

## 디젤엔진에서 노즐 홀 형상효과의 실험적 연구

구건우\* · 이영진\* · 김인수\*\* · 이충원†

### Experimental Study of the Effects of Nozzle Hole Geometry for di Diesel Engine

Kun-Woo Ku, young-jin Lee, In-su Kim, Choong-won Lee

**Key Words:** Spray tip penetration(분무도달거리), Spray angle(분사각), Nozzle hole geometry(노즐 홀 형상), Common-rail(커먼레일)

#### Abstract

Spray tip penetration and spray angle for one main injection were measured at the atmospheric condition with the fuel injection pressure of 270 bar and 540 bar. It investigates an effect of different nozzle hole geometry of conventional cylindrical one and those of elliptical ones. Injection period represented by injector pulse drive was fixed at 1ms. From the result of this study, it is shown that spray tip penetration becomes shorter and spray angle becomes wider with the elliptical nozzle hole geometry due to fast break-up of a fuel liquid column.

#### 1. 서 론

현재 디젤엔진은 연료 효율과 더불어 지구 온난화의 주범인 CO<sub>2</sub>의 방출이 가솔린 엔진에 비해 유리하기 때문에 상용차뿐만 아니라 승용차에서도 그 사용이 확대되고 있다. 이러한 장점에도 불구하고 디젤엔진이 가지는 가장 큰 문제점은 NO<sub>x</sub>, HC, CO, PM 등의 배기가스 배출이다. 세계적으로 배기가스 배출기준이 강화되고 있는 추세이기 때문에 이를 해결하기 위해서 많은 연구가 진행되고 있다. 현재 디젤엔진에서는 NO<sub>x</sub>의 절감을 위해 일반적으로 EGR(Exhaust Gas Recirculation)을 사용하고 있다.

그리고 VGT(Variable Geometry Turbocharger)는 배기가스의 NO<sub>x</sub>뿐만 아니라 PM 절감을 위해 디젤엔진에

장착되어 있다. 디젤 엔진에서 배출되는 배기가스의 NO<sub>x</sub>를 시키기 위한 많은 후처리 시스템이 연구되고 있다. 암모니아 또는 urea 분사에 의한 SCR 시스템은 상대적으로 낮은 온도 상태에서도 급격한 NO<sub>x</sub>의 저감을 보여주고 있다. 하지만 냉 시동 시에는 아직 NO<sub>x</sub>의 정화율이 떨어지고, 암모니아 또는 urea의 분사량을 실제 운전 중인 차에서 NO<sub>x</sub>의 배출량에 맞게 조절하기는 상당히 어려운 점이 많다.

이와 더불어 PM 절감기술도 연구되고 있다. 커먼레일 시스템뿐만 아니라 DOC(Diesel Oxidization Catalyst) 시스템도 디젤엔진에서 THC, PM, CO 배출을 감소시킬 수 있다. 또 DPF(Diesel Particulate Filter)<sup>(1)</sup> 역시 PM 감소의 효과를 얻을 수 있으나 배기가스의 온도가 그 성능에 영향을 끼치고, 배기가스의 압력증가에 의한 Filter의 파손 문제가 해결 되어야 한다.

Nakatani는 DPNR이(Diesel PM and NO<sub>x</sub> Reduction) 이 NO<sub>x</sub>와 PM을 동시에 감소 시키는데 좋은 효과를 가진다고 발표 하였다<sup>(2)</sup>.

이러한 배기가스 절감을 위한 연구 중에 커먼레일 시

(2007년 9월 8일 접수 ~ 2007년 9월 18일 심사완료)

\*경북대학교 기계공학부 대학원

\*\*경북대학교 기계공학부 대학원, Delphi Korea

†책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학부

E-mail : chwlee@knu.ac.kr

TEL : (053)950-5576 FAX : (053)956-9914

스택에서 고압 분사를 통해 연소를 제어하여 NO<sub>x</sub>와 PM의 배출을 감소시키는 방법은 여러 방법들 중 가장 효과적인 방법 중 하나로 고려 되고 있다. 디젤엔진에서의 연소는 연료의 미립화로 인한 균질한 공연비에 크게 의존한다. 이러한 견해에서 피에조 타입 인젝터는 기존 솔레노이드 방식보다 더 큰 압력으로 구동 될 수 있고 니들의 반응 속도가 크기 때문에 미립화와 분사량 제어에 유리하다<sup>(3)</sup>. 하지만 초 고압 분사방식인 피에조 타입 인젝터는 기존 솔레노이드 인젝터 보다 비용적인 면에서 불리하다. 그리하여 기존 솔레노이드 인젝터의 홀 형상을 변화시켜 향상된 미립화를 얻는 것이 좋은 방법이라 할 수 있다<sup>(4, 5)</sup>.

그리하여 본 연구에서는 기존 솔레노이드 인젝터의 분사 홀을 타원으로 재설계하여 기존 원형 홀 인젝터와 분무 특성 비교 실험을 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 실험장치의 구성

Figure 1 과 Table 1은 실험에 사용된 노즐의 사양과 사이즈를 나타낸다. 실험에 사용된 인젝터는 원형 홀과 타원형 홀의 분무 특성을 알아보기 위해 기존 다공 홀의 노즐 바디를 단공 홀의 노즐 바디로 재설계하여 실험에 사용 하였다. 실험 장치는 Fig. 2의 개략도와 같이 RV 차량에 사용되는 Bosch사의 상용 커먼레일 시스템과 분사 사진을 획득하기 위한 장치들로 구성 되었다.

Table 1 Specification of used nozzle hole

Injector		A	B	C	D
Geometry		Circle	Ellipse	Ellipse	Ellipse
Hole dia. (mm)	d1(major)	0.565	0.682	0.702	0.721
	d2(minor)	0.565	0.569	0.543	0.539
Hole area (mm <sup>2</sup> )		0.246	0.305	0.300	0.305
No. of holes		1			
Injection system		Bosch common rail system			
Injection pressure(bar)		270, 540			
Ambient gas condition		Atmospheric condition			
Fuel		Light diesel			

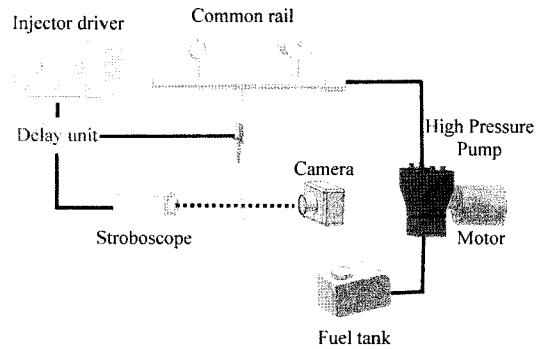


Fig. 2 Experimental setup for spray image

커먼레일 시스템은 3.7 KW의 DC모터(OTIS LG Co., model KM105HK1)로 구동 되었으며, 연료 공급부의 파이프와 커먼레일에 있는 공기를 제거하기 위해 분사 시작 전 air bleeding을 실시하였다. 연료분사시간은 커먼레일 인젝션 드라이브 시스템(TEMS Co., model TDA-330)을 이용하여 조정하였다. 분무사진은 분사시기와 동기화된 스트로보스코프(SUGAWARA Co., model PS-240A)와 디지털 카메라(Nicon Co., model D70S)를 이용하여 분사 후 100 μs의 간격으로 분무 이미지를 촬영하였다. 각각의 노즐 홀 사이즈는 전자 현미경을 이용해 획득한 사진을 통해 측정하였고, 연료 분사량은 전자저울(CAS Co., model MW-120)을 이용하여 측정 하였다. PC를 이용하여 분사 후 시간의 경과에 따라 촬영된 각각의 분무사진으로부터 Spray tip penetration, Spray angle등의 분무 특성을 측정하였다.

### 2.2. 분무사진 분석

분무사진의 분석을 위해 Kang 과 Bae<sup>(8)</sup>의 논문을 참

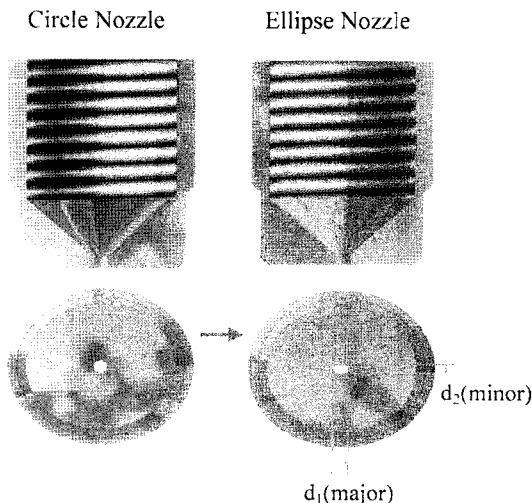


Fig. 1 Schematic of nozzle used

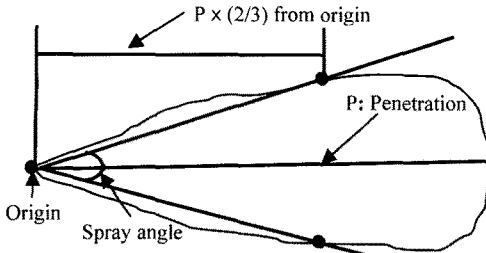


Fig. 3 Example of image showing spray boundaries with geometric definitions

고하였다. 일관된 분무 사진의 분석을 위하여 이미지 분석 소프트웨어를 사용하였다. 이 소프트웨어는 분무가 촬영된 사진의 배경 이미지를 제거한 후 분무 이미지만 사진에 남아있게 해준다. 그 후 위의 과정을 거친 사진의 각 화소에 해당하는 명도(0~220)를 조사하여 각 명도에 해당하는 화소의 수를 상대적으로 표시하는 히스토그램을 얻을 수 있다. 본 연구에 사용된 소프트웨어는 어두운 배경에 해당하는 봉우리가 히스토그램 상에 나타나게 되는데, 이 히스토그램에서 명암의 Threshold를 조절하여 획득된 사진의 기준명도를 결정하고 흑백영상을 생성한다. 이후 각 분무경계의 좌표들을 기억하여 분무도달거리, 면적, 기하학적 각도 등을 계산한다. Fig. 3은 사진분석의 한 예와 함께 몇 가지 기하학적 인자들의 정의를 나타낸다.

본 연구에서 분무도달거리는 노즐 끝에서 선정한 원점으로부터 분무 경계상의 가장 먼 거리로 정의하였고, 분사각은 원점으로부터 분무도달거리의 2/3 거리에 있는 분무경계상의 점들을 찾아 이들이 원점과 이루는 삼각형의 꼭지각으로 정의 하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1. 분사 유량

현재 디젤 인젝터는 연료의 미립화를 위해 홀 직경이 최소화 되고 있다. 이는 연료 분사량 제어 문제로 연결되기 때문에 디젤 엔진 분사 시스템에서 고려해야 할 중요한 결정인자 중 하나이다. 실험적으로 연료 분사량을 측정하기 위해 1 ms의 간격으로 대기에 1분간 분사된 연료를 채집하여 전자저울로 측정하였다. 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 본 연구에서는 가공성의 문제로 원형과 타원형 노즐의 면적을 같게 할 수 없었다. 그에

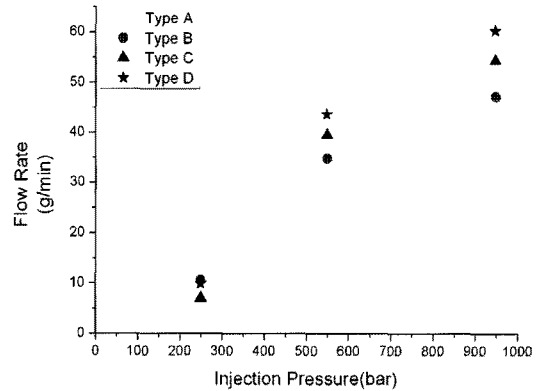


Fig. 4 Fuel injection rates for each nozzle

서 원형노즐과 타원형 노즐의 유량을 직접비교 할 수 없었다. 하지만 타원형 노즐인 B, C, D는 같은 단면적을 가짐에도 불구하고 550 bar 이상의 압력에서는 타원의 장, 단경 비가 가장 큰 노즐 D에서 유량이 최대가 됨을 알 수 있다. 특정분사압력 이상에서는 분사압력에 관계없이 타원의 장, 단경 비가 커질수록 분사량이 증가함을 알 수 있다. 하지만 이번 실험에서는 타원의 장, 단경비에 의해 유량이 달라지는 이유를 명확히 밝혀 낼 수 없었다.

#### 3.2. 분무도달거리(Penetration)와 분사각

디젤엔진 연소에서는 연료 액적의 크기뿐만 아니라 분사각과 분무도달거리도 배기가스와CO생성에 밀접한 관계가 있으므로 매우 중요하다. 디젤엔진에서의 CO생성은 상대적으로 온도가 낮고 공기와의 혼합이 불리한 연소실 하부와 실린더 벽면에서 고압분사로 인한 벽면 연료충돌로 인해 생성된다. 연료의 벽면충돌을 막기 위해서는 미립화를 촉진시켜 연료가 벽면에 도달하기 전에 압축착화 시켜야 한다. Fig. 5와6은 분사시간이 1 ms 이고 분사 시작 후 0.5 ms부터 1.6 ms 동안 각각의 노즐에서의 분무도달거리와 분사각을 나타낸다. 연료는 270 bar의 분사압으로 대기 중에 분사되었고, 분무 특성은 타원형노즐의 장축과 단축에서 각각 측정되었다. 각 노즐의 1회분사량은 알파벳 순서대로 0.0049 g, 0.0052 g, 0.0040 g, 0.0049 g 이다. 연료 분사량의 차이가 미소함에 따라 본 연구에서는 분사압 270 bar에서는 각각 노즐의 분사량이 유사하다고 판단하였다. Fig. 5에서 단축과 장축의 분무도달거리가 부분적으로 다른 곳이 나타나는데, 이는 디젤 분무의 분무도달거리가 매회 실험 시 조금씩 달라짐을 보인 것과, 장, 단축의 사진 촬영이 동

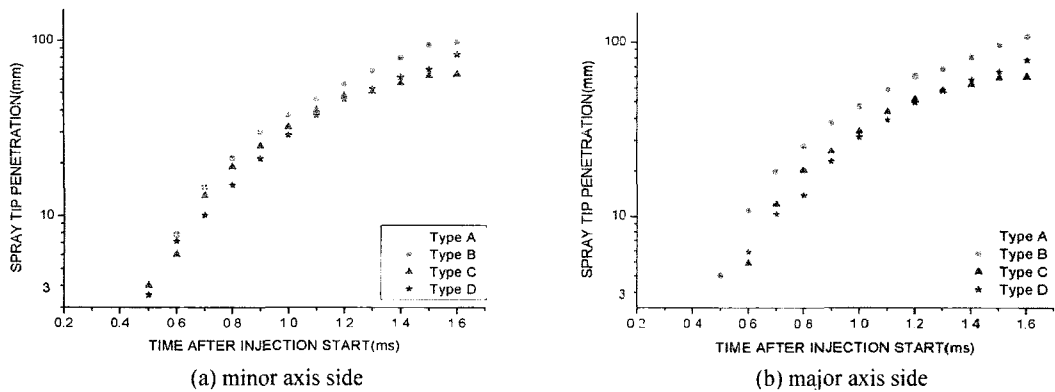


Fig. 5 Spray tip penetration for each nozzle when fuel injection pressure is 270bar

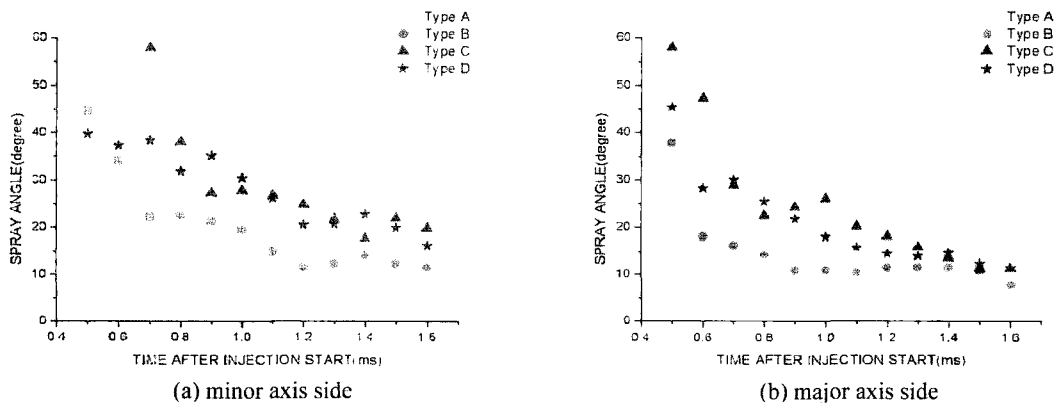


Fig. 6 Spray angle for each nozzle when fuel injection pressure is 270bar

일한 event에서 이루어지지 못해서 생긴 결과라 판단된다. 분무도달거리와 분사각은 장, 단축에서 각각 촬영된 30장의 사진을 분석해 평균하여 측정 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 원형 홀 형상을 지닌 노즐 A가 가장 작은 직경임에도 불구하고 가장 긴 분무도달거리를 보인다. 그리고 원형 홀 노즐 A에서 분사각 또한 타원형노즐에 비해 작음을 보이고 있다. 거의 동일 조건에서 분사 하였음에도 불구하고 원형노즐의 분무특성이 타원형노즐의 분무특성보다 좋지 않음을 볼 수 있다. 그 이유는 원형노즐의 분무 형상은 solid cone 이 되지만, 타원형노즐의 분무는 타원 형상이 된다. 동일 면적의 원형노즐과 타원 노즐을 비교 했을 때 타원형노즐의 분무초기 액주 중심으로부터 분무 경계면 까지 거리가 타원의 단축면에서 원형노즐의 그 거리보다 짧기 때문에 액주 중심으로 공기 유입이 유리해지며, 유입 된 공기와 분사된 연료 액적들이 활발히 상호 작용을 하여 미립화가 빠르게 진행됨으로써 얻어진 결과라 판단된다. Fig. 5를

보면 노즐 형상에 관계없이 분사 후 시간에 따른 분무도달거리는 증가한다. 이는 노즐의 분사압이 낮아 분열이 비교적 천천히 일어나 관찰 시간 내에 미립화가 완전히 진행되지 않아서 일어나는 현상으로 보인다<sup>(10)</sup>. 연료 분사압의 영향에 의한 타원형 노즐과 원형노즐의 분무도달거리 및 분사각을 조사하기 위해 연료를 540 bar로 대기 중에 분사하였고 실험조건 및 방법은 앞서 기술한 방법과 동일하다. Fig 7과 8은 분사압 540 bar의 분무도달거리 및 분사각을 나타낸다. 각 노즐의 1회 분사량은 알파벳 순서대로 0.0143 g, 0.0174 g, 0.198 g, 0.218 g이다. 각 노즐에 대한 분무도달거리와 분사각은 Fig. 5, 6에서 보이는 것과 다름을 알 수 있다. 특히 타원형노즐 C, D에서 분무도달거리의 비율이 비교적 길어졌다. 이는 각각의 노즐에서 연료 분사량을 제외하고 다른 조건은 동일했기 때문에 타원형노즐에서 좀 더 많이 분사된 연료가 액주의 분열을 지연시켰을 것이라 생각된다. 그에 반해 타원형노즐 C, D의 분사각은 Fig.

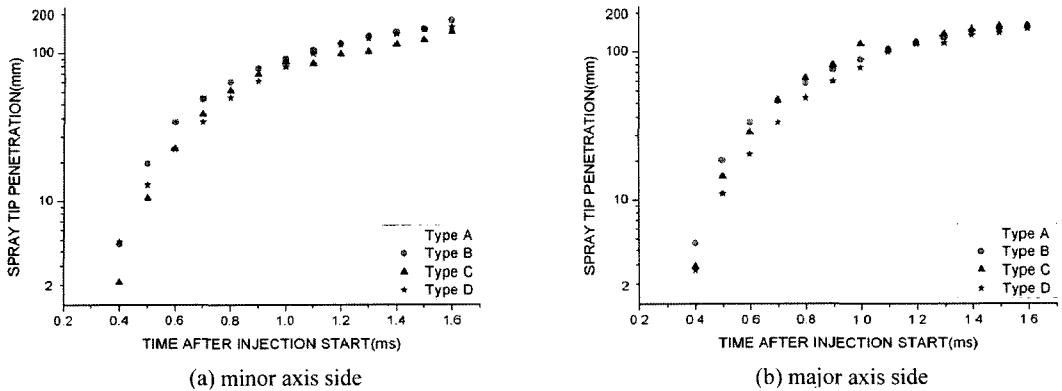


Fig. 7 Spray tip penetration for each nozzle when fuel injection pressure is 540bar

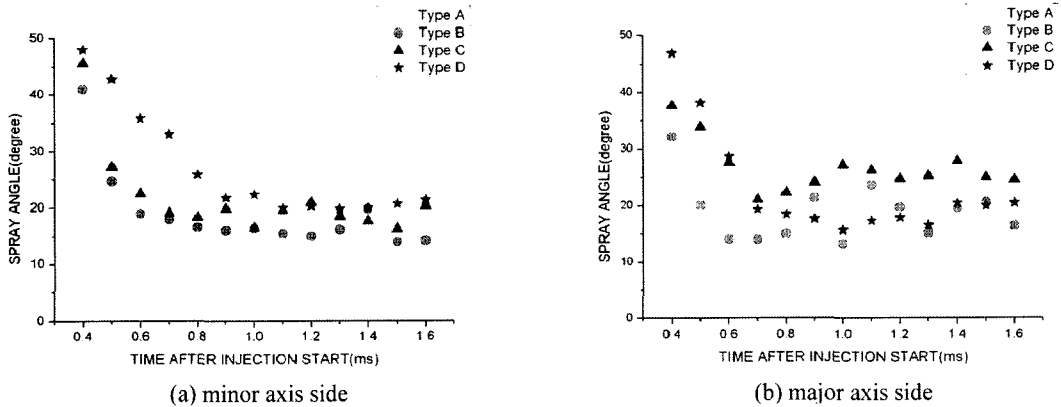


Fig. 8 Spray angle for each nozzle when fuel injection pressure is 540bar

6과 비교하였을 때 유사한 경향이 나타남을 보여주고 있는데, 이것은 타원형노즐 C, D의 분사각이 원형노즐 A의 분사각에 비해 명백히 크다는 것을 보여준다. Fig. 7을 보면 노즐의 형상에 관계없이 분무도달거리 그래프 기울기가 Fig. 5와 비교했을 때 시간의 경과에 따라 완만해짐을 볼 수 있다. 분사압력의 증가가 액주의 미립화를 빠르게 진행시켜 일어난 현상으로 보인다.

3.3. 분무 이미지

Figure 9는 노즐 A와 D를 동일압력으로 분사한 후 1.6 ms 후의 분무 사진이다. 노즐 D의 분무도달거리가 노즐 A보다 짧아짐을 보인다. 분사각도 노즐 D가 더 커짐을 볼 수 있다. 또한 노즐 D의 액주 안에서 light gray pixel과 white pixel들이 노즐 A 보다 쉽게 관찰되며 더 넓은 것을 볼 수 있다. 이는 주위 공기와의 혼합과 좋은 미립화의 결과라 할 수 있다. 이 현상은 노즐 D의 연료 액주 중심으로부터 분무경계면까지 거리가 이전 단락에

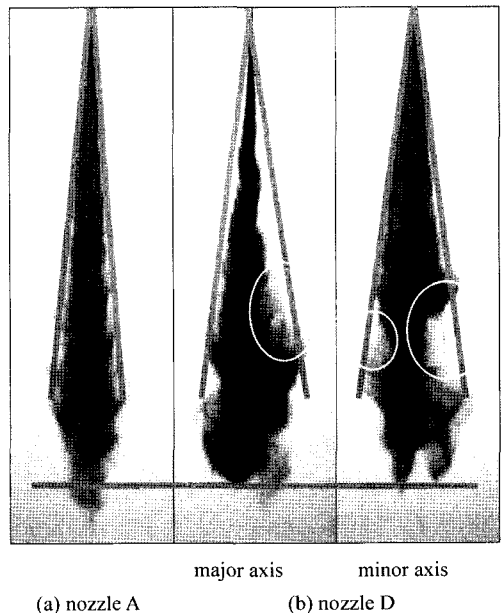


Fig. 9 Selected spray image for nozzle A and B

서 기술된 노즐 A의 경우보다 좀 더 가깝기 때문이다. 이런 분무특성은 본 연구에서 획득된 타원형 노즐 C, D의 사진에서 전반적으로 나타난다.

#### 4. 결 론

일반적인 원형 홀 노즐과 타원형 노즐 홀 노즐의 기초 분사특성 실험을 분사압력에 변화를 주어 조사하였다. 이 연구로부터 얻어낸 결과들은 아래와 같다.

1. 각각의 노즐에서 연료가 분사되었을 때 연료분사 압력에 관계없이 원형 노즐 A보다 타원형 노즐 C, D의 분무도달거리는 짧아졌고, 분무각은 더 커졌다.

2. 이번 연구에서 타원형노즐의 경우 장, 단경의 형상비가 증가함에 따라 분사 유량이 증가 하였다.

#### 후 기

본 논문은 KEMCO(에너지 관리공단)의 지원에 의해 이루어진 것으로, 연구를 지원해 주신 관계자 분들께 감사할 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) M. Khair, A Review of Diesel Particulate Filter Technologies, SAE paper 2003-01-2303, 2003.
- (2) K. Nakatani, S. Hirota, S. Takeshima, K. Itoh, T. Tanaka and K. Dohmae, Simultaneous PM and Nox Reduction System for Diesel Engines, SAE paper 2002-01-0957, 2002.
- (3) S. Kim, N. Chung, and M. Sunwoo, Injection Rate Estimation of a Piezo-Actuated Injector, SAE paper 2005-01-0911, 2005.
- (4) C. Bae, J. Yu, J. Kang, J. Kong, and K. Lee, Effect of Nozzle Geometry on the Common-Rail Diesel Spray, SAE paper 2002-01-1625, 2002.
- (5) J. Han, P. Lu, X. Xie, M. Lai, and N. A. Henein, Investigation of Diesel Spray Primary Break-up and Development for Different Nozzle Geometry, SAE paper 2002-01-2775, 2002.
- (6) D. Cheon, S. Park, C. Lee, and K. Lee, Effect of Injection Pressure on the Atomization Characteristics of High Pressure Injector in Diesel Engine, Proceeding of ILASS-Asia 2001, 2001.
- (7) N. Tamaki, M. Shimizu, and H. Hiroyasu, Effect of Geometric Shapes of High-Efficiency Atomization Enhancement Nozzle on Atomization Characteristics, Proceedings of ILASS-Europe 2005, 2005.
- (8) C. Bae, and J. Kang, Initial Behaviors of Diesel Spray from Common-Rail System Considering Injection Rate Profile, Proceedings of KSAE2002, 2002.
- (9) L. Jacobsson, E. Winklhofer and J. Chomiak, Effect on Spray Characteristic and Heat-Release Rate in a Large-Size Single-Cylinder Diesel Engine, SAE paper 1999-01-3490, 1998.
- (10) A. H. Lefevbre, Atomization and Spray, Hemisphere Press, 1983.