

# 노즐 형상비에 따른 캐비테이션 및 내부 유동 특성에 관한 수치적 연구

한동식\* · 김현규\* · 장영준\*\* · 전충환†

## A Numerical Study on the Characteristics of Cavitation and Internal Flow According to Nozzle Length-to-Diameter Ratio

Dong-Sik Han, Hyun-Kyu Kim, Young-June Chang and Chung-Hwan Jeon

**Key Words:** Cavitation(캐비테이션), Nozzle L/D(노즐 형상비), VOF(Volume-of-Fluid)

### Abstract

Spray formation mechanism was controlled by a cavitation inside an injection nozzle. Nozzle geometry affects spray characteristics and formation behavior, which could determine engine performance and pollutant formation. A study was carried out on the influence of aspect ratio on cavitation inside a nozzle. The cavitation model available in Star-CD code was used to obtain cavitation behavior inside nozzle, which was compared with previous experimental results. In this paper, a CFD approach combining multiphase Volume-of-Fluid(VOF) and k-model was applied. The numerical results are similar with the experimental results.

### 기호설명

$\mu_t$	동적와류점성 (m/s)
$k$	난류운동에너지
$\omega$	비소산율
$t$	비레이노즐 응력
$P_{crit}$	cavitation 지점 압력 (Pa)
$P_v$	연료증기압력 (Pa)
$\rho_v$	증기밀도 (kg/m <sup>3</sup> )
$C$	액체 체적율
(1-C)	증기 체적율
$\mu_l$	연료 점성 (kg/m-s)
$\mu_v$	증기 점성 (kg/m-s)
$f_{local}$	국부보이드율
$n$	기포수밀도

$C^*$	국부체적율
$C_k$	모델상수 (=8)

### 1. 서론

인젝터 노즐은 엔진에 중요한 부분을 차지하고 있다. 최근 엔진의 고효율과 배기가스의 감소가 요구됨에 따라 연소 특성에 많은 영향을 주는 분무거동에 대한 정확한 이해가 필요하게 되었다. 특히, 엔진 내부에서 연료분사장치나 인젝터로부터 분사된 연료의 분무거동은 혼합기 형성, 연소 및 배출물 형성에 중요한 요소이며, 이에 연료 분무의 미립화를 통한 분무의 증발 및 혼합 특성 개선에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

연료의 분무 거동은 노즐 내부로 압력이 가해지면 분사된 연료는 액주 또는 액적으로 미립화된다. 미립화의 정도는 분무 노즐의 성능을 나타내는 주요한 척도이다. 미립화의 정도를 지배하는 주요 변수로는 노즐의 직경, 분사 연료 및 주위 기체의속도, 점도, 밀도, 표면장력 등

(2008년 10월 9일 접수 ~ 2008년 12월 8일 심사완료)

\*부산대학교 기계공학과 대학원

\*\*부산대학교 기계공학부, PC<sup>3</sup>

†책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부, PC<sup>3</sup>, RIMT

E-mail : chjeon@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-3051 FAX : (051)582-9818

이 있으며 이들의 변화에 따른 입경 분포 변화에 대한 연구가 오랫동안 연구가 이루어져 왔다<sup>(1)</sup>.

또한, 현재까지 연구에 의하여 인젝터 노즐 내부에서 발생하는 캐비테이션(cavitation)이 분무의 미립화 특성에 큰 영향을 미치는 인자인 것으로 밝혀졌다. 분무의 미립화 특성의 개선을 위하여서는 노즐 내부에서 발생하는 cavitation 유동의 발달 메커니즘과 분무의 미립화 관계에 대한 정확한 이해가 이루어져야 한다.

Daikoku등<sup>(2)</sup>은 원통 노즐을 다양한 L/D와 분사조건에서 실험을 통하여 cavitation 에 관한 연구를 수행하였다. 이 실험을 통하여 노즐 L/D가 크면 노즐내부에 소용가 일어나며, 분사된 연료를 충분히 미립화 하지 못하지만, 노즐의 L/D가 작으면 낮은 분사압력에서도 cavitation이 발생하고, 분사된 연료의 미립화를 증진한다고 보고하였다.

Weixing등<sup>(3)</sup>은 VOF(Volume of Fluid)기법을 이용하여 분사압력에 따른 노즐 내부에 생성되는 cavitation의 거동을 수치 해석방법으로 연구하였다.

David등<sup>(4)</sup>은 디젤 인젝터의 노즐입구 형상에 따른 유동 특성을 수치해석방법으로 연구하였다.

Arcomanis등<sup>(5)</sup>은 실제 크기의 디젤 인젝터 노즐과 확장된 크기의 인젝터 노즐에서 cavitation 현상에 관한 실험을 수행하여, cavitation이 노즐 내부에 머물러 있는 생명주기는 서로 다르지만, 거시적인 cavitation 구조는 유사하다는 결과를 발표하였다.

Roth등<sup>(6)</sup>은 디젤 인젝터의 내부 유동 특성에 대한 노즐 형상의 영향을 조사하기 위해 다양한 노즐 형상에 대한 CFD 분석을 하였다. 이 연구에서 오리피스 입구 반경의 증가는 벽 근처에서 평균 출구 속도 및 유량계 수의 증가를 야기하는 반면, cavitation 유동영역은 감소하게 된다<sup>(13)</sup>.

실제 디젤 엔진에서 인젝터 노즐 내부에 일어나는 cavitation 현상을 관찰하고자 하는 연구가 진행되고 있지만 직접적으로 관찰하기에는 가시화 영역이 매우 작으며, 고압분사로 인한 빠른 유체의 속도로 인하여 가시화 연구에 많은 어려움이 따른다. 이러한 이유로 본 연구는 노즐 L/D에 따른 노즐 내부에 cavitation 특성을 파악하기위해 VOF기법을 이용하여 선행연구의 노즐실험에 사용된 물을 대한 실험결과와 수치결과를 비교하였다. 또한, 난류모델은 k- $\omega$ 모델을 이용하여 cavitation 유동을 구현하였고, STAR-CD<sup>(7)</sup> 프로그램을 이용하여 수치해석을 수행하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 난류모델

이전 연구에서 사용된 난류모델은 유동장에 수반된 이상(two-phase) 유동역학적인 현상들을 표현하는데 충분치 않다고 지적을 하고 있다<sup>(8)</sup>. 그리하여 우리는 Wilcox등<sup>(9)</sup> 제안한 단상유동인 k- $\omega$ 모델을 적용하여 cavitation 유동을 형성하였다. 동적와류점성( $\mu_t$ ), 난류운동에너지(k)와 난류 소산율( $\omega$ )에 대한 보존 방정식은 다음과 같다.

- Dynamics eddy viscosity  $\mu_t$  :

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \tag{1}$$

- Turbulence kinetic energy k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega x_j)}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial(\rho c_i)}{\partial x_i} - \beta k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \tag{2}$$

- Specific dissipation rate  $\omega$  :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega x_j)}{\partial x_j} = & \gamma \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial(\rho c_i)}{\partial x_i} - \beta_k k \omega^2 \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \tag{3}$$

여기서,  $i=1, 2$  그리고  $j=1, 2$  이차원 유동문제에 대한 지수이며, 비레이놀즈응력은 아래 (4)식으로 나타낸다.

$$\tau_{ij} = -\frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k + \mu_t \left( \frac{\partial c_i}{\partial x_j} + \frac{\partial c_j}{\partial x_i} \right) \tag{4}$$

여기서,  $i=j$ 에서 크로벡커 심볼(Kronecker symbol)은  $\delta_{ij}=1$ 로 나타낸다. Table 1은 Wilcox등<sup>(9)</sup> 제안한 밀폐계수(closure coefficients)이다.

### 2.2 BTP(Bubble Two Phase) 모델

BTP는 와류점성 그리고 cavitation 버블에 상호관계를 고려한 모델이다<sup>(7,10-11)</sup>. 여기서 공동(cavity)의 내부와 외부 부분은 압축성 점성 유체인 cavity에 관하여 단연속체로 가정하였다. 이 모델은 밀도가 매우 다양한 압축성 점성유체에 대해서 유동장을 거시적으로 나타내며 미시적으로 기포군과 같은 cavitation구조를 나타낸다.

BTP는 3-D Navier-Stoke's, Rayleigh식에 포함된 편미

Table 1 Closure coefficients for turbulence modeling

$\gamma$	$\beta_\omega$	$\beta_k$	$\sigma_\omega$	$\sigma_k$
0.52	0.072	0.09	2.0	2.0

분방정식을 계산하기 위해 유한차분법을 사용하였다.

여기서,  $P_{crit}$ 는 이상(two-phase) 유동에 압력장과 속도장의 객체인 표준기포역학접근(classical bubble dynamics approach)에 의해 측정된다.

게다가, 벽면에 기포저동은 시간에 따른 압력변화에 영향을 받는다. 이 문제는 이상(two-phase)간의 혼합 때문에 알기가 어렵다.

기포 핵(bubble nuclei)은 Blake의 임계설을 근거로 하여 기포평형을 BTP 모델에 사용하여 계산하였다.

$$P_{crit} = P_v - \frac{4\sigma}{3R} \tag{5}$$

BTP 모델에서 액체는 비압축성이다. 혼합 압축성은 보이드율(void fraction)에 변화에 의해 알 수있다. 이 모델은 변이밀도의 유체에 대해 액체-기체 혼합으로 대체한다고 가정한다.

기상(vapor phase)은 작기 때문에 이 모델은 질량 그리고 운동량을 무시한다. 단, 상변화 때문에 밀도변화만 고려한다. 점성효과와 국부체적율(local volume fraction)에 대한 추가적인 관계들은 정의되어야 한다. 혼합 밀도와 유사한, 혼합 점성은 다음식과 같이 주어진다.

$$\mu = \mu_l C + \mu_v (1 - C) \tag{6}$$

간이화한 국부균일모델(LHM: Local Homogenous Model)은 평균장 접근(mean field approximation)을 근거로 한다. 이것은 국부체적율을 정의하는데 사용된다.

$$f_{local} = n \frac{4}{3} \pi \Sigma R^3 \tag{7}$$

그리하여, 국부 증기율은 다음식과 같다.

$$C^* = 1 - n \frac{4}{3} \pi \Sigma R^3 \tag{8}$$

기포들은 항상 구형으로 정의한다. 기포들은 분리되어져 있으며, n의 값은 일정하다고 가정한다. 그리고 기포들은 액체속도에 의해 열을 대류로 보낸다. 다시 말하면 출구는 no slip조건을 적용하였다.

체적율에 대한 Transport 방정식은, Barotropic 모델 사용된 것과 유사한 국부공동원(local cavitation source)을 나타내기 위한 추가적인 식으로 나타낸다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{U} \nabla C = \frac{C^*}{\Delta t} \tag{9}$$

다음 식 10에서 레이디얼 운동(radial motion)인 Rayleigh 방정식은 구형 기포들의 성장과 충돌이 지배한다.

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{P_v - P}{\rho_L} \tag{10}$$

$P_v$ 는 이 모델에 대한 Rayleigh 방정식에 고정항으로 고려되어진다. 이것은 모델의 등온성으로 설명한다.

BTP 모델은 기포 역학문제인 기포 주위의 영향에 대한 원인을 포함한다. 계산 격자의 영향을 줄이기 위하여, 모델은 각각의 기포들의 상호관계를 고려한다. 상호관계 모델링은 Sub-Grid-Scale 모델을 기본으로 한다. 기포 상호 작용에 관한 식 (10)이후에, 마지막으로 Rayleigh-Plesset 방정식으로 나타낸다.

$$\left( 1 + 2\pi \Delta r^2 n R \right) R \frac{D^2 R}{Dt^2} \left( \frac{3}{2} + 4\pi \Delta r^2 n R \right) \left( \frac{DR}{Dt} \right)^2 + 2\pi \Delta r^2 \frac{Dn}{Dt} R^2 \frac{DR}{Dt} = \frac{P_v - P}{P_i} \tag{11}$$

식 (11)은 Rayleigh-Plesset의 일반화된 식이다. BTP 모델인 경우, n은 일정한 값을 가진다. 또한 식 (11)은 미분식은 no-slip 조건을 형성하기 위하여 총미분식으로 계산되어진다.

### 2.3 해석모델

이전 연구에서 Roosen 등<sup>(12)</sup>의 2차원 평면 실험 결과를 수치적인 모델로 구현하였다. 그리하여 실험과 수치 해석을 비교하여 수치해석 데이터의 정당성을 입증하며, 노즐 LD에 따른 내부 cavitation 유동을 고려하여 노즐 내부의 물리적인 현상을 연구하였다.

Figure 1은 노즐 내부의 이차원적 모델이다. 노즐의 크기는 0.28x1x0.2(diameter x length x width) mm<sup>3</sup>인 직사각형의 모양이며, 계산 시간을 줄이기 위하여, 이차원 유동과 대칭조건을 적용하였다. 컴퓨터의 메모리 용량과 계산 시간을 줄이기 위해 계산 격자는 약 18만개를 생성하였다.

Figure 2는 실험과 수치해석결과를 비교한 그림이다. 노즐 입구에서 기포(bubble)로 인한 cavitation이 생성이 되며 노즐 내부의 유동패턴이 변화되는 것을 볼 수 가

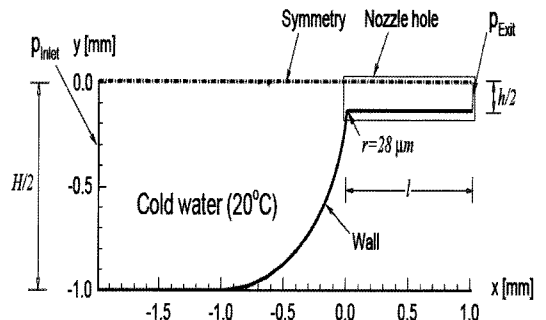


Fig. 1 The 2-D plane model for injection nozzle

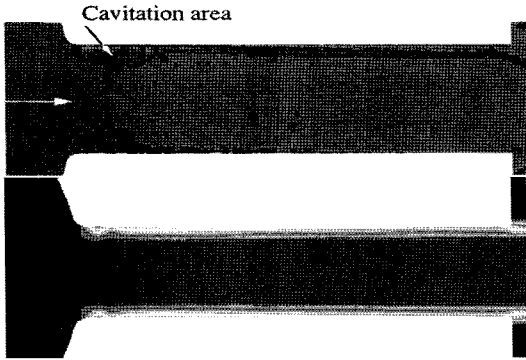


Fig. 2 The comparison of cavitating area between experiment and simulation

Table 2 Definition for various aspect ratio of nozzle

L/D	D(L=1)[mm]	L(D=0.28)[mm]
3	0.33	0.84
4	0.25	1.12
5	0.20	1.40
6	0.17	1.68
7	0.14	1.96

있다. 두 그림을 통하여 cavitation 크기는 다소 차이는 있지만, 노즐 내부에 미치는 cavitation 영역은 잘 일치하였다. 이로부터 노즐 L/D에 따른 cavitation 생성과 유동 특성에 대한 수치해석을 수행하였다.

2.4 경계 및 계산조건

해석모델의 노즐 inlet 압력은 80 bar, outlet 압력은 21 bar를 주었으며, nuclei concentration  $n_0=1.5 \times 10^{14}$  nuclei/ $m^3$  water, nuclei radius  $R_0=0.3 \mu m$  값을 주었다. 유체는 노즐내부에는 상온의 물이 분사하도록 정의하였다.

Table 2는 노즐의 L/D에 따라서 노즐의 직경과 길이를 변화시키므로 인해 cavitation의 생성여부와 노즐 내부의 유동 현상을 파악하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 캐비테이션(cavitation) 생성

Figure 3은 Volume-of-Fluid(VOF)기법을 통하여 노즐 내부의 cavitation 성장과정을 나타낸 그림이다. 내부유동을 난류유동(turbulent flow), 캐비테이션 시작 유동

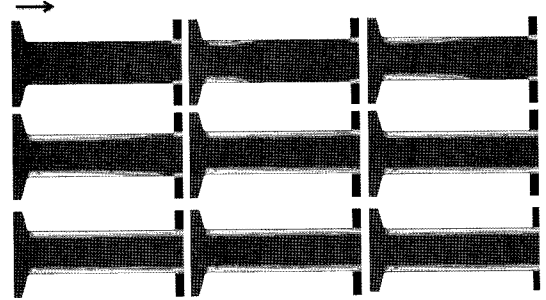


Fig. 3 Development of cavitation inner nozzle (time step is 0.04 ms)

(beginning of cavitation), 캐비테이션 성장유동(growth of cavitation), 하이드롤릭 플립유동(Hydraulic flip)의 4 가지로 유동을 구분 할 수 있다. 유체의 유속은 각각의 연료의 난류유동에서부터 캐비테이션의 성장 유동까지 증가하고, 하이드롤릭 플립 유동에서 단면적의 감소로 인한 유량 감소로 유속 또한 감소하게 된다<sup>(13)</sup>. 노즐 이전부분에 유체가 유입이 되며, 노즐 입구를 지나 출구에서 유체가 분사가 된다.

유체가 유입이 된 시점에서 0.26 ms 이후부터 노즐 입구 상·하 지점에 미소한 크기인 cavitation이 발생하게 된다. 시간이 지나면서 cavitation의 크기가 점점 커지게 된다. cavitation 초기 생성 때부터 0.16 ms 시점에 cavitation의 크기가 정체되며 내부 유체의 흐름은 안정화가 된다. 이로 인해 초기 유체분열은 cavitation의 초기에서 말기 부분의 유동이 불안정함으로 분열을 촉진시킬 수 있다고 사료된다.

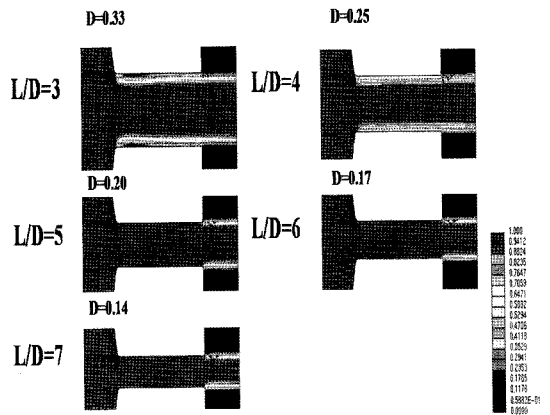


Fig. 4 Cavitation distribution as function of nozzle diameter at constant nozzle length

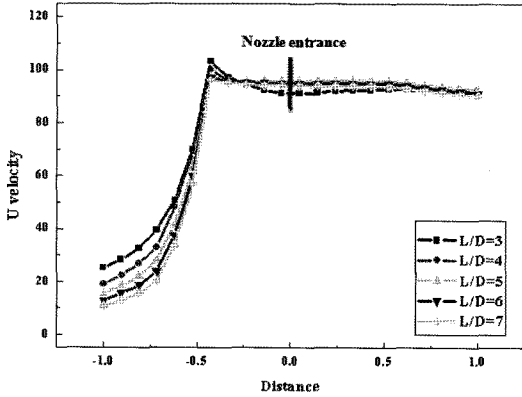


Fig. 5 Effect of L/D ratio on the U velocity as function of nozzle diameter at constant nozzle length

3.2 노즐 직경변화에 따른 캐비테이션(cavitation)유동 특성

Figure 4는 기본 노즐의 길이는 고정시키며 직경을 변화시켜 cavitation의 생성여부와 유동특성을 나타낸 이미지이다. Fig. 5는 노즐 중심을 따라 노즐 입구 전부터 출구 지점까지의 U-속도를 나타낸 그래프이다. L/D에 따라 U-속도는 모두 유사한 경향을 보였다.

노즐 직경을 변화 시켰을 때, 노즐 L/D가 증가함에 따라 cavitation의 크기가 작아지며, L/D가 5이후에는 cavitation이 생성이 되지 않는다. 이는 노즐의 직경이 작아짐으로 노즐 내부압력이 높아져서 노즐 출구의 유체의 속도가 cavitation이 형성 되었을 때보다 높아진다. 이로 인해 노즐 내부에 cavitation 유동이 발생하지 않는다.

또한, 노즐 입구전의 유속은 증가하게 되며, 노즐 입구로부터의 -0.5 mm지점에서 속도는 최고점에 이른다. 그 이후 유속이 일정하게 되므로 유동이 안정하게 흐른다. L/D 3은 다른 L/D에 비해 높은 유속을 보이다가 cavitation 지점을 지나면서 급격하게 유속이 낮아진다. cavitation 생성은 노즐 직경이 커짐으로 인해 빠른 유속이 형성되며 이로 인해 노즐 입구 부근에 cavitation 현상이 일어나게 된다. cavitation으로 인해 유동 유효 단면적이 작아졌다가 그 이후 커지게 된다. 이로 인해 유속이 점점 낮아지게 된다.

반면, L/D가 5, 6, 7인 경우 노즐 입구 전에 유속은 차이가 있지만, 노즐 입구 부분에 유속의 속도는 차이를 보이지 않는다. 그 이후, 유속도 각 L/D에 따른 유속은 유사한 경향을 보여주고 있다. 이는 노즐의 직경의 근소한 변화는 노즐 내부의 유속에 영향을 미치지 않음을 보여준다.

3.3 노즐 길이변화에 따른 캐비테이션(cavitation) 유동 특성

Figure 6은 기본 노즐의 직경은 고정시키며 길이를 변화 시켜 cavitation의 생성여부와 유동특성을 나타낸 이미지이다. Fig. 7 노즐 중심을 따라 노즐 입구 전부터 출구 지점까지의 U-속도를 나타낸 그래프이다. L/D에 따라 U-속도는 모두 유사한 경향을 보였다. 노즐의 직경을 고정하고 노즐의 길이를 변화 시켰을 때, cavitation의 크기는 노즐 L/D가 3, 4, 5에서는 별 차이를 보이지 않는다.

그러나 L/D가 6인 경우 cavitation 세기가 약해지며, L/D가 7인 경우 cavitation 현상이 일어나지 않는다. 이는 노즐길이 길어짐으로 인해 노즐 내부의 평균유속이 작으므로 인해 안정적인 유동이 형성된다.

모든 L/D는 노즐 입구 전에 유속은 유사하게 증가한다. 그리고 -0.5 mm지점에서 유속이 최고점에 이르게

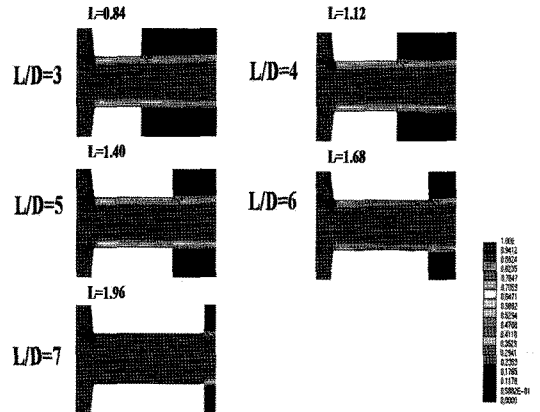


Fig. 6 Cavitation distribution as function of nozzle length at constant nozzle diameter

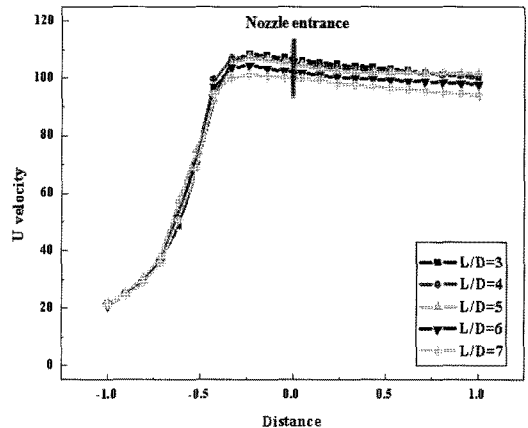


Fig. 7 Effect of L/D ratio on the U velocity as function of nozzle length at constant nozzle diameter

된다. 하지만,  $L/D$ 가 6, 7은 다른  $L/D$ 에 비해 낮은 유속을 형성하게 된다. 0 mm지점 이후에는 유동은 일정한 속도로 흐르게 된다.

$L/D$ 에서 노즐길이가 길어지면 노즐 내부에서 소요가 일어나며, 분사된 연료를 충분히 미립화하지 못할 것이라고 사료된다. cavitation의 생성 및 크기는 노즐의 직경을 달리 했을 때 더 많이 영향을 받는다. 하지만, 노즐의 길이를 달리 했을 때 cavitation이 노즐 내부유동에 미치는 영향이 줄어드는 것을 확인할 수 가 있었다. 이 러므로cavitation의 크기로 인해 노즐 분사 후 분무 거동 특성에 영향을 미칠 것이라 추정이 된다.

## 5. 결 론

2D 노즐 형상비가 노즐 내부에서 캐비테이션 생성 및 성장, 내부유동에 미치는 영향을 수치적으로 연구한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. cavitation은 노즐입구에서 형성이 되면, 초기에 작은 크기를 형성하다가 점점 크기가 커지게 된다. 이때 유동은 불안정상태를 보여준다. 어느 시점에 도달하게 되면 cavitation 크기는 정체가 되며 유동은 안정화가 된다.

2. 노즐 직경을 변화시켰을 때,  $L/D$  커짐에 따라 cavitation 크기는 작아지며,  $L/D$  5 이후에는 cavitation이 형성하지 못한다. 이는 노즐 직경이 작아짐에 따라 노즐 입구에 높은 압력이 형성이 되었기 때문이다. 또한, 노즐 출구의 액적평균입경, 증발율에 많은 영향을 미치리라 사료된다.

3. 노즐길이를 변화시켰을 때는,  $L/D$  커짐에 따라 cavitation 크기는 작아지며,  $L/D$ 가 7일 때는 cavitation이 형성하지 못한다. 노즐길이가 길어짐에 따라 노즐 내부에 높은 압력이 형성이 됨으로 cavitation이 생성되지 못한다. cavitation 크기가 작아짐으로 인해 노즐 내부의 유출계수가 작아짐으로 인해 분무 초기분열 특성에 영향을 미치리라 사료된다.

4. cavitation 크기를  $L/D$ 를 이용하여 효율적으로 제어 하면 노즐 출구에서의 액적 분열 및 미립화에 보다 좋은 영향을 미칠 수 있음을 이번 연구에서 알 수가 있었다.

## 후 기

이 논문은 2008년도 2단계 두뇌한국(BK21)사업과 지

식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다. 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) C. Arcoumanis, M. Gavaises, J. M. Nouri, E. Wahab and R. Horrocks, "Analysis of the Flow in the Nozzle of a Vertical Multi-Hole Diesel Engine Injector", SAE Paper, 980811, 1998.
- (2) M. Daikoku, H. Furudate and T. Inamura, "Effect of Cavitation in the Cylindrical Nozzle on the Liquid Breakup Process", Proc. 9th ICLASS, 12-7, 2003.
- (3) Y. Weixing and H. Gunter, "Cavitation in Injection Nozzles-Effect of Injection Pressure Fluctuations-", CAV2001, SessionA7.001, 2001.
- (4) P. David, J. Christopher and M. L. Corradini, "A Numerical Study of Cavitating Flow Through Various Nozzle Shapes", SAE Paper, 971597, 1997.
- (5) C. Arcoumanis, H. Flora, M. Gavaises and M. Badami, "Cavitation in Real-size Multi-hole Diesel Injector Nozzles", SAE Paper, 2001-01-1249, 2001.
- (6) H. Roth, M. Gavaises and C. Arcoumanis, "Cavitation Initiationin, its Development and Link with Flow Turbulence in Diesel Injector Nozzles", SAE paper, SAE 2002-01-0214, 2002.
- (7) STAR-CD, Methodology Volume, 1999.
- (8) W. Yuan, J. Sauter and G. H. Schnerr, "Modeling of Unsteady Cavitating Flows in Fuel Injection Nozzles", ILASS-Europe2000, 2000, pp11~13.
- (9) D. C. Wilcox, "Turbulence Modeling for CFD", 2nd edition, DCWIndustries, Inc., 1998.
- (10) D. P. Schmidt, C. J. Rutland, M. L. Corrandini, P. Roosen and O. Genge, 1999, "Cavitaion in Two-Dimensional Asymmetric Nozzles", SAE Paper, 1999-01-0518,1999.
- (11) A. Kubota, H. Kato and H. Yamaguchi, "A Numercal Study of Unsteady cavitatio on a Hydrofoil Section", Jornal of Fluid Mechanics 240, 1991, pp59~96.
- (12) W. Yuan, J. Sauter and GH. Schnerr, "Modeling and Computation of Unsteady cavitation Flows in Injection Nozzle", Mechanique & Industries 2, 2001, pp.383~394.
- (13) S. H. Park, H. K Suh and C. S. Lee, "Effects of Nozzle Orifice Shape and Nozzle Length-to-Diameter Ratio on Internal and External Flow Characteristics of Diesel and Biodiesel Fuel", KSME, Vol. 31, No. 3, 2007, pp.264.