

## 노즐 형상비가 바이오디젤 연료의 노즐 내부 및 외부 유동 특성에 미치는 영향

박수한<sup>1)</sup> · 서현규<sup>1)</sup> · 이창식<sup>2)</sup>

한양대학교 대학원<sup>1)</sup> · 한양대학교 기계공학과<sup>2)</sup>

### Effects of Nozzle Length-diameter Ratio on Internal and External Flow Characteristics of Biodiesel Fuel

Su Han Park<sup>1)</sup> · Hyun Kyu Suh<sup>1)</sup> · Chang Sik Lee<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 17 October 2006 / Accepted 27 February 2007)

**Abstract** : The purpose of this work is to investigate the effect of properties of diesel and biodiesel fuels on the nozzle cavitation and the effect of the length/diameter(L/D) ratio on internal and external flow pattern of nozzle at the various injection conditions. In order to study the effect of the L/D ratio on the nozzle cavitation characteristics of diesel and biodiesel, the characteristics of cavitation flow in the nozzle are visualized and analyzed at the injection pressure of 0.1 MPa to 0.7 MPa by using the visualized images. It was founded that the cavitation was formed in the nozzle orifice at the low injection pressure and the breakup of the issuing liquid jet was promoted at the low L/D ratio. When the L/D ratio decrease, cavitation beginning and growth were affect by cavitation number and Reynolds number.

**Key words** : Biodiesel(바이오디젤), Nozzle cavitation(노즐 캐비테이션), Discharge coefficient(유량계수), Cavitation number(캐비테이션 수), The length-diameter ratio L/D(형상비)

#### Nomenclature

- D : diameter(m)
- m : ratio of nozzle area and orifice area
- P : pressure(MPa)
- $\Delta P$  : pressure difference(MPa)
- Q : flowrate(m<sup>3</sup>/s)
- V : flow velocity(m/s)
- $\rho$  : density(kg/m<sup>3</sup>)
- $\mu$  : viscosity(Ns/m<sup>3</sup>)

#### 1. 서론

최근 환경보호와 에너지 수급안정에 대한 우려가 증가하면서 바이오디젤, 에탄올-디젤 연료 혼합물 등과 같은 대체연료에 관심이 집중되고 있다. 바이오디젤연료는 화석연료와 비교해서 지구온난화에 미치는 영향이 적은 것으로 알려져 있고, 연료자체에 11~15%의 산소를 함유하고 있기 때문에 연소실 내에서 완전 연소가 가능하여 P.M.(Particulate Matter, 입자상 물질)등이 적게 배출되는 장점을 가지고 있다. 따라서, 환경문제와 에너지 수급문제를 극복하기 위한 방편으로 바이오 연료와 디젤 연료의 혼합물을 기존 디젤 엔진에 이용하는 방안이 검토되고

\*Corresponding author, E-mail: cslee@hanyang.ac.kr

있는데, 이는 바이오디젤의 특성이 디젤연료와 유사해 별도의 엔진 개조 없이도 사용이 가능하기 때문이다.<sup>1,2)</sup>

엔진의 출력성능과 배기성능을 향상시킬 수 있는 방법으로 연료의 미립화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 연료가 노즐의 분사구멍으로 진입하는 과정에서 유체 일부의 압력저하로 인해 액체 상에서 기체상으로 연료가 변화하여 발생하는 캐비테이션은 연료의 분무 및 미립화 특성에 많은 영향을 미치기 때문에, 이에 관한 연구 또한 활발히 진행되고 있다.

캐비테이션에 관한 연구로는 Daikoku<sup>3)</sup> 등이 원통형 노즐을 여러 가지 형상비(L/D, Length/Diameter)와 다양한 분사조건에서 실험을 수행하였다. 그 결과 노즐 형상비(L/D)가 크면 노즐내부에서 소요가 일어나며, 분사된 연료를 충분히 미립화하지 못하지만, 노즐의 형상비(L/D)가 작은 경우에는 낮은 분사압력에서도 캐비테이션이 발생하고, 분사된 연료의 미립화를 증진한다고 보고하였다. 또한, 형상비가 작을 때, 캐비테이션의 생성과 붕괴는 노즐 내에서의 유동 변화에 영향을 주어 분사된 유체가 wavy jet에서 분무의 형태로 변화하기 위한 유동속도를 줄일 수 있다고 발표하였다. Sou<sup>4)</sup> 등은 두 개의 아크릴판과 두 개의 스테인리스 스틸(Stainless steel)판을 이용하여 2-D 가시화 노즐을 제작하여, 이를 이용하여 형상비(L/W, Length/Width)에 따른 실험을 하였다. 이 실험에서 역시 형상비(L/W)가 작을 때 캐비테이션으로 인한 미립화가 촉진된다고 발표하고, 캐비테이션, 노즐출구에서의 미립화, 정규화된 캐비테이션의 길이 등은 레이놀즈 수 보다 캐비테이션 수에 더 많은 영향을 받는다고 보고하였다. Soteriou<sup>5)</sup> 등은 레이저 시트법을 이용하여 확대된 평면 노즐 오리피스 내부의 유동을 관찰하여, 노즐 오리피스 내부에서 발생한 캐비테이션은 노즐 내부의 속도장을 변화시키며, 또한, 캐비테이션 유동 내의 난류는 분사된 연료의 미립화를 증진시키는 주요한 요인이라고 발표했다. Inamura<sup>6)</sup> 등은 분사압력에 따른 캐비테이션 발생 조건 및 유동 패턴에 관한 연구를 하여, 분사압력이 증가할수록, 노즐 출구에서의 압력이 증가하여 캐비테이션에 의해 미립화가 잘 진행된다고 보고하였으며, Chaves<sup>7)</sup> 등은 노즐 형상비(L/D)에

따른 캐비테이션과 유동패턴에 관한 연구에서, 형상비가 작고 분사압력이 낮을 때, 캐비테이션의 형성에 의한 미립화가 잘 일어남을 밝혔다. Arcoumanis<sup>8)</sup> 등은 실제 크기의 디젤 인젝터 노즐과 확장된 크기의 인젝터 노즐에서 캐비테이션 현상에 관한 실험을 수행하여, 캐비테이션이 노즐 오리피스 내부에 머물러 있는 시간과 생명주기는 서로 다르지만, 거시적인 캐비테이션 구조는 유사하다고 발표하였다. Payri<sup>9)</sup> 등은 캐비테이션이 분무각의 증가를 유도하고, 그로 인해 액체의 유동단면적이 감소함에 따라 유동의 분출 속도가 높아진다는 연구결과를 발표했다. 이러한 캐비테이션 및 노즐의 형상비에 따른 유동패턴 등에 관한 연구가 이미 많이 진행되어왔으며, 보다 명확한 캐비테이션의 원인과 영향뿐만 아니라, 노즐의 형상 등의 분사조건에 따른 영향을 밝히기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구는 연료 인젝터 노즐에서 발생하는 캐비테이션이 바이오 디젤 연료의 미립화 및 유동특성에 미치는 영향을 알아보기 위한 기초연구로써, 노즐의 형상비에 따른 캐비테이션의 생성과 캐비테이션이 분사된 연료의 내·외부 유동에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 또한, 형상비 및 분사조건에 따른 캐비테이션의 발생을 가시화하고, 노즐 내부 및 외부 유동특성에 미치는 영향을 레이놀즈 수, 캐비테이션 수 등의 무차원수를 이용하여 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

형상비(L/D)가 디젤연료와 바이오디젤 연료의 노즐 내 캐비테이션의 생성 및 외부 분무 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 Fig. 1과 같은 실험 장치를 구성하였다. 실험 장치는 크게 연료 공급 장치와 분무 가시화 장치로 나눌 수 있다. 질소가스(N<sub>2</sub>)로 가압된 연료는 연료탱크로부터 여과기로 유입되어 연료 내 잔류하고 있는 이물질을 제거하고, 순간 유량의 측정이 가능한 유량계(A109LMA, GPI)를 지나 노즐을 통해 분사된다. 분사된 연료는 순환펌프(PW-200M, WILO)를 통해 연료탱크로 다시 보충되도록 하였다.

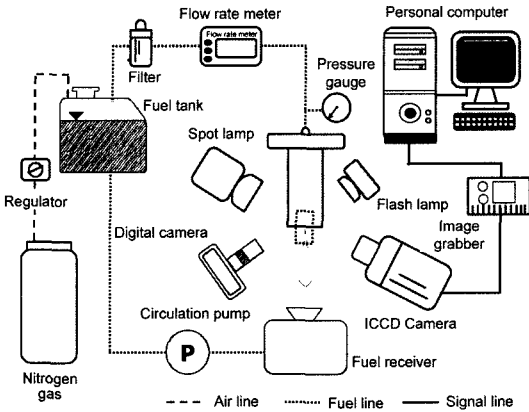


Fig. 1 Flow visualization system

노즐로부터 분사된 연료의 유동특성을 가시화하기 위해 노즐내의 오리피스에서의 유동을 관찰하기 위한 광원(spot lamp)과 고해상도 ICCD(intensified charge couple device) 카메라(Cooke Corp, Dicam-PRO)를 설치하였다. 고해상도 ICCD 카메라는 이미지 그래버에 의해 연동되며, 촬영된 이미지들은 연결된 컴퓨터에 저장하였다. 또한, 노즐 출구에서의 유동을 관찰하기 위해서 플래쉬 램프와 디지털 카메라(Nikon, D100)를 설치하였으며, 촬영된 이미지는 자체 메모리카드에 저장되도록 하였다.

형상비에 따른 노즐 오리피스 내부의 유동 및 외부의 유동을 관찰하기 위해서 Fig. 2와 같은 형태의 노즐을 형상비에 따라 제작하였다. 노즐은 투명한 아크릴로 제작되었으며, 오리피스의 입구가 직각인 단공형 노즐로 직경은 2.7mm이고, Table 1에서 보는 바와 같이 형상비가 3.33, 10, 20인 오리피스의 길이는 각각 9mm, 27mm, 54mm이다. 오리피스를 포함한 원통형 전체의 길이는 99mm로 일정하게 유지하도록 했다.

Table 1 Specifications of test nozzle

Diameter(D, mm)	L/D ratio	Length B(mm)
2.7	3.33	9
2.7	10	27
2.7	20	54

## 2.2 실험방법

바이오 디젤 연료의 형상비에 따른 노즐 내부 및 외부 유동특성을 조사하기 위해서 순수 대두유(soy

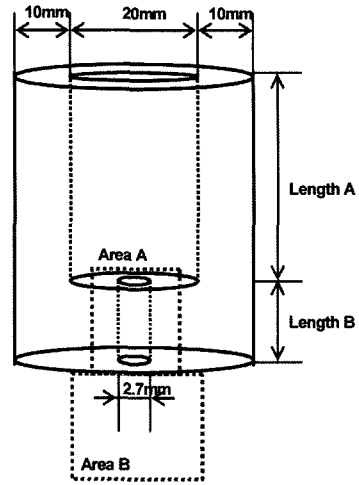


Fig. 2 Test nozzle and visualization region

Table 2 Experimental condition

Fuel	Diesel, Biodiesel
Injection pressure(MPa)	0.1 ~ 0.7
Reynolds number(Re)	9000 ~ 35000
Cavitation number(K)	0.2 ~ 3.2
Ambient pressure(MPa)	0.1
Ambient temperature(Kelvin)	293
L/D ratio	3.33, 10, 20

bean oil) 연료를 사용하였고, 디젤 연료를 비교 대상으로 하였다. 각각의 연료 및 노즐 형상비에 대해 분사압력을 0.1MPa ~ 0.7MPa로 조절하면서 순간유량을 측정하고, 각각의 분사압력에 대한 이미지를 획득하였다. 자세한 실험조건은 Table 2와 같다.

실험을 통해 얻어진 유량과 분사압력, 연료의 물성치를 이용하여 식 (1)에서 (3)에 표시된 세 가지 무차원수(레이놀즈 수, 캐비테이션 수, 유량계수)를 구한 후, 이들을 여러 가지 조건에 대하여 비교하여 합산소 바이오 디젤의 형상비에 따른 유동특성을 비교·분석하였다.

$$\text{Reynolds number} : Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (1)$$

$$\text{Cavitation number} : K = \frac{P_b - P_v}{(\rho V^2/2)} \quad (2)$$

$$\text{Discharge coefficient} : C_d = \frac{Q\sqrt{1-m^2}}{A\sqrt{2(\Delta P/\rho)}} \quad (3)$$

여기서,  $P_v$ 와  $P_b$ 는 각각 증기압과 대기압을 나타내며, 유량계수에서  $m$  값은 노즐 직경과 오리피스 직경의 비를 나타낸다. 이는 상이한 직경비에 따른 차이를 보정하기 위한 계수이며, 본 실험에서는 Table 1과 Fig. 2의 노즐 제원으로부터 노즐 직경이 20mm, 오리피스 직경이 2.7mm이므로,  $m=0.135$ 이다.<sup>6)</sup>

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 연료의 노즐 내부 및 외부 유동특성

노즐의 형상비(L/D)가 3.33인 노즐에서 실험한 결과의 이미지로부터 Sarre<sup>10)</sup> 등의 연구 결과를 참고로 캐비테이션 유동을 오리피스 내부에서 캐비테이션 발생 영역에 따라 난류유동(turbulent flow), 캐비테이션 시작유동(Beginning of cavitation), 캐비테이션 성장유동(Growth of cavitation), 하이드롤릭 플립유동(Hydraulic flip)의 4가지로 노즐 오리피스 내부 및 외부유동을 구분할 수 있었다. 유체의 유속은 각각의 연료의 난류유동에서부터 캐비테이션의 성장유동까지 증가하고, 하이드롤릭 플립유동에서 단면적의 감소로 인한 유량 감소로 유속 또한 감소하게 된다. 전체적으로 바이오디젤에서는 디젤에서보다 높은 분사압력, 분사속도에서 각각의 유동특성이 나타났는데, 이는 바이오디젤의 물성치(밀도, 점성계수 등)에 의한 영향으로 판단된다.

Fig. 3은 분사압력에 대한 연료의 분사속도를 나타낸 그래프이다. 캐비테이션이 생성, 성장하는 동

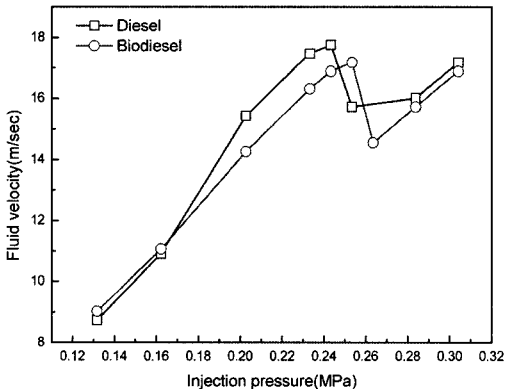
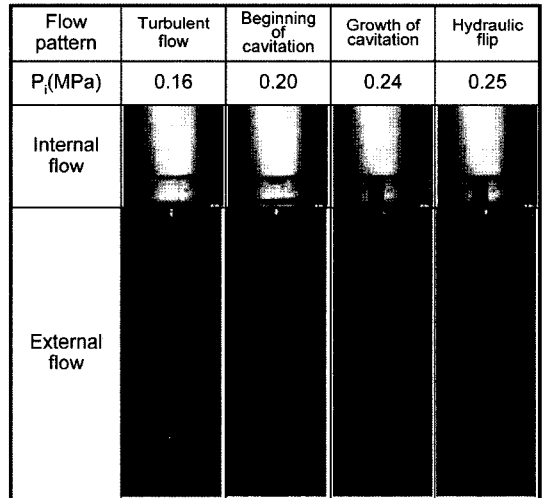


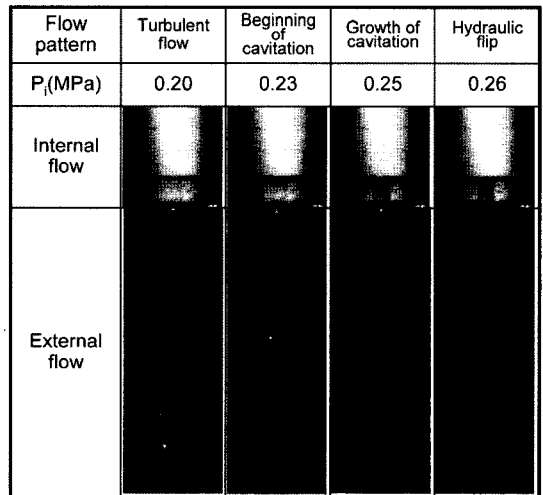
Fig. 3 The relationship between flow velocity and injection pressure

안 바이오디젤의 분사압력 및 분사속도가 디젤보다 높은데, 이는 바이오디젤의 점성계수가 디젤의 점성계수보다 약 67% (디젤 :  $0.00233 \text{Ns/m}^2$ , 바이오디젤 :  $0.00389 \text{Ns/m}^2$ ) 정도 높기 때문이며, 밀도 또한 디젤이  $830 \text{kg/m}^3$ , 바이오디젤은  $880 \text{kg/m}^3$ 로 디젤보다 높기 때문인 것으로 추정된다.

Fig. 4는 디젤연료와 바이오디젤 연료를 분사압력 0.1MPa에서 0.3MPa까지 변화시키며 얻은 이미지와 분사속도를 비교한 것이다. 디젤 0.20MPa, 바이오디젤 0.23MPa에서 캐비테이션이 생성되고, 생성된 후 분사압력의 증가에 따라 성장함을 알 수 있다. 디젤

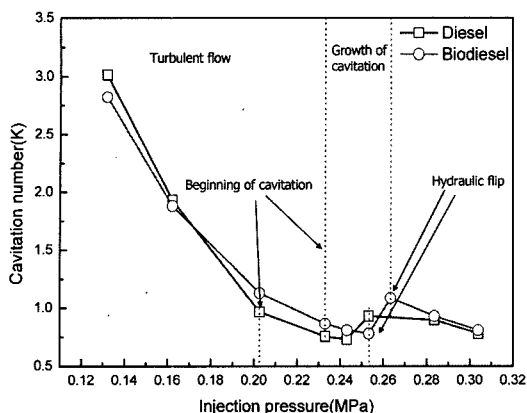


(a) Diesel fuel

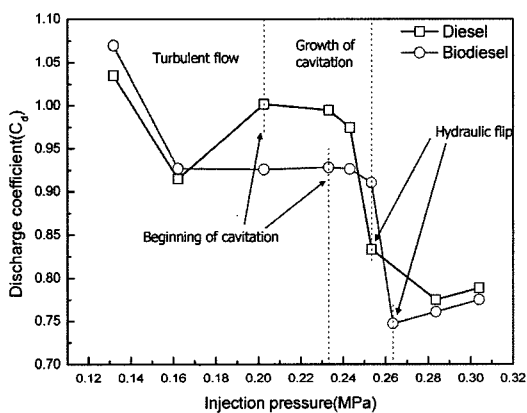


(b) Biodiesel fuel

Fig. 4 Internal and external flow pattern of L/D=3.33 nozzle



(a) Injection pressure and cavitation number



(b) Injection pressure and discharge coefficient

Fig. 5 The relations between injection pressure and cavitation number and discharge coefficient

과 바이오디젤은 각각 0.24MPa, 0.25 MPa에서 캐비테이션의 성장이 최대가 되고, 이 때 분사된 연료의 미립화가 가장 잘 일어나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 디젤과 바이오디젤 연료의 분사압력에 따른 캐비테이션 수와 유량계수의 변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 5(a)와 같이 분사압력이 증가함에 따라 디젤은 최대 3.0158에서 최소 0.7797로, 바이오디젤은 최대 2.8244에서 최소 0.8068로 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 분사압력이 증가할수록 유체의 분사속도는 증가하게 되고, 유체의 분사속도의 제공에 반비례하는 캐비테이션 수의 특성이 반영된 것으로 판단된다. Fig. 5(b)에서는 분사압력의 증가에 따라 유량계수가 변화하고 있음을 알 수 있다. 캐비테이션이 생성된 후에는 유량계수가 감소하였다. 이는 분사압력의 증가로 유체의 속도는 증가하였으

나, 캐비테이션 생성으로 인해 노즐 오리피스 내부에서의 유효 유동단면적이 감소하였기 때문에 실제 유출되는 유량이 베르누이 방정식에 의한 이론치보다 작아졌기 때문으로 추정된다. 또한, 바이오디젤이 디젤보다 유량계수가 대체로 낮게 형성되는 이유는 바이오디젤의 점성의 영향으로 노즐 오리피스 내의 벽면과 마찰이 디젤보다 크기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.2 노즐 형상비에 따른 바이오디젤의 유동특성

분사되는 유량은 분사압력과 밀접한 관계가 있다. Fig. 6은 각각의 노즐형상에서 분사압력을 0.1 MPa에서 0.7 MPa까지 변화하였을 때, 나타나는 유량에 대한 그래프이다. 전체적으로 분사압력이 증가할수록 분사되는 유량은 증가하고 있음을 알 수 있다.

노즐 형상비가 3.33과 10인 노즐에서 유량의 감소 구간이 나타나는 것은 하이드롤릭 플립유동으로 진입하였기 때문이다. 반면, 노즐 형상비가 20인 노즐에서는 실험 조건 내에서 하이드롤릭 플립유동을 관찰하는 대신 오리피스 전체에서 캐비테이션이 생성되는 슈퍼 캐비테이션 현상이 관찰되었다. 이로 인해 실험구간 내에서 유량의 증가는 계속되었다.

Fig. 7은 바이오디젤 연료의 형상비에 따른 노즐 내부 및 외부에서의 유동형태를 나타내고 있다. 형상비가 증가할수록 캐비테이션이 생성되는 시점의

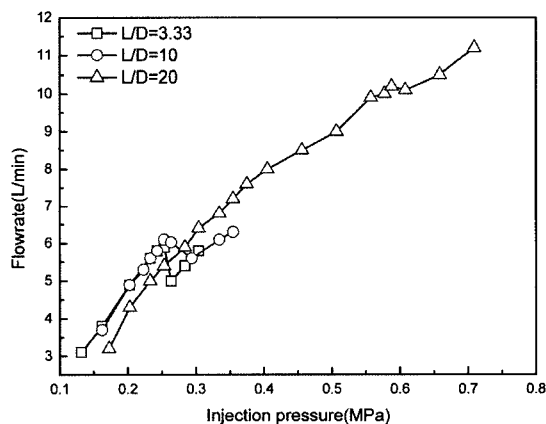


Fig. 6 Effect of L/D ratio on the flowrate according to injection pressure

노즐 형상비가 바이오디젤 연료의 노즐 내부 및 외부 유동 특성에 미치는 영향

Flow pattern	Turbulent flow	Beginning of cavitation	Growth of cavitation	Hydraulic flip
$P_i$ (MPa)	0.20	0.22	0.26	0.29
Internal flow				
External flow				
K	1.1304	0.9662	0.7465	0.8655
$C_d$	0.9259	0.9143	0.9008	0.7677

(a) Flow pattern of L/D = 10

Flow pattern	Turbulent flow	Beginning of cavitation	Growth of cavitation	Hydraulic flip
$P_i$ (MPa)	0.35	0.37	0.58	0.60
Internal flow				
External flow				
K	0.5236	0.4699	0.2609	0.2661
$C_d$	0.8605	0.8740	0.8797	0.8535

(b) Flow pattern of L/D = 20

Fig. 7 Internal and external flow pattern of biodiesel fuel

분사압력은 높아지고, 캐비테이션의 성장 또한 느리게 진행되며, 따라서, 분사 연료의 미립화에는 나쁜 영향을 줄 것으로 판단된다.

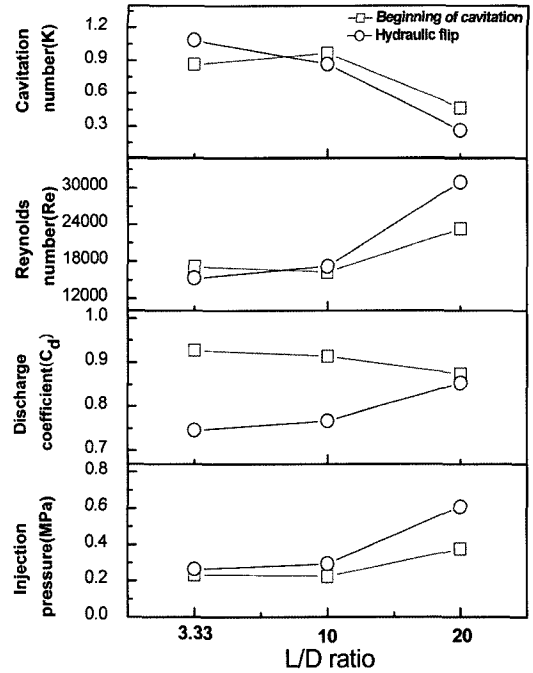


Fig. 8 Effects of L/D ratio on cavitation number, Reynolds number, discharge coefficient, and injection pressure

연료 유동의 가시화 결과를 분석하여 노즐 형상비에 따른 캐비테이션 수, 레이놀즈 수, 유량계수, 분사압력을 Fig. 8에 나타내었다. 캐비테이션 수는 노즐 형상비가 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 캐비테이션 생성에 필요한 높은 분사압력이 연료의 분사속도에 영향을 주게 되고, 이는 캐비테이션 수가 분사속도의 제곱에 반비례하게 됨을 실험적으로 증명하는 것이다. 레이놀즈 수와 분사압력은 노즐 형상비가 증가할수록 캐비테이션의 생성유동과 하이드롤릭 플립유동이 시작되는 지점의 값이 증가함을 보여준다. 이런 결과는 노즐 형상비가 커질수록 분사압력의 증가로 인해 연료를 미립화하기 위한 에너지 소모가 많음을 의미한다. 유량계수의 경우에는 캐비테이션이 성장하여 하이드롤릭 플립 유동으로 발달하는 경우, 유량계수는 감소함을 알 수 있었고, 형상비가 커질수록 캐비테이션 시작 유동과 하이드롤릭 플립 유동 사이의 유량계수의 차이가 작아짐을 알 수 있다. 또한, 캐비테이션 시작 유동의 유량계수가 노즐 형상비의 증가에 따라 감소하는 현상을 확인할 수 있었다. 이것은 노즐 오리피스 길이가 길어지면서, 벽면에서 이탈

했던 유체가 재부착함에 따라 벽면과 마찰하는 시간이 길어지기 때문에 판단된다.

#### 4. 결론

노즐 형상비 및 분사압력이 바이오디젤 연료의 노즐 내의 캐비테이션 및 노즐 외부 유동에 미치는 영향을 실험적으로 연구한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 노즐 오리피스스의 형상비가 3.33인 노즐에서 디젤과 바이오디젤 연료 각각의 캐비테이션 유동은 바이오디젤이 디젤 보다 약 4%~25% 높은 분사압력에서 형성된다. 이는 바이오디젤 연료가 디젤 연료보다 높은 점성계수를 갖기 때문인 것으로 판단된다.
- 2) 형상비가 클수록 캐비테이션의 발생 및 성장에 높은 분사압력이 필요하며, 이 때 분사된 연료의 미립화는 활발하게 일어나지 않았다.
- 3) 형상비가 작을수록 낮은 분사압력에서 캐비테이션이 발생되고, 캐비테이션의 성장도 원활했으며, 생성된 캐비테이션은 분사된 연료의 미립화를 촉진시켰다.
- 4) 노즐의 형상비가 커질수록, 캐비테이션 시작 유동에서의 유량계수와 하이드릴릭 플립 유동에서의 유량계수 차이가 작아졌다.
- 5) 오리피스스의 길이가 길어지면 노즐의 형상비가 증가하여 유체가 재부착한 후 벽면과 연료의 마찰구간이 증가하여 캐비테이션 시작 유동의 유량계수가 감소하는 경향을 갖는다.

#### 후 기

본 연구는 교육인적 자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실 지원 사업 및 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-10932-0)의 지원으로 수행되었으며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사드립니다.

#### References

- 1) S. H. Yoon, M. Y. Kim, S. I. Kwon, H. S. Jeon

- and C. S. Lee, "Combustion Characteristics of Biodiesel Fuel Derived from Soybean in a Common-rail Diesel Engine," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.1922-1928, 2006.
- 2) S. H. Yoon, S. G. An, M. Y. Kim, S. I. Kwon and C. S. Lee, "Combustion Characteristics of Biodiesel Fuel in a DI Diesele Engine," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.698-704, 2005.
- 3) M. Daikoku, H. Furudate and T. Inamura, "Effect of Cavitation in the Cylindrical Nozzle on the Liquid Breakup Process," Proc. 9th ICLASS, pp.12-7, 2003.
- 4) A. Sou, M. Muhammad Itham, S. Hosokawa and A. Tomiyama, "Effects of Cavitation in a Nozzle on Liquid Jet Atomization," Proc. 10th ICLASS, ICLASS06-043, 2006.
- 5) C. Soteriou, R. Andrews and M. Smith, "Further Studies of Cavitation and Atomization in Diesel Injection," SAE 1999-01-1486, 1999.
- 6) T. Inamura, H. Saito, M. Daikoku, T. Onodera and H. Sakamoto, A. Kumakawa, "Cavitating Flow in Rectangular Nozzle with Orifice," Proc. 10th ICLASS-Asia, pp.273-280, 2005.
- 7) H. Chaves, M. Knapp and A. Kubitzek, "Experimental Study of Cavitation in the Nozzle Hole of Diesel Injectors Using Transparent Nozzle," SAE 950290, 1995.
- 8) C. Arcoumanis, H. Flora, M. Gavaises and M. Badami, "Cavitation in Real-size Multi-hole Diesel Injector Nozzles," SAE 2000-01-1249, 2000.
- 9) F. Payri, V. Bermudez, R. Payri and F. J. Salvador, "The Influence of Caviation on the Internal Flow and the Spray Characteristics in Diesel Injection Nozzle," Fuel, Vol.83, pp.419-431, 2004.
- 10) C. K. Sarre, S. C. Kong and R. D. Reitz, "Modeling the Effect of Injector Nozzle Geometry on Diesel Sprays," SAE 1999-01-0912, 1999.