Quarterly of Applied Mechanics, Vol. 12, pp. 151-162, 1954.
5. C.O.Iyer and Z.Han, Fuel Spray Modeling of Outward-Opening Pintle Injectors, ILASS Americas, 15th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray System, Madison, WI, 2002.
6. J.I.Kim, S.Y.No and J.H.Lim, Modeling Capability of Various Atomization and Droplet Breakup Models for DI Diesel Engines, The eighth Symposium(ILASS-Japan) on Atomization, Osaka, Japan, pp. 149-154, 1999.
7. F.Q.Zhao, M.C.Lai and D.L.Harrington, The Spray Characteristics of Automotive Port Fuel Injection-A critical review, SAE paper 950506, 1995.
8. C.S.Lee, K.H.Lee, M.S.Chon and D.S.Kim, Spray Structure and Characteristics of High-pressure Gasoline Injectors for Direct-injection Engine Applications, Atomization and Sprays, Vol.11, pp. 35-48, 2001.
9. J.L.York, H.F.Stubbs and M.R.Tek, The Mechanism of Disintegration of Liquid Sheets, Trans. ASME, Vol. 75, pp. 1279-1286, 1953.
10. R.P.Fraser, P.Eisenklam, N.Dombrowski and D.Hasson, Drop Formation from Rapidly Moving Sheets, AIChE J., Vol. 8, No. 5, pp. 672-680, 1962.
11. D.P.Schmidt, I.Nouar, P.K.Senecal, C.J.Rutland, J.K.Martin, R.D.Reitz and J.A.Hoffman, Pressure-swirl Atomization in the Near Field, SAE paper 1999-01-0496, 1999.
12. N.Dombrowski and W.R.Johns, The Aerodynamic Instability and Disintegration of Viscous Liquid Sheets, Chem. Eng. Sci., Vol. 18, pp. 203-214, 1963.
13. S.W.Park, K.A.Sung and C.S.Lee, Macroscopic Behavior and Spray Characteristics of Gasoline Injector in a Direct-injection Gasoline Engine, The Eleventh International Pacific Conference on Automotive Engineering(IPC-11), IPC2001D071, 2001.