

# 다공 디젤노즐의 출수 변화에 따른 유량계수 평가에 관한 연구

## A Study on Estimate of Flow Coefficient with Variation of Hole Number in Multi-hole Diesel Nozzle

이지근\*, 조원일\*\*, 노병준\*\*\*  
Jeekuen Lee, Wonil Cho, Byoungjoon Rho

### ABSTRACT

This experimental study is to investigate the flow characteristics of the multi-hole nozzle used in the fuel injection system of a heavy-duty diesel engine. A multi-hole diesel nozzle with a 2-spring nozzle holder was used in this study and without changing the total orifice exit area, its hole number varied from 3( $d_n=0.42\text{mm}$ ) to 8( $d_n=0.25\text{mm}$ ). The injection pressure and needle lift were measured and Bosch type injection rates measurement system was used. The discharge flowrates of each orifice in the multi-hole nozzle changed by the flow conditions inside the nozzle sac hole. In case that pump speed and injection quantity were low, the orifice located in the vertex of nozzle tip had a great deal of injection quantity compared with that of others. As the increment of multi-hole number, the injection duration and the mean injection pressure decrease. The mean and peak injection rates, however, increase. Actually, the mean flow coefficient( $C_{d(\text{mean})}$ ) increases, too. The flow coefficient of the multi 8 hole was evaluated as  $C_{d(\text{mean})}=0.74$  and that is the maximum value among the examined conditions.

주요기술용어 : Multi-hole nozzle(다공노즐), Injection rate(분사율), Flow coefficient(유량계수)

### Nomenclature

$C_{d(\text{mean})}$  : mean flow coefficient  
deg. : crank angle  
 $d_n$  : nozzle hole diameter, mm  
 $H_n$  : hole number  
 $t_{inj}$  : injection duration, ms

$\rho_i$  : fuel density,  $\text{kg/m}^3$

### 1. 서론

최근의 직접분사식 디젤기관의 연료분사 시스템은 오염물질 방출수준을 낮추고, 특히  $\text{NO}_x$ 와 입자상물질(PM)의 동시저감을 달성할 수 있도록 연료분사율을 조절할 수 있는 전자제어시스템, 높은 분사압을 얻을 수 있는 고압분사 시스템, 그리고 노즐의

\* 회원, 전북대학교 국책지원사업단

\*\* 회원, 전주공업대학 기계과

\*\*\* 회원, 전북대학교 기계공학부

홀 수를 증가시켜 연료의 공간 분포 특성을 향상시킴과 동시에 보다 작고 균일한 분무를 형성시키는 방향으로 연구가 진행되고 있다. 디젤노즐에 대한 초기연구는 핀틀 또는 단공노즐에 대한 것이 상당부분을 차지하고 있다. 그러나 직접분사방식의 연소시스템이 적용됨에 따라 다공노즐의 사용이 보편화되고 있어, 이에 대한 연구의 필요성이 급증하고 있는 실정이다. 그러나 다공노즐에 대한 연구는 단공노즐과 달리 실험적 연구에 상당한 제약이 따르며, 아직도 규명되지 않은 많은 부분이 존재하고 있다. 최근 들어 실험 및 계측 기법의 발달로 다공노즐에 대한 연구가 수행되면서 단공과 다공 분무 사이에는 근본적인 차이가 있으며, 이것은 주로 노즐 섹 홀 내부 유동 특성에 기인한다는 결과가 발표되고 있다.

이와 관련된 연료분사계에 관한 연구로, Ishiwata와 Kitahara 등<sup>1)</sup>은 분사율 형성 (injection rate shaping) 기법이 분사계 설계에 있어서 가장 중요한 인자임을 지적하고, 직경이 작은 노즐 오리피스의 적용은 PM과 NO<sub>x</sub>의 저감을 위한 방법 중 하나임을 제시한 바가 있다. Funai와 Itoh 등<sup>2)</sup>은 스모그 방출 수준을 낮추기 위해서는 100MPa 이상의 고압분사가 필요하며, Yoshikawa와 Hiroyasu 등<sup>3)</sup>은 스모크와 NO<sub>x</sub> 방출 수준을 모두 줄이기 위해서는 흡기스웰과 연소실의 형상을 바꾸는 것보다 노즐형상을 최적화하는 것이 더 효과적임을 제시한 바가 있다.

한편 노즐의 유동특성을 나타내는 무차원 수로는 유량계수가 있으며, Varde와 Popa,<sup>4)</sup> Burt와 Troth,<sup>5)</sup> Dent,<sup>6)</sup> Koo와 Martin 등<sup>7)</sup>은 단공노즐의 유량계수를 그리고 Arcoumanis와 Whitelaw 등<sup>8)</sup>은 다공노즐의

유량계수를 평가한 바가 있다.

본 연구에서는 다공노즐에 대한 연료분사계 특성을 파악하고, 노즐 홀 수 변화에 따른 유량계수를 평가하여 다공노즐 설계에 필요한 기초자료를 얻고자 하였다.

## 2. 실험장치

### 2.1 연료분사장치

다공노즐에 대한 연료분사계 특성을 고찰하기 위해 연료분사펌프, 구동 모터 등이 포함된 연료분사장치를 구성하였다. 분사펌프는 8기통 in-line 펌프로서, 직경이 12mm인 우권 양리드의 플런저를 사용하고 있다. 연료분사펌프는 최고 3600rpm의 속도로 회전할 수 있는 15kW DC 모터에 의해 구동되며, 모터의 회전속도는 속도 제어반에 의해 제어된다. 연료분사펌프의 회전수는 분사시기 조절장치 가까이 설치된 근접센서로부터의 신호를 타코미터를 이용하여 측정하였다.

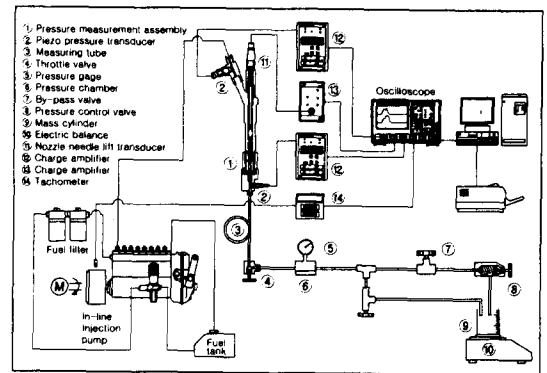


Fig. 1 Injection characteristics measurement system

실험에 이용된 연료분사 펌프는 배기량 17,200cc, V8기통 대형 디젤엔진에 사용되는 펌프로서 대상 엔진의 최대 출력 및 토크점에서 펌프 1행정당 분사량(mm<sup>3</sup>/st)과 펌프 회전수(rpm)는 각각 147/1100, 143/700

이다.

분사펌프는 8개의 플런저 유닛을 가지고 있다. 이 중 실험에 사용되는 플런저 유닛은 분사펌프의 구동축에 해당되는 분사시기 조절장치에 가장 가까운 플런저 유닛을 사용하였다. 조정랙의 제어는 1/1000mm까지 측정 가능한 마이크로미터를 이용하였다. 또한 분사펌프에서 발생된 압력파를 노즐까지 전달하는 장치인 분사파이프는 분사계 특성에 많은 영향을 끼치므로 실제 엔진에 사용되는 것과 동일한 것을 이용하였다. 외경과 내경은 각각  $\phi 6$ ,  $\phi 2.2$  이며, 길이는 660mm이다. 시험에 사용된 연료는 24℃에서 비중 0.8315, 동점도 3.71cSt, 의 물성치를 가진 KS 2호의 경유를 사용하였다.

펌프측 압력으로는 델리버리 밸브 출구압력을 측정하였으며, 잔압측정이 가능한 피에조 저항 압력센서(Kistler4065A500)와 증폭기(Kistler4618)를 이용하였다. 노즐측 압력으로는 노즐 홀더 입구 압력을 측정하였으며, 피에조 압력센서(Kistler6229)를 사용하였다. 얻어진 신호는 충전 증폭기(charge amplifier, Kistler5011)에서 신호를 증폭한 후, 오실로스코프(LeCroy9354A)를 이용하여 측정하였으며, 컴퓨터에 저장한 후 일괄처리 하였다.

## 2.2 다공노즐 형상

실험에 이용된 분사노즐은 Fig.2에 나타난 바와 같이 2-스프링 홀더를 가진 미니색형의 다공노즐이다. 다공노즐의 형상변화가 분무특성에 끼치는 영향을 고찰하기 위하여 전체 홀 면적을 일정하게 유지한 상태에서 분공수를 3공부터 8공까지 변화시켰다. 홀수에 따른 직경과 출구면적은 Table 1에 나타난 것과 같다.

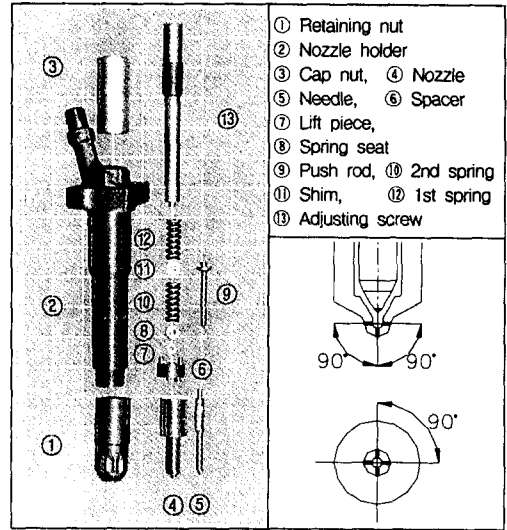


Fig. 2 Details of the multi-hole diesel nozzle

실험에 이용된 다공 노즐은 Fig.2의 5공 노즐의 예와 같이 노즐 정점에 1개의 오리피스(Orifice)가 있으며, 나머지 오리피스는 균일한 간격으로 팁의 원주 둘레에 설치되어 있다.

Table 1 Nozzle hole total area and diameter with hole number

Hole No.	3	4	5	6	7	8
Diameter	0.42	0.36	0.32	0.30	0.27	0.25
Total area	0.416	0.407	0.402	0.424	0.401	0.393

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 오리피스 위치에 따른 방출특성

Fig.3은 다공노즐의 오리피스 위치에 따른 방출특성을 알아보기 위해, 5공 노즐에 대해, 전체분사량을 홀 수인 5로 나누어 각 홀 당 예상 분사량(expected injection quantity)으로, 그리고 노즐의 정점에 위치한 오리피스로부터 방출된 유량을 측정하여 측정 분사량(measured injection quantity)으로 정의하고, 펌프회전수와 랙위치 변화

에 따른 관계를 나타낸 것이다.

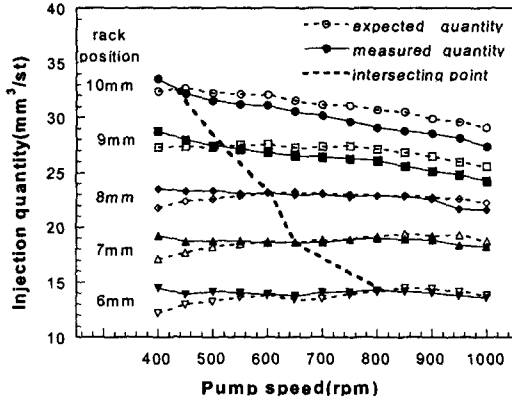


Fig. 3 Relationship between expected and measured flowrates for the multi 5 hole nozzle

그림을 살펴보면 펌프 회전속도 증가에 따라 조정랙의 위치가 커질수록 노즐 정점에 위치한 오리피스로부터 방출되는 유량이 점점 감소하여 어느 지점을 경계로 더 작은 유량이 방출되고 있음을 관찰할 수 있다. 그림에서 굵은 일점쇄선으로 나타낸 것은 노즐 정점에 위치한 오리피스로부터 방출되는 유량이 예상분사량과 일치하는 지점을 서로 연결한 선으로, 이 점을 기준으로 상반된 경향을 나타내는 노즐 정점에 위치한 오리피스의 방출 유량변화를 가시적으로 구분하기 위해서 나타낸 것이다. 이와 같은 방출유량의 차이는 노즐 색 내부의 유동 경로의 변화를 의미하는 것으로써, 교차점을 연결한 일점쇄선은 거의 대각선형태를 나타내고 있는 점으로 미루어보아 노즐 색 내부의 유동상태는 일정한 레이놀드수를 기준으로 변화함을 예측할 수 있다.

Fig.4는 다공노즐의 홀 수가 변화할 때 노즐 정점에 위치한 오리피스의 방출 특성을 알아보기 위하여 전체 분사량이  $70\text{mm}^3/\text{st}$ 일 때, 다공노즐의 홀 수를 3공부

터 8공까지 변화시켜가면서 측정한 분사량과 전체 분사량에 대한 예상 분사량을 함께 나타낸 것이다.

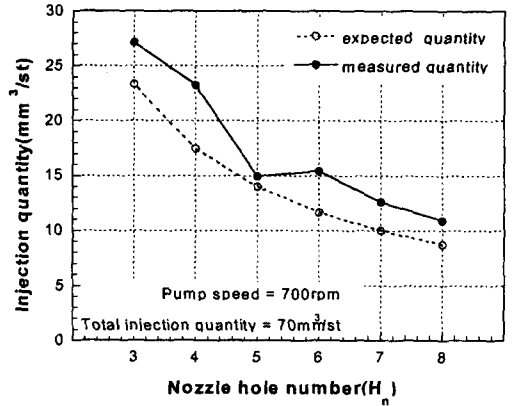


Fig. 4 Relationship between expected and measured flowrates for various multi-hole nozzles

홀 수에 관계없이 정점에 위치한 오리피스로 더 많은 유량이 방출되고 있으며 4공 노즐이 예상 분사량보다 32.9% 더 많은 유량을 방출하여 가장 큰 차이를 나타내고 있다. 또한 5공 노즐의 경우 6.6%로 가장 작은 차이를 나타내고 있으며, 3공 노즐부터 8공 노즐 전체의 평균값은 23.1%로 나타났다.

이러한 결과로부터 다공노즐의 방출특성은 오리피스의 위치와 작동조건에 따라 달라지며, 일정한 작동조건을 경계로 변화함을 알 수 있다. 이것은 연소실내 분무유동장의 최적화를 위한 노즐 설계시 고려되어야 할 사항으로 노즐색 내부유동에 대한 연구결과와의 검증자료로 활용될 수 있을 것이다.

### 3.2 연료분사압력

연료분사가 시작되면 압력은 매우 빠르게

증가하며 압력파는 분사노즐을 향해 연료의 음속(약 1400m/s)으로 움직인다. 특히 분사 압력선도에서 노즐이 열리는 순간과 그 때의 압력(열림압력), 노즐이 열린 직후 압력 곡선 특성과 압력 상승 정도, 분사기간, 노즐이 닫히는 순간과 그 때의 압력(닫힘압력), 반사파의 크기, 2차 분사 등은 분사계 특성을 결정짓는 중요한 특성값이다.

Fig.5는 펌프 회전속도가 700rpm이고, 분사량이 70mm<sup>3</sup>/st 일 경우, 노즐 입구(고압관 끝단)에 설치된 피에조 압력센서로부터 얻은 순간분사압력 신호를 노즐 홀 수에 대해 나타낸 것으로, 시간축의 0은 분사시작을 의미한다.

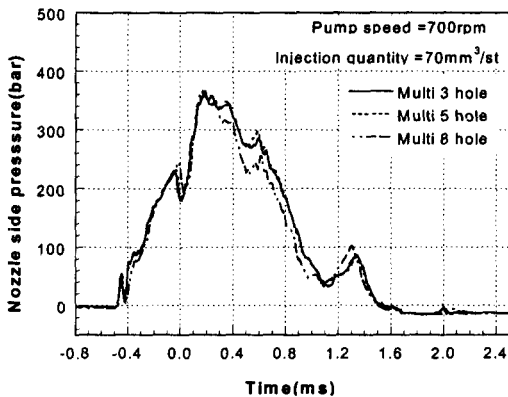


Fig. 5 Effects of hole number on the nozzle side pressure for the multi hole nozzle

분사가 시작되기 전에 상승되는 압력은 니들이 열림과 동시에 하락한 후 다시 상승하며 0.2ms 근처에서 최대값에 도달한 후 하강하게 된다. 분사가 끝나는 1.2ms 근처에서 약간의 압력상승이 있지만 곧 감소하여 잔류압력과 같게 된다.

노즐 홀 수에 따른 영향을 살펴보면, 8공 노즐의 열림압력과 닫힘압력이 다른 노즐보

다 약간 크게 나타나고 있으며, 최대분사압력 이후 압력 강하가 두드러지게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 순간분사압력 선도로부터 계산된 분사기간동안의 평균분사압력과 최고분사압력을 노즐 홀 수에 대하여 살펴보면, 8공 노즐에서 가장 작은 평균분사압력을 나타내고 있어 최대값과 최소값 사이에 약 9.5%의 편차가 존재함을 알 수 있다. 또한 최고분사압력은 5공 노즐에서 가장 높게 나타나고 있으며, 3공 노즐에서 가장 낮은 분포를 보이고 있어 약 4.3%의 차이를 나타내고 있다. 이것으로부터 분사기간이 동일하다면, 8공 노즐의 경우가 동일한 양을 가장 적은 에너지로 분사함을 알 수 있으며, 따라서 높은 방출계수를 갖음을 짐작할 수 있다.

### 3.3 연료분사기간

Fig.6은 다공노즐의 홀 수 변화가 분사기간에 끼치는 영향을 알아보기 위하여, 펌프 회전속도가 700rpm이고, 분사량 70mm<sup>3</sup>/st 일 때 홀 수 변화에 따른 니들 양정의 거동을 분사시작 후 시간변화에 따라 나타낸 것이다. 니들 양정은 니들이 열린 후 최대 분사압이 나타나는 지점에서 약간 주춤하지만 계속해서 상승하여 곧바로 최대 양정에 도달한다. 니들 양정이 최대값에 도달한 후, 하강하기 전까지 진동하는 현상을 관찰할 수 있다. 이러한 니들의 떨림 현상은 노즐 홀 면적 특성과 노즐 열림압력 등에 영향을 받으며, 노즐 홀 면적이 작을수록 그리고 노즐 열림압력이 클수록 진폭이 커지는 것으로 알려져 있다.

노즐 홀 수가 3공에서 8공으로 증가할 경우, 전반적인 니들양정 변화거동은 유사하지만 분사종료시점이 약간 빨라짐을 알 수

있다. 특히 홀 수가 3공에서 8공으로 증가함에 따라 홀 직경은 0.42mm에서 0.25mm로 작아지지만 반사파에 의한 2차 분사 등과 같은 후분사가 일어나지 않음을 관찰할 수 있다.

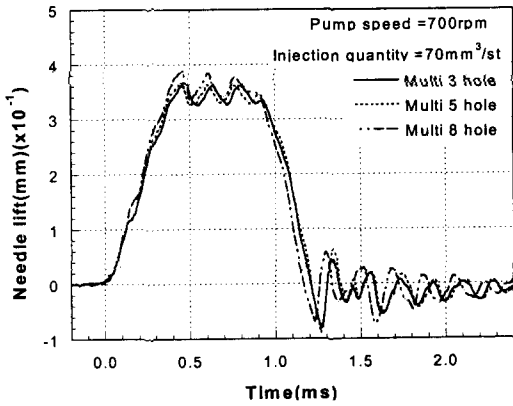


Fig. 6 Effects of hole number on needle lift for the multi hole nozzle

Fig.7은 분사시간으로 정의된 니들 열림과 닫힘 사이의 기간을 시간(ms)과 크랭크 각(deg.)으로 나타낸 것이다.

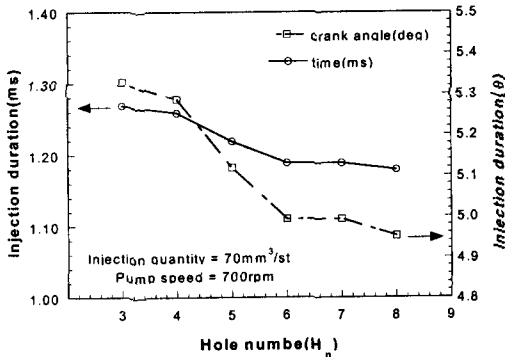


Fig. 7 Effects of hole number on injection duration for the multi hole nozzle

다공노즐의 홀 수가 증가할수록 분사시간

은 감소하며, 최대값을 나타내는 3공과 최소값을 나타내는 8공 노즐사이 시간으로는 0.11ms, 크랭크 각으로는 0.38°의 차이를 나타낼 수 있다.

### 3.4 연료분사율

연료분사율은 노즐로부터 분사되는 분사량의 시간적 변화의 비율로 정의된다. 따라서 분사율은 펌프에서 발생된 압력이 고압관 내에서 압력과 형태를 전달되어 노즐로부터 분사되는 시간적인 분사량으로 송유율에 1차적으로 지배된다고 할 수 있다. 그러나 송유율이 일정한 경우, 분사율은 노즐 니들의 움직임에 많은 영향을 받으며, 노즐 홀 수 및 홀 직경, 노즐 열림 및 닫힘 압력 등에 영향을 받는다.

Fig.8은 다공노즐의 홀 수 변화에 따른 분사율특성을 고찰하기 위하여 펌프회전속도 700rpm, 분사량 70mm³/st일 경우의 분사율을 노즐 홀 수에 대하여 나타낸 것이다.

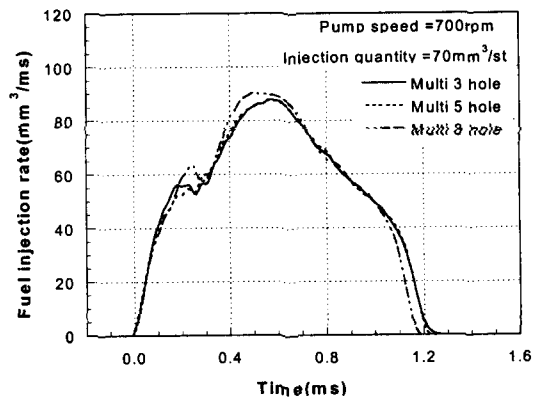


Fig. 8 Effects of hole number on injection rates for the multi hole nozzle

그림에서 볼 수 있듯이 분사율은 분사압

력이 최고값에 도달하는 0.25ms 근처에서 변곡점을 형성한 후 다시 상승하며 0.6ms 근처에서 최대값을 보인 후 1.1ms까지 완만하게 감소하고 그 이후에 보다 급격히 감소하여 분사를 종료한다. 배기가스 방출특성에 많은 영향을 미치는 초기분사율은 0.1ms까지는 거의 변화하지 않지만, 최고분사율이 나타나는 시간과 최대분사율까지의 상승 정도에 약간 차이가 있다.

Fig.9는 다공노즐의 홀 수 변화에 따른 평균분사율과 최대분사율을 함께 나타낸 것이다.

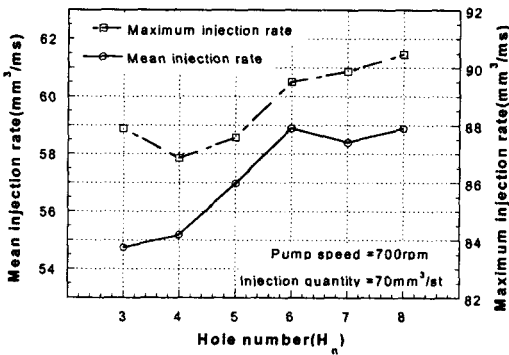


Fig. 9 Effects of hole number on mean and maximum injection rates for the multi hole nozzle

평균분사율은 노즐 홀 수가 증가할수록 거의 선형적으로 증가하며, 6공 노즐부터는 거의 일정한 값을 보이고 있다. 또한 최대 분사율은 3공노즐에서 다소 높게 나타나다가 4공노즐에서 감소한 후, 점점 증가하여 8공 노즐에서 최대값을 나타내고 있다. 노즐 홀 수가 3공에서 8공으로 증가할 경우 평균분사율은 약 7.6% 증가하며, 최대분사율은 최소값은 보이는 4공 노즐과 8공 노즐 사이에 4.2%의 차이를 나타내고 있다. 이와 같이 노즐의 홀 수가 증가하면 평균분사율

이 증가하는 것은 분사기간의 단축과 더불어 최고 분사율이 증가했기 때문이다. 이러한 결과를 평균분사압력과 함께 생각해 보면, 다공노즐의 경우 홀 수가 증가하면 평균분사압이 감소하므로 다공노즐의 홀 수가 증가함에 따라 노즐 유량계수가 증가할 것으로 예상된다.

### 3.5 노즐 유량계수

노즐의 순간유량계수는 분사율과 노즐입구의 압력선도로부터 계산될 수 있으며, 다음과 같이 정의된다.

$$C_d = \frac{m_d / (t_{inj} \rho_f)}{(\pi d_n^2 / 4) (2 \Delta P / \rho_f)^{1/2}} \quad (1)$$

여기서,  $m_d / (t_{inj} \rho_f)$ 은 유량( $m^3/s$ ),  $\rho_f$ 은 연료의 밀도( $kg/m^3$ ),  $d_n$ 은 홀 직경(m),  $\Delta p$ 는 압력차(Pa)이다.

Fig.10은 다공노즐의 형상변화에 따른 유량계수를 평가하기 위하여 분사펌프의 회전수와 분사량을 700rpm, 70mm<sup>3</sup>/st로 고정하고, 다공노즐의 홀 수를 3공부터 8공까지

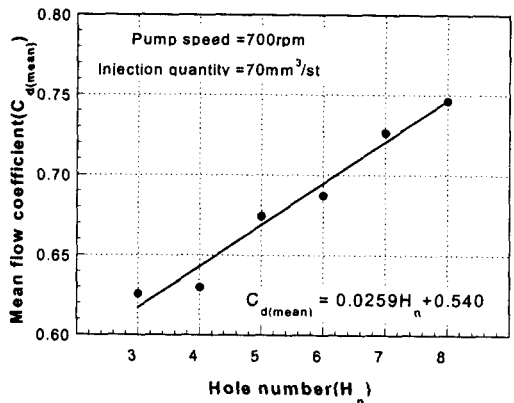


Fig. 10 Distributions of the mean flow coefficient with multi-hole number

변화시켰을 때 식(1)을 이용하여 계산된 유량계수의 평균값에 해당하는 평균유량계수를 나타낸 것이다.

다공노즐의 홀 수가 증가하면 노즐의 평균유량계수는 거의 선형적으로 증가하며, 3공~8공 노즐의 평균유량계수( $C_{d(mean)}$ )와 노즐 홀 수( $H_n$ )의 관계를 분사량  $70\text{mm}^3/\text{st}$ , 펌프회전수  $700\text{rpm}$ 에서 식(2)와 같이 1차식으로 나타낼 수 있었다.

$$C_{d(mean)} = 0.0259H_n + 0.540, (3 \leq H_n \leq 8) \quad (2)$$

이 때, 최대값을 나타내는 8공 노즐의 유량계수는 0.74로 평가되었다.

#### 4. 결론

다공노즐의 노즐 홀 수 변화에 대하여 연료분사계 특성과 유량계수를 평가한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 3~8공 노즐에서, 각 오리피스의 분사량은 색 내부 유동조건에 따라 달라진다. 펌프 회전속도 증가에 따라 조정랙의 위치가 커질수록 노즐 정점에 위치한 오리피스로 방출되는 유량이 점점 감소하여 어느 지점을 경계로 더 작은 유량이 방출됨을 알 수 있었다.
- 2) 다공노즐의 홀 수가 3공에서 8공으로 증가하면 분사기간은 감소하며, 분사기간동안의 평균분사압력은 낮아지는 반면, 평균분사율은 증가하는 것으로 나타났다.
- 3) 3공~8공 노즐의 평균유량계수( $C_{d(mean)}$ )와 노즐 홀 수( $H_n$ )의 관계를 분사량  $70\text{mm}^3/\text{st}$ , 펌프회전수  $700\text{rpm}$ 에서 1차식으로 나타낼 수 있었다. 또한 평균유량계수는 홀 수가 증가할수록 거의 선형적으로

로 증가하며, 8공 노즐의 유량계수가 0.74로 가장 높게 나타났다.

#### 후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 자유공모과제(1998-011-E00257)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드린다.

#### 참 고 문 헌

- 1) H. Ishiwata, X.-h. Li, H. Yoshikawa, and N. Kitahara, "Recent Progress in Rate Shaping Technology for Diesel In-Line Pumps," SAE 940194, 1994.
- 2) K. Funai, T. Yamaguchi and Ito, S., "Injection Rate Shaping Technology with Common Rail Fuel System(ECD-U2)," SAE 960107.
- 3) S. Yoshikama, R. Furusawa, A. Masataka, and H. Hiroyasu, "Optimizing Spray Behavior to Improve Engine Performance and to Reduce Exhaust Emissions in a Small D.I. Diesel Engine," SAE 890463, 1989.
- 4) K. S. Varde and D. M. Popa, "Diesel Fuel Spray Penetration at High Injection Pressures," SAE 830448, 1983.
- 5) R. Burt and K. A. Troth, "Penetration and Vaporization of Diesel Fuel Sprays," Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol.184, 147, 1970.
- 6) J. C. Dent, "Turbulent Mixing Rate-Its Effect on Smoke and Hydrocarbon Emission from Diesel Engines," SAE 800092, 1980.
- 7) J. Y. Koo and J. K. Martin, "Droplet Size and Velocities in a Transient Diesel Fuel Spray," SAE 900397, 1990.
- 8) C. Arcoumanis, E. Cossali, G. Paal and J. H. Whitelaw, "Transient Characteristics of Multi-Hole Diesel Sprays," SAE 900480, 1990.