

디젤기관용 분사밸브 형상에 따른 분사특성

김성윤[†] · 오승우* · 박권희**

(원고접수일 : 2003년 6월 30일, 심사완료일 : 2003년 7월 24일)

Injection Characteristics with Valve Geometries for a Diesel Engine

Sung-Yoon Kim[†] · Seung-Woo Oh* · Kweon-Ha Park**

Key words : Injection characteristics(분무특성), Fuel chamber geometry(연료실 형상), Needle lift(니들양정), Diesel engine(디젤기관)

Abstract

Injection technology is one of the important technologies in a diesel engine. Many studies have done on the injection system. In this study, the fuel chamber geometry, the orifice ratio and the needle lift of the injection valve of a diesel engine for generating electricity are varied and tested. The injection pressure, duration and spray shapes are produced with pressure transducer, needle lift sensor and highspeed camera. The result shows that the nozzle hole size has influence on the rail pressure and injection duration sensuously.

1. 서 론

디젤기관은 현재 사용되고 있는 어떠한 동력원보다 높은 열효율을 갖고 있으며, 가솔린 기관과 함께 수송용 내연기관의 대부분을 차지하고 있다. 특히 큰 출력을 필요로 하는 박용기관, 발전용기관, 대형 트럭 등의 수송용 기관과 산업용 기관에 널리 사용되고 있다. 과거 엔진들과는 달리 디젤기술이 혁신적으로 발달되었기 때문에 중소형 차량용으로도 공급이 증가할 것으로 생각된다. 하지만 질소산화물과 매연미립자의 배출은 가솔린이나 가

스엔진에 비하여 매우 높기 때문에 대도시뿐만 아니라 해양에서도 엄격한 규제가 시작되었고 이를 만족하기 위해서는 더욱 많은 기술개발이 요구된다. 분사계의 기술은 디젤기관의 가장 중요한 기술 중의 하나이며 많은 연구가 진행되고 있다.

조⁽¹⁾는 스로틀링 핀틀형 분사노즐의 핀틀 팁의 형상과 밸브가 열리는 압력을 변화시켜 분사계의 특성을 조사하였으며, 분사노즐의 열리는 압력이 높으면 분사량이 작아지며 관로 잔류압력과의 백동이 커져 2차 분사 유발 등의 분사특성이 악화되며, 분사펌프의 속도가 증가할수록 분사관내의 압

[†] 책임저자(한국해양대학교 대학원 기계공학과) E-mail : sin2gy@hanmail.com T : 051)410-4953

* 한국해양대학교 대학원 기계공학과

** 한국해양대학교 기계정보공학부

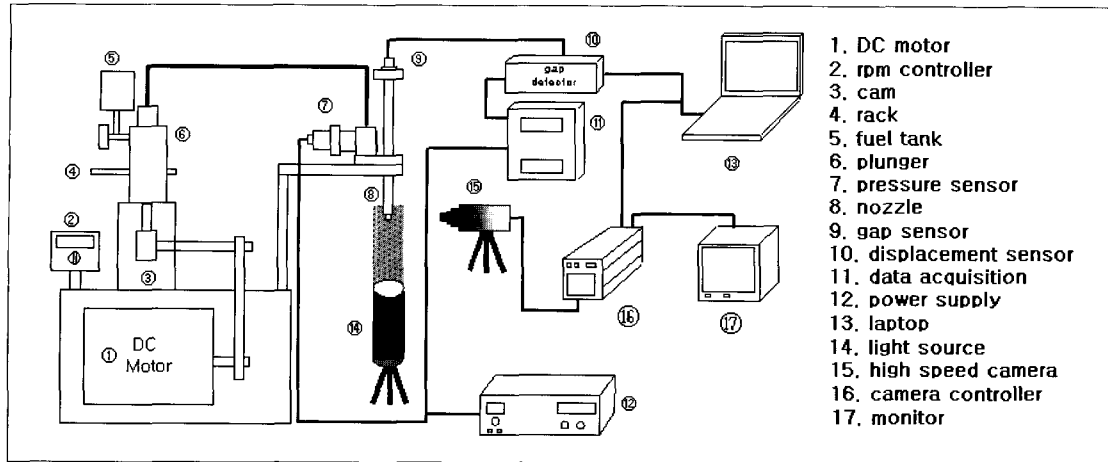


Fig. 1 Experimental setup

력은 커지며, 분사기간은 짧아지고 분사율은 증가한다고 설명하고 있다. 디젤 기관의 성능을 좌우하는 미립화 효율 향상 방안과 혼합기 형성과정을 연구하는 방법으로 지금까지는 주로 연소실내의 연료분무 자체를 연구하였으나^{[2]-[5]}, 연료분무 자체의 거시적인 특성인 분무도달거리, 분무각 등과 미시적인 특성인 연료 액적 입자의 크기 및 속도는 상부조건 즉 노즐 형상과 노즐 내부의 유동 현상에 영향을 받으므로 최근에는 노즐 내부유동 현상이 연료분무의 미립화에 미치는 영향에 대한 연구의 중요성이 점차 더해가고 있으며^[6], 실제 디젤 엔진에서의 인젝터 노즐 분공내부에서 일어나는 캐비테이션 현상을 관찰하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.^[7] Castleman^[8]은 액체분류의 분산(dispersion)이 주위 기체와의 마찰에 의해서 발생한다고 설명하고, 그에 반해서 Schweitzer^[9]는 노즐 내부에서 발생하는 난류운동에 의해서 액체분류의 분산이 일어난다고 설명하고 있으며, 김^[10]은 마찰과 난류운동의 영향 그리고 분사액체 및 주위기체의 조건(밀도, 점도, 표면장력 등), 노즐 오리피스의 형상비(L/d) 등의 영향을 받는다고 설명하고 있다. 구^[11] 등은 노즐 내부에 캐비테이션의 발생여부를 수치해석을 통하여 연구하였으며, 그 결과 노즐 내부에 캐비테이션이 발생한 경우가 발생하지 않은 경우보다 캐비테이션에 의한 기포발생에 의해 연료의 미립화가 촉진됨을 알 수 있었다.^{[12]-[13]} 또한, 오리피스의 형상

비(L/d)가 작을 때는 입구조건이 노즐출구에 영향을 크게 미치나 클 때는 경계층 및 내부유동의 발달에 따라 입구조건에 영향이 적어진다고 설명하고 있다^[11]. 노즐 입구 모양에 따라 축소부 직후 캐비테이션 발생 가능성은 달라지며, 곡면 입구형상 노즐(R-type)에서의 캐비테이션 발생 가능성은 급격 축소된 디젤노즐(D-type)보다 월등히 낮다.^[11] 하^[14] 등은 노즐 내부의 유동을 광학적으로 측정이 가능하도록 비례적으로 크게 만들고 단순화 시켜서 내부유동을 가시화한 결과 노즐의 내부에는 캐비테이션이 발생하였으며, 캐비테이션이 발생한 경우가 그렇지 않은 경우보다 연료의 분산이 촉진됨을 설명했으며, 적절히 미립화가 된 연료는 혼합기 형성과정에서 빨리 가연 혼합기를 만들어 디젤기관의 점화를 촉진시켜 연소효율을 높이고 유해 배출가스의 생성을 줄인다.^{[15]-[17]}

본 연구에서는 노즐 내부의 연료실형상 변화, 니들 양정 변화 그리고 오리피스의 형상비(L/d)의 변화가 분사압력과 분사기간 그리고 분무에 대해 어떠한 영향을 미치는지에 대해 분석하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험조건

2.1 실험장치

선박 발전용 디젤기관의 분사밸브에 대한 분사 특성을 실험하기 위하여 Fig. 1과 같은 분사실험

장치를 구성한다. 연료공급계통은 인버터로 회전 속도를 제어할 수 있는 15k W DC 모터로 캠을 구동하여 분사펌프를 작동시키고 고압화된 디젤연료가 분사밸브로 공급되도록 구성되었다. 데이터 취득계통은 압력센서와 갭 센서에서 발생하는 전압신호를 데이터처리장치를 통하여 HP VEE프로 그램으로 처리하도록 구성되어 있다. 압력 취득을 위하여 최대압력 100MPa까지 측정할 수 있는 센서를 분사밸브 연료공급 직전에 설치하였으며 니들 양정 측정을 위하여 니들의 상부에 연결봉을 설치하여 분사밸브의 상단까지 니들의 거동을 연장하고 이 곳에 ONO SOKKI VS-041 모델의 갭센서를 설치하여 니들의 움직임을 받을 수 있도록 하였다. 분무형상을 촬영하기 위하여 광원을 정면에 설치하고 SPACECOM 사의 1mm CCTV LENS를 장착한 고속도카메라를 측면에 설치하였으며, 고속도 카메라에서 입력된 영상 데이터를 취득하기 위하여 고속도 카메라와 랩톱(laptop)을 ROPER SCIENTIFIC FAST CAM-Super 10KC 모델의 카메라 컨트롤러로 연결하여 실험하였다.

2.2 실험조건

Table 1은 실험조건을 보여준다. Case 1 양정을 0.1mm씩 변화하였다. Case 2에서는 니들 양정과 연료실 형상을 모두 동일하게주었으며, 오리피스의 형상비(L/d)를 $5.55(=1.6/0.288)$ 와 $5.19(=1.6/0.308)$ 그리고 $4.87(=1.6/0.328)$ 로 변화하였고, Case 3에서는 니들 양정과 오리피스의 형상비(L/d)를 $5.97(=1.6/0.268)$ 로 동일하게 하고, 연료실 형상을 변화하였다.

Table 1 Test conditions

| | lift(mm) | d(mm) | L(mm) | sac volume type |
|--------|----------|-------|-------|-----------------|
| Case 1 | 0.4 | 0.308 | 1.6 | TB |
| | 0.5 | | | |
| | 0.6 | | | |
| Case 2 | 0.5 | 0.288 | 1.6 | TB |
| | | 0.308 | | |
| | | 0.328 | | |
| Case 3 | 0.5 | 0.268 | 1.6 | TB |
| | | | | DV |

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연료실 형상 변화

Fig. 2는 TB 타입과 DV 타입의 형상을 보여주고 있다. DV 타입노즐은 하나의 홀로 연료를 공급하며, TB 타입노즐은 2개의 홀로 연료를 공급한다. DV 타입은 연료실이 분사홀에서 멀리 떨어져 있고 TB 타입은 가깝게 위치하고 있으며, 연료

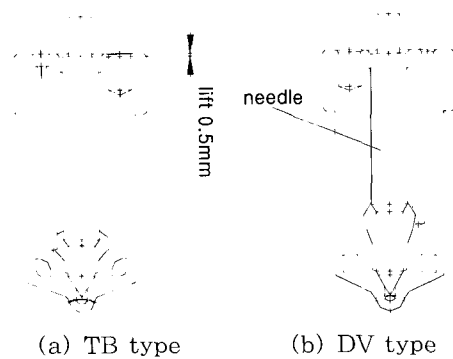


Fig. 2 Fuel chamber geometries

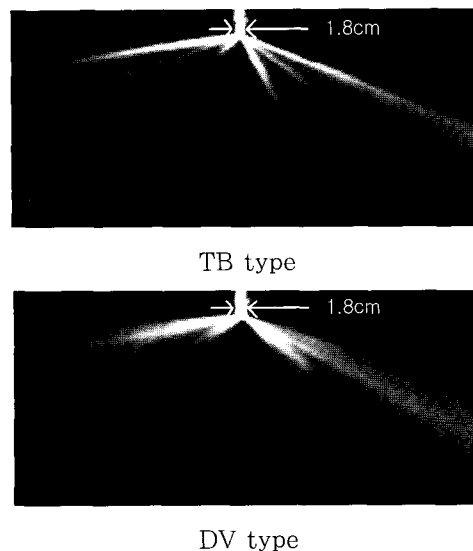


Fig. 3 Spray development with TB type and DV type

실 체적과 연료공급홀의 면적은 동일하다. Fig. 3은 연료실 형상의 변화에 따른 성장 분무이다. 분위기 압력이 대기압 상태이기 때문에 분사된 액적

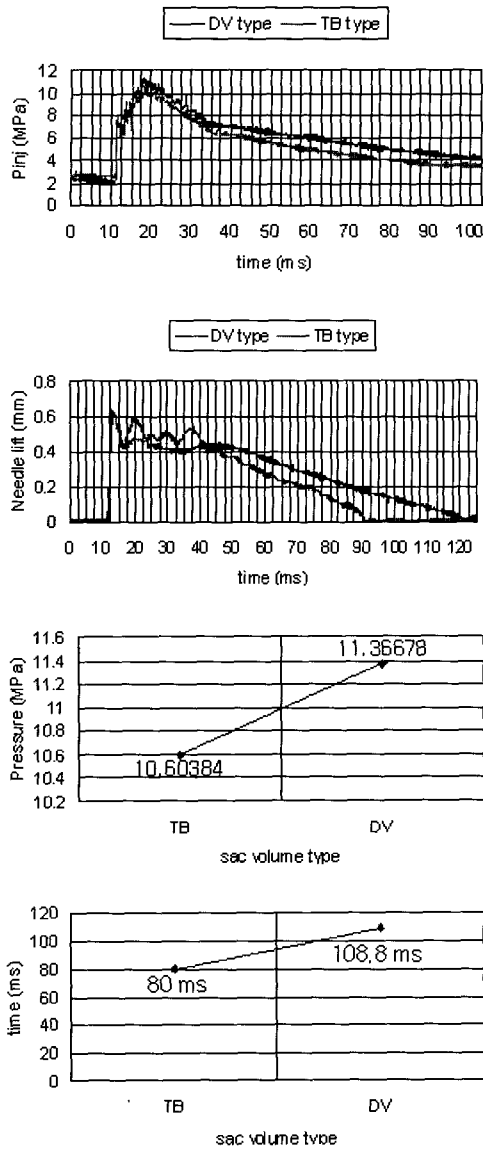


Fig. 4 Pressure, needle lift, maximum pressure and injection duration with TB type and DV type

들이 주위공기의 저항없이 밖으로 빠르게 진행하면서 분산된다. 관통에 있어서는 TB 타입이 DV 타입보다 뛰어나지만 분사압력이 높은 DV 타입이 TB 타입보다 더 넓게 분산됨을 보여주며 연소 활성화에 유리할 것으로 생각된다. Fig. 4는 연료실 형상 변화에 따른 분사압력과 니들 양정의 변화 그리고 최고압력과 분사시간을 보여준다. 분사압력을 보면 연료공급홀이 하나이고 연료실이 분공

에서 멀리 위치한 DV 타입이 잔류압력은 낮지만 분사기간동안 전체적으로 높은 압력을 유지하며 분사기간이 길어진다. 이는 분공에서 멀리 위치한 연료실과 하나인 공급홀의 복합적인 영향으로 생각된다. 동일한 공급홀 면적임에도 불구하고 하나의 공급홀의 경우가 공급홀의 표면마찰의 감소로 충분한 연료를 공급할 수 있으며 동시에 멀리 떨어진 분사홀까지의 압력전달시간이 길어지기 때문에 분사기간동안 분사압력이 높은 것으로 판단된다. 분사기간의 증가도 이러한 측면에서 오랫동안 지속된다. 따라서 저속기관에서는 DV 타입이, 고속기관에서는 TB 타입이 적합할 것으로 판단된다.

3.2 니들 양정 변화

Fig. 5는 분사밸브의 니들 양정이 0.4mm, 0.5mm, 0.6mm일 때 분무가 완전히 성장한 모습을 보여준다. 앞에서 언급한 것처럼 대기압의 분위기에서 빠른 진행을 나타낸다. 양정이 0.4mm에서 0.6mm로 증가하면서 더 넓게 분산되는데 이는 분사압력 증가에 따른 결과로 보여진다. 양정이 0.5mm일 때 0.4mm와 0.6mm일 때 보다 관통에 있어서는 가장 좋은 결과를 보인다. Fig. 6은 니들 양정 변화에 따른 분사압력과 니들 양정 변화 그리고 최고압력과 분사시간 그래프를 보여주고 있다. 노즐의 분사기간은 니들 양정 0.4mm에서 가장 길게 나타나며, 양정이 커질수록 분사기간은 점차 짧아지며, 분사기간의 차이는 줄어드는 것을 볼 수 있다. 분사 최고압력그래프를 보면 니들 양정 0.4mm에서 가장 낮으며, 니들 양정이 커질수록 최고압력값이 증가하며, 그 증가량은 점점 감소함을 알 수 있다. 동일한 연료를 분사하여야하기 때문에 양정이 작을수록 오랜 기간 분사하게 되는데 양정이 0.5mm 이상이 되면 그 차이가 크게 줄어드는 것을 알 수 있다. 갭 센서를 니들 스프링 상부에 설치하고 2개의 니들로 상부와 하부가 분리된 상태로 제측하였기 때문에 밸브가 열릴 때의 압력으로 양정이 기준치보다 높게 나오는 것을 볼 수 있었다. 생산제작에서는 이를 고려하여 0.5mm를 기준으로 그 이하가 되는 것을 조심하여야 한다.

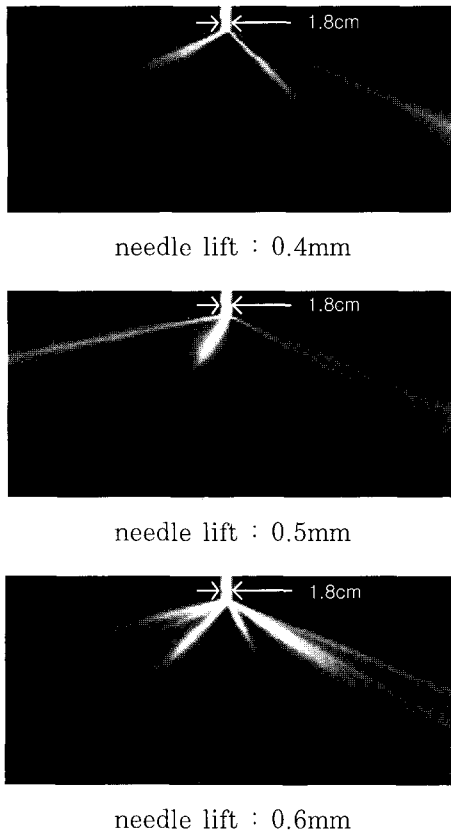


Fig. 5 Spray development with changing needle lift

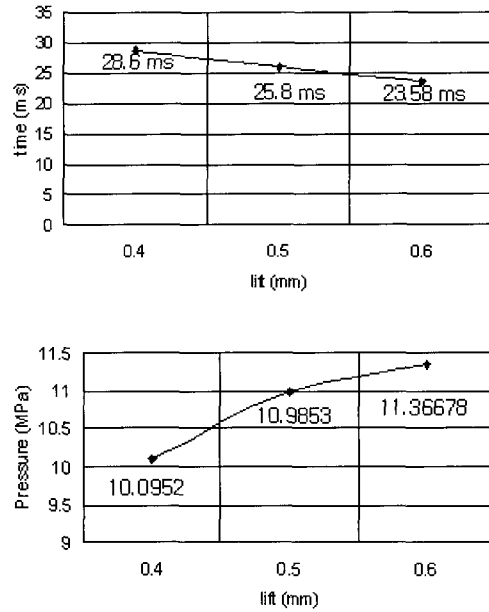
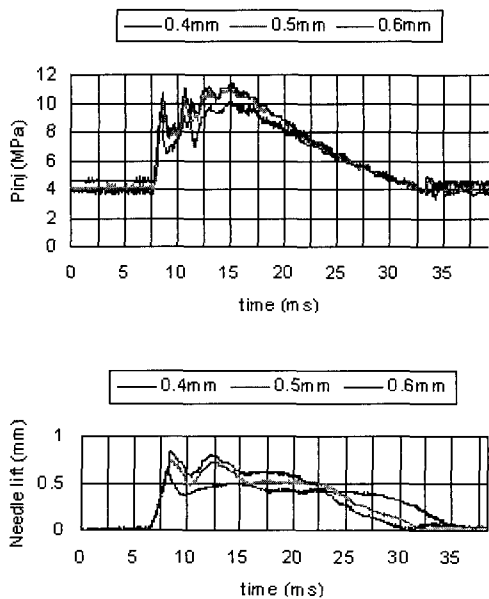


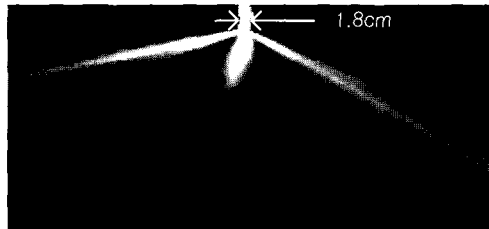
Fig. 6 Pressure, needle lift, maximum pressure and injection duration with changing needle lift

3.3 노즐 직경 변화

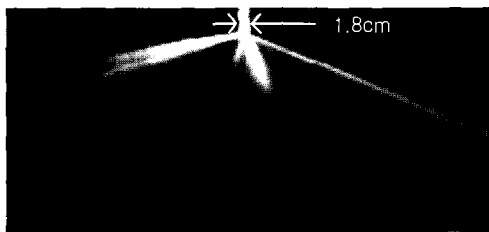
Fig. 7은 노즐 홀 직경 변화에 따른 성장분무형상을 보여준다. 노즐 홀 직경이 0.288mm일 때는 분산과 관통이 0.328mm일 때보다 상당히 증가하는 경향을 보이거나, 0.308mm보다는 아주 미세하게 증가하는 것을 볼 수 있으며, 0.308mm일 때 관통은 0.288mm과 0.328mm보다 증가하지만 분산에서는 0.328mm일 때보다는 증가하고 0.288mm일 때보다는 감소하는 경향을 보이며, 0.328mm일 때는 관통과 분산 모두 0.288mm과 0.308mm보다 감소하는 경향을 보인다. 이는 0.328mm일 때 분사압력이 급격히 감소한 결과이다. Fig. 8은 노즐의 직경 변화에 따른 분사압력과 니들 양정 그리고 분사시간과 최고압력 그래프를 보여주고 있다. 분사압력을 보면 직경이 작을수록 최고압력이 높고 직경이 커질수록 점점 감소하는 것을 볼 수 있다. 분사시간은 노즐 직경이 커질수록 당연히 짧아지는 것을 볼 수 있다. 노즐 직경 변화와 니들 양정 변화를 비교해보면 양정과 노즐 직경이 커질수록 연료가 흐르는 관로가 넓어진다는 공통점을 볼 때 분사시간에서는 동일 하



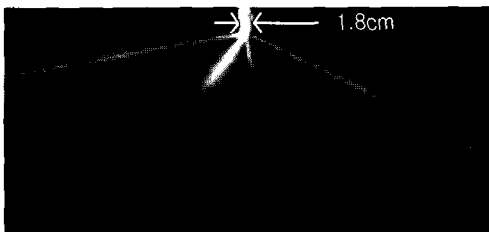
결과를 볼 수 있지만 최고 압력에서는 노즐직경 변화에서는 관로가 좁을수록 압력이 높아지나 니들 양정 변화에서는 관로가 좁아질수록 압력이 낮아지는걸 볼 수 있었다. 연료실 형상과 니들 양정 변화를 수직상으로 연료실이 넓어지는 것으로 보면 서로 같은 결과를 보인다. 이 결과를 본다면 노즐 출구에서의 직경변화(관로)와 노즐 내부에서의 관로 변화에 따른 압력 변화는 상반됨을 알 수 있다. 노즐직경의 변화는 관로내의 변화보다 더욱 노즐의 분무특성에 영향을 미치며 민감하기 때문에 노즐 홀 제작은 더욱 정밀하게 이루어져야 할 것으로 판단된다.



nozzle diameter : 0.288mm



nozzle diameter : 0.308mm



nozzle diameter : 0.328mm

Fig. 7 Spray development with changing nozzle diameter

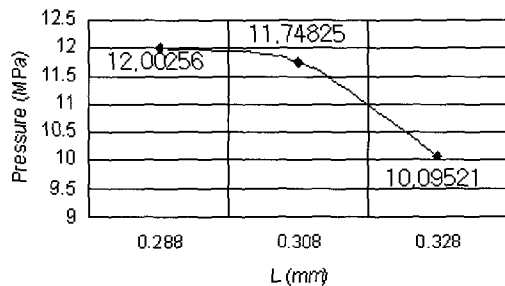
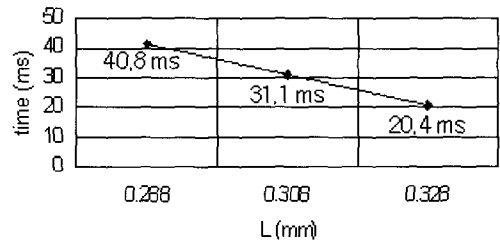
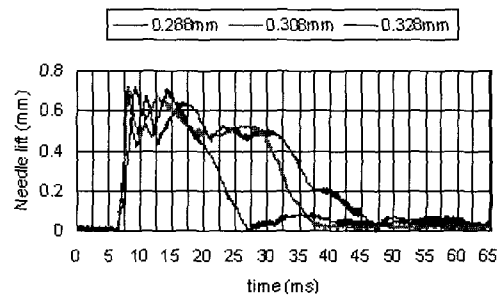
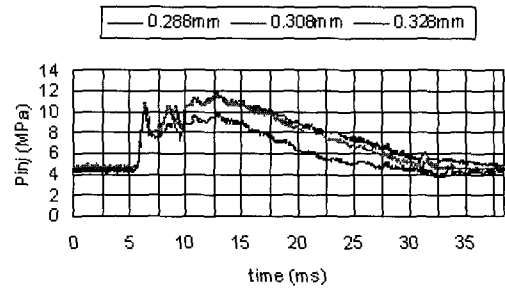


Fig. 8 Pressure, needle lift, maximum pressure and injection duration with changing nozzle diameter

4. 결 론

선박발전용 분사밸브 형상에 따른 분사와 분무 특성을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 연료실형상변화 : 연료실이 분사홀에서 멀리

위치하고 연료공급홀이 하나인 DV 타입은 연료실이 분사홀에 가깝게 위치하고 공급홀이 2개인 TB 타입에 비하여 분사압력이 7% 높아지고 분사시간이 36% 증가한다. 분사압력이 높은 DV 타입이 TB 타입보다 더 넓게 분산됨을 보여주며 연소 활성화에 유리할 것으로 생각된다. 기관속도와 연소실형상에 따라 적절한 타입의 선택이 요구된다.

- 2) 니들양정변화 : 양정이 높을수록 분사시간이 줄어들고 분사압력은 높아진다. 하지만 양정이 0.5mm 이상이 되면 큰 변화가 없다. 니들양정이 증가할수록 분사압력의 증가로 인해 분산이 증가하며 관통은 감소한다.
- 3) 노즐직경변화 : 노즐직경이 0.308mm 이상으로 증가하면 분사압력과 분사시간이 급격히 줄어들기 때문에 정밀한 제작이 요구된다. 노즐직경이 0.288mm일 때 분산과 관통이 가장 좋으며 0.308mm이상일 때 급격히 저하된다.

3가지 경우에 대한 각각의 실험결과를 종합적으로 분석해 볼 때, 분사압력이 높을수록 분산이 증가됨을 알 수 있고 따라서 분사기 설계에서 압력 감소를 주의해야하며 각 설계인자들을 적절히 고려해야한다. 상기 분석한 설계인자들만을 생각한다면 분무확산을 최대화하기 위해서는 연료실이 노즐홀에서 멀리 위치한 DV 타입에 양정은 0.5mm이상 노즐 홀 직경은 0.3mm 이하로 제작하는 것이 적합할 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 2003년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- [1] 조래희, "핀틀형 노즐의 팁형상에 따른 분사 특성 및 글로우 플러그 충돌효과에 관한 연구", 부산대학교 석사학위논문, 1997.
- [2] Hiroyasu, H. and Kadota, T., "Fuel

- Droplet Size Distribution in Diesel Combustion Chamber", SAE paper 740715, 1974.
- [3] Reitz, R. D. and Bracco, F. B., "On the Dependence of Spray Angle and Other Spray Parameters on Nozzle Design an Operating Conditions", SAE paper 790494, 1979.
- [4] Wu, K-J., "Atomizing Round Jets", Ph.D.Thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Princeton University, 1983.
- [5] Liu, A. B. and Reitz, R. D., "Mechanism of Air-Assisted Liquid Atomization", ILASS America 92, pp. 59-63, 1992.
- [6] Huh, K. Y. and Gosman, A. D., "Atomization Mechanism of Fuel Injection", ILASS America 91, pp. 42-81, 1991.
- [7] Arcoumanis C., Gavaises M. Nouri J.M., Wahab E. and Horrocks R., "Analysis of the Flow in the Nozzle of a Vertical Multi-Hole Diesel Engine Injector", SAE paper 980811, 1998.
- [8] Castleman Jr., R. A., "The Mechanism of the Atomization of Liquid", J. Research Nat.Bur.Standards, Vol.6, pp. 369-376, 1931.
- [9] Schweitzer, P. H., "Mechanism of Disintegration of Liquid Jets", J. Applied Physics, Vol.8, pp. 513-521, 1937.
- [10] 김인구, "두 개의 와류분무노즐에서 분사되는 이중분무의 특성에 관한 연구", 한국과학기술원 박사학위논문, 1989.
- [11] 구자예, 박장혁, 오두석, 정홍철, "연료노즐 내부유동 현상의 수치해석", 대기기계학회논문집 (B), 제20권 제6호, pp. 1971-1982, 1996.
- [12] Shimizu, M., Arai, M. and Hiroyasu, H., "Disintegrating Progress of a

Liquid Jet and Internal Flow in a Nozzle", JSME, Vol. 56, No. 528, pp. 2519-2525, 1990.

- [13] Wang, X. F., Chin, J. S. and Lefebvre, A. H., "Influence of Gas-Injector Geometry on Atomization Performance of Aerated-liquid Nozzles", International Journal of Turbo and Jet Engine, Vol. 6, pp. 271-291, 1989.
- [14] 하성엽, 김홍열, 류구영, 구자예, "노즐분공내 유체충돌이 있는 디젤노즐의 유동 및 분무특성 연구", 대한기계학회논문집(B), 제21권 제12호, pp. 1635-1646, 1997.
- [15] 차건중, 김덕줄, "충돌판에 의한 분무의 공간 분포에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집, 제19권 제1호, pp. 251-262, 1995.
- [16] Koo, J. Y., "Characteristics of a Transient Diesel Fuel Spray", Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison, 1991.
- [17] Faeth, G. M., "Mixing, Transport and Combustion in Sprays", Prog. Energy Comb. Sci., Vol. 13, pp. 293-345, 1991.

저 자 소 개



김성윤 (金星潤)

1978년 3월 13일생, 2002년 한국해양대학교 기계냉동자동차공학부(자동차공학전공) 졸업(공학사), 현재 한국해양대학교 기계공학과 석사과정 재학중.



오승우 (吳昇佑)

1977년 11월 13일생. 2003년 한국해양대학교 기계공학부(기계공학 전공) 졸업(공학사), 현재 한국해양대학교 기계공학과 석사과정 재학중.



박권하 (朴權夏)

1960년 9월 1일생, 1982년 삼균관대학교 기계공학과(공학사) 졸업, 1991년 UMIST 기계공학과(공학석사) 졸업, 1995년 UMIST 기계공학과(공학박사) 졸업, 1995~1998년 기계연구원, 1998~현재 한국해양대학교 기계정보공학부, 조교수.