

< 논문 >

## 분사각 변화에 따른 횡단류에 분사되는 액체제트의 분무특성에 대한 수치적 연구

이관형\* · 고정빈\* · 구자예†  
(2005년 9월 9일 접수, 2005년 12월 28일 심사완료)

### Numerical Study for Spray Characteristics of Liquid Jet in Cross Flow with Variation of Injection Angle

Kwan-Hyung Lee, Jung-Bin Ko and Ja-Ye Koo

**Key Words:** Cross Flow(횡단류), Droplet Breakup Model(액적분열모델), Penetration Length(침투 길이), Breakup Length(분열길이), Injection Angle(분사각)

#### Abstract

The spray characteristics of liquid jet in cross flow with variation of injection angle are numerically studied. Numerical analysis was carried out using KIVA code, which was modified to be suitable for simulating liquid jet ejected into cross flow. Wave model and Kelvin-Helmholtz(KH)/Rayleigh-Taylor(RT) hybrid model were used for the purpose of analyzing liquid column, ligament, and the breakup of droplet. Numerical results were compared with experimental data in order to verify the reliability of the physical model. Liquid jet penetration length, volume flux, droplet velocity profile and SMD were obtained. Penetration length increases as flow velocity decreases and injection velocity increases. From the bottom wall, the SMD increases as vertical distance increases. Also the SMD decreases as injection angle increases.

#### 기호설명

$a$  : 모액적의 직경, 액적의 가속도  
 $B_0$  : 켈빈-헬름홀츠 모델 상수  
 $B_1$  : 켈빈-헬름홀츠 모델의 시간상수  
 $C_{RT}$  : 레이아웃-테일러 모델 상수  
 $C_r$  : 레이아웃-테일러 모델의 시간상수  
 $d_0$  : 노즐 직경  
 $g$  : 중력 가속도  
 $g_t$  : 이동방향으로의 액적 가속도  
 $K_{RT}$  : 레이아웃-테일러 파동 수

$q$  : 모멘텀 플럭스 비( $q = \rho_l U_l^2 / \rho_g U_g^2$ )  
 $r$  : 분열 직후의 액적 직경  
 $Re$  : 레이놀즈 수( $Re_l = \rho_l U D / \mu$ )  
 $T$  : 테일러 수( $T = Z \sqrt{We_g}$ )  
 $U_r$  : 액적/기체 상대속도  
 $We$  : 웨버 수( $We = \rho_g U_g^2 D / \sigma_l$ )  
 $Z$  : 오네서지 수( $Z = \sqrt{We_l / Re_l}$ )  
 $y$  : 액체 제트의 분사방향 축  
 $z$  : 가스의 유동방향 축

#### 그리스 문자

$A$  : 최대파동 성장률에 상응하는 파장  
 $\mu$  : 점성  
 $\rho$  : 밀도  
 $\sigma$  : 표면 장력  
 $\tau$  : 분열 시간

† 책임저자, 회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과  
 E-mail : jykoo@hau.ac.kr  
 TEL : (02)300-0116 FAX : (02)3158-4429

\* 회원, 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

$\Omega$  : 최대 파동 성장률

하첨자

$g$  : 기체

$l$  : 액체

$RT$  : 레이아웃-테일러 모델

## 1. 서론

횡단류 내부로의 액체 연료 분사는 분사된 액체 연료의 미립화와 이를 통한 유동 가스와의 혼합을 목적으로 하는 매우 유용한 방법이며 이러한 방법의 대표적인 활용 사례로는 가스 터빈 엔진의 후기 연소기나 램젯, 스크램젯 엔진 연소기를 들 수 있다. 이들 연소기에서 액체 제트의 미립화는 연소 효율과 안정성 및 공해물질의 배출량과 같이 엔진에서 매우 중요하게 다루어지는 사항들에 직접적으로 영향을 미치는 요인이다. 그러나 액체 제트의 미립화는 다양한 인자들에 의해 영향을 받기 때문에 이 과정을 명확히 해석하는데 있어서 큰 어려움이 따른다. 또한 이러한 미립화 과정은 액적과 주위를 통과하는 가스와의 상대속도 차에 의하여 일어나는 현상으로 초기 액적이 분열되는 1차 분열 직후 액주의 분열과 동시에 2차 분열 과정을 통해 더욱 세분화 되며 이 과정들은 초기 액적 분열과는 완전히 다른 메커니즘을 나타낸다.

액적의 분열 과정을 수치적으로 해석하기 위한 액적 분열 모델은 그동안 여러 연구자들에 의해 다양한 모델들이 제안되었는데 그 중 TAB(Taylor Analogy Breakup)<sup>(1)</sup> 모델은 액적의 변형을 스프링-질량계의 감쇠강제조화 운동으로 모사하여 액적의 표면장력을 스프링의 복원력으로, 액적에 작용하는 공기항력은 질량에 작용하는 외력으로 간주한다. 또한 DDB(Droplet Deformation and Breakup)<sup>(2)</sup> 모델은 TAB 모델이 액적의 세로방향의 변위를 선형적으로 가정하는 비합리성을 개선하여 비선형적인 액적의 변형을 계산하기 위해 사용되는 모델이며 이 모델의 핵심은 액적변형의 한계치 초과에 의해 야기되는 액적의 분열을 고려하는 것이다. 초기의 구형액적으로부터 공기역학적 항력에 의해 편 원의 원반형 타원체의 액적으로 형상이 변형되는 과정에 기초한다. 이 모델의 특징은 분열과정에서 운동에너지와 점성의 소

산을 무시할 수 있다는 가정과 웨버수 20 이상의 조건 하에 적용 가능하다는 점이다. 그러나 이러한 모델들은 현재에 사용되는 엔진이나 연소실 내부와 같이 초고압의 연료분무에 적용하게 되면 액적이 지나치게 빨리 분열하고, 분열된 액적의 크기도 너무 작게 해석되어 분무의 관통력을 실제보다 작게 예측하는 단점이 있다.

이러한 단점을 개선하기 위하여 ETAB(Enhanced TAB)<sup>(3)</sup>와 APTAB(Aerodynamically Progressed TAB)<sup>(4)</sup> 모델 등이 개발되었다. 이러한 진보된 모델들은 실험과 비교적 잘 맞는 결과를 나타내지만 다양한 분사조건에서 만족한 결과를 얻기 위해서는 아직도 개선되어야 할 점이 남아 있다. 반면에 wave<sup>(5)</sup> 모델은 Reitz에 의해 제안된 분열모델로서 이것은 Kelvin-Helmholtz의 불안정 이론을 바탕으로 액주 표면에서 주위 가스와의 상대 속도 차에 의하여 미소 크기의 불안정파가 존재한다는 가정을 통해 액주의 분열 및 2차 분열 과정까지 해석이 가능하다. Beale et al.<sup>(6)</sup>은 wave 모델에 Rayleigh-Taylor 모델을 접목한 변형된 wave 모델인 KH-RT hybrid 모델을 제안하였으며, 최근의 연구를 살펴보면 Madabhushi<sup>(7)</sup>는 이러한 wave 모델을 이용하여 분열과정을 모델링하였고 그 결과로서 수정된 wave 모델들을 도출하였다.

복잡하고 세분화 되어있는 미립화 과정을 정확하게 예측하기 위해서는 정확한 실험 자료와 수치적으로 개발된 분열 모델들과의 결과 비교가 선행 되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 비교적 신뢰성이 높고 다양한 결과를 보여주는 실험 자료로서 Wu et al.<sup>(8)</sup>의 실험 결과를 채택하고, 액체 제트의 미립화 과정을 wave 모델과 KH-RT hybrid 모델을 이용하여 수치적으로 모델링 하여 각각의 경우에 대하여 액체제트의 침투길이 및 액적의 SMD와 분사 방향으로의 속도, 체적 유속 등에 대한 계산 결과를 비교함으로써 두 모델들에 적용된 물리적 항들의 적절성을 검증하고 분사각 변화에 따른 횡단류 내부에 분사되는 액체 제트의 분열 및 분무 특성을 규명하였다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 Wave 모델

Kelvin-Helmholtz 이론을 바탕으로 한 wave 모델은 기본적으로 반경  $a$ 를 갖는 모액적(parent

droplet)으로부터 반경  $r$ 을 갖는 새로운 액적들로 분열이 일어나며 이 새로운 액적들의 반경은 다음과 같이 나타내어진다.<sup>(5)</sup>

$$r = B_0 \Lambda \quad (1)$$

여기서  $\Lambda$  는 KH wave의 최대 성장률  $\Omega$  에 대응하는 파장을 나타내며  $B_0$  는 상수로써 그 값은 0.61 정도이다.<sup>(5)</sup> 또한 최대 성장률  $\Omega$  과  $\Lambda$  는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Omega = \frac{0.34 + 0.38 We_g^{1.5}}{(1+Z)(1+1.4T^{0.6})} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_l a^3}} \quad (2)$$

$$\Lambda = \frac{9.02a(1+0.45\sqrt{Z})(1+0.4T^{0.7})}{(1+0.865We_g^{1.67})^{0.6}} \quad (3)$$

액적의 분열과정 동안 모액적은 질량의 감소에 따라 그 직경도 줄어들게 된다. 모액적의 반경 변화율은 다음의 식을 사용한다.

$$\frac{da}{dt} = -\frac{(a-r)}{\tau} \quad (4)$$

여기서  $\tau$ 는 액적분열시간을 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$\tau = \frac{3.726B_1 a}{\Omega \Lambda} \quad (5)$$

$B_1$ 은 시간상수이며 본 연구에서는 Xin et al.<sup>(9)</sup> 이 권장한 값인 40을 사용하였다.

## 2.2 KH-RT hybrid 모델

KH-RT hybrid 모델은 액적의 2차 분열을 해석하기 위하여 사용하였다. RT 모델은 액적이 분열될 때의 특정한 특성 분열 시간까지 증가하는 액적 표면의 불안정성을 예측한다.<sup>(6)</sup> RT 모델의 최대 성장률  $\Omega_{RT}$ 는 다음과 같다.

$$\Omega_{RT} = \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3\sigma}} \frac{[-g_l(\rho_l - \rho_g)]^{3/2}}{\rho_l + \rho_g}} \quad (6)$$

여기서  $g_l = g \cdot \vec{j} + a \cdot \vec{j}$ 로 정의되며  $a$ 는 액적의 가속도를 나타낸다. 이때 파동수(wave number)는  $K_{RT} = \sqrt{-g_l(\rho_l - \rho_g)/3\sigma}$ 로 정의된다. 마찬가지로 최대 성장률에 상응하는 파장의 크기는  $2\pi C_{RT}/K_{RT}$ 이며 만일 파장의 크기가 액적의 직경보다 더 작다면 RT wave가 액적 표면에서 발달하고 있는 것으로 가정한다. 이때의 분열시간은 다음과 같다.

$$\tau_{RT} = \frac{C_r}{\Omega_{RT}} \quad (7)$$

여기서  $C_r$ 는 RT 모델의 시간상수로써 그 값은 1.0 정도이다.<sup>(6)</sup> 만일 RT wave가 분열시간보다 더 큰 시간동안 성장하게 되면 액적의 분열이 일어나는 것으로 가정하며 이때의 액적 직경  $r$ 을 다음과 같이 계산한다.

$$r = \frac{\pi C_{RT}}{K_{RT}} \quad (8)$$

여기서  $C_{RT}$ 는 상수로써 그 값은 0.1을 사용한 다.<sup>(6)</sup>

RT 모델을 사용하기 위해서는 액체 제트의 분열 길이를 정의하여야 한다. 이것은 분열 길이까지와 그 이후의 분열 과정이 서로 다른 비율로 발생한다는 Levich의 이론<sup>(10)</sup>에 기초한 것으로써 분열 길이는 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$L_b = C_b d_0 \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \quad (9)$$

여기서  $C_b$ 는 상수로써  $C_b = B_1/2$ 로 정의할 수 있다. 본 연구에서는 식 (9)에 정의된 분열길이 이전에는 KH모델을 사용하고 이 분열길이를 초과한 이후의 액적들에 대한 분열과정은 KH모델과 RT모델을 함께 적용한 KH-RT hybrid모델을 사용하였다.

## 2.3 가정 및 경계조건

Wave 모델을 사용하기 위하여 액주표면에 공기와의 상대속도에 의하여 미소 크기의 불안정파가

Table 1 Properties and test condition of liquid jet

	Water
$\rho(kg/m^3)$	996
$\sigma(N/m)$	$63.5 \times 10^{-3}$
$\mu(kg/m/s)$	$8.65 \times 10^{-4}$
$d_0(mm)$	0.5
$v_l(m/s)$	8.9 ~ 37.7
$q$	3.38 ~ 28.4
$We_l$	760 ~ 11300

존재한다고 가정하고, 초기 액적은 노즐 직경과 동일한 크기를 갖는 “blob”으로 가정한다. 또한 액적이 구에서 원판으로 변한다는 것을 나타내는 동적 항력 모델을 공기 저항계수에 도입하였다. 난류에 대한 영향을 고려하기 위하여 난류모델은 표준  $k-\epsilon$  모델을 적용하여 벽면 법칙도 고려하였다. 계산 영역은 3차원의  $x, y, z$  좌표를 사용하였으며 사용된 격자수는 그 조밀성이 계산결과에 영향을 줄 수 있는데 본 연구에서는 한 cell의 크기를 2mm로 설정하였고  $n_x=20, n_y=50, n_z=90$ 으로 설정하여 전체 계산 도메인의 크기는  $4 \times 10 \times 18 cm$ 로 하였다. 계산 시간 간격은  $1.0 \times 10^{-6} sec$ 로 설정하여 비정상과정으로 계산을 수행하였다. 또한 노즐에서 분사되는 수많은 액적들을 대표하는 액적군의 개념인 “parcel”의 개수는 4000으로 설정하였다. 주위압력, 벽면의 온도와 초기 유입 공기의 온도는 계산결과와 실험결과와의 정확도를 위해 실험에서의 주위 조건과 일치하도록 하였으며 분사되는 액적의 증발과 액적간의 충돌영향도 고려하였다.

분사되는 액체는 물을 사용하였으며 액체 제트의 여러 상태량 및 테스트 조건을 Table 1에 나타내었다. 유입 가스는 공기이며 속도는 69~137 m/s 이다.

### 3. 계산 결과 및 고찰

#### 3.1 액체 제트의 분열 형상 및 유동장

액체 제트의 분열 형상과 계산 영역 내부유동장의 속도 분포를 Fig. 1에 나타내었다. 액체 제트의 분사 속도는 19.3 m/s 이며 공기의 유동 속

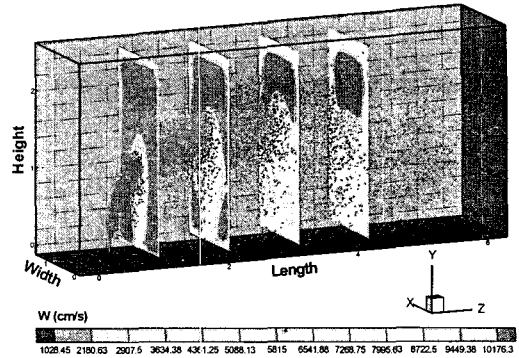


Fig. 1 Schematic of liquid jet and velocity contour

도는 103 m/s이다. 노즐을 통해 횡단류 내부로 수직 분사된 액체 제트는 초기 분열 과정을 거쳐 리거먼트(ligament)라고 불리는 큰 덩어리의 액적들과 그보다 작은 무수히 많은 액적들이 생성된다. 이는 다시 2차 분열과정을 통해 더욱더 작은 크기의 액적들로 분열되어 유동장 내부로 분산된다.

유동의 속도는 유동장의 전 영역에서 비교적 균일한데 액주의 영향으로 인해 액주 후방에서 속도가 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이러한 현상은 액주에서 멀어질수록 소멸되게 되는데 이것은 액주의 후방에서 발생하는 와류를 고려한 액적 분열 모델의 개발 필요성을 의미하는 것으로써 현재 사용된 분열 모델은 이러한 현상을 해석하는데에는 적합하지 않으며 실험과의 결과 비교에서 나타나는 바와 같이 일정 영역에서 오차가 발생하게 된다.

#### 3.2 침투 길이(Penetration length)

Fig. 2에 횡단류 내부에 분사되는 액체 제트의 침투길이를 도시하였다. 유입공기의 속도는 103m/s이고 액체 제트의 분사속도는 29m/s이며 이러한 조건에서 wave모델과 KH-RT hybrid모델을 사용하여 각각의 계산된 침투길이를 Wu 등이 실험을 통해 도출한 침투길이에 대한 실험식<sup>(8)</sup>인  $y_t/d = 4.3q^{0.33} (x/d)^{0.33}$ 과 비교하여 나타낸 그림이다. Fig. 2를 보면 수치해석에 사용된 두 모델 모두 액체 제트의 초기 침투 길이를 비교적 잘 예측하고 있다는 것을 알 수 있다. 두 모델 모두 초기 분열에서는 동일하게 wave 모델을 사

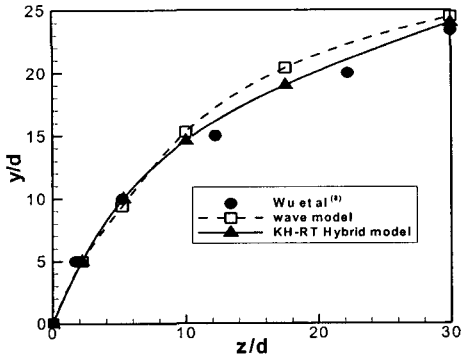


Fig. 2 Penetration length of liquid jet

용하게 되므로 초기의 침투 길이는 두 모델이 동일한 결과를 나타내며 이것은 분열 과정이 진행되면서 설정된 조건에 따라 RT 모델이 적용되면서 wave 모델만을 사용한 결과보다 hybrid 모델이 적용된 수치해석 결과가 실제현상에 더욱 근접한 수치 해를 갖게 되는 것을 알 수 있다. 이것은 2차 분열 과정을 RT 모델로 해석하는 hybrid 모델의 개념이 실제 분열 현상을 예측하는데 유용하다는 것을 의미한다.

### 3.3 분무 특성

횡단류 내부의 액체 제트 분무특성을 살펴보기 위하여 침투 길이 외에 SMD와 체적 유속 및 분사 방향으로의 액적 속도분포를 고려하였다. 여기서 분사방향의 위치는 계산도메인 상의  $z=0$  인 지점으로 부터의 거리이다.

$z/d_0=300$  인 지점을 임의로 선정하여 이 지점에서의 실험결과와 수치해석 결과를 비교하여 Fig. 3과 4에 각각 나타내었다. Fig. 3에서는 유입 공기 속도가 103m/s로 일정하고 12.8과 29m/s의 분사 속도를 가지는 경우에 대해서 실험과 수치해석 결과를 비교하여 나타내었다. Fig. 4에서는 분사속도가 19.3m/s로 일정할 때 유입공기의 속도를 69m/s와 그 두 배에 가까운 137m/s일 경우에 대한 실험과 수치해석 결과를 나타내었다.  $y$  축은 액체가 분사되는 방향이며  $y/d_0$ 로 무차원화하여 결과를 비교하였다.

Fig. 3을 살펴보면 분사속도가 작은 위 그림들의 경우 분사속도가 상대적으로 높은 아래 그림에 비해 체적유속의 분포가 더 아래쪽으로 위치

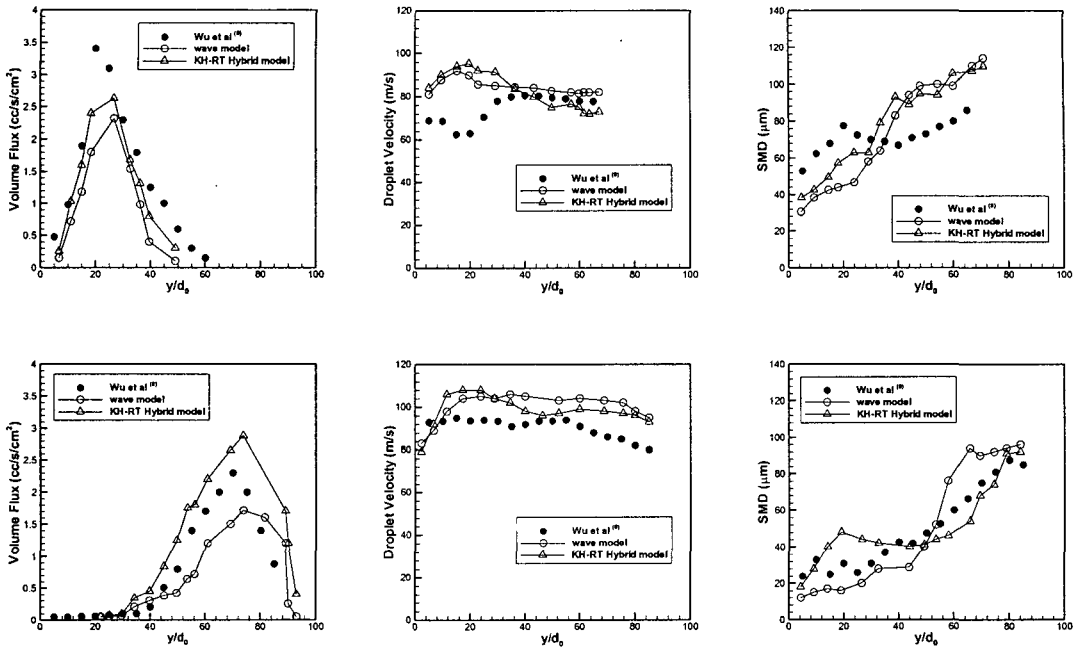
하며 액적의 크기는 분사속도가 클수록 미립화가 활발히 진행되어 더 작아지는 것을 알 수 있다. Fig. 4에서는 유입공기의 속도가 큰 아래 그림의 경우 체적유속의 분포가 더 아래쪽에 위치하게 되며 액적의 크기는 유입공기의 속도가 클수록 작아지며 유입공기의 속도가 상대적으로 작은 경우 미립화가 덜 진행되어 액적의 크기는 더 크지만 그림에서도 알 수 있듯이 한 단면에서 계산영역 전체에 걸쳐 분포되어 있음을 알 수 있다. 모든 경우에 대하여 액체의 분사 속도가 클수록 체적 유속의 최대치가 형성되는 높이가 증가한다. 전반적으로 체적 유속의 최대치에 대한 예측은 KH-RT hybrid 모델이 wave 모델보다 조금 더 정확하지만 wave 모델은 그 값을 실제보다 작게 예측하는 반면에 hybrid 모델은 더 크게 예측하기 때문에 그 정확도는 크게 차이를 보이지 않는다.

액적의 분사방향 속도 결과는 Fig. 3의 분사속도 12.9m/s 와 Fig. 4의 유입공기속도 137m/s 의 경우 실험과 수치해석 결과에서 많은 오차를 나타낸다. 이것은 분사속도가 작거나 유입공기의 속도가 커서 액체 제트의 휘는 정도가 클수록 액주 후방의 와류에 의한 영향이 커지게 되는데 실험의 경우에는 이러한 현상을 정확하게 측정할 반면 수치해석에 사용된 분열 모델들은 앞에서 지적한 바와 같이 와류의 영향을 포함하지 못했기 때문으로 생각된다. 분사 방향으로의 액적 속도는 전반적으로 큰 변화가 없이 일정하며 그러한 경향성은 수치해석 결과에서도 잘 나타나고 있다.

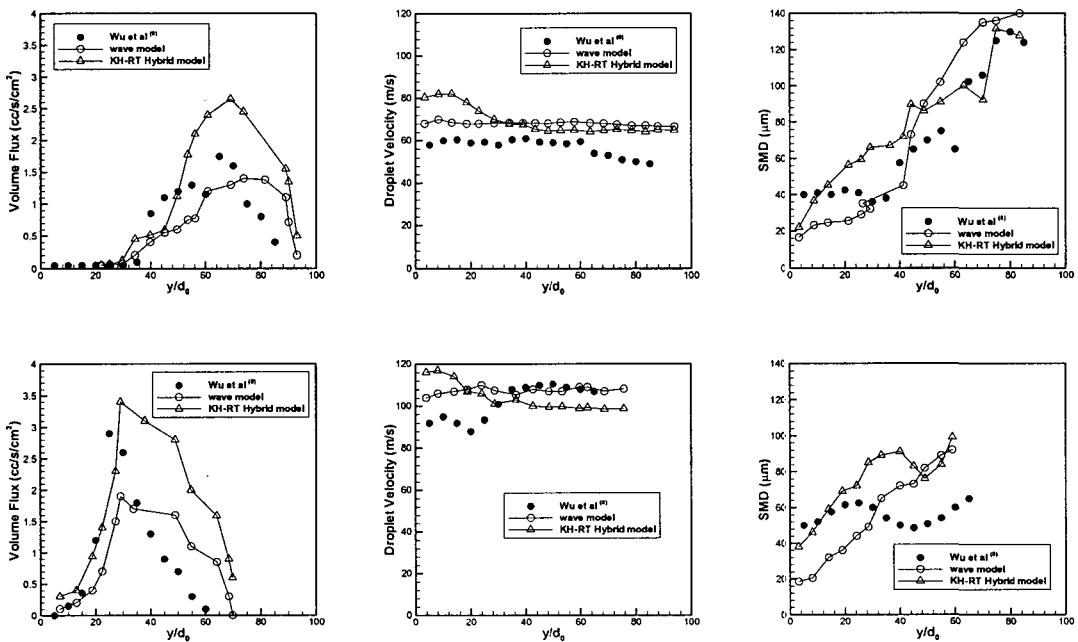
SMD의 경우  $y$ 방향의 상부로 올라갈수록 그 크기는 증가한다. 이것은 실제 액체 제트의 전반에 걸쳐 일정한 한 단면에서의 액적의 크기분포를 말해주는 것이며 두 모델을 통한 계산 결과 또한 비교적 이러한 현상을 잘 예측하고 있다. Hybrid 모델의 경우 초기에는 SMD를 wave 모델보다 더 크게 예측하다가 분열이 진행되면서 점점 그 현상이 역전되는데 이러한 현상은 앞에서 설명한 바와 같이 Fig. 2의 침투길이에 도 직접적으로 영향을 준다는 것을 실제로 확인할 수 있다.

### 3.4 분사각 변화에 따른 분무 특성

횡단류에 분사되는 액체 제트의 분사각 변화에 따른 분무 특성을 파악하기 위하여 횡단류에 수



**Fig. 3** Profiles of volume flux, droplet velocity and SMD with different injection velocity at  $z/d_0 = 300$  [ $V_i = 12.8$  (top) and  $29.0$  m/s (bottom),  $V_g = 103$  m/s]



**Fig. 4** Profiles of volume flux, droplet velocity and SMD with different gas stream velocity at  $z/d_0 = 300$  [ $V_i = 19.3$  m/s,  $V_g = 69$  (top) and  $137$  m/s (bottom)]

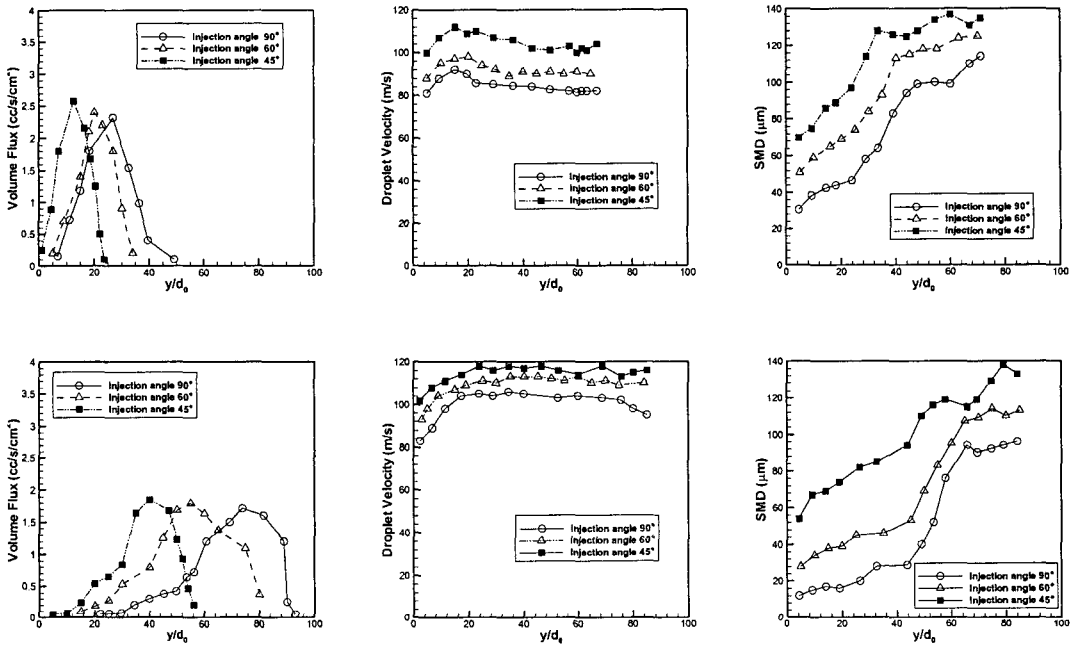


Fig. 5 Profiles of volume Flux, droplet velocity and SMD with variation of injection angle at  $z/d_0 = 300$   
 $[V_l = 12.8$  (top) and  $29.0$  m/s (bottom),  $V_g = 103$  m/s]

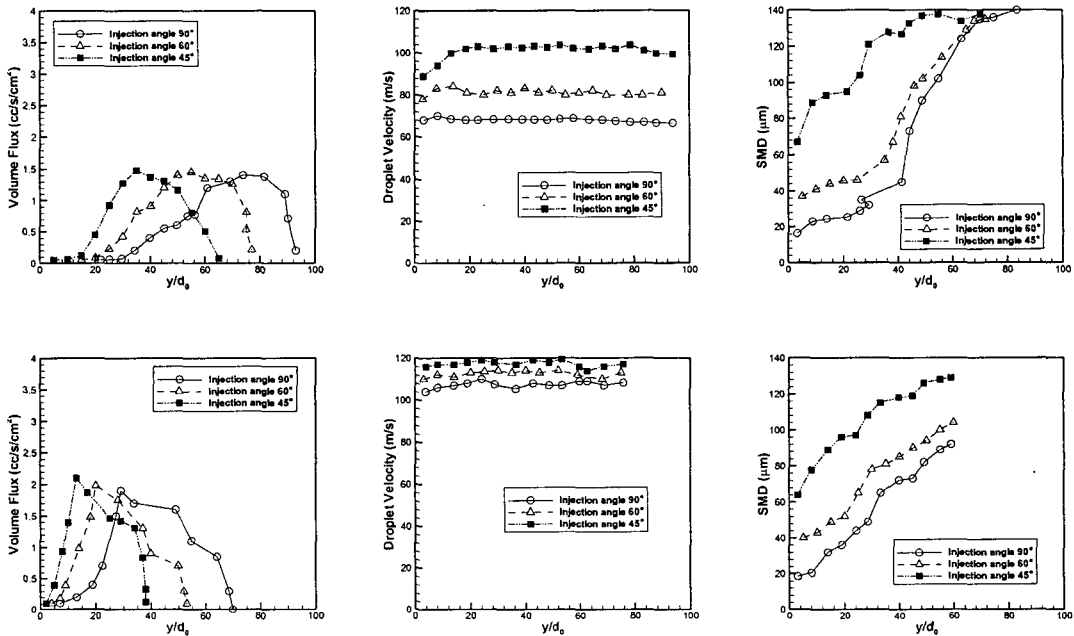


Fig. 6 Profiles of volume flux, droplet velocity and SMD with variation of injection angle at  $z/d_0 = 300$   
 $[V_l = 19.3$  m/s,  $V_g = 69$  (top) and  $137$  m/s (bottom)]

직을 이루는 분사각  $90^\circ$ 로부터 시계방향으로 분사각을  $60^\circ$ ,  $45^\circ$ 로 변화시켜 그에 따른 체적 유속과 액적 속도 및 SMD를 계산하였다. 적용된 모델은 wave 모델이며 그 이유는 침투길이 외에 wave 모델과의 결과 값 오차가 서로 비슷하며 hybrid 모델을 사용하였을 경우에는 계산 값들이 실제보다 좀 더 크게 예측되어 그림의 스케일을 벗어나 정량적인 비교 분석이 힘들기 때문이다.

Fig. 5는 분사속도 12.8과 29m/s, 유입공기의 속도 103m/s 일 경우에 대한 결과이며 Fig. 6은 분사속도가 19.3m/s, 유입공기의 속도가 69m/s와 137m/s일 경우에 대한 수치해석 결과이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 체적 유속의 경우 분사각 감소에 따라 최대치의 형성되는 높이가 감소하는 것을 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 침투길이 또한 분사각 감소에 따라 낮게 형성될 것이라는 것을 예측할 수 있다.

액적의 분사방향 속도는 분사각의 감소에 따라 증가하는 것을 알 수 있는데 이것은 분사각이 감소할수록 액체 제트의 미립화가 덜 진행되게 되어 상대적으로 큰 크기의 액적들이 형성되기 때문이다. 또한 액적의 속도는 유동장 내부로의 액적 분포에도 직접적인 영향을 미치는 요소이므로 미립화 이후의 다음단계인 연소과정에도 큰 영향을 줄 수 있다.

액적 속도와 마찬가지로 SMD 또한 분사각의 감소에 따라 그 크기가 증가하는 것을 알 수 있는데 이는 횡단류에 수직으로 분사하였을 경우 액적의 미립화가 가장 활발하게 일어나며 분사각이 감소함에 따라 미립화의 정도가 작아진다는 사실을 나타내는 결과이다. 따라서 분사각이 감소할수록 유동장 내부에는 상대적으로 큰 크기의 액적들이 더 많이 존재하여 이후의 연소과정에서 연소 효율을 저하시킬 수도 있지만 액적들의 유동 속도가 증가하여 유동장 내부로 빠르게 분포되어 나가게 되므로 화염의 안정성에는 도움이 될 것으로 생각한다.

#### 4. 결 론

Wave 모델과 KH-RT hybrid 모델을 사용하여 분사각 변화에 따른 횡단류 내부로 분사되는 액체 제트의 분무 특성을 규명하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) RT 모델이 적용되기 이전의 초기 침투길이 예측은 wave 모델과 hybrid 모델 모두 동일하며 그 결과 또한 비교적 정확하지만 분열과정이 진행될수록 hybrid 모델이 더욱 정확한 결과를 나타낸다.

(2) 체적 유속의 경우 wave 모델은 그 값을 실제보다 작게, hybrid 모델은 크게 예측하며 그 오차는 서로 비슷하다.

(3) 유동과 수직 방향으로의 액적 속도 분포는 액체 제트의 휨 정도가 클 경우 후류의 영향으로 인해 두 모델 모두 오차를 보이지만 전체적으로 균일한 속도분포를 가지는 실제 현상은 비교적 정확하게 예측하고 있다.

(4) SMD는 hybrid 모델이 wave 모델보다 그 값을 크게 예측하지만 이 현상은 분열이 진행되면서 반대가 되는 경향을 보인다.

(5) 분사각이 감소함에 따라 체적 유속의 최대치가 형성되는 높이와 침투길이는 감소하며 액적의 분사방향으로의 속도와 SMD는 점차 증가한다.

#### 후 기

본 연구는 2005년도 한국항공대학교 교비 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) O'Rourke, P.J. and Amsden, A.A., 1987, "The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup," SAE Trans., 872089.
- (2) Ibrahim, E.A., et al., 1993, "Modeling of Spray Droplets Deformation and Breakup," *J. of Propulsion and Power*, Vol. 9, No. 4, pp. 651~654.
- (3) Tanner, F.X., 1997, "Liquid Jet Atomization and Droplet Breakup Modeling of Non-Evaporation Diesel Fuel Sprays," SAE Paper 970050.
- (4) Park, J.H., Hwang, S.S. and Yoon, Y.B., 2000, "Aerodynamically Progressed Taylor Analogy Breakup(APTAB) Model for Accurate Prediction of Spray Droplet Deformation and Breakup," ILASS-Korea Vol. 5, No. 2, pp. 53~60.
- (5) Reitz, R.D., 1987, "Modeling Atomization Processes in High-pressure Vaporizing Sprays,"



- Atomization and Sprays Technology*, Vol. 3, pp. 309~337.
- (6) Beale, J.C. and Reitz, R.D., 1999, "Modeling Spray Atomization with The Kelvin-Helmholtz / Rayleigh-Taylor Hybrid Model," *Atomization and Sprays*, Vol. 9, pp. 623~650.
- (7) Madabhushi, R.K., 2003, "A Model for Numerical Simulation of Breakup of a Liquid Jet in Crossflow," *Atomization and Sprays*, Vol. 24, pp. 889~912.
- (8) Wu, P.K., Kirkendall, K.A., Fuller, R.P. and Nejad, A.S., 1998, "Spray Structures of Liquid Jets Atomized in Subsonic Crossflows," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 13, No. 2, pp. 173~182.
- (9) Xin, J. Ricart, L. and Reitz, R.D., 1998, "Computer Modeling of Diesel Spray Atomization and Combustion," *Combustion Sci. Technol.*, Vol. 137, 1-6, p. 171.
- (10) Levich, P.J., 1962, "Physicochemical Hydrodynamics," Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.