

## 복합 모델을 이용한 연료 인젝터의 분무 미립화 모델링

### Modeling of Spray Atomization of Fuel Injector Using Hybrid Model

박성욱\*, 김형준\*, 류열\*\*, 이창식\*\*\*  
Sung Wook Park, Hyung Jun Kim, Youl Rhyu, Chang Sik Lee

#### ABSTRACT

This paper presents the comparison of prediction accuracy of hybrid models. To obtain the experimental results for comparing with the numerical results, the macroscopic and microscopic structures of the hollow-cone spray such as spray development process, spray penetration and the distribution of mean droplet size are investigated by using a shadowgraph technique and phase Doppler particle analyzer. Also, the numerical researches using various hybrid models are performed. LISA model and WAVE model are used for the primary breakup, and TAB, DDB, and RT model are used for the secondary breakup.

주요기술용어 : Atomization(미립화), Hybrid breakup model(복합 액적 분열모델), Spray tip penetration (분무 관통 거리)

#### 1. 서론

직접 분사식 가솔린 엔진은 기존의 가솔린 포트분사 방식에 비해 정확한 연료 공급제어가 가능하며, 이에 따라 연료 소비율을 약 30%정도까지 개선할 수 있으며, 또한 펌핑 손실, 고압축비와 체적 효율의 증대 등을 도모할 수 있다. 그러나 연료-공기의 혼합시간이 매우 짧기 때문에 양호한 혼합기를 형성시키기 위해서는 연료의 미립화 성능을 높이고 연소실 내의 알맞은 위치에 적절한 혼합기 분포가 이루어지도록 하는 분무 기술 개발이 필요하다. 이러한 관점에서 직분식 가솔린

인젝터의 미립화 특성에 대한 실험 및 해석적 연구가 활발히 진행되고 있다.

Zhao<sup>1)</sup>등과 Lee<sup>2)</sup>등은 PDPA와 가시화 장치 등을 이용하여 평균 액적 크기와 속도 분포 등에 관한 연구를 수행하였다. 그리고 정확한 분무 미립화 과정 해석을 위한 많은 액적 분열 모델 등이 제안되고 있다. 그러나 단일 액적 분열 모델로는 인젝터에서 분사된 액주로부터 액적으로 분열되는 1차 분열과 분열된 액적이 더 작은 액적으로 쪼개어지는 2차 분열과 같은 서로 다른 분열 특성을 갖는 1, 2차 미립화 과정을 동시에 해석하는 데는 많은 어려움이 따른다. 그러므로 1차 분열과 2차 분열을 적절히 동시에 적용하여 좀 더 정확한 연료 인젝터의 미립화 특성을 해석하기 위하여 복합 모델의 개발이 요구 되어 진다. Beatrice<sup>3)</sup>등은

\* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학부

\*\* 회원, 두원정공 기술연구소

\*\*\* 회원, 한양대학교 기계공학부

WAVE모델과 TAB모델의 복합모델을 디젤 분무 해석에서 실험 결과와 비교하여 WAVE모델과 TAB모델의 복합 모델을 제안하였다. 또한 김과 노<sup>4)</sup>등은 비선형 효과를 고려한 WAVE모델과 DDB모델의 복합 모델을 제안하였다.

본 연구에서는 Nd:YAG 레이저와 CCD 카메라를 이용하여 직접 분사식 가솔린 인젝터에서의 분무 발달 과정을 가시화 하고, PDPA 시스템을 이용하여 압력에 따른 연료의 미립화 특성에 대해 조사하였다. 또한 KIVA-3 코드를 이용하여 WAVE모델과 LISA모델을 1차 분열로 사용하고 TAB, DDB, RT모델을 2차 분열에 첨가시킨 WAVE-TAB, WAVE-DDB, WAVE-RT, LISA-TAB, LISA-DDB, LISA-RT의 6가지 복합 모델을 사용하여 분무 발달 과정, 평균 입경 분포 등에 대한 예측 정확성을 비교, 검증하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

가솔린 인젝터의 분무 거동 및 미립화 특성을 규명하기 위하여 그림 1과 같은 PDPA 시스템 및 가시화 장치를 구성하였다. 분무 가시화 시스템은 스파크 방전 광원, 필드 렌즈, CCD 카메라 등으로 구성하였으며 연료 분사 시스템의 실시간 신호 처리장치와 동기시켜 원하는 시간의 정지 화상을 취득할 수 있도록 하였다. 분무 입자의 입

경 및 속도를 측정하기 위하여 아르곤 이온 레이저와 신호처리계 등으로 이루어진 PDPA 시스템을 사용하였다. 연료의 분사 압력은 5MPa과 7MPa로 설정하였으며 실험에 사용된 노즐은 단공 압력 분무 스웰형 인젝터이며 노즐 출구 지름은 1.0mm, 연료의 밀도는 680.3kg/m<sup>3</sup>이고, 점성계수는 0.0029Ns/m<sup>2</sup>이다.

## 3. 분열모델

### 3.1 1차 분열 모델

#### 3.1.1 WAVE 모델

Kelvin-Helmholtz 불안정성은 상 경계면에서 두 상의 상대적 접선 운동에 의해 발생된다. 분열 특성은 Reitz<sup>5)</sup>가 제안한 분산 방정식을 곡선 접합하여 구한 최대 성장률  $\Omega$  와 그에 해당하는 파장  $\Lambda$ 에 의해 결정된다. 분열은 액정의 반경  $\gamma$ 이 분열시간  $\tau$  동안  $\gamma_c$ 로 감소한다는 가정으로부터  $dt$  시간 후의 감소된 반지름  $\gamma_n$ 을 구할 수 있다.

$$r_c = 0.61\Lambda \quad (1)$$

$$\tau = \frac{3.726B_1 r}{\Omega\Lambda} \quad (2)$$

$$\left(\frac{r-r_n}{dt}\right) = \left(\frac{r-r_c}{\tau}\right) \quad (3)$$

#### 3.1.2 LISA 모델

Schmidt<sup>6)</sup> 등이 제안한 이 모델에서 2차 분열인 TAB모델은 제외한 1차 분열만 고려한다. 이 모델은 분사된 액적들이 노즐로부터 분열 길이에 도달할 때까지 분열, 충돌, 항력 등에 영향을 받지 않는다고 가정한다. 분열길이  $L$ 은 다음 식으로 주어진다.

$$L = U\tau = \frac{U}{\Omega} \ln\left(\frac{\eta_b}{\eta_0}\right) \quad (4)$$

여기서  $U$ 는 전체 시트의 속도이고  $\ln(\eta_b/\eta_0)$ 의

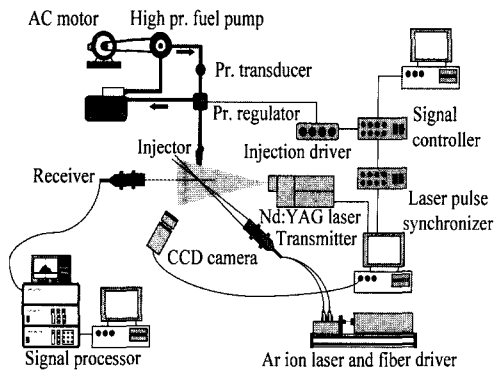


Fig. 1 Schematic diagrams of PDPA system and spray visualization system

값은 Dombrowski<sup>7)</sup>등이 제안한 값을 사용한다. 또한 분열 후의 액적의 크기는 다음 식에 의해 결정되고  $K_L$ 은 리저먼트 중에 가장 불안정한 파의 길이이다.

$$d_D^3 = \frac{3\pi d_L^3}{K_L} \quad (5)$$

### 3.2 2차 분열 모델

#### 3.2.1 TAB 모델

TAB모델은 ORourke와 Amsden<sup>8)</sup>이 제안한 모델로 진동 및 찌그러짐을 동반하는 액적과 스프링-질량계 사이의 상사에 기초한 모델이며 모델 방정식은 다음과 같고 첨자  $g$ 와  $l$ 은 각각 기체와 액체의 물성치를 나타낸다.

$$\ddot{y} = \frac{C_F \rho_g u^2}{C_b \rho_l r^2} - \frac{C_k \sigma}{\rho_l r^3} y - \frac{C_d \mu_l}{\rho_l r^2} \dot{y} \quad (6)$$

여기서  $C_F, C_b, C_k, C_d$ 는 TAB모델에서 사용되는 분열상수이며 또한  $y = x/(C_b r)$ 이고  $y > 1$ 일 때 분열이 일어나는 것으로 가정한다.

또한 DDB모델을 제외한 모든 모델에 사용된 항력계수는 다음과 같이 주어진다.

$$C_{DS} = \frac{24}{Re_l} \left( 1 + \frac{1}{6} Re_l^{\frac{2}{3}} \right) \quad (Re_l \leq 1000) \quad (7)$$

$$C_{DS} = 0.424 \quad (Re_l \geq 1000) \quad (8)$$

위 식을 바탕으로 액적의 찌그러짐을 고려하기 위하여 TAB모델의 찌그러짐 상수  $y$ 를 사용하여 다음과 같이 주어진다.

$$C_D = C_{DS} (1 + 2.632y) \quad (9)$$

#### 3.2.2 DDB 모델

TAB모델에서 고려하지 않은 비선형 효과를 고려한 Ibrahim<sup>9)</sup>등이 제안한 모델로 순수한 신장유동에 의해 액적이 변형된다고 가정하였다. 모델 방정식은 다음과 같다.

$$K \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{4N}{Re} \frac{1}{y^2} \frac{dy}{dt} + \frac{27\pi^2}{16We} y [1 - 2(cy)^{-6}] = \frac{3}{8} \quad (10)$$

여기서  $K$ 는 액체와 가스 사이의 밀도비이고  $N$ 은 액체와 가스사이의 점도비이며 액적 분열이 일어나는 임계 조건은 다음과 같다.

$$\frac{a}{r} = \frac{We}{6\pi} \quad (11)$$

여기서  $We = \rho_g U^2 r / \sigma$ 로 정의되며  $U$ 는 상대 속도,  $r$ 은 액적의 반지름을 나타낸다. DDB모델에서 항력 계산에 사용되는 액적의 찌그러짐 상수  $y$ 는 Hwang<sup>10)</sup>등이 제안한 식에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$y = \min \left\{ 1, \left( \frac{a}{r} - 1 \right) \right\} \quad (12)$$

#### 3.2.3 RT모델

이 모델은 Bellman<sup>11)</sup>등이 제안한 모델로 RT불안정성은 액체와 기체 사이의 경계면에 수직인 가속 작용이 일어날 때 액체의 관성 때문에 일어난다. 액체의 점도를 무시하고, 표면 장력만을 고려할 때 가장 빠르게 성장하는 주파수  $\Omega$ 와 파장  $\Lambda$ , 그리고 파동수  $K_{RT}$ 가 결정된다.

또한 분열시간  $\tau$ 와 분열 후 액적의 반경  $r_c$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\tau = \frac{C_\tau}{\Omega} \quad (13)$$

$$r_c = \frac{\pi C_{RT}}{K_{RT}} \quad (14)$$

### 3.3 복합 모델의 적용

복합 모델을 구성하기 위해서는 1차 분열과 2차 분열의 경계 조건 설정이 필요하다. WAVE-TAB모델은 Beatrice<sup>3)</sup>등이 제안한 WAVE모델에서 분사된 액적의 최대 직경의 95%가 되면 TAB모델에 의해 2차 분열이 일어나게 된다. 모델 상

수  $B_1$  과  $C_k$  는 실험값의 비교 후 가장 잘 일치하는 10과 6.5의 값을 사용하였다. WAVE-DDB모델 또한 분열기준을 WAVE-TAB모델과 동일하게 적용하였다. WAVE-RT모델은 Su<sup>12)</sup>등이 제안한 KH-RT복합모델과 같게 설정하고 모델상수  $B1$  과  $C_{RT}$ 는 Park<sup>13)</sup>등이 제안한 10과 0.16의 값을 사용하였다. LISA-DDB모델은 기존의 LISA모델에서 2차분열인 TAB모델 대신에 비선형 효과를 고려한 DDB모델을 대신 사용하였다. LISA-RT모델은 LISA모델에서 액적이 분열길이  $L$ 에 도달하였을 때 RT분열이 일어나도록 하였다. 그리고 모델상수  $C_{RT}$ 의 값은 실험치와 잘 일치하는 0.18의 값을 사용하였다. 모든 모델들의 초기 조건은 실험 조건과 동일하게 적용하였고 계산 간격은  $20\mu\text{sec}$ 로 하였고 계산격자는  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 로 설정하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 2는 5MPa와 7MPa의 분사 압력(1.4ms)에서의 가시화 실험을 통해 얻은 영상과 복합 모델들을 사용한 분무 형상의 계산 결과를 나타낸 것이다. 인젝터에서 분사되어진 후 하류 부분에서 급속도로 액적 분열이 일어나는 것을 볼 수 있고 5MPa일 때 보다 7MPa의 고압 분사가 이루어질 때는 분무 선단 관통 거리가 길어지는 현상을 볼 수 있다. 또한 분사되어질 때의 주위기체의 영향에 의해 링 모양의 와류가 뚜렷이 형성된다. 역시 고압일수록 와류의 모양이 더 크고 원모양에 가까워짐을 알 수 있다. 특히 DDB 모델에서는 다른 항력 모델을 사용하였기 때문에 다른 모델들 보다 강한 와류 현상이 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3과 4는 5MPa일 때와 7MPa일 때의 분무 선단의 도달 거리를 나타낸 것이다. 두 그래프에서 나타난 실험값과 계산값이 비교적 모든 복합 모델들에서 일치하는 경향을 보이고 있으나 분사초기 즉, 0.4ms까지는 실험값보다 길게 예측되는 경향을 보인다. 이런 이유는 분사 초기에 각 분열 모델이 실험치보다는 분열이 작게 일어나게 예측되

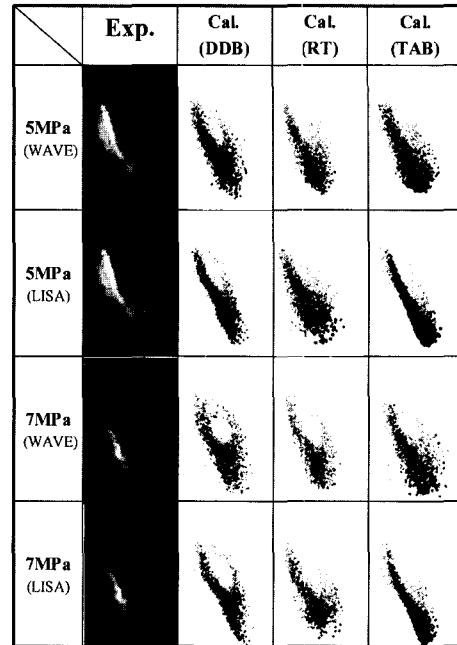
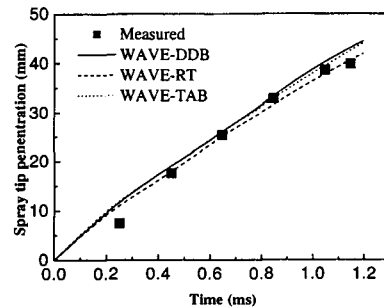
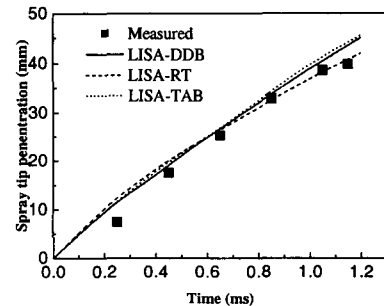


Fig. 2 The comparison of hybrid models spray form

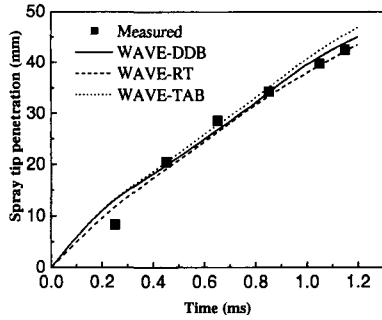


(a) Hybrid models with WAVE model

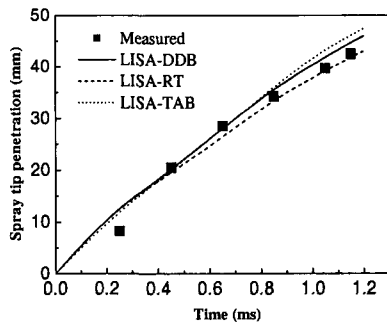


(b) Hybrid models with LISA model

Fig. 3 Effect of primary breakup on spray tip penetration (P=5MPa)



(a) Hybrid models with WAVE model

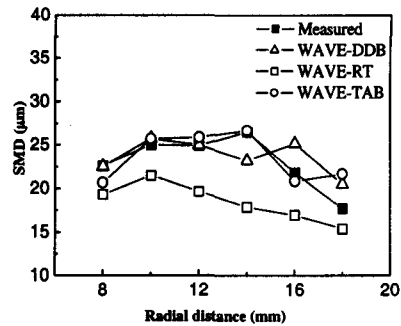


(b) Hybrid models with LISA model

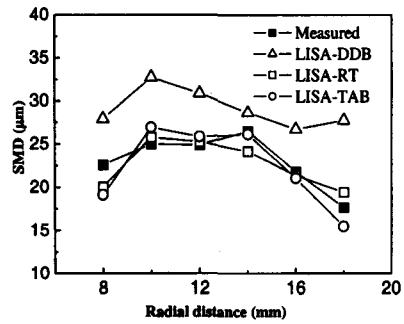
Fig. 4 Effect of primary breakup on spray tip penetration (P=7MPa)

어 일어난 결과라고 생각된다. 또한 2차 분열을 RT모델로 사용하면 하류 부근에서 분열이 많이 일어나 1.0ms에서 다른 모델에 비해 가장 짧은 관통거리를 보여주고 있다. 관통 거리 예측은 항력 모델을 적절히 이용하면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이라 생각된다.

Fig. 5와 6은 분사압력 5MPa과 7MPa일 때에 인젝터에서부터 20mm의 거리의 실험값과 계산치의 SMD분포를 나타낸 그래프이다. 5MPa에서는 1차 분열을 LISA모델을 2차 분열을 DDB모델을 사용하였을 때에는 가장 큰 SMD를 보여주었다. 그러나 7MPa일 때에는 가장 실험치와 근접하는 값을 보여주었다. 이는 DDB모델이 분열 조건이 Weber수와 밀접한 관련이 있어서 7MPa 이상의 고압분무에서는 좋은 결과를 예측할 수 있다는 결과라고 생각된다. 그리고 2차 분열을 TAB모델을 사용하면 7MPa에서 보여진 결과처럼 가장 많



(a) Hybrid models with WAVE model

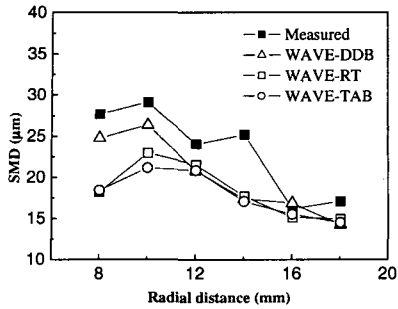


(b) Hybrid models with LISA model

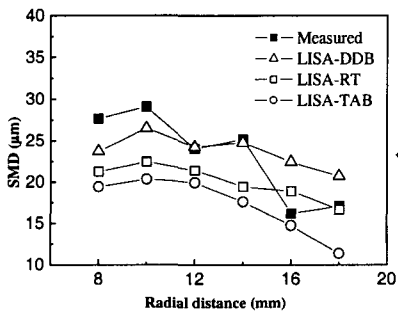
Fig. 5 Patterns of SMD distribution according to hybrid models (P=5MPa, L=20mm)

은 분열이 계속적으로 일어나 다른 모델들 보다 가장 작은 SMD의 값을 보여주는 것을 알 수 있다. 2차 분열을 RT분열을 사용한 결과는 5MPa에서는 실험치와 가장 근접한 결과를 얻었으나 역시 고압 분사에 있어서는 DDB모델과 TAB모델의 중간 정도의 값이 예측되었다. 그리고 1차 분열의 특징을 살펴보면 5MPa과 7MPa에서 모두 WAVE모델이 LISA모델보다 작은 SMD의 값이 예측되는 것을 살펴볼 수 있다.

이것은 WAVE모델에서 분열이 LISA모델보다 분사 초기에 더욱 활발히 일어났음을 알 수 있다. 이는 분사 초기에 LISA모델은 분열 길이에 도달할 때까지 분열, 합착, 항력에 영향을 받지 않기 때문에 초기에 SMD가 분열 길이에 도달할 때까지 그대로 유지되어 WAVE모델보다 더 큰 SMD를 예측한 것이라 생각된다.



(a) Hybrid models with WAVE model



(b) Hybrid models with LISA model

Fig. 6 Patterns of SMD distribution according to hybrid models (P=7MPa, L=20mm)

### 5. 결론

직접분사식 가솔린 분무를 모사하기 위하여 1차 분열은 WAVE모델과 LISA모델을, 2차 분열은 TAB, DDB, RT모델을 사용하여 해석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분무 형상의 경우 고압일수록 와류의 형상이 뚜렷이 나타났으며 DDB모델의 경우에는 다른 항력모델의 적용으로 강한 와류 형상이 보여졌다.
- 2) 분무 선단 관통 거리에서는 모든 복합 모델들이 실험치와 일치하였으며 2차 분열을 RT모델을 사용한 경우 가장 적은 관통거리를 보여주었다.
- 3) SMD의 경우에는 5MPa인 경우에는 TAB, RT모델을 적용한 결과가 실험치와 잘 일치하였고, 7MPa의 경우에는 DDB모델의 경우가 실험치와 일치하였다.

4) 5MPa이하의 분사 압력에서는 1차 분열을 WAVE모델과 2차 분열을 TAB, RT모델을 적용하는 것이 실험치에 근접한 결과를 얻을 수 있고, 7MPa이상의 고압분사에서는 1차 분열을 LISA모델을 2차 분열은 DDB모델을 적용하면 실험값에 근접하는 좋은 결과를 얻을 것으로 생각된다.

### 후 기

본 연구는 목적 기초 연구 사업(R01-2000-000303-0) 및 BK21 핵심 사업의 연구 지원에 의하여 수행된 연구의 일부로써 연구를 지원해 주신 관계기관에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- 1) F. Q. Zhao, M. C. Lai, D. L. Harrington, "The Spray Characteristics of Automotive Port Fuel Injection-A Critical Review," SAE 950506, 1995.
- 2) C. S. Lee, K. H. Lee, M. S. Chon, 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.
- 3) C. Beatrice, P. Belardini, C. Bertoli, M. C. Cameretti, N. C. Cirillo, "Fuel Jet Models for Multidimensional Diesel Combustion Calculation ; An Update," SAE 950086, 1995.
- 4) 김정일, 노수영, "디젤분무의 모사를 위한 혼합 모델의 개발," 한국자동차공학회논문집, 제9권 제1호, pp.8-19, 2001.
- 5) R. D. Reitz, "Modeling Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays," Atomisation and Technology, Vol.3, pp.309-337, 1987.
- 6) D. P. Schmidt, I. Nouar, P. K. Senecal, C. J. Rutland, J. K. Martin, R. D. Reitz, J. A. Hoffman, "Pressure-Swirl Atomization in the Near Field," SAE 1999-01-0496, 1999.
- 7) N. Dombrowski, W. R. Johns, "The Aerodynamic Instability and Disintegration of Viscous Liquid Sheets," Chem. Eng. Sci., Vol.18, pp.203-214, 1963.

- 8) P. J. ORourke, A. A. Amsden, "The tab Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup," SAE 872089, 1987.
- 9) E. A. Ibrahim, H. Q. Yang, A. J. Prezkwas, "Modeling of Spray Droplets Deformation and Breakup," AIAA J. Propulsion and Power, Vol.9, No.4, pp.652-654, 1993.
- 10) S. S. Hwang, Z. Liu, R. D. Reitz, "Breakup Mechanisms and Drag Coefficients of High-Speed Vaporizing Liquid Drops," Atomization and Sprays, Vol.6, pp.353-376, 1996.
- 11) R. Bellman, R. H. Pennington, "Effects of Surface Tension and Viscosity on Taylor Instability," Quarterly of Applied Mechanics, Vol.12, pp.151-162, 1954.
- 12) T. F. Su, M. A. Patterson, R. D. Reitz, P. V. Farrel, "Experimental and Numerical Studied of High Pressure Multiple Injection Sprays," SAE 960861, 1996.
- 13) S. W. Park, K. A. Sung, 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.