

< 논문 >

노즐 오리피스 형상 및 형상비가 디젤과 바이오디젤 연료의 노즐 내부 및 외부 유동특성에 미치는 영향

박수한* · 서현규* · 이창식†

(2006년 11월 6일 접수, 2007년 1월 10일 심사완료)

Effects of Nozzle Orifice Shape and Nozzle Length-to-Diameter Ratio on Internal and External Flow Characteristics of Diesel and Biodiesel Fuel

Su Han Park, Hyun Kyu Suh and Chang Sik Lee

Key Words: Biodiesel(바이오디젤), Nozzle Cavitation(노즐 캐비테이션), Discharge Coefficient(유량 계수), Cavitation Number(캐비테이션 수), Length-To-Diameter Ratio L/D(형상비), Orifice Nozzle(오리피스 노즐)

Abstract

The aim of this study is to investigate the effects of nozzle orifice shapes and the nozzle length-to-diameter ratio(L/D) on the nozzle cavitation formation inside the orifice and the external flow pattern. The nozzle used in this work was tested the taper orifice nozzle and the rectangular orifice nozzle which was made from the transparent acrylic acid resin. For studying the effect of the nozzle L/D ratio, it was used to three L/D ratios of 3.33, 10, and 20. The cavitation flow of nozzle was visualized by using the ICCD camera and optical system. This work revealed that the flow rate and discharge coefficient(C_d) of the taper orifice nozzle was larger than those of the rectangular orifice nozzle at the same injection pressure. The cavitation flow was observed in the nozzle orifice at the low injection pressure and the breakup of liquid jet was promoted as the L/D ratio is decreased. The cavitation of biodiesel fuel was formed at the lower injection pressure than that of diesel fuel because of higher viscosity and density.

기호설명

- D : 노즐 오리피스 직경(m)
- m : 노즐과 오리피스 직경비
- P : 압력(MPa)
- ΔP : 분사압력과 대기압의 차(MPa)
- Q : 분사유량(m^3/s)
- V : 분사속도(m/s)
- ρ_{Bio} : 바이오디젤 연료의 밀도(kg/m^3)

- ρ_D : 디젤연료의 밀도(kg/m^3)
- μ_{Bio} : 바이오디젤 연료의 점성계수(Ns/m^2)
- μ_D : 디젤연료의 점성계수(Ns/m^2)

1. 서론

고유가 시대가 계속되면서 인류의 관심은 환경과 더불어 에너지 수급 및 안정문제로 확산되고 있다. 많은 연구자들은 환경과 에너지 수급 및 안정의 문제를 동시에 해결하기 위한 다양한 시도 중의 하나로, 저압 분사로 고압 분사의 효과를 나타낼 수 있는 노즐 형상의 설계를 위한 연구를 진행해오고 있다. 압력형 단공 노즐은 단순

* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과
 † 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과
 E-mail : cslee@hanyang.ac.kr
 TEL : (02)2220-0427 FAX : (02)2281-5286

히 원형의 작은 구멍이 뚫려 있는 가장 간단한 형태이며, 노즐 내부로 압력이 가해짐에 따라 분사된 액체는 액주 및 액적으로 미립화한다. 액체가 액주에서 액적으로 분열하는 원인으로는 난류 유동의 영향, 주위 기체의 항력, 분사 액체 및 밀도, 점도, 표면장력과 같은 주위 기체의 조건, 노즐의 형태(L/D) 등의 영향을 받고 있는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾

특히, 액체의 미립화에 영향을 주는 요소 중 하나인 캐비테이션의 생성 및 미립화에 미치는 영향을 밝히기 위해 많은 연구자들이 여러 가지 시도를 하고 있다. 캐비테이션은 유체의 속도가 증가하면서, 이로 인해 발생하는 압력의 감소가 유체의 연속성을 깨고, 그 자리에 기공(cavity)이 생기는 현상을 말한다. Sarre 등⁽²⁾은 FIRE와 KIVA-II 코드를 이용하여 연료분사와 분무과정에 대한 노즐 형상의 영향을 시뮬레이션 하고, 유량 계수, 유효 분사속도, 분사 초기의 액적 크기 등을 계산하였고, Roth 등⁽³⁾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 유량계수의 증가를 야기하는 반면, 캐비테이션 유동(cavitating flow) 영역은 감소하게 된다는 결과를 보고 했다. 또한, 원추형 노즐(conical nozzle)에서는 캐비테이션이 생성되지 않는다는 결과도 보고했다. Payri 등⁽⁴⁾은 노즐 내부에서 캐비테이션이 생성되면 노즐 출구에서의 분무각은 증가하고, 또한 실제 크기의 투명한 노즐의 내부 유동 관점에서 노즐 구멍에서의 출구 속도가 증가한다고 발표했다. Daikoku 등,⁽⁵⁾ Chaves 등⁽⁶⁾은 노즐의 형상비가 캐비테이션의 생성 및 액체의 미립화에 미치는 영향에 대한 연구결과를 발표하여, 노즐의 형상비(L/D)가 작을 때 낮은 분사압력에서 캐비테이션이 형성되어, 미립화가 잘 일어난다고 보고하였다. 특히, Sou 등⁽⁷⁾은 투명한 아크릴 노즐을 2-D로 제작하여 캐비테이션의 생성 및 성장등의 과정을 보다 이해하기 쉽게 가시화 하였다. Soteriou 등⁽⁸⁾은 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 발표하였다. Inamura 등⁽⁹⁾은 분사압력에 따른 캐비테이션 발생 조건 및 유동 패턴에 관한 연구를 수행하여, 낮은 대기압력 조건에서는 모든 레이놀즈 수 조건에서 캐비테이션이 발생한다고 보고하였고, Arcoumanis 등⁽¹⁰⁾은 실제 크기의 디젤 인젝터 노즐과 확장된 크기의 인젝터 노즐에서 캐비테이션 현상에 관한 실험을 수행하여, 캐비테이션이 노즐 오리피스 내부에 머물러 있는 생명주기는 서로 다르지만, 거시적인 캐비테이션 구조는 유사하다는 결과를 발표하였다.

에너지 수급의 문제를 해결하기 위한 방편으로, 신·재생에너지의 사용이 고려되고 있으며, 그 중 디젤 연료와 유사해 별도의 엔진 개조 없이도 사용이 가능한 바이오디젤 연료가 대안으로 검토되고 있다. 바이오디젤 연료는 식물성 오일이나 동물성 지방과 같은 회복가능한 자원인 자연자원으로 만들어지기 때문에 환경적으로 유익하며 미생물을 안전하게 분해하고 회복성이 좋은 연료로서, 화석연료보다 대기오염이 적은 것이 특징이다. 또한, 기존의 디젤 연료보다 높은 세탄가를 나타내므로 완전연소에 의한 연소효율을 증대시킬 수 있으며 연료의 운환성이 디젤연료보다 우수하여 이에 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹¹⁾

윤 등⁽¹²⁾은 대두유를 적용한 엔진의 연소특성에 대한 연구를 수행하였고, 이 등⁽¹³⁾은 바이오디젤 혼합유의 무화 및 연소특성 실험을 수행하여 바이오디젤 연료의 미립화와 연소특성에 대하여 보고하였다. 한편, 서 등⁽¹⁴⁾은 바이오디젤 연료의 거시적 무화 및 미립화 특성에 대하여 보고하였다. 이와 같은 다양한 선행 연구가 보고되고 있으나, 바이오디젤 연료의 캐비테이션에 관한 연구는 매우 적으며, 더욱 체계적인 연구가 필요한 실정이다.

본 연구는 직접 분사식 디젤 엔진의 연료로 바이오 디젤 연료를 사용할 경우 인젝터 노즐에서 발생하는 캐비테이션 현상을 알아보기 위한 기초 연구로써, 노즐 오리피스의 형상 및 노즐 형상비에 따른 캐비테이션의 생성과 캐비테이션이 분사된 연료의 내·외부 유동에 미치는 영향을 디젤 연료의 캐비테이션과 비교하여 실험적으로 분석했다. 아울러 노즐 오리피스 형상, 노즐 형상비 및 분사조건에 따른 캐비테이션의 발생을 가시화

하고, 노즐 내부 및 외부 유동특성에 미치는 영향을 레이놀즈 수, 캐비테이션 수, 유량계수 등의 무차원수를 이용하여 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 노즐 오리피스의 형상 및 노즐 형상비가 디젤 및 합산소 바이오디젤 연료의 노즐 오리피스 내부 및 외부 유동 특성에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험 장치를 나타낸 것으로서 그 주요부는 연료 공급 장치와 분무 가시화 장치로 구성되어 있다.

연료 공급 장치는 질소가스로 가압된 연료탱크와 순간유량 측정을 위한 유량계, 연료탱크로부터 나온 연료 내의 이물질 제거를 위한 여과기 그리고 노즐 분사 압력 측정을 위한 압력계로 구성되었다. 또한, 분사된 연료는 순환펌프를 통해서 다시 연료 탱크로 보충되도록 하였다. 분무 가시화 장치는 노즐 오리피스 내부에서의 유동 관찰을 위해 광원(spot lamp)과 고해상도 ICCD카메라(intensified charge couple device)(Cooke Corp, Dicam-PRO)와 노즐 외부 유동특성 관찰을 위해 플래쉬 램프(flash lamp)와 디지털 카메라(Nikon, D100)를 설치하였다. 고해상도 ICCD 카메라는 이미지 그래버(image grabber)에 의해 연동되어, 연결된 컴퓨터에 저장되도록 하였으며, 디지털

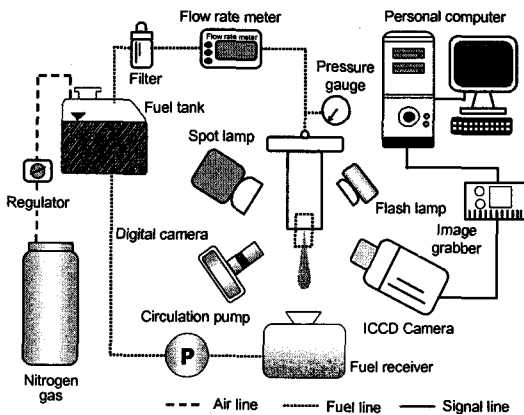
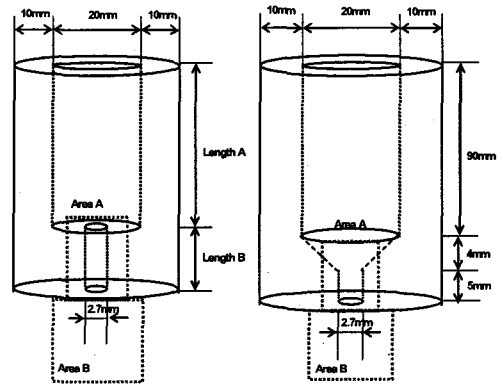


Fig. 1 Schematic of fuel supply system and flow visualization system

카메라에 의해 촬영된 이미지는 자체 메모리카드에 저장되도록 하였다.

노즐 오리피스 내부에서 일어나는 캐비테이션 현상을 관찰하기 위해서 Fig. 2와 같은 두 가지 형태의 노즐을 제작하였다. 노즐은 투명한 아크릴로 제작되었으며 Fig. 2(a)는 원형의 단면적과 오리피스 입구가 직각인 단공형 노즐로 직경은 2.7mm이고, 오리피스의 깊이는 Table 1에 나타난 것과 같이 세 가지 형태의 형상비를 갖는 노즐을 제작하였다. Fig. 2(b)는 원형의 단면적에 오리피스 입구가 경사진 단공형 노즐로 직경은 2.7mm이고, 오리피스 깊이 5mm, 테이퍼 높이 4mm이다.

또한, Fig. 2의 점선 부분은 가시화되는 부분을 표시해주고 있다. 고해상도 ICCD 카메라를 이용해서 영역 A부분을 가시화하여 오리피스 내부에서 발생하는 캐비테이션의 이미지를 획득하고, 디지털카메라를 이용해서 영역 B를 가시화하여 노즐 외부에서의 유동 특성을 비교분석하였다.



(a) Rectangular orifice (b) Taper orifice nozzle

Fig. 2 Test nozzle and visualization region

Table 1 Specifications of test nozzle

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

Table 2 Test conditions

Fuel	Diesel, Biodiesel
Injection pressure(MPa)	0.1 ~ 0.7
Reynolds number(Re)	7500 ~ 35000
Cavitation number(K)	0.2 ~ 3.0
Ambient pressure(MPa)	0.1
Ambient temperature(Kelvin)	293
L/D ratio	3.33, 10, 20

2.2 실험 방법

본 실험에서는 노즐 오리피스의 형상 및 노즐 형상비에 연료의 특성을 알아보기 위해 디젤연료와 합산소 바이오디젤(순수 대두유, soy bean oil) 연료를 사용하였다. 실험은 노즐 오리피스 형상(직각 및 테이퍼 오리피스 노즐) 및 노즐 형상비(L/D 3.33, 10, 20)에 대하여 분사압력을 0.1MPa에서 0.7MPa로 조절하며, 순간 유량을 측정하고, 각각의 분사압력에 대한 이미지를 취득하였다. 자세한 실험조건은 Table 2와 같다. 실험으로부터 얻어진 결과를 정량적으로 분석하기 위해 유량, 분사압력, 연료의 물성치를 이용하여 식 (1)에서 (3)과 같은 세 가지 무차원수(레이놀즈 수, 캐비테이션 수, 유량계수)를 구한 후, 디젤 및 합산소 바이오디젤의 노즐 오리피스 형상 및 노즐 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 노즐 직경이 20mm, 오리피스 직경이 2.7mm 이므로, m 값은 0.135이다.⁽⁹⁾

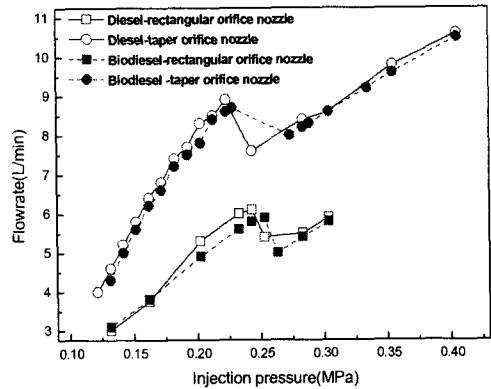


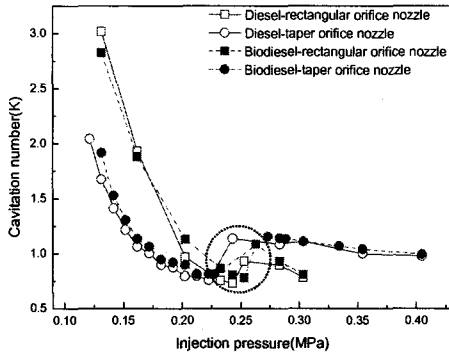
Fig. 3 Flow rate against the injection pressure

3. 실험결과 및 고찰

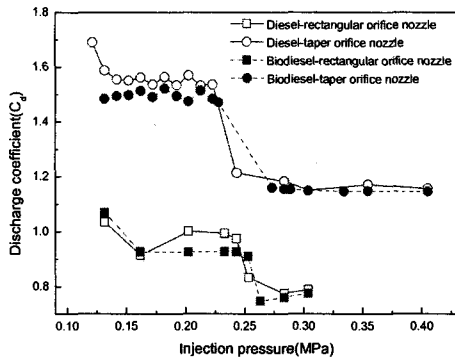
3.1 노즐 형상에 따른 내부 및 외부유동 특성

Fig. 3은 디젤 및 바이오디젤 연료의 분사 노즐 형상에 따른 분사압력과 분사유량과의 관계를 나타낸 것이다. 두 노즐 및 두 연료 모두 분사압력의 증가에 따라 분사유량은 증가하고 있으며, 테이퍼 오리피스를 가진 노즐이 직각입구 오리피스를 가진 노즐보다 전 실험구간에서 약 1.5 ~ 4.0L/min 정도 높은 분사유량을 가지는 것으로 나타났다. 이는 테이퍼 오리피스 형상의 노즐은 유동방향의 급격한 변화 없이 부드럽게 빠져나오는 반면, 직각입구 오리피스 형상의 노즐은 유동방향이 90°로 바뀌면서 유동저항이 상대적으로 높기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 바이오디젤 연료는 높은 점성계수(바이오디젤 : $\mu_{Bio} = 0.00389\text{Ns/m}^2$, 디젤 : $\mu_D = 0.00223\text{Ns/m}^2$)와 높은 밀도(바이오디젤 : $\rho_{Bio} = 880\text{kg/m}^3$, 디젤 : $\rho_D = 830\text{kg/m}^3$)의 영향으로 오리피스 벽면과의 마찰이 심해 디젤보다 다소 낮은 분사유량을 보이고 있다.

Fig. 4는 디젤과 바이오디젤 연료의 분사압력과 캐비테이션 수, 분사압력과 유량계수의 관계를 나타낸 그래프이다. Fig. 4(a)에서 캐비테이션 수는 분사압력이 증가할수록 대체로 감소함을 알 수 있다. 이는 Fig. 3에서 나타난 바와 같이 분사압력의 증가는 분사유량 및 분사속도의 증가를 유발하고, 분사속도의 제곱에 반비례하는 캐비테이션 수의 특징을 잘 나타내주고 있다. Fig. 4(a)



(a) Injection pressure and cavitation number



(b) Injection pressure and discharge coefficient

Fig. 4 The relations between injection pressure and cavitation number and discharge coefficient

에서 점선 원은 캐비테이션이 생성 후 성장이 지속되어 벽면에 재부착하지 못하고, 오리피스 밖으로 빠져나오는 ‘하이드롤릭 플립’ 유동의 시작점을 나타낸다. ‘하이드롤릭 플립’ 유동 구간은 유동 단면적이 축소되므로, 분사유량 및 분사속도가 감소하게 된다. 이로 인하여 캐비테이션 수가 소폭 상승하게 되었다. Fig. 4(b)에서는 전 구간에서 직각입구 오리피스를 가진 노즐이 테이퍼 오리피스를 가진 노즐보다 낮은 유량계수를 보여주고 있다. 유량계수는 오리피스를 통해 분사되는 유량을 베르누이 방정식으로부터 계산되는 이론 유량과 실제 유량의 비를 나타내는 무차원수로써, 유량계수가 높다는 것은 실제 분사되는 유량이 상대적으로 많아짐을 의미한다. Fig. 3의 분사압력과 분사유량의 관계에서와 같이, 실험결과 및 Fig. 4(b)를 통해 테이퍼 오리피스를 가지는

Nozzle type	Rectangular		Taper	
	Diesel	Biodiesel	Diesel	Biodiesel
Fuel	Diesel	Biodiesel	Diesel	Biodiesel
P_i (MPa)	0.20	0.23	0.12	0.20
Internal flow				
External flow				
Q(L/min)	5.3	4.0	5.6	7.8
K	1.0128	2.0399	0.8655	0.8979
C_d	1.0015	1.6902	0.9281	1.4739

(a) Beginning of cavitation

Nozzle type	Rectangular		Taper	
	Diesel	Biodiesel	Diesel	Biodiesel
Fuel	Diesel	Biodiesel	Diesel	Biodiesel
P_i (MPa)	0.24	0.25	0.22	0.225
Internal flow				
External flow				
Q(L/min)	6.1	5.9	8.9	8.7
K	0.7646	0.7797	0.7591	0.8125
C_d	0.9742	0.9103	1.5353	1.4705

(b) Growth of cavitation

Nozzle type	Rectangular		Taper	
	Diesel	Biodiesel	Diesel	Biodiesel
Fuel	Diesel	Biodiesel	Diesel	Biodiesel
P_i (MPa)	0.25	0.26	0.24	0.27
Internal flow				
External flow				
Q(L/min)	5.4	5.0	7.6	8.0
K	0.9756	1.0857	1.1362	1.1543
C_d	0.8332	0.7469	1.2138	1.1595

(c) Hydraulic flip

Fig. 5 Comparison of flow characteristics between rectangular orifice nozzle and taper orifice nozzle

노즐이 직각입구 오리피스를 가진 노즐보다 유동 저항이 낮음을 보여준다.

Fig. 5는 디젤 및 합산소 바이오디젤 연료를 분사압력 0.1MPa에서 0.4MPa 까지 변화시키며, 직각입구 오리피스 노즐과 테이퍼 오리피스 노즐에서 얻은 이미지를 비교한 것이다. 디젤 및 바이오디젤 연료 모두 테이퍼 오리피스를 가진 노즐에서 직각입구 오리피스를 가진 노즐보다 낮은 분사압력에서 캐비테이션이 생성, 성장 및 ‘하이드롤릭 플립 유동’까지 발달한다. 또한, 낮은 분사압력에도 불구하고, 높은 분사유량을 나타냄을 알 수 있으며, 그림에서 캐비테이션이 생성되어 [Fig. 5(a)의 A 부분], 성장된 후 분사된 연료의 미립화가 더 활발하게 진행됨이 확인되었다. 디젤 연료는 직각입구 오리피스 노즐에서 0.24MPa, 테이퍼 오리피스 노즐에서 0.22MPa, 바이오디젤은 직각입구 오리피스 노즐에서 0.25MPa, 테이퍼 오리피스 노즐에서 0.225MPa에서 캐비테이션의 성장이 최대로 일어나고 있음을 알 수 있다. 이로부터 테이퍼 오리피스가 있는 노즐에서는 더 낮은 분사압력으로 보다 많은 분사유량 및 활발한 미립화를 이룰 수 있음이 확인되었다. 이는 실제 엔진에서의 분사시스템에 적용될 때 에너지 절감의 효과를 기대할 수 있음을 의미한다. 또한, ‘캐비테이션 시작 유동,’ ‘캐비테이션 성장 유동,’ ‘하이드롤릭 플립 유동’에서 바이오디젤 연료는 디젤연료 보다 다소 높은 분사압력임에도 낮은 유량계수를 나타내었다. 이는 바이오 디젤이 디젤보다 1.74배 높은 점성과, 1.06배 높은 밀도(바이오디젤 : 880kg/m³, 디젤 : 830kg/m³)를 갖는 등의 물성치 차이 때문으로 판단된다.

3.2 바이오디젤 연료의 노즐 형상비에 따른 노즐 내부 및 외부 유동 특성

Fig. 6은 노즐의 형상비에 대해 분사압력을 0.1MPa에서 0.7MPa로 변화시켰을 때, 분사유량의 변화를 나타낸 그래프이다. 분사유량은 대체로 분사압력의 증가와 더불어 증가하고 있으며, 디젤과 바이오디젤 연료 모두 유사한 경향을 보였다. Fig. 6(a)와 (b)에서 노즐 형상비가 3.33, 10인 그래프의 점선 원안의 부분은 ‘하이드롤릭 플립’ 유동으로 발달하면서 유동 단면적의 감소로 인해 분사유량이 감소한 부분이다. 반면, L/D가 20인 노즐에서는 실험조건 구간에서 ‘하이드롤릭 플립’

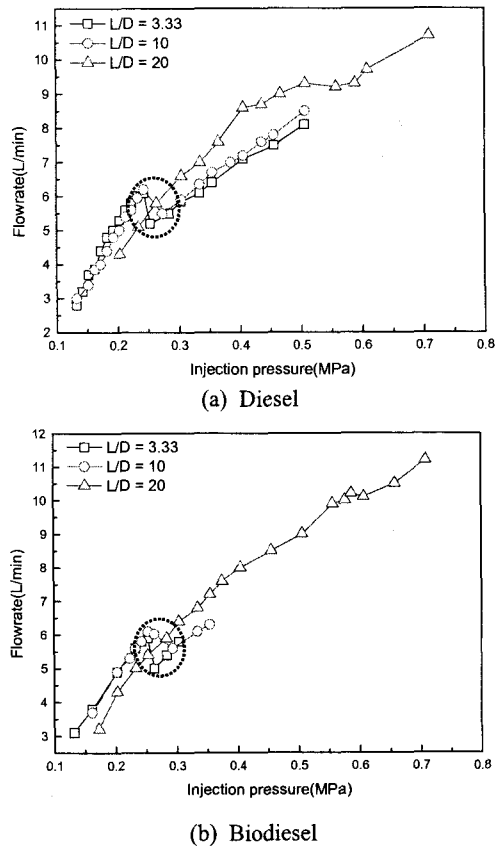


Fig. 6 Effect of L/D ratio on the flow rate according to the injection pressure

유동을 관찰할 수 없었고, 대신 오리피스 전체에 캐비테이션이 생성되는 ‘슈퍼 캐비테이션 현상’이 관찰되었다. 이로 인해 유량의 감소구간이 나타나지 않았으며, 이는 형상비가 커질수록 캐비테이션의 생성 및 성장에 보다 높은 분사압력, 즉 보다 많은 에너지가 필요함을 의미한다.

Fig. 7은 노즐 형상비(L/D)가 10, 20 일 때, 디젤과 바이오디젤 연료의 노즐 오리피스 내부에서 캐비테이션을 생성, 성장 및 하이드롤릭 플립(혹은 슈퍼캐비테이션)으로 발달하는 과정을 ICCD 카메라와 디지털 카메라를 통해 얻은 이미지로 정리한 것이다. 형상비 10에서는 디젤 및 바이오디젤 연료가 각각 0.24MPa, 0.26MPa에서 캐비테이션의 성장이 최대가 되고, 유량계수 또한 최대가 된다. 형상비 20에서는 디젤 및 바이오디젤 연료가 각각 0.60MPa 일 때, 캐비테이션의 성장이 최대가 되며, 유량계수는 점점 감소하는 경향

Fuel	Diesel			Diesel			
	Type	Beginning	Growth	Hydraulic	Beginning	Growth	Hydraulic
P(MPa)	0.23	0.24	0.27	0.23	0.24	0.27	
Internal flow							
External flow							
Q(L/min)	5.95	6.2	5.5	5.95	6.2	5.5	
K	0.8036	0.7401	0.9405	0.8036	0.7401	0.9405	
C _d	0.9861	0.9902	0.7971	0.9861	0.9902	0.7971	

(a) L/D = 10

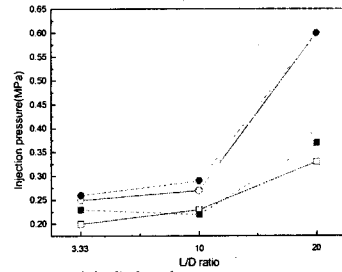
Fuel	Diesel			Diesel			
	Type	Beginning	Growth	Hydraulic	Beginning	Growth	Hydraulic
P(MPa)	0.33	0.58	0.60	0.37	0.58	0.60	
Internal flow							
External flow							
Q(L/min)	7.0	9.3	9.7	7.8	10.2	10.1	
K	0.5806	0.3138	0.3024	0.4646	0.2601	0.2631	
C _d	0.8722	0.8021	0.8197	0.8821	0.8798	0.8614	

(b) L/D = 20

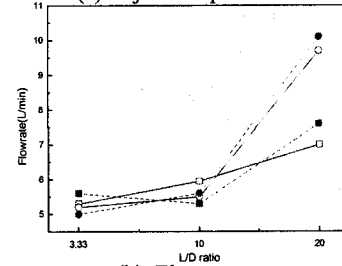
Fig. 7 Internal and external flow pattern of diesel and biodiesel fuels

을 보인다. 형상비가 3.33일 때, 디젤 및 바이오디젤 연료가 각각 0.24MPa, 0.25MPa에서 캐비테이션이 최대로 성장하고, 분사된 연료의 미립화도 활발히 일어나는 것을 고려한다면, 노즐의 형상비가 커질수록 높은 분사압력이 필요하므로, 에너지 효율이 나빠짐을 알 수 있다.

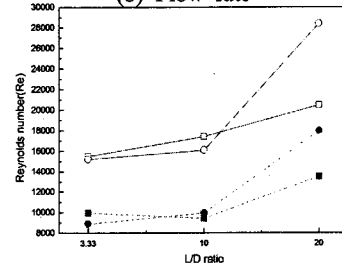
Fig. 8은 연료 유동의 가시화 결과를 분석하여 디젤 및 바이오디젤 연료의 노즐 형상비에 따른 분사압력, 분사유량, 레이놀즈 수, 유량계수, 캐비테이션 수의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)에서 ‘캐비테이션 시작 유동’이 되기 위한 분사압력은 노즐 형상비가 커질수록 증가하며, 이로 인해 Fig. 8(b)와 같이 더 많은 분사유량이 필요함을 알 수 있다. 이는 노즐 형상비가 커질수록, 캐비테이션을 생성하기 위한 에너지가 많이 소모됨을 의미한다. 노즐 형상비에 따른 레이놀즈 수의 변화를 나타내고 있는 Fig. 8(c)에서는 디젤 연료와



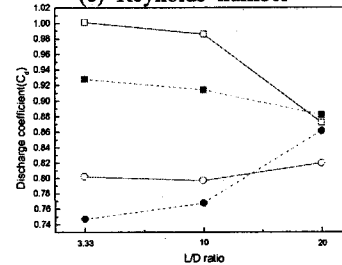
(a) Injection pressure



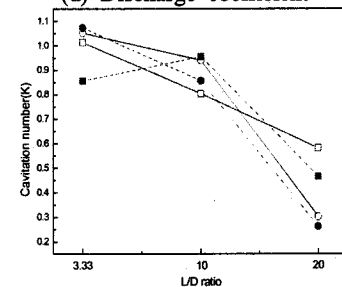
(b) Flow rate



(c) Reynolds number



(d) Discharge coefficient



(e) Cavitation number

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

바이오디젤 연료의 레이놀즈 수 범위가 확연히 다름을 알 수 있다. 이것은 바이오디젤의 점성계수가 디젤 보다 크기 때문이다. 또한, Fig. 8(c)를 통해 레이놀즈 수는 밀도보다 점성계수의 영향이 더 큼을 알 수 있다. Fig. 8(d)에서는 노즐 형상비가 커질수록 ‘캐비테이션 시작 유동’의 유량계수가 작아짐을 확인할 수 있는데, 이는 오리피스의 길이가 길어짐에 따라 유체가 재부착한 후 벽면과 연료의 마찰구간이 길어졌기 때문으로 판단된다. Fig. 8(e)에서 캐비테이션 수는 노즐 형상비의 증가에 따라 감소함을 알 수 있는데 이는 캐비테이션 생성에 필요한 높은 분사압력이 연료의 분사속도에 영향을 주게 되고, 이는 캐비테이션 수가 분사속도의 제공에 반비례하게 됨을 실험적으로 증명하는 것이다.

4. 결 론

노즐 오리피스의 형상 및 노즐 형상비가 디젤 연료와 합산소 바이오디젤 연료의 노즐 오리피스 내부에서 캐비테이션 생성 및 성장, 외부 유동에 미치는 영향을 실험적으로 연구한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 바이오디젤 연료는 높은 밀도와 높은 점성계수로 인해, 디젤 연료 보다 높은 분사압력에서 캐비테이션이 형성된다.

(2) 테이퍼 오리피스 노즐은 직각입구 오리피스 노즐보다 낮은 분사압력에서 높은 분사유량을 나타내고, 또한 분사압력의 증가에 따른 유량계수도 높은 것으로 나타났다. 이는 오리피스 입구의 테이퍼로 인해 노즐에서 오리피스로 진입할 때 유체 유동의 방향 전환이 상대적으로 부드러워 유동저항이 감소했기 때문으로 판단된다.

(3) 형상비가 작을수록 낮은 분사압력에서 캐비테이션이 생성되고, 캐비테이션의 성장도 원활했으며, 생성된 캐비테이션은 분사된 연료의 미립화를 촉진시켰다.

(4) 노즐의 형상비가 커질수록, ‘캐비테이션 시작 유동’에서의 유량계수와 ‘하이드롤릭 플립 유동’에서의 유량계수 차이가 작아졌다.

(5) 노즐의 형상비가 커지면서, ‘캐비테이션 시작 유동’의 유량계수가 작아짐을 확인할 수 있는데, 이것은 오리피스의 길이가 길어짐에 따라 유체가 재 부착 후 벽면과 연료의 마찰구간이 길

어졌기 때문으로 판단된다.

후 기

본 연구는 교육인적 자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실 지원 사업 및 환경부 Eco-STAR project(무-저공해 자동차 사업단)와 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-10932-0)지원으로 수행되었으며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, S. Y., 1996, "Liquid Atomization," Minumsa, pp. 133~136.
- (2) Sarre, C. K., Kong, S.C. and Reutz, R. D., 1999, "Modeling the Effects of Injector Nozzle Geometry on Diesel Sprays," *SAE technical paper*, SAE 1999-01-0912.
- (3) Roth, H., Gavaises, M. and Arcoumanis, C., 2002, "Cavitation Initiation, its Development and Link with Flow Turbulence in Diesel Injector Nozzles," *SAE technical paper*, SAE 2002-01-0214.
- (4) Payri, F., Bermudez, V., Payri, R. and Salvador, F. J., 2004, "The Influence of Cavitation on the Internal Flow and the Spray Characteristics in Diesel Injection Nozzles," *Fuel*, Vol. 83, pp. 419~431.
- (5) Daikoku, M., Furudate, H. and Inamura, T., 2003, "Effect of Cavitation in the Cylindrical Nozzle on the Liquid Breakup Process," *Proc. 9th ICLASS*, 12-7.
- (6) Chaves, H., Knapp, M. and Kubitzek, A., 1995, "Experimental Study of Cavitation in the Nozzle Hole of Diesel Injectors Using Transparent Nozzle," *SAE technical paper*, SAE 950290.
- (7) Sou, A., Muhammad Itham, M., Hosokawa, S. and Tomiyama, A., 2006, "Effects of Cavitation in a Nozzle on Liquid Jet Atomization," *Proc. 10th ICLASS*, ICLASS06-043.
- (8) Soteriou, C., Andrews, R. and Smith, M., 1999, "Further Studies of Cavitation and Atomization in Diesel Injection," *SAE technical paper*, SAE 1999-01-1486.

- (9) Inamura, T., Saito, H., Daikoku, M., Onodera, T., Sakamoto, H. and A. K., 2005, "Cavitating Flow in Rectangular Nozzle with Orifice," *Proc. 10th ILASS-Asia*, pp. 273~280.
- (10) Arcoumanis, C., Flora, H., Gavaises, M. and Badami, M., 2000, "Cavitation in Real-size Multi-hole Diesel Injector Nozzles," SAE paper 2000-01-1249.
- (11) The editorial department, 2005, "Biodiesel," *Journal of the KSME*, Vol. 45, No. 3, pp. 60~61.
- (12) Yoon, S. H., Kim, M. Y., Kwon, S. I., Jeon, H. S. and Lee, C. S., 2006, "Combustion Characteristics of Biodiesel Fuel Derived from Soybean in a Common-rail Diesel Engine," *Spring conference proceeding, KSAE*, pp. 1922~1928.
- (13) Lee, C. S., Park, S. W. and Kwon, S. I., 2005, "An Experimental Study on the Atomization and Combustion Characteristics of Biodiesel-blended Fuels," *Energy & Fuels*, pp. 2201~2208.
- (14) Suh, H. K., Park, S. W., Kwon, S. I. and Lee, C. S., 2004, "Macroscopic Behavior and Atomization Characteristics of Bio-diesel Fuels," *Transactions of KSAE*, Vol. 12, No. 6, pp. 23~29.