

工學碩士 學位論文

디젤기관용 분사밸브 형상에 따른 분사특성

Injection Characteristics with Valve Geometries for  
a Diesel Engine

指導教授 朴 權 夏

2004年 2月

韓國海洋大學校 大學院

機 械 工 學 科

金 星 潤

# ABSTRACT

Injection Characteristics with Valve Geometries for a Diesel Engine

Sung-Yoon Kim

Department of Mechanical Engineering, Graduate School

Korea Maritime National University

Busan, Korea

(Supervised by Professor Kweonha Park)

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, tested and simulated. In the test, the injection pressure, duration and spray shapes are obtained with pressure transducer, needle lift sensor and high speed camera. The result shows that the nozzle hole size has influence on the rail pressure and injection duration sensuously. In the simulation using average 55,000 grids, static and dynamic

pressure on outlet surface and velocity vector are obtained. Decrease of the static pressure at the place O(between needles) and increase of the dynamic pressure on the outlet surface are occurred owing to the rise of the nozzle hole diameter, high increase rate of the dynamic pressure with changing nozzle diameter exposed at needle lift 0.4mm. In the consequence, the data of the experimental test and simulation were identical and the highest dynamic pressure of the outlet was occurred at needle lift 0.4mm and nozzle hole diameter 0.328mm.

## 그림목차

Fig. 2.1 Experimental setup.....	1
Fig. 2.2 Fuel chamber geometries.....	2
Fig. 2.3 Spray development with the TB type and DV type.....	3
Fig. 2.4 Pressure, needle lift, maximum pressure and injection duration with the TB type and DV type.....	4
Fig. 2.5 Spray development with changing needle lift.....	5
Fig. 2.6 Pressure, needle lift, maximum pressure and injection duration with changing needle lift.....	6
Fig. 2.7 Spray development with changing nozzle diameter.....	7
Fig. 2.8 Pressure, needle lift, maximum pressure and injection duration with changing nozzle diameter.....	8
Fig. 3.9 Computational mesh of DV type and TB type.....	9
Fig. 3.10 Diagram of inlet and outlet.....	10
Fig. 3.11 Inlet static pressure variation used for computation.....	11
Fig. 3.12 Outlet dynamic pressure variation with TB type and DV type.....	12
Fig. 3.13 Static pressure of TB type and DV type.....	13
Fig. 3.14 Velocity of TB type and DV type.....	14
Fig. 3.15 Outlet dynamic pressure variation with changing needle lift.....	15
Fig. 3.16 Static pressure with changing needle lift.....	17
Fig. 3.17 Velocity with changing needle lift.....	19
Fig. 3.18 Outlet dynamic pressure variation with changing needle lift.....	21
Fig. 3.19 Static pressure with changing needle lift.....	23
Fig. 3.20 Velocity with changing needle lift.....	25

Fig. 3.21 Outlet dynamic pressure variation with changing needle lift.....	27
Fig. 3.22 Static pressure with changing needle lift.....	29
Fig. 3.23 Velocity with changing needle lift.....	31
Fig. 3.24 Outlet dynamic pressure variation with changing nozzle hole diameter .....	33
Fig. 3.25 Static pressure with changing nozzle hole diameter.....	35
Fig. 3.26 Velocity with changing nozzle hole diameter.....	37
Fig. 3.27 Outlet dynamic pressure variation with changing nozzle hole diameter .....	39
Fig. 3.28 Static pressure with changing nozzle hole diameter.....	41
Fig. 3.29 Velocity with changing nozzle hole diameter.....	43
Fig. 3.30 Outlet dynamic pressure variation with changing nozzle hole diameter .....	45
Fig. 3.31 Static pressure with changing nozzle hole diameter.....	47
Fig. 3.32 Velocity with changing nozzle hole diameter.....	49

# 目 次

## ABSTRACT

### 그림 목차

#### I. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적.....	1
1.2 연구의 내용.....	4

#### II. 실험에 의한 분사특성

2.1 실험장치 및 실험조건.....	5
2.1.1 실험장치.....	5
2.1.2 실험조건.....	6
2.2 실험결과 및 고찰.....	8
2.2.1 연료실 형상 변화.....	8
2.2.2 니들 양정 변화.....	11
2.2.3 노즐 직경 변화.....	14

#### III. 계산에 의한 분사특성

3.1 수학적 모델 및 계산조건.....	17
3.2 계산 결과 및 고찰.....	21
3.2.1 연료실 형상변화.....	21
3.2.2 니들 양정변화.....	26
3.2.2.1 노즐 홀 직경이 0.288mm일 때.....	26
3.2.2.2 노즐 홀 직경이 0.308mm일 때.....	33
3.2.2.3 노즐 홀 직경이 0.328mm일 때.....	40

3.2.3 노즐 홀 직경변화.....	47
3.2.3.1 니들 양정이 0.4mm일 때.....	47
3.2.3.2 니들 양정이 0.5mm일 때.....	54
3.2.3.3 니들 양정이 0.6mm일 때.....	61
3.3 결과 요약.....	68
<b>IV. 결 론</b> .....	69
<b>참고문헌</b> .....	70
<b>부 록</b>	

# I. 서론

## 1.1 연구의 배경 및 목적

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

조<sup>1)</sup>는 스토틀링 핀틀형 분사노즐의 핀틀 팁의 형상과 밸브가 열리는 압력을 변화시켜 분사계의 특성을 조사하였으며, 분사노즐의 열리는 압력이 높으면 분사량이 작아지며 관로 잔류압력과 맥동이 커져 2차 분사 유발 등의 분사특성이 악화되며, 분사펌프의 속도가 증가할수록 분사관내의 압력은 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<sup>2)~5)</sup>, 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<sup>6)</sup>, 실제 디젤엔진에서의 인젝터 노즐 분공내부에서 일어나는 캐비테이션 현상을 관찰하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>7)</sup> Castleman<sup>8)</sup>은 액체분류의 분산(dispersion)이 주위 기체와의 마찰에 의해서 발생한다고 설명하고, 그에 반해서



Schweitzer<sup>9)</sup>는 노즐 내부에서 발생하는 난류운동에 의해서 액체분류의 분산이 일어난다고 설명하고 있으며, 김<sup>10)</sup>은 마찰과 난류운동의 영향 그리고 분사액체 및 주위 기체의 조건(밀도, 점도, 표면장력 등), 노즐 오리피스의 형상비(L/d)등의 영향을 받는다고 설명하고 있다. 구<sup>11)</sup> 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.<sup>12)~13)</sup> 또한, 오리피스의 형상비(L/d)가 작을 때는 입구조건이 노즐출구에 영향을 크게 미치나 클 때는 경계층 및 내부유동의 발달에 따라 입구조건이 영향을 적어진다고 설명하고 있다<sup>11)</sup>. 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.<sup>11)</sup> 하<sup>14)</sup> 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.<sup>15)~17)</sup>

디젤엔진의 노즐 출구에서의 분무의 거동은 혼합기 형성, 연소 및 배출물 형성에 중요한 영향을 미친다. 이에 연료 분무의 미립화를 통한 분무의 증발 및 혼합 특성 개선에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 노즐 내부의 유동은 3차원의 특성을 갖고 있으며 실험방법으로는 가시화가 용이하지 않다. 이에 수치해석을 이용하여 노즐 내부뿐만 아니라 실험으로 측정이 곤란한 영역의 유동특성을 파악할 수 있으므로 국내외에서 선행연구가 진행되고 있다.<sup>18)~19)</sup> 현재까지 많은 연구들에 의하여 인젝터 노즐 분공 내에서 발생하는 캐비테이션이 분무의 미립화 특성에 큰 영향을 미치는 인자인 것으로 밝혀졌으나, 캐비테이션이 분무 미립화에 미치는 영향에 대

하여는 여전히 명확하게 규명되지 못하고 있는 실정이다.<sup>20)</sup> 이러한 노력의 일환으로 실제 디젤 엔진에서의 인젝터 노즐 분공 내부에서 일어나는 캐비테이션 현상을 관찰하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>21)</sup> 하지만 가시화를 통해 직접적으로 관찰하기에는 그 관찰할 영역의 크기가 너무 작고, 큰 분사압력과 빠른 유체의 속도로 인하여 가시화 연구에 많은 어려움이 따른다. 이러한 이유로 최근에 캐비테이션이 발생하는 디젤 인젝터 내부의 형상 및 운전 조건에 따른 영향을 분석하기 위해 3차원 해석의 중요성은 증대되고 있다.

## 1.2 연구의 내용

본 논문에서는 노즐 내부의 연료실 형상 변화(TB 타입, DV 타입), 니들 양정 변화(0.4mm, 0.5mm, 0.6mm) 그리고 노즐 홀 직경(0.288mm, 0.308mm, 0.328)의 변화에 대해 노즐 입구쪽에서의 압력과 노즐 상부에서의 니들 양정 그리고 분무형상을 실험적으로 연구하였다. 연료실형상, 니들 양정 변화 그리고 노즐 홀 직경의 변화가 분사압력과 분사기간 그리고 분무에 대해 어떠한 영향을 미치는지에 대해 실험분석하였으며, 실험에서 얻은 분사 밸브 입구에서의 정압을 평균 분사기간 30ms 동안 샘플링하여 수치계산에 적용할 수 있도록 하였다. 이 샘플링한 30ms 동안의 정압 변화를 각각의 경우에 적용하도록 UDF 파일로 작성하였으며, 입구조건은 비정상상태의 압력 조건으로 계산하였다. 노즐 8개 출구에서의 동압 변화, 분사 시간 15ms에서의 노즐 단면에 대한 정압 분포 그리고 동일한 단면에 대한 속도 분포를 얻었다. 그리고 연료실 형상, 니들 양정 변화 그리고 노즐 홀 직경의 변화가 노즐 내부 유동과 노즐 출구에서의 동압 그리고 노즐 내부의 정압 변화에 미치는 영향을 3차원 수치해석을 이용하여 분석하였다. 최종적으로 실험에서 얻은 분사밸브 입구에서의 정압변화와 분무형상을 수치계산에서 얻은 노즐 출구에서의 동압 변화와 노즐 단면에 대한 정압 분포 그리고 속도 분포와 비교 분석하였다.

## II. 실험에 의한 분사특성

### 2.1 실험장치 및 실험조건

#### 2.1.1 실험장치

선박 발전용 디젤기관의 분사밸브에 대한 분사특성을 실험하기 위하여 Fig. 2.1과 같은 분사 실험장치를 구성하였다. 연료공급계통은 인버터로 회전속도를 제어할 수 있는 15kW DC 모터로 캠을 구동하여 분사펌프를 작동시키고 고압화된 디젤연료가 분사밸브로 공급되도록 구성되었다. 데이터 취득계통은 압력센서와 깎 센서에서 발생하는 전압신호를 데이터처리장치를 통하여 HP VEE프로그램으로 처리하도록 구성되어 있다. 압력 취득을 위하여 최대압력 100MPa까지 측정할 수 있는 센서를 분사밸브 연료공급 직전에 설치하였으며 니들양정 측정을 위하여 니들의 상부에 연결봉을 설치하여 분사밸브의 상단까지 니들의 거동을 연장하고 이 곳에 ONO SOKKI VS-041 모델의 깎센서를 설치하여 니들의 움직임을 받을 수 있도록 하였다. 분무 형상을 촬영하기 위하여 광원을 정면에 설치하고 SPACECOM사의 1mm CCTV LENS를 장착한 고속도카메라를 측면에 설치하였으며, 고속도 카메라에서 입력된 영상 데이터를 취득하기 위하여 고속도 카메라와 랩탑(laptop)을 ROPER SCIENTIFIC FAST CAM-Super 10KC 모델의 카메라 컨트롤러로 연결하여 실험하였다.

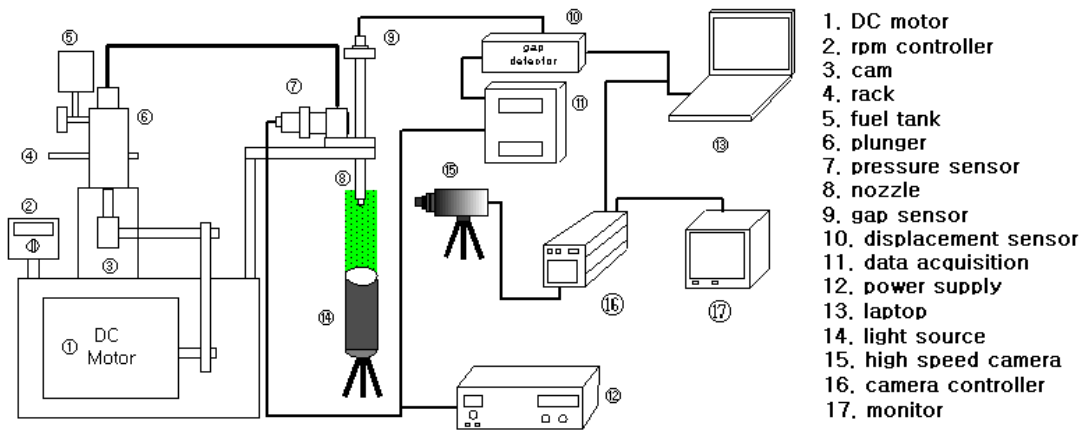


Fig. 2.1 Experimental setup

### 2.1.2 실험조건

Table 1은 실험조건을 보여준다. Case 1에서는 연료실 형상과 오리피스의 형상비 (L/d)를 모두 5.19로 동일하게 주었고, 니들 양정을 0.1mm씩 변화하였다. Case 2에서는 니들 양정과 연료실 형상을 모두 동일하게 주었으며, 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.

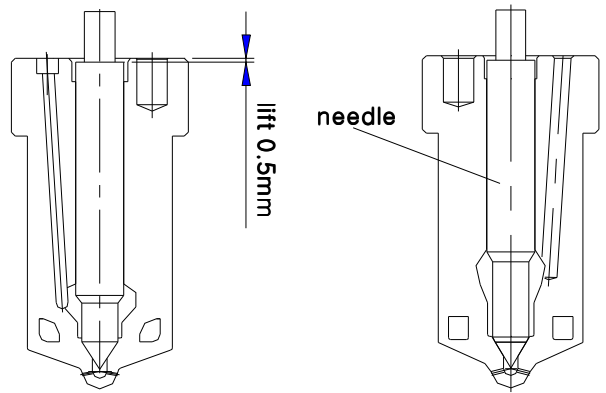
Table 1 Test conditions

	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

## 2.2 실험결과 및 고찰

### 2.2.1 연료실 형상 변화

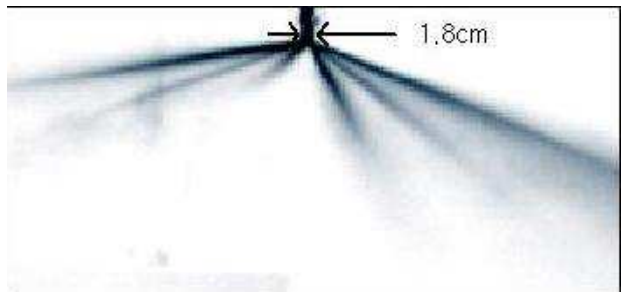
Fig. 2.2는 TB 타입과 DV 타입의 형상을 보여주고 있다. DV 타입노즐은 하나의 홀로 연료를 공급하며, TB 타입노즐은 2개의 홀로 연료를 공급한다. DV 타입은 연료실이 분사홀에서 멀리 떨어져 있고 TB 타입은 가깝게 위치하고 있으며, 연료실 체적과 연료공급홀의 면적은 동일하다. Fig. 2.3은 연료실 형상의 변화에 따른 성장분무이다. 분위기 압력이 대기압 상태이기 때문에 분사된 액적들이 주위공기의 저항없이 밖으로 빠르게 진행하면서 분산된다. 관통에 있어서는 TB 타입이 DV 타입보다 뛰어나지만 분사압력이 높은 DV 타입이 TB 타입보다 더 넓게 분산됨을 보여주며 연소 활성화에 유리할 것으로 생각된다. Fig. 2.4는 연료실 형상 변화에 따른 분사압력과 니들 양정의 변화 그리고 최고압력과 분사시간을 보여준다. 분사압력을 보면 연료공급홀이 하나이고 연료실이 분공에서 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.



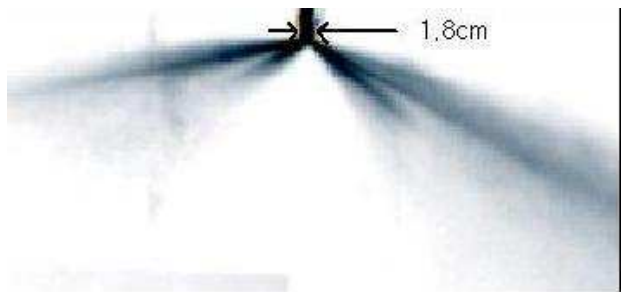
(a) TB type

(b) DV type

Fig. 2.2 Fuel chamber geometries



TB type



DV type

Fig. 2.3 Spray development with TB type and DV type



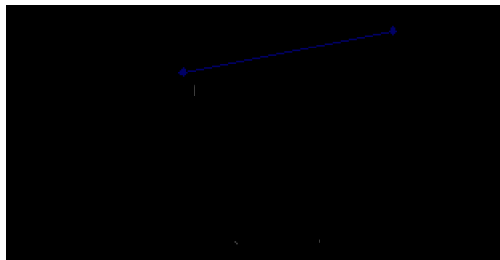
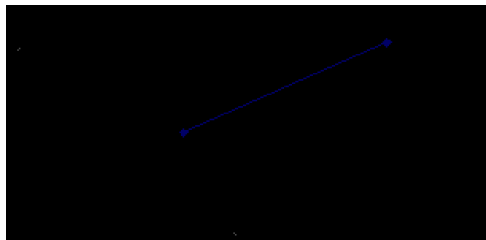
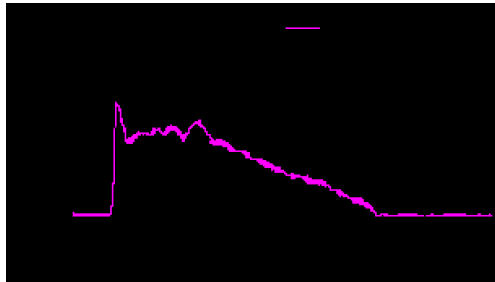
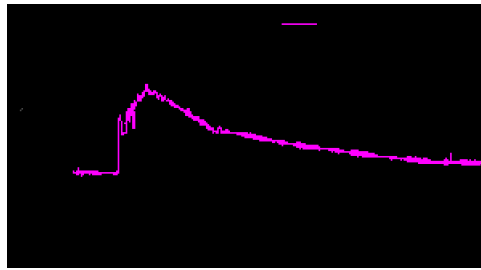
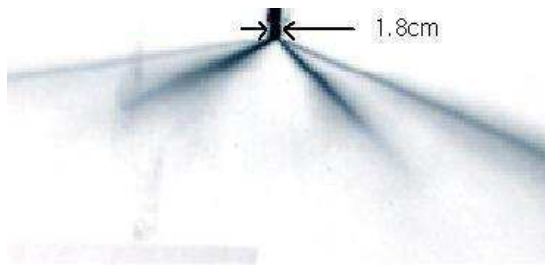


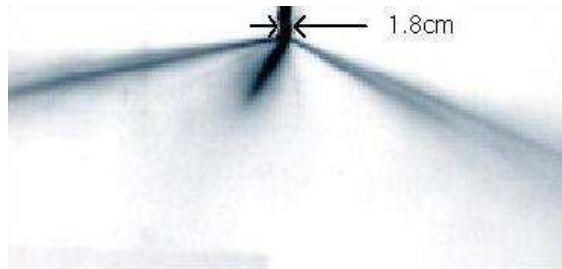
Fig. 2.4 Pressure, needle lift, maximum pressure and injection duration with TB type and DV type

### 2.2.2 니들 양정 변화

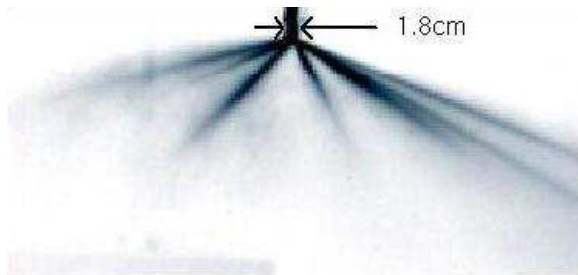
Fig. 2.5는 분사밸브의 니들 양정이 0.4mm, 0.5mm, 0.6mm일 때 분무가 완전히 성장한 모습을 보여준다. 앞에서 언급한 것처럼 대기압의 분위기에서 빠른 진행을 나타낸다. 양정이 0.4mm에서 0.6mm로 증가하면서 더 넓게 분산되는데 이는 분사압력 증가에 따른 결과로 보여진다. 양정이 0.5mm일 때 0.4mm와 0.6mm일 때 보다 관통에 있어서는 가장 좋은 결과를 보인다. Fig. 2.6은 니들 양정 변화에 따른 분사압력과 니들 양정 변화 그리고 최고압력과 분사시간 그래프를 보여주고 있다. 노즐의 분사시간은 니들 양정 0.4mm에서 가장 길게 나타나며, 양정이 커질수록 분사시간은 점차 짧아지며, 분사시간의 차이는 줄어드는 것을 볼 수 있다. 분사 최고압력 그래프를 보면 니들 양정 0.4mm에서 가장 낮으며, 니들 양정이 커질수록 최고압력값이 증가하며, 그 증가량은 점점 감소함을 알 수 있다. 동일한 연료를 분사하여야 하기 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 계측하였기 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.



needle lift : 0.4mm



needle lift : 0.5mm



needle lift : 0.6mm

Fig. 2.5 Spray development with changing needle lift

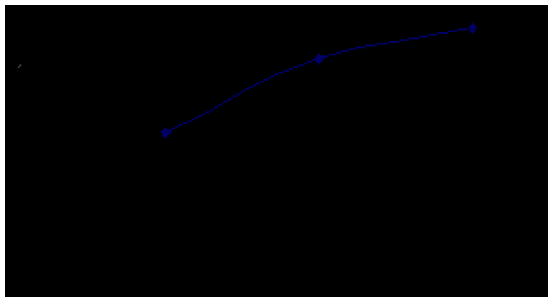
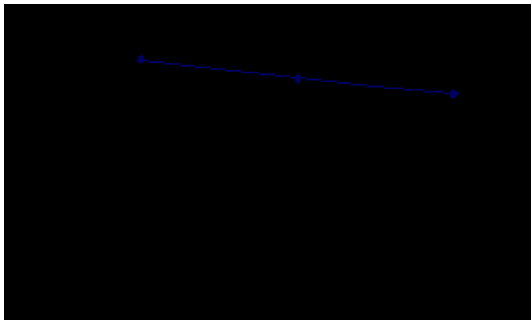
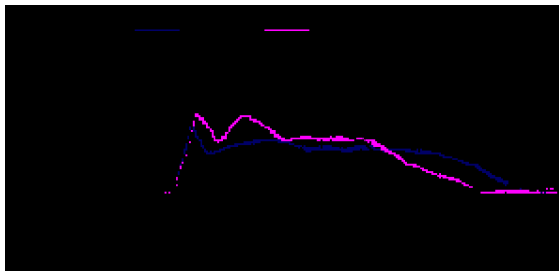
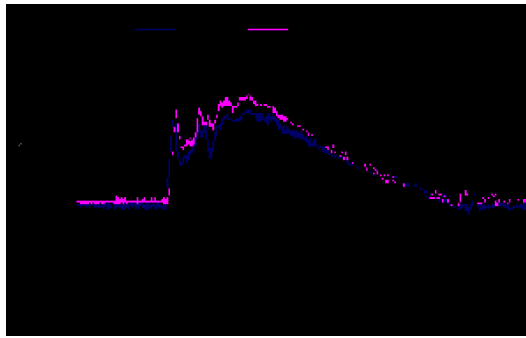
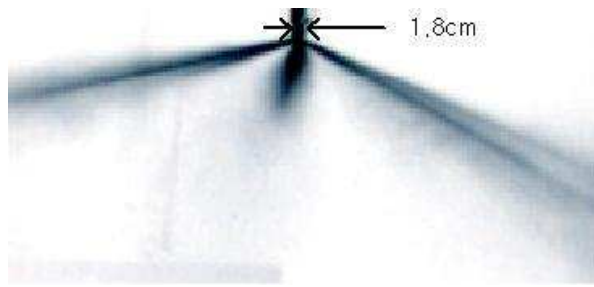


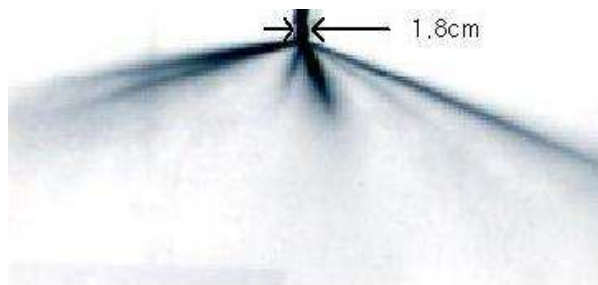
Fig. 2.6 Pressure, needle lift, maximum pressure and injection duration with changing needle lift

### 2.2.3 노즐 직경 변화

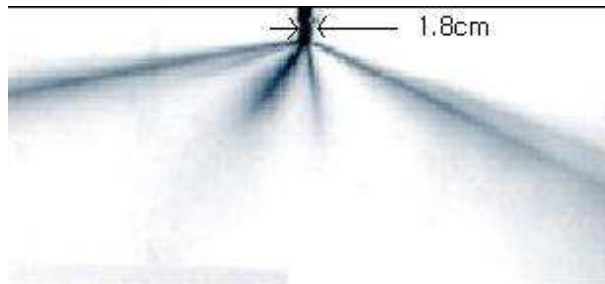
Fig. 2.7은 노즐 홀 직경 변화에 따른 성장분무형상을 보여준다. 노즐 홀 직경이 0.288mm일 때는 분산과 관통이 0.328mm일 때보다 상당히 증가하는 경향을 보이나, 0.308mm보다는 아주 미세하게 증가하는 것을 볼 수 있으며, 0.308mm일 때 관통은 0.288mm과 0.328mm보다 증가하지만 분산에서는 0.328mm일 때보다는 증가하고 0.288mm일 때보다는 감소하는 경향을 보이며, 0.328mm일 때는 관통과 분산 모두 0.288mm과 0.308mm보다 감소하는 경향을 보인다. 이는 0.328mm일 때 분사압력이 급격히 감소한 결과이다. Fig. 2.8은 노즐의 직경 변화에 따른 분사압력과 니들 양정 그리고 분사기간과 최고압력 그래프를 보여주고 있다. 분사압력을 보면 직경이 작을수록 최고압력이 높고 직경이 커질수록 점점 감소하는 것을 볼 수 있다. 분사기간은 노즐 직경이 커질수록 당연히 짧아지는 것을 볼 수 있다. 노즐 직경 변화와 니들 양정 변화를 비교해보면 양정과 노즐직경이 커질수록 연료가 흐르는 관로가 넓어진다는 공통점을 볼 때 분사기간에서는 동일 한 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. 2.7 Spray development with changing nozzle diameter

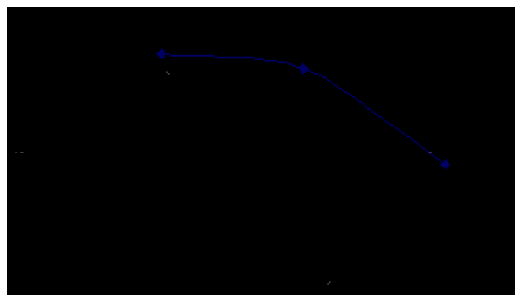
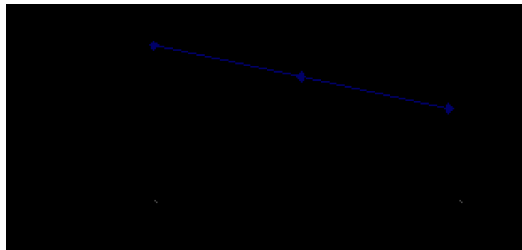
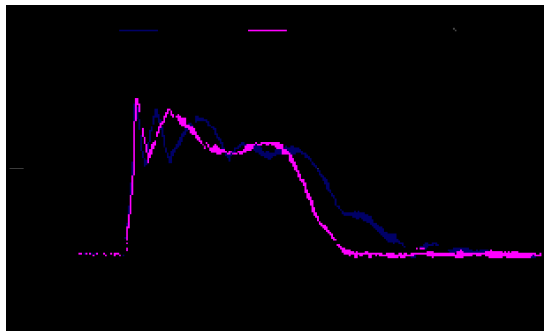
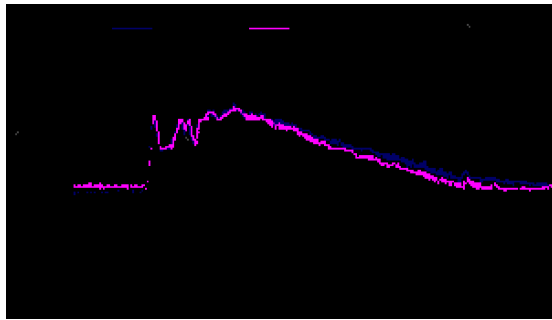


Fig. 2.8 Pressure, needle lift, maximum pressure and injection duration with changing nozzle diameter

### III. 계산에 의한 분사특성

#### 3.1 수학적 모델 및 계산조건

분사노즐 내부의 유동해석을 하기 위하여 상용 CFD코드인 FLUENT를 사용하였다. 수치계산시 격자 개수는 평균 55,000개이고, 비정상상태로 계산을 수행하였으며, Fig. 3.9에서 노즐형상에 따른 TB 타입과 DV 타입의 격자 형상을 나타내었으며, 형상이 복잡한 부분과 중요한 부분에 대해서는 격자를 조밀하게 구성하여 정확성을 높였다. 계산시간은 1ms 단위로 하여 실험결과에서 얻은 평균 분사기간인 30ms로 구성하였다. Fig. 3.11은 실험에서 얻은 분사시간에 따른 분사압력(정압) 값을 수치 계산에 적용할 수 있도록 만든 시간 변화에 따른 입구압력 변화이다. 이 시간 변화에 따른 압력값들을 FLUENT에 적용하기 위하여 UDF 파일로 변환하여 입구 경계 조건에 적용하였다. 계산에 사용된 질량 보존 방정식과 운동량 보존 방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (3-1)$$

$S_m$  : mass added to the continuous phase from the dispersed second phase

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3-2)$$

$$\bar{\tau} = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3-3)$$

$p$  : static pressure ,  $\bar{\tau}$  : stress tensor

$\rho \vec{g}$  : gravitational body force

$\vec{F}$  : external body forces ,  $\mu$  : molecular viscosity

$I$  : unit tensor(effect of volume dilation)



계산조건은 입구와 출구를 모두 압력으로 주었으며, 점성모델은 Spalart-Allmaras(1 eqn) 모델을 사용하였으며, 이산화방법에서 압력항은 standard scheme과 pressure-velocity coupling은 SIMPLE scheme 그리고 모멘텀항은 First order upwind scheme으로 수행하였다. Table 2는 수치계산에 사용된 계산조건들을 보여주며, 실험에서 사용하였던 조건보다 좀 더 많은 케이스들을 추가하여 계산을 하였다.

Fig. 3.10에서 노즐의 상부에서 본 입구 1, 2와 출구 8개에 대해 케이스마다 동일한 번호를 지정하였으며, 계산 후 케이스마다 1~8까지 출구에서의 압력값의 차이를 비교하였다. Fig. 3.10에서 보이는 좌표축에서 Z축으로 잘려진 단면을 동압과 속도를 나타내는데 사용하였다.

계산에 사용된 Spalart-Allmaras(1 eqn) 모델 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \tilde{\nu} u_i) = G_\nu + \frac{1}{\sigma \tilde{\nu}} \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu + \rho \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2\rho} \left( \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_\nu + S_\nu \quad (3-4)$$

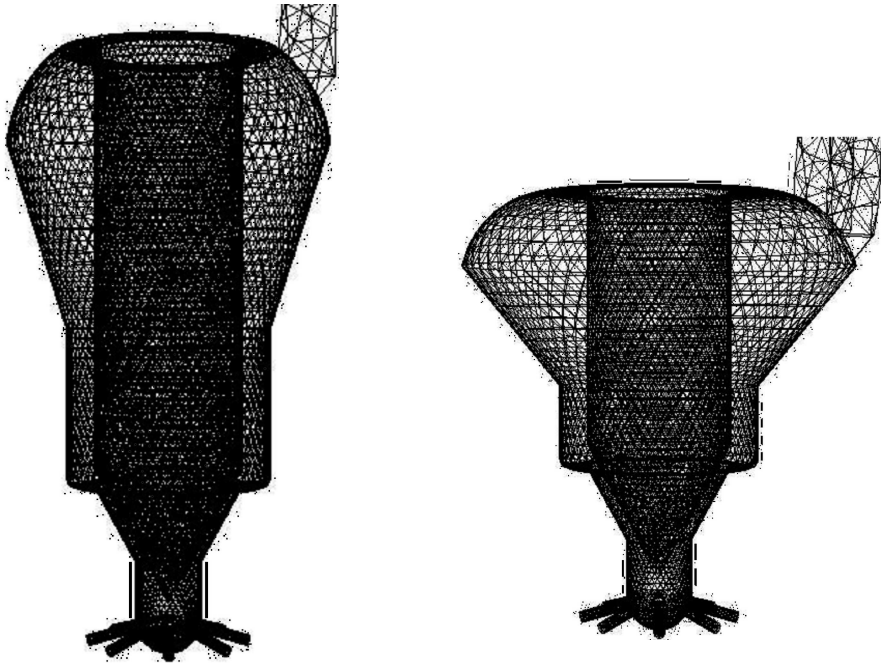
$G_\nu$  : production of turbulent viscosity

$Y_\nu$  : destruction of turbulent viscosity

$\sigma_\nu$  ,  $C_{b2}$  : constants

$\nu$  : molecular kinematic viscosity

$S_\nu$  : user-defined source term



(a) DV type

(b) TB type

Fig. 3.9 Computational mesh of DV type and TB type

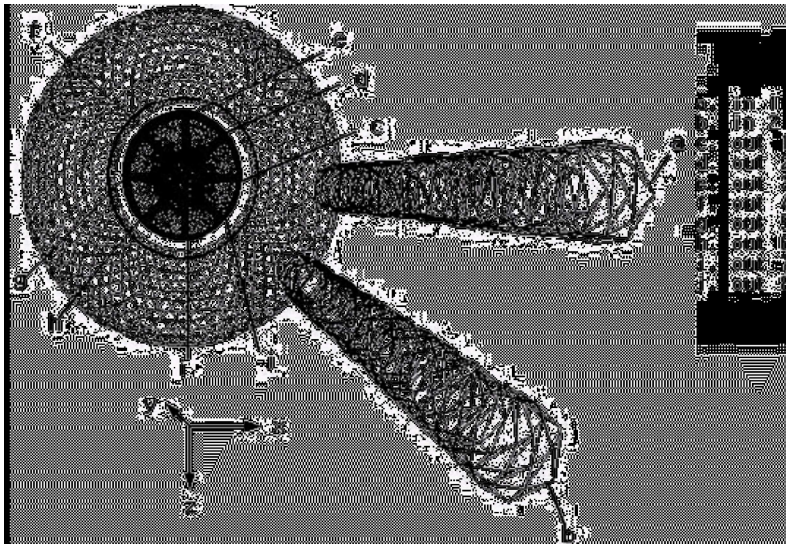


Fig. 3.10 Diagram of inlet and outlet

Table 2 Calculation conditions

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

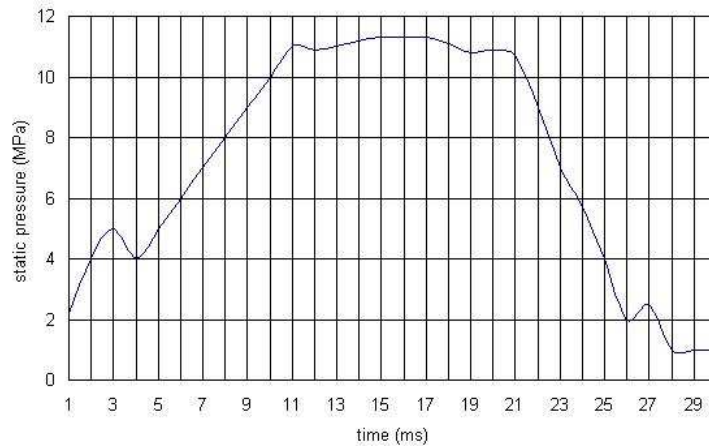


Fig. 3.11 Inlet static pressure variation used for computation

## 3.2 계산 결과 및 고찰

### 3.2.1 연료실 형상변화

Fig. 3.12는 니들양정과 홀 직경이 동일하며 연료실이 분사홀과 가깝게 위치한 TB타입과 연료실이 멀리 위치한 DV 타입의 분사기간동안 출구에서의 동압을 보여 준다. 동압은 속도에너지를 압력에너지로 변환한 것이며, 정압과의 합이 전압을 나타내며, 그에 관한 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$Pd = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (\text{kg/ms}^2) \quad (3-5)$$

$$Pt = Ps + Pd \quad (3-6)$$

V : 속도 (m/s)

$\rho$  : 밀도(kg/m<sup>3</sup>)

Pt : 전압(total pressure)

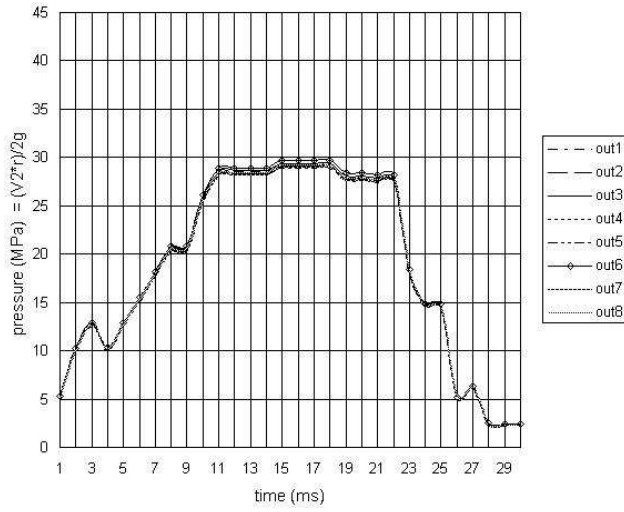
Ps : 정압(static pressure)

Pd : 동압(dynamic pressure)

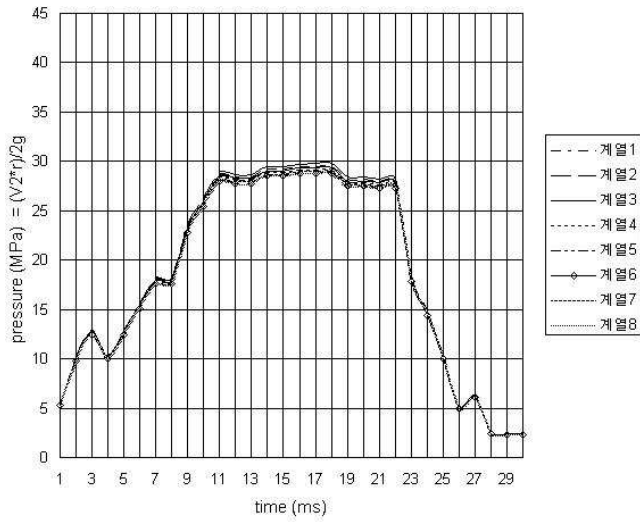
Fig. 3.12에서 TB 타입은 분사직후(1ms) 5MPa의 동압을 보이며 이후 3ms에서 12.5MPa까지 증가하고 약간 압력이 낮아진 후 다시 증가하는데 최고압력은 30MPa를 유지한다. 8개의 홀 출구에서 동일한 변화 경향을 보이며 그 값은 유사하다. DV 타입에서 초기압력은 5MPa이고 3ms에서 12.5MPa까지 TB타입과 비슷하게 증가하나 4ms에서 TB 타입보다 좀 더 낮은 압력을 나타낸 후 증가하였다. 전체적인 경향은 비슷하며, 최고압력 즉, 최대 유동속도가 TB 타입보다 낮다. 이는 실험결과에서 얻은 정압이 DV 타입이 TB 타입보다 높게 나왔다는 사실과 일치함을 보여준다. 즉 실험의 경우에는 동일한 회전수로 캠을 구동하고 니들을 누르는 스프링의 힘을 동일하게 조절한 상태에서 실험하였기 때문에 분공(nozzle hole)에서의 동압이 낮으면, 즉 유동이 느리면 노즐입구에서의 압력이 높게 되고, 동압이 높으면 노즐입구

압력이 낮게 된다.

Fig. 3.13은 TB 타입과 DV 타입의 정압을 나타내며, 노즐 홀 내부에서의 정압은 TB 타입보다 DV 타입이 조금 높은 것으로 나타났으며, 이는 동압과 정압과의 관계를 생각해보면 당연한 결과로 보여진다. 니들과 노즐의 틈인 O부분에서의 정압은 TB 타입이 좀 더 낮은 것으로 나타났다. 연료공급홀이 하나이고 연료실이 분공에서 멀리 위치한 TB 타입이 DV 타입보다 노즐 홀 입구부분에서 부압부분이 좀 더 강하게 생기는 걸 볼 수 있으며, 이는 노즐 홀 내에서 캐비테이션 현상이 좀 더 강하게 일어남을 의미한다. 노즐 내부에 발생한 캐비테이션에 의해 기포가 발생하며 그로 인해 연료의 미립화가 촉진됨을 알 수 있다.<sup>22)~23)</sup> Fig. 3.14는 TB 타입과 DV 타입의 속도를 나타내며, 노즐 입구에서 낮은 정압을 나타냈던 TB 타입은 노즐 입구에서 빠른 속도를 보이며 노즐 내부에서도 DV 타입보다 높은 속도를 보이고 있다.

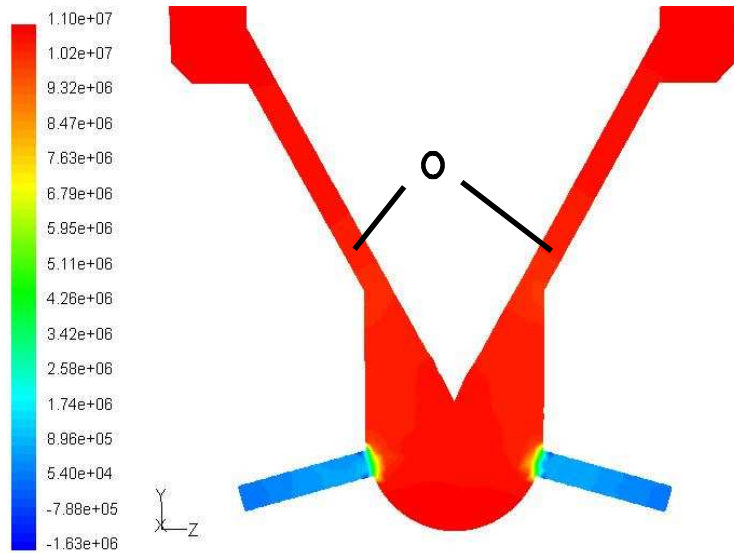


Outlet dynamic pressure variation of TB-0.5mm 0.268mm

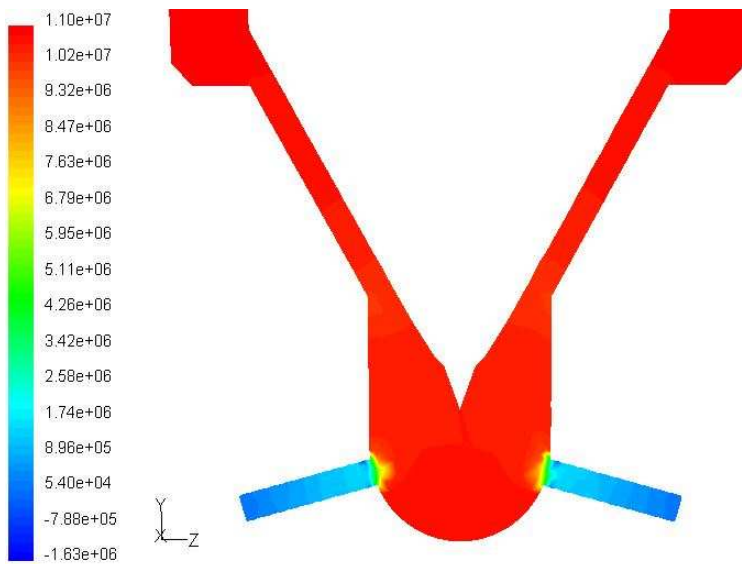


Outlet dynamic pressure variation of DV-0.5mm 0.268mm

Fig. 3.12 Outlet dynamic pressure variation with TB type and DV type

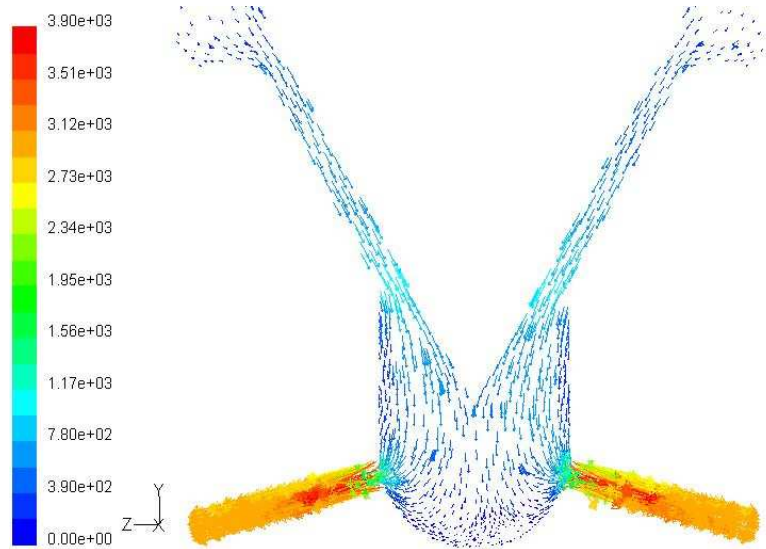


Static pressure of TB-0.5mm 0.268mm(at t=15ms)

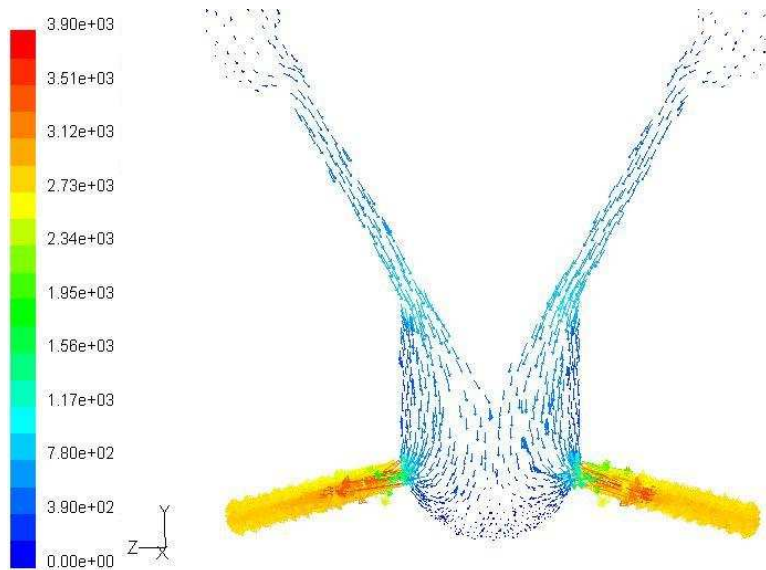


Static pressure of DV-0.5mm 0.268mm(at t=15ms)

Fig. 3.13 Static pressure of TB type and DV type



Velocity of TB-0.5mm 0.268mm(at t=15ms)



Velocity of DV-0.5mm 0.268mm(at t=15ms)

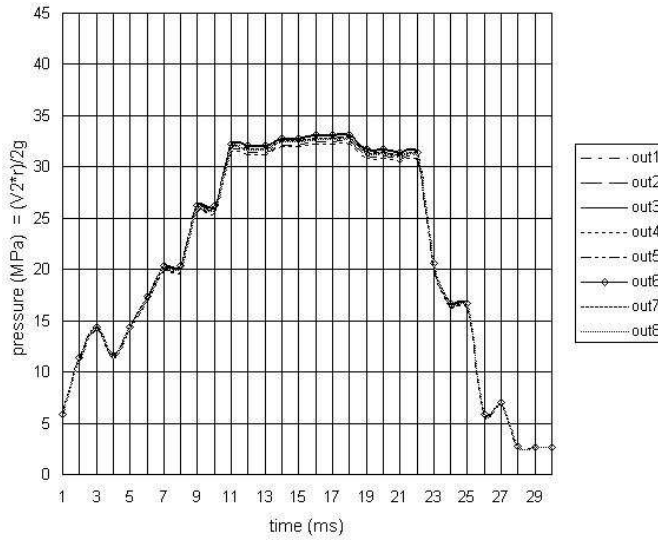
Fig. 3.14 Velocity of TB type and DV type



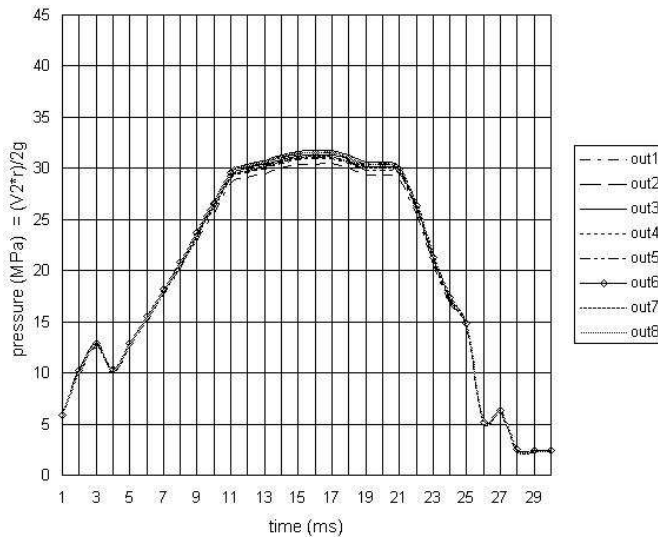
### 3.2.2 니들 양정변화

#### 3.2.2.1 노즐 홀 직경이 0.288mm일 때

Fig. 3.15는 노즐 홀 직경이 0.288mm일 때, 니들 양정변화에 대한 출구에서의 동압을 나타내고 있다. Fig. 3.15에서 니들 양정이 0.4mm일 때, 초기압력 약 6MPa이며, 3ms에서 가장 높은 약 14MPa까지 증가하고 최고압력은 33MPa을 유지한다. 니들 양정이 0.5mm일 때 초기압력이 6MPa정도이며, 3ms에서 12.5MPa까지 증가하고 최고압력은 대략 30.5MPa을 유지한다. 니들 양정이 0.6mm일 때 초기압력은 6MPa로 3가지 경우 거의 동일한 압력을 보이며, 3ms에서 가장 낮은 12MPa까지 증가하고 최고압력은 30MPa을 유지하며 가장 낮은 값으로 나타났다. 단위 시간당 질량 분사율( $\dot{m} = \rho AV$ )이며, 속도에너지를 압력에너지로 변환한 것이 동압이다. 따라서 Fig. 3.15에서 니들 양정이 작을수록 분사율이 높다고 할 수 있다. 노즐 홀 직경이 0.288mm일 때, 니들 양정변화에 대한 정압을 Fig. 3.16에 나타내고 있다. 니들과 노즐의 틈인 O부분에서의 정압은 니들 양정이 작을수록 낮은 것으로 나타났다. 노즐 내부의 압력은 니들 양정이 0.4mm에서 0.5mm로 증가하면서 높아지나 0.6mm로 증가하면서 압력의 증가는 거의 발생하지 않았다. 노즐 입구에서 부압이 발생한 곳 주위의 압력은 니들 양정이 0.5mm일 때와 0.6mm일 때가 0.4mm일 때보다 확연히 높으며 이는 니들 양정이 0.4mm인 경우에 비해 캐비테이션의 발생을 촉진시킬 것으로 예상된다. Fig. 3.17은 니들 양정변화에 대한 속도 분포를 보여주고 있으며, 노즐 입구에서 부압이 발생한 곳에서의 속도가 가장 빠르게 나타났다. 노즐내에서의 전체적인 속도는 0.4mm인 경우가 가장 빠르며, 0.5mm와 0.6mm인 경우는 거의 비슷함을 알 수 있으며, 이는 출구에서 동압의 결과와 일치함을 보여준다.

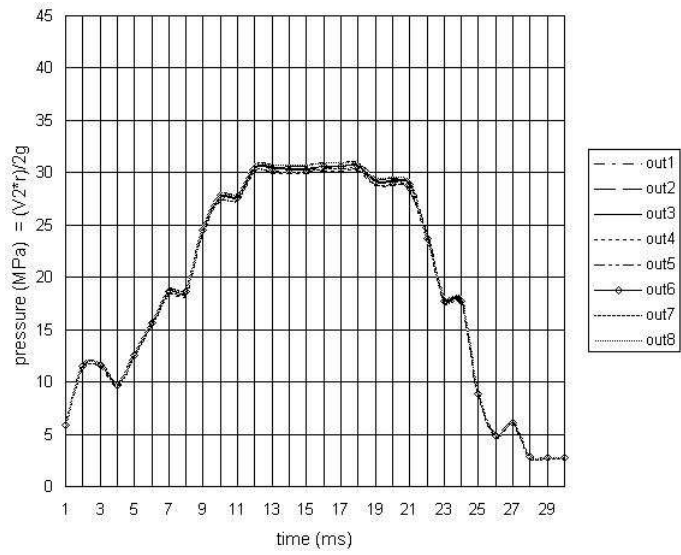


Outlet dynamic pressure variation of TB-0.4mm 0.288mm



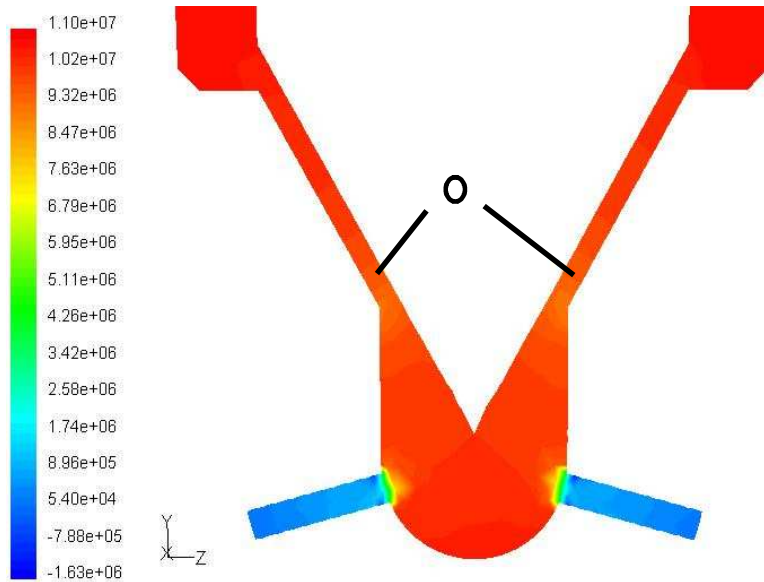
Outlet dynamic pressure variation of TB-0.5mm 0.288mm

Fig. 3.15 Outlet dynamic pressure variation with changing needle lift

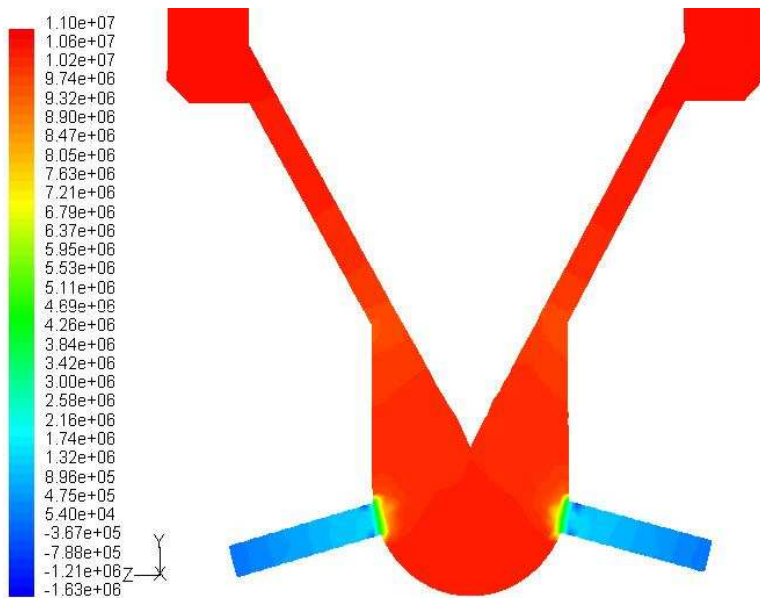


Outlet dynamic pressure variation of TB-0.6mm 0.288mm

Fig. 3.15 To be continued

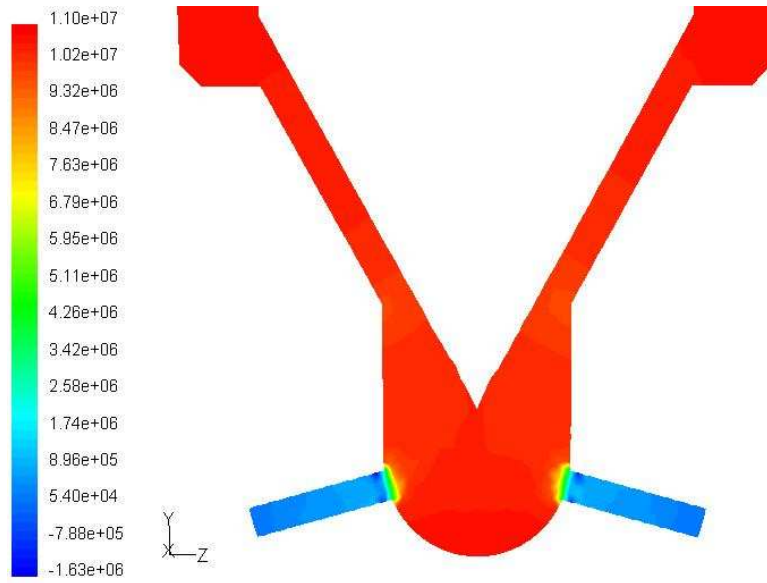


Static pressure of TB-0.4mm 0.288mm(at t=15ms)



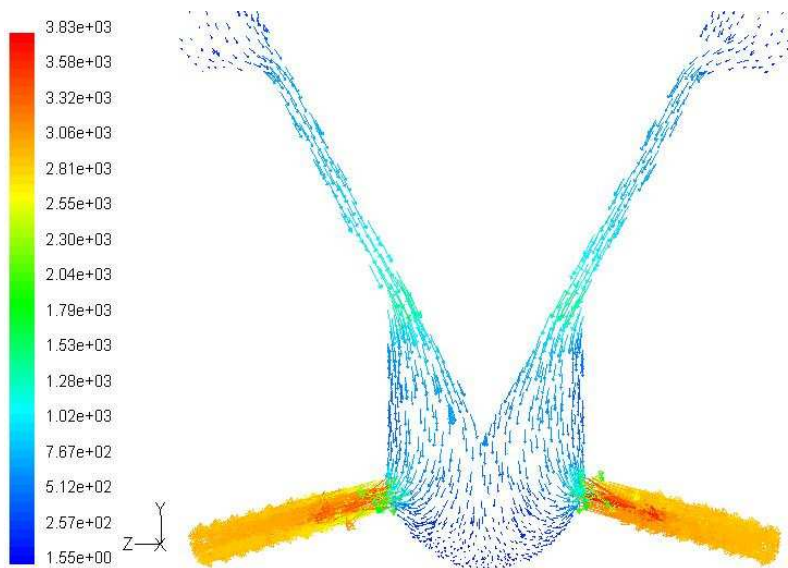
Static pressure of TB-0.5mm 0.288mm(at t=15ms)

Fig. 3.16 Static pressure with changing needle lift

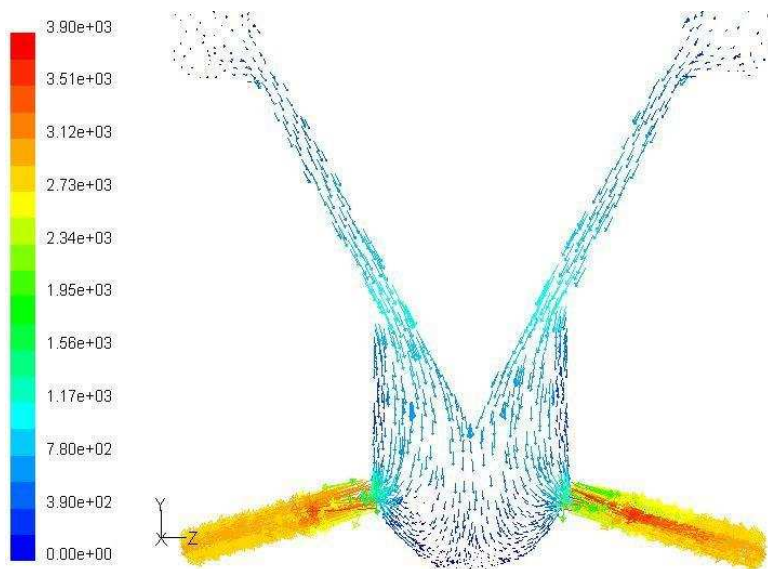


Static pressure of TB-0.6mm 0.288mm(at t=15ms)

Fig. 3.16 To be continued

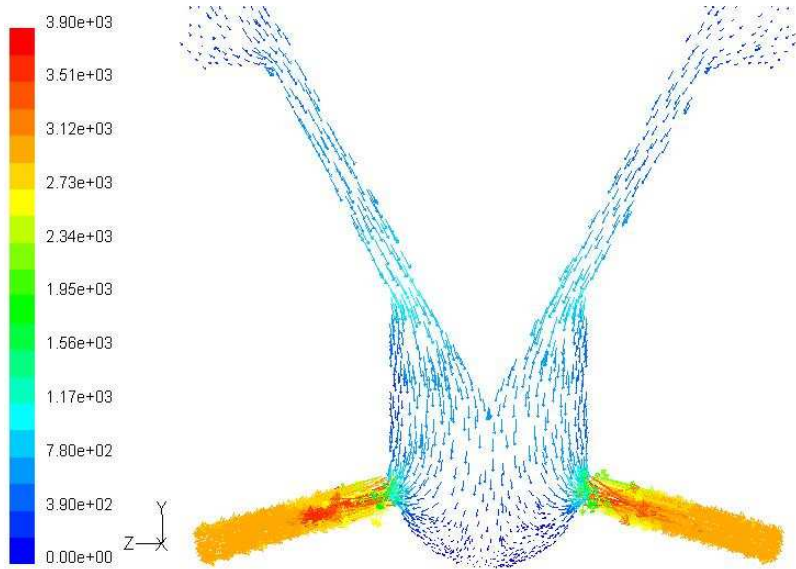


Velocity of TB-0.4mm 0.288mm(at t=15ms)



Velocity of TB-0.5mm 0.288mm(at t=15ms)

Fig. 3.17 Velocity with changing needle lift



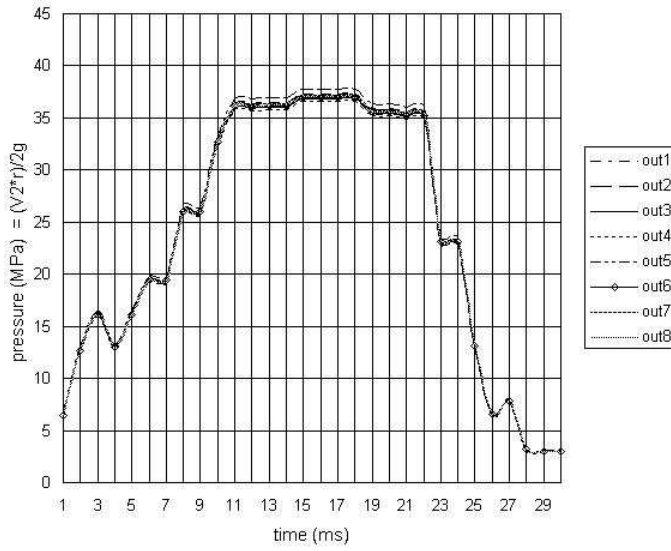
Velocity of TB-0.6mm 0.288mm(at t=15ms)

Fig. 3.17 To be continued

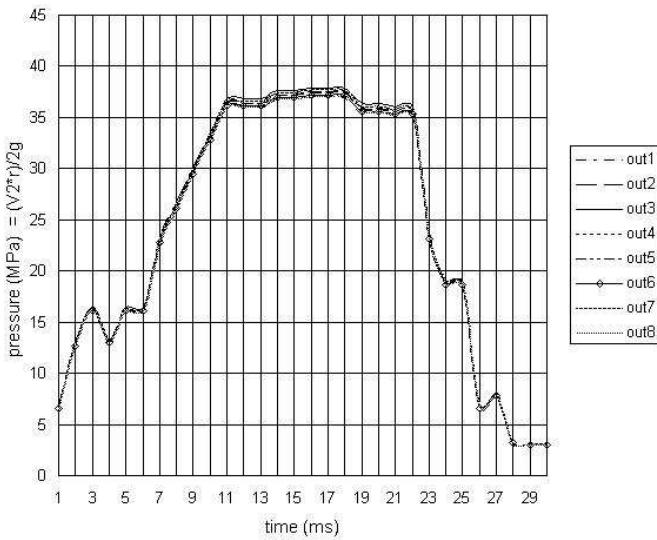
### 3.2.2.2 노즐 홀 직경이 0.308mm일 때

Fig. 3.18은 노즐 홀 직경이 0.308mm일 때 니들 양정변화에 대한 출구에서의 동압 변화를 나타낸다. 니들 양정이 0.4mm일 때 초기압력이 약 6.5MPa로 홀 직경이 0.288mm일 때보다 0.5MPa 정도 증가했으며, 3ms에서 압력도 16.5MPa로 증가했음을 볼 수 있으며, 최고압력은 36.5MPa를 유지한다. 니들 양정이 0.5mm일 때 초기압력이 약 6.5MPa로 홀 직경이 0.288mm일 때보다 0.5MPa 정도 증가했으며 최고압력은 0.4mm와 유사한 36.5MPa를 유지한다. 니들 양정이 0.6mm일 때 초기압력이 약 6MPa로 홀 직경이 0.288mm일 때와 변화가 없으며 3ms에서 14.9MPa로 증가하고 최고압력은 33.5MPa를 유지하며, 다른 두 가지 경우에 비해 약 3MPa의 압력감소를 보인다. 3가지 경우 모두 최고압력이 노즐 홀 직경이 0.288mm인 경우에 비해 약 3~6MPa정도 증가했음을 알 수 있다. Fig. 3.19에 니들 양정변화에 대한 정압(Pa)을 나타내고 있으며, 역시 부압이 발생했음을 보여주고 있다. 니들과 노즐 틈인 O부분에서의 압력은 니들 양정이 작을수록 낮고, O부분에서의 낮은 압력이 0.288mm일 때에 비해 노즐 입구까지 확산되는 현상을 볼 수 있으며, 3가지 경우 모두 노즐 홀 직경이 0.288mm인 경우보다 노즐 내의 압력이 낮아졌음을 알 수 있다. 노즐 내에서의 압력은 양정이 커질수록 증가하나 0.5mm보다 커지면서 그 변화량은 거의 없으며, 3가지 경우 모두 노즐 홀 직경이 0.288mm인 경우에 비해 압력이 조금씩 감소했음을 알 수 있으며 이는 동압의 증가와 일치함을 볼 수 있다. Fig. 3.20은 니들 양정변화에 대한 속도 분포를 보여주고 있다. 니들 양정이 작아질수록 노즐 내부에서의 속도가 증가하는 것을 볼 수 있으며, 이는 양정이 작아질수록 O부분에서의 정압의 감소와 관련된 것으로 사료된다. 노즐 내에서의 속도 분포는 0.4mm와 0.5mm는 유사하고, 0.6mm는 느린 것을 볼 수 있으며, 이는 출구에서의 동압의 증가와 일치한다. 분사율의 감소를 방지하기 위해 노즐 홀이 0.308mm인 경우 양정이 0.5mm보다 증가하는 것을 유의하여야 할 것이다.



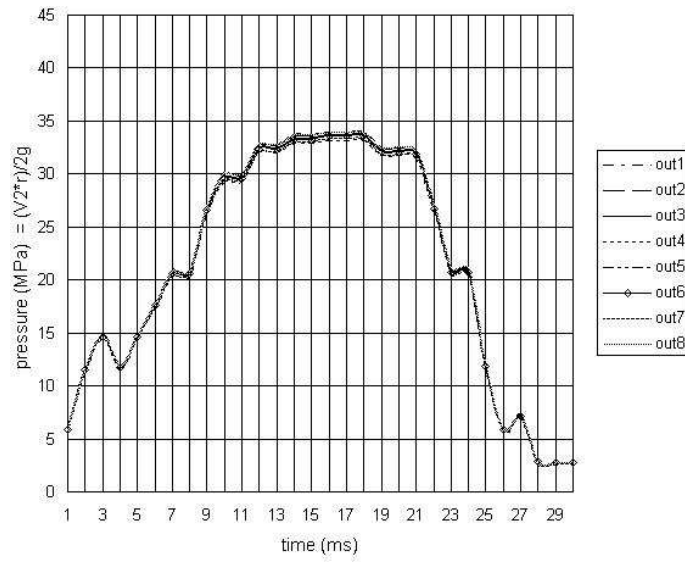


Outlet dynamic pressure variation of TB-0.4mm 0.308mm



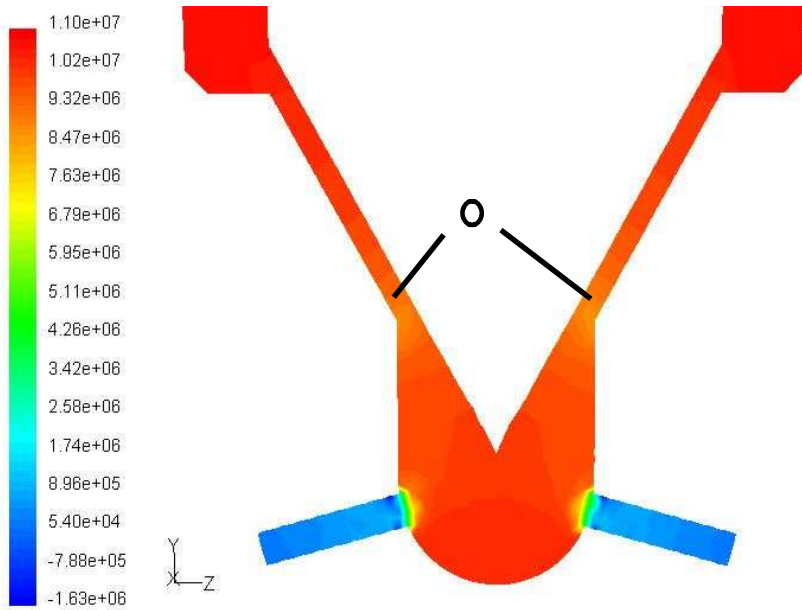
Outlet dynamic pressure variation of TB-0.5mm 0.308mm

Fig. 3.18 Outlet dynamic pressure variation with changing needle lift

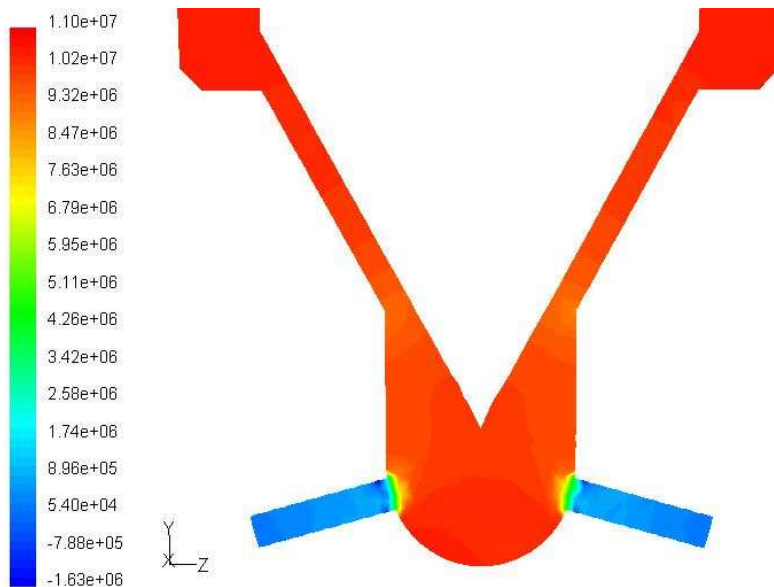


Outlet dynamic pressure variation of TB-0.6mm 0.308mm

Fig. 3.18 To be continued

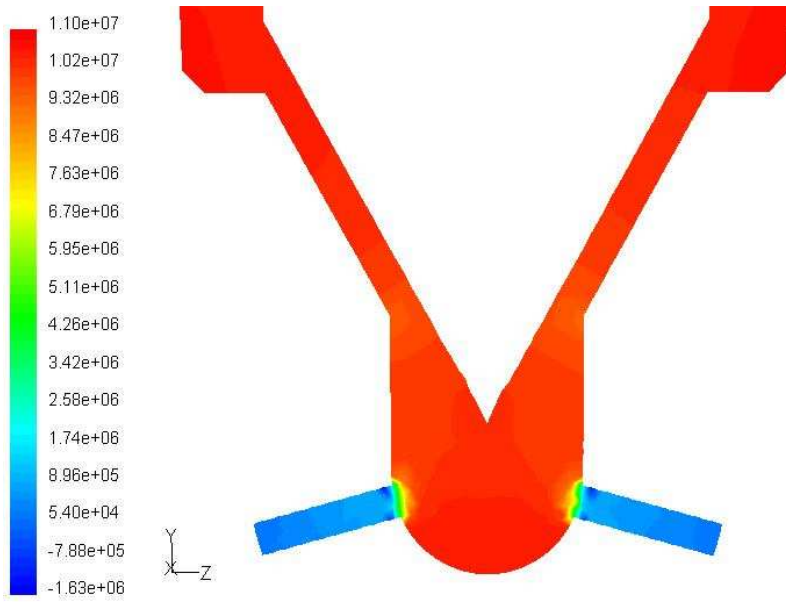


Static pressure of TB-0.4mm 0.308mm(at t=15ms)



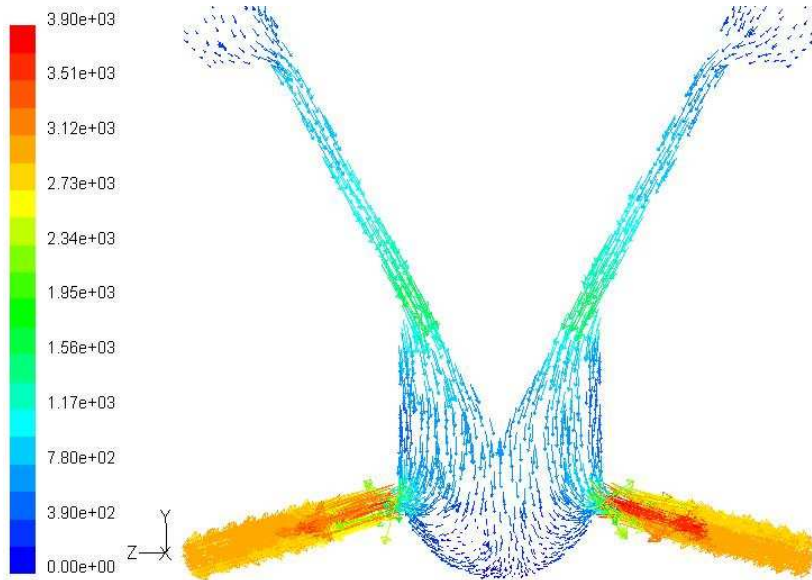
Static pressure of TB-0.5mm 0.308mm(at t=15ms)

Fig. 3.19 Static pressure with changing needle lift

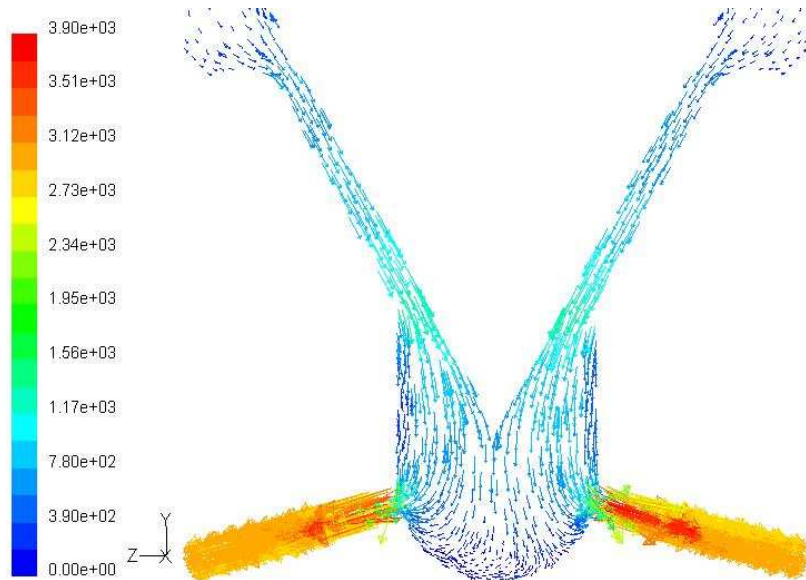


Static pressure of TB-0.6mm 0.308mm(at t=15ms)

Fig. 3.19 To be continued

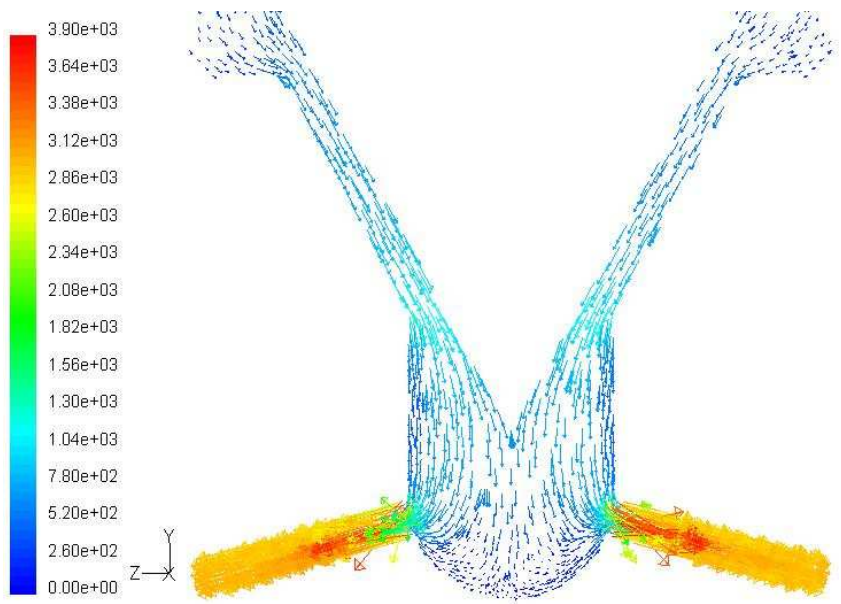


Velocity of TB-0.4mm 0.308mm(at t=15ms)



Velocity of TB-0.5mm 0.308mm(at t=15ms)

Fig. 3.20 Velocity with changing needle lift

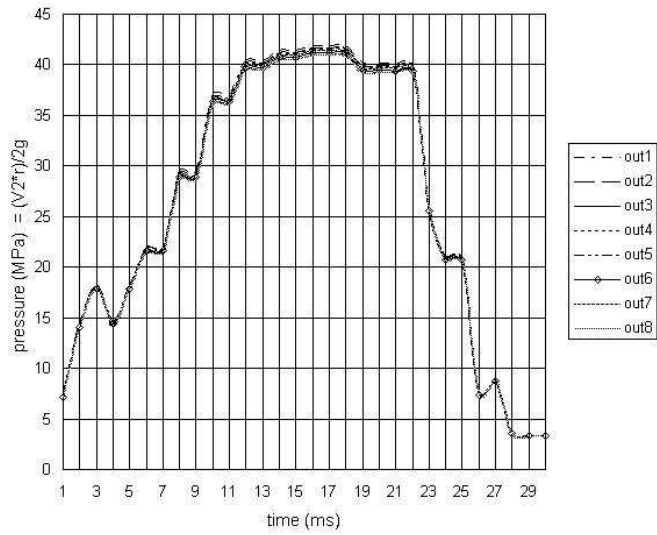


Velocity of TB-0.6mm 0.308mm(at t=15ms)

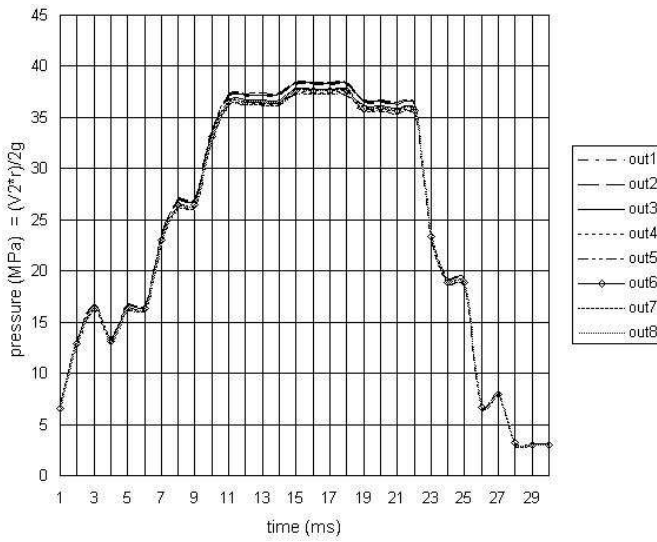
Fig. 3.20 To be continued

### 3.2.2.3 노즐 홀 직경이 0.328mm 일 때

Fig. 3.21은 노즐 홀 직경이 0.328mm일 때 니들 양정변화에 대한 출구에서의 동압 변화를 보여주고 있다. 니들 양정이 0.4mm일 때 초기압력이 7MPa이며 3ms에서 17.5MPa까지 증가하고, 최고압력은 41.5MPa로 가장 높은 동압을 유지한다. 니들 양정이 0.5mm일 때 초기압력은 6.7MPa이며 3ms에서 16.5MPa까지 증가하고, 최고압력은 37MPa를 유지한다. 니들 양정이 0.6mm일 때 초기압력은 0.5mm일 때와 유사한 6.6MPa이며 최고압력도 0.5mm와 유사한 37MPa를 유지한다. 노즐 홀 직경이 0.308mm인 경우에 비해 3가지 모두 초기압력과 최고압력 그리고 출구에서의 동압이 증가했으며, 니들 양정이 0.4mm인 경우가 약 5.5MPa로 가장 크게 증가했으며, 0.6mm인 경우는 약 3.5MPa이 증가했고, 0.5mm인 경우가 약 1MPa로 가장 작게 증가했음을 알 수 있다. Fig. 3.22는 니들 양정 변화에 대한 정압 분포를 보여주고 있다. 니들 양정이 작을수록 O부분에서의 정압이 낮게 나타났으며, 그 영향으로 노즐 입구에서의 정압감소를 보이고, 부압 발생부에서의 부압이 조금 더 높게 나타남으로 인해 캐비테이션의 발생을 저하시킬 것으로 사료된다. Fig. 3.23은 니들 양정 변화에 대한 속도 분포를 보여주고 있다. 니들 양정이 증가할수록 노즐 내부에서의 전체적인 속도 분포가 증가함을 볼 수 있으며, O부분에서의 속도는 감소함을 알 수 있다. Fig. 3.23에서 3가지 경우 부압이 발생한 곳에서의 속도가 가장 높고, 동압의 결과에서 보듯 노즐 내에서의 속도는 양정이 작을수록 빠른 것으로 나타났다.



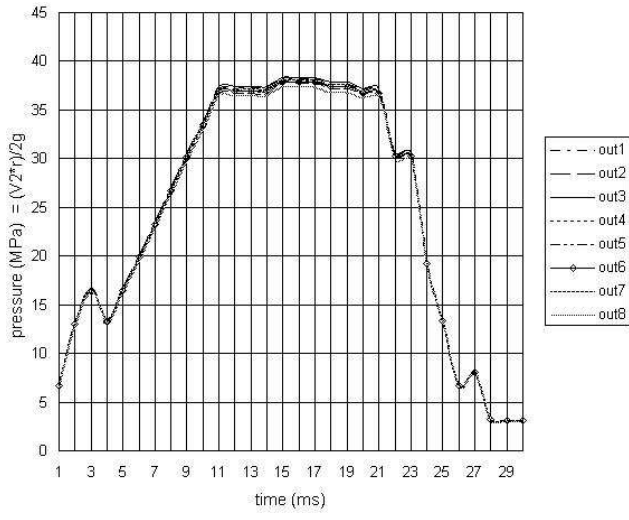
Outlet dynamic pressure variation of TB-0.4mm 0.328mm



Outlet dynamic pressure variation of TB-0.5mm 0.328mm

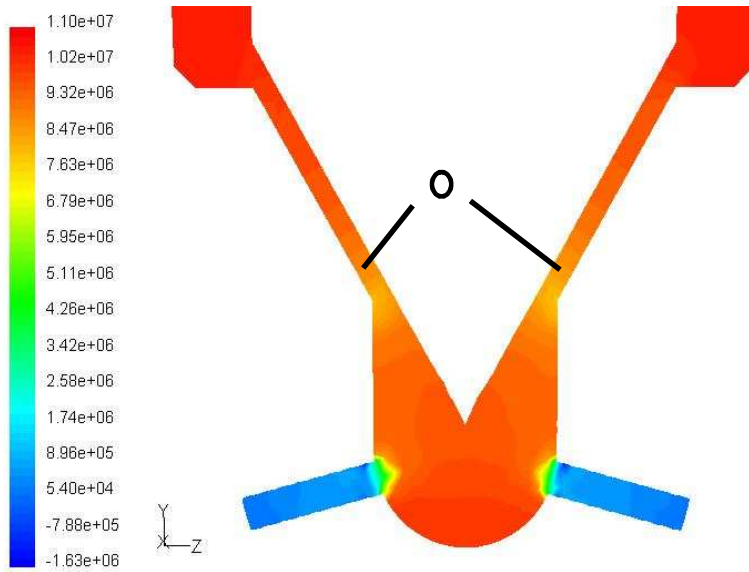
Fig. 3.21 Outlet dynamic pressure variation with changing needle lift



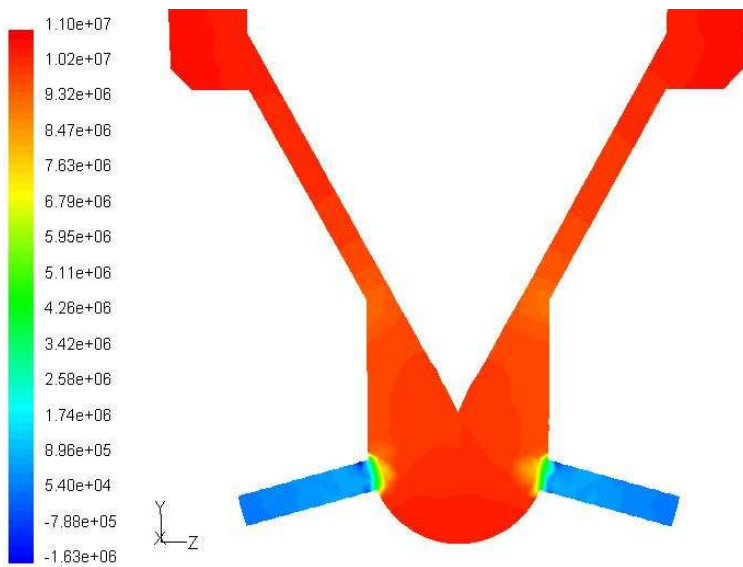


Outlet dynamic pressure variation of TB-0.6mm 0.328mm

Fig. 3.21 To be continued

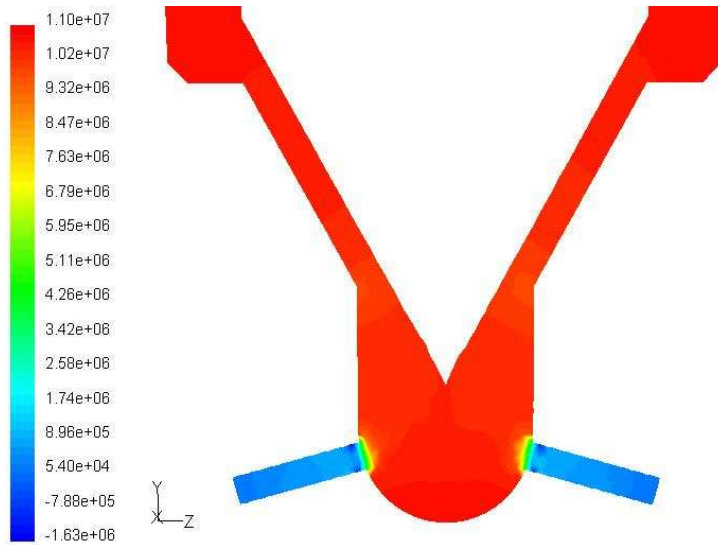


Static pressure of TB-0.4mm 0.328mm(at t=15ms)



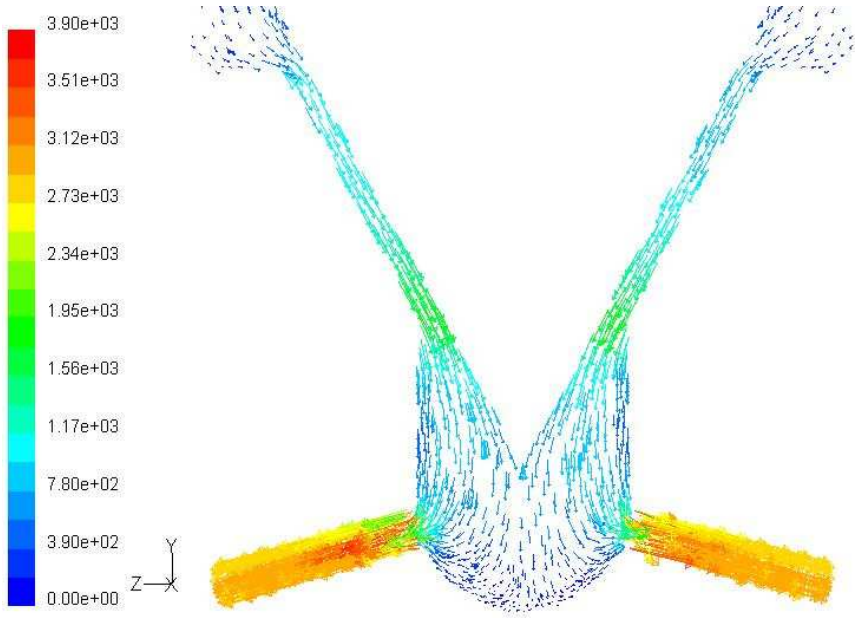
Static pressure of TB-0.5mm 0.328mm(at t=15ms)

Fig. 3.22 Static pressure with changing needle lift

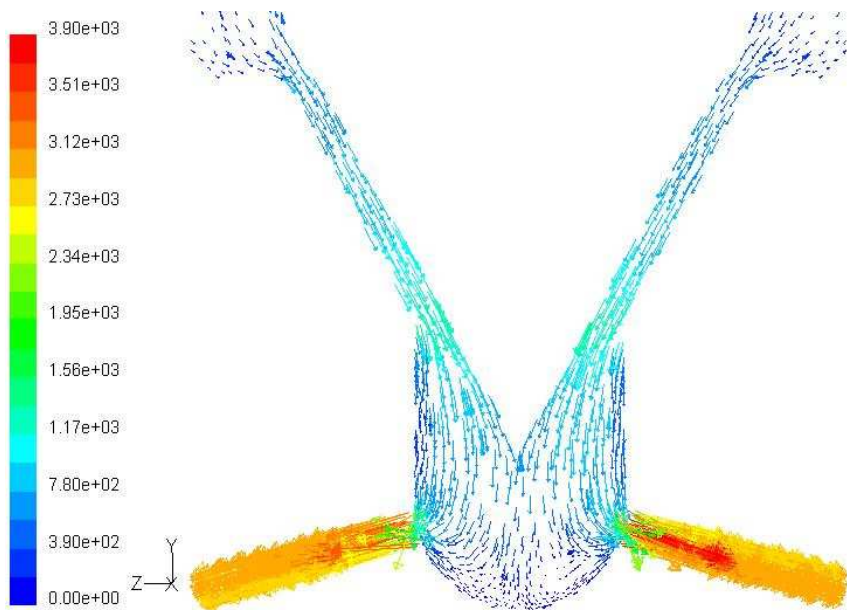


Static pressure of TB-0.6mm 0.328mm(at t=15ms)

Fig. 3.22 To be continued

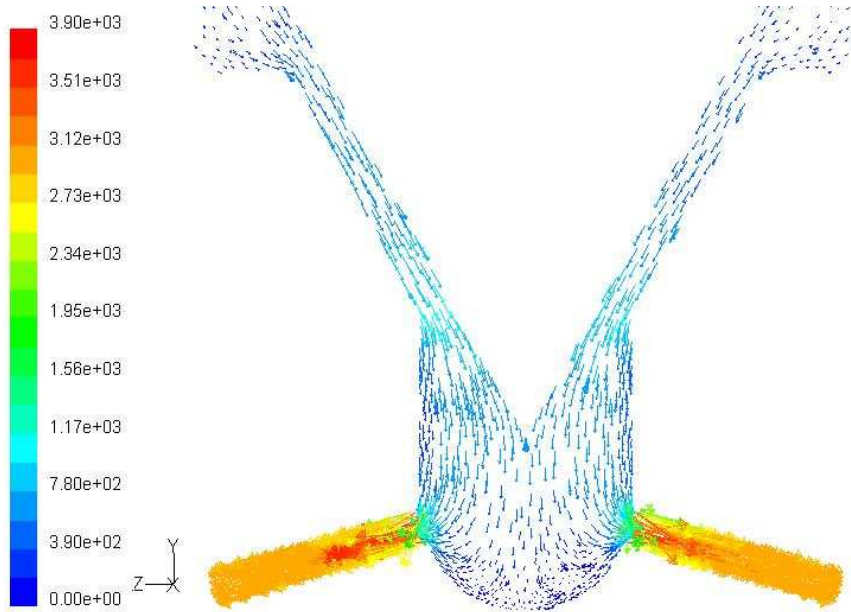


Velocity of TB-0.4mm 0.328mm(at t=15ms)



Velocity of TB-0.5mm 0.328mm(at t=15ms)

Fig. 3.23 Velocity with changing needle lift



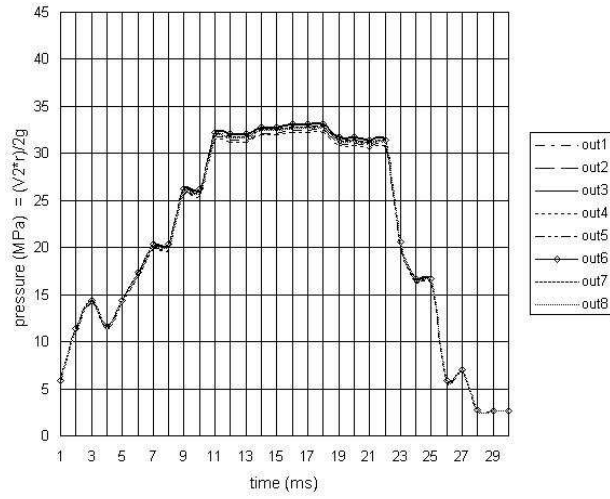
Velocity of TB-0.6mm 0.328mm(at  $t=15\text{ms}$ )

Fig. 3.23 To be continued

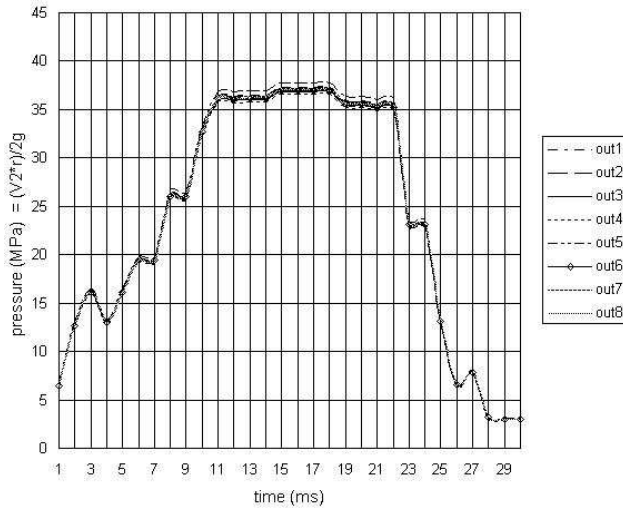
### 3.2.3 노즐 홀 직경변화

#### 3.2.3.1 니들 양정이 0.4mm일 때

Fig. 3.24는 니들 양정이 0.4mm일 때 노즐 홀 직경 변화에 대한 출구에서의 동압 변화를 보여주고 있다. 노즐 홀 직경이 0.288mm일 때 초기압력은 약 6MPa이며 3ms에서 13.6MPa까지 증가하고, 최고압력은 32.5MPa을 유지한다. 노즐 홀 직경이 0.308mm일 때 초기압력은 0.288일 때보다 약 0.6MPa 증가한 6.6MPa이며 3ms에서 0.288mm일 때보다 3MPa 증가한 16.5MPa까지 증가하고, 최고압력은 약 5MPa 증가한 37.5MPa을 유지한다. 노즐 홀 직경이 0.328mm일 때 초기압력은 7.2MPa이며 3ms에서 17.5MPa까지 증가하며, 최고압력은 41.5MPa을 유지한다. Fig. 3.25는 니들 양정이 0.4mm일 때 노즐 홀 직경 변화에 대한 정압 분포를 보여주고 있다. 노즐 홀 직경이 증가할수록 O부분에서의 정압이 감소하며, 그 영향으로 인해 노즐 입구까지 낮은 압력 부분이 이어지는 것을 볼 수 있다. 노즐 홀 직경이 커질수록 증가한 출구에서의 동압이 O부분에서의 정압의 감소로 인한 영향으로 사료된다. 노즐 내부에서의 압력도 노즐 홀 직경이 커질수록 낮아지는 것을 볼 수 있으며 이는 출구에서 얻은 동압의 결과와 일치함을 보여준다. Fig. 3.26은 니들 양정이 0.4mm일 때 노즐 홀 직경 변화에 대한 속도 분포를 보여주고 있다. O부분에서의 속도는 노즐 홀 직경이 커질수록 증가하는 것을 볼 수 있으며, 그로 인해 노즐 입구에서의 속도가 증가하는 것을 볼 수 있다.

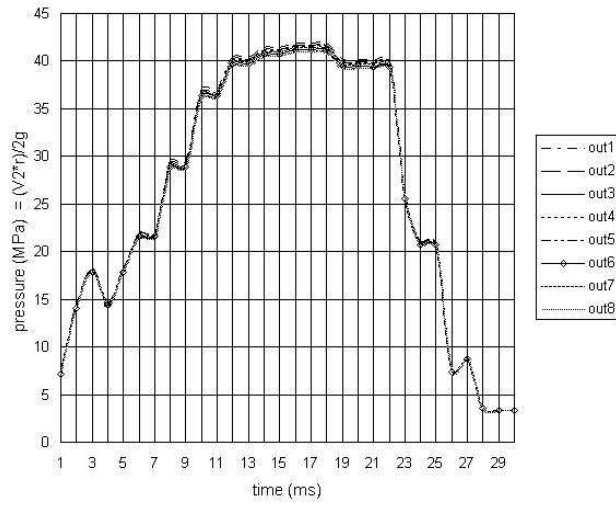


Outlet dynamic pressure variation of TB-0.4mm 0.288mm



Outlet dynamic pressure variation of TB-0.4mm 0.308mm

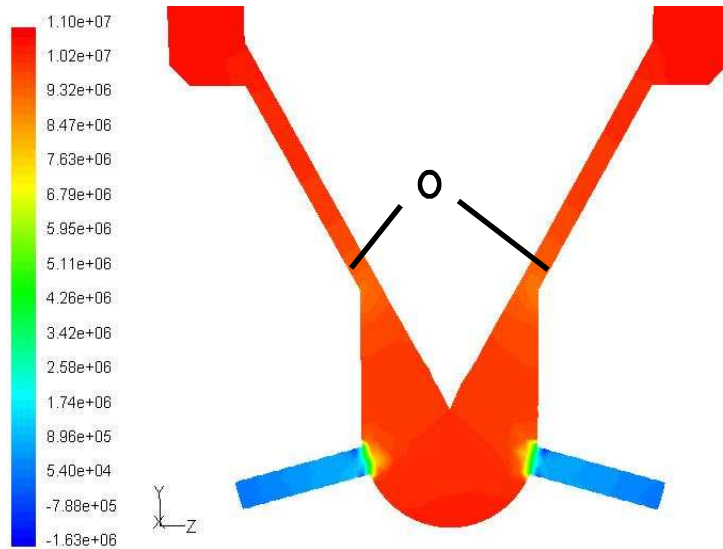
Fig. 3.24 Outlet dynamic pressure variation with changing nozzle hole diameter



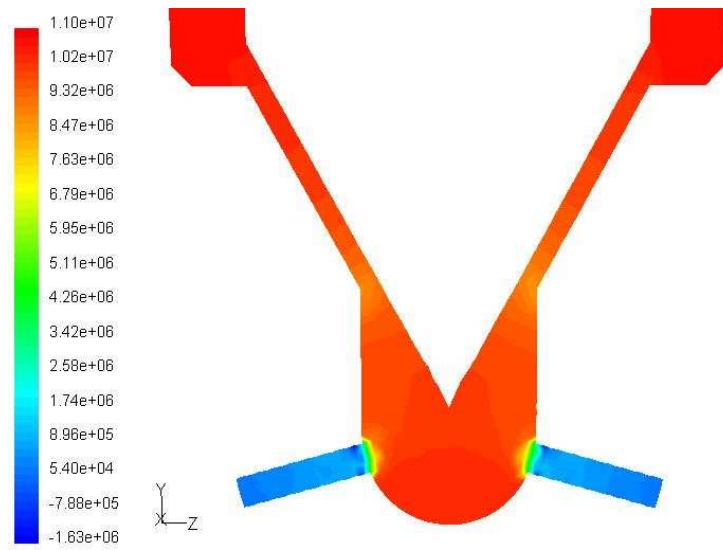
Outlet dynamic pressure variation of TB-0.4mm 0.328mm

Fig. 3.24 To be continued



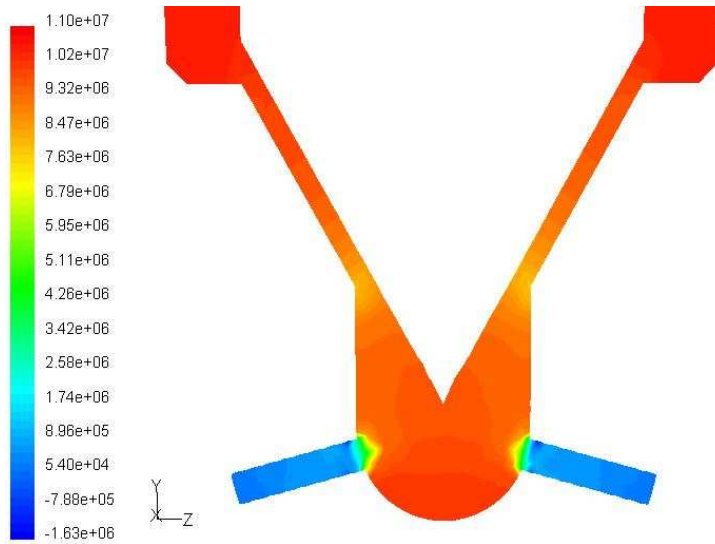


Static pressure of TB-0.4mm 0.288mm(at t=15ms)



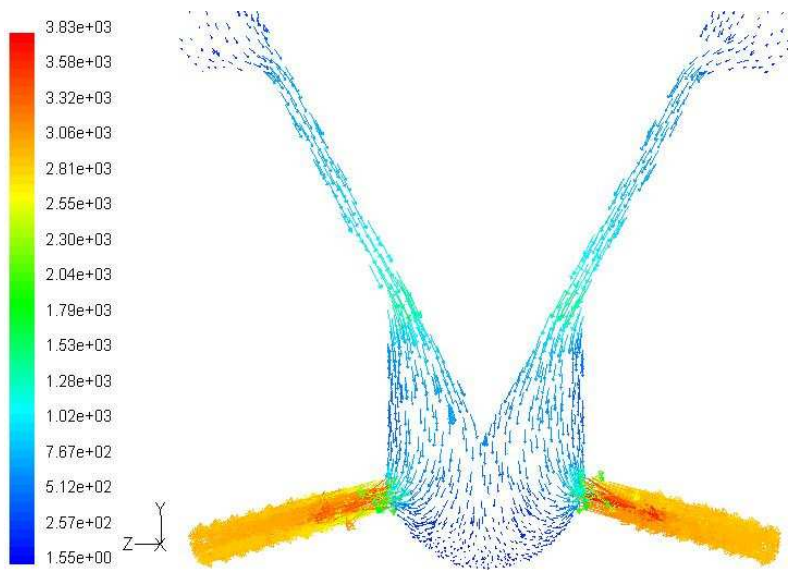
Static pressure of TB-0.4mm 0.308mm(at t=15ms)

Fig. 3.25 Static pressure with changing nozzle hole diameter

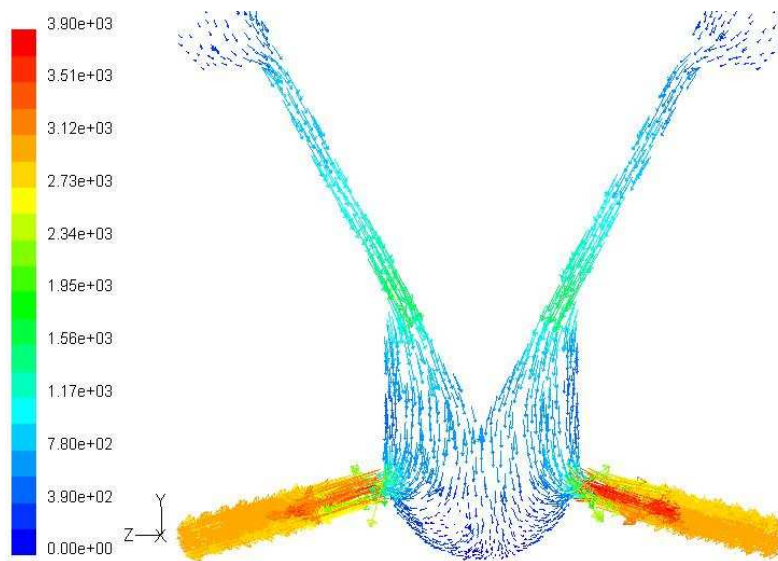


Static pressure of TB-0.4mm 0.328mm(at t=15ms)

Fig. 3.25 To be continued

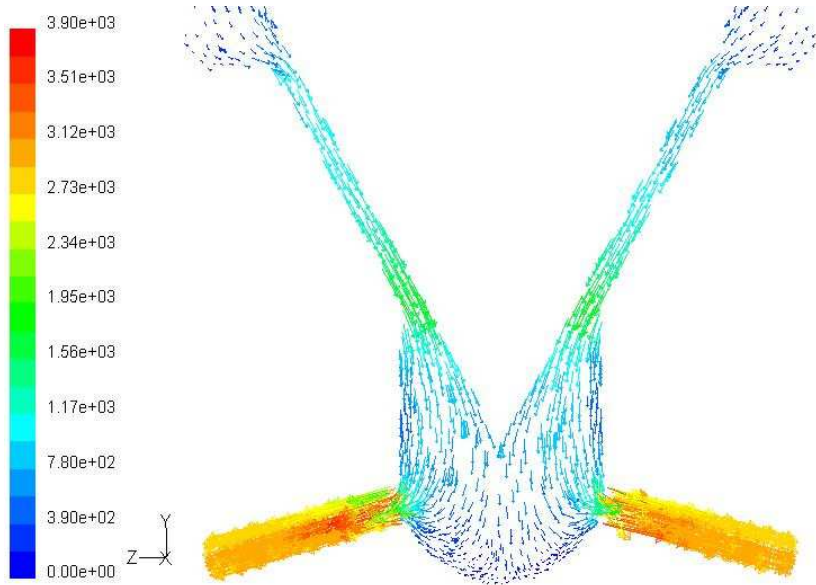


Velocity of TB-0.4mm 0.288mm(at t=15ms)



Velocity of TB-0.4mm 0.308mm(at t=15ms)

Fig. 3.26 Velocity with changing nozzle hole diameter

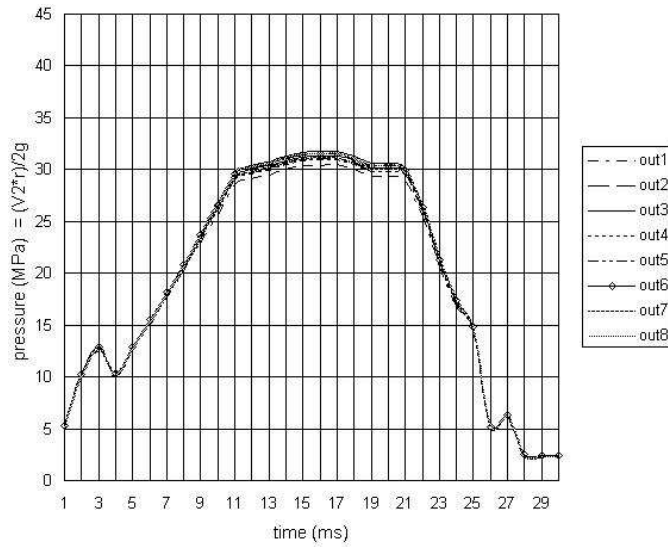


Velocity of TB-0.4mm 0.328mm(at t=15ms)

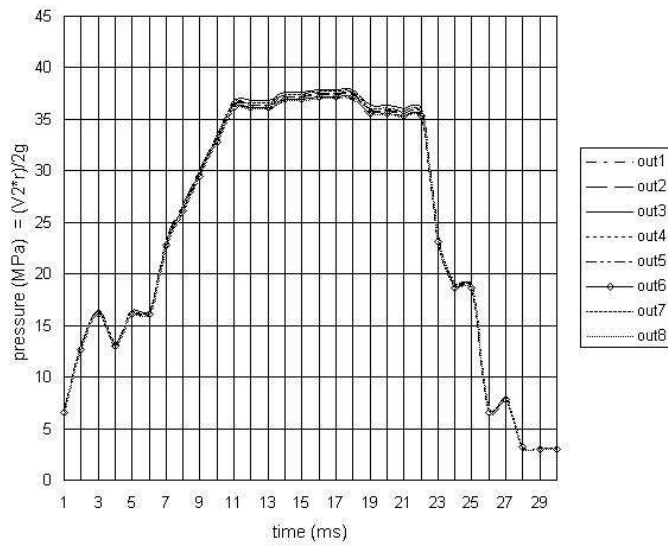
Fig. 3.26 To be continued

### 3.2.3.2 니들 양정이 0.5mm일 때

Fig. 3.27은 니들 양정이 0.5mm일 때 노즐 홀 직경 변화에 대한 출구에서의 동압 변화를 보여주고 있다. 노즐 홀 직경이 0.288mm일 때 초기압력은 약 5MPa이며 3ms에서 12.5MPa까지 증가하고, 최고압력은 30.5MPa을 유지한다. 노즐 홀 직경이 0.308mm일 때 초기압력은 0.288일 때보다 약 1.5MPa 증가한 6.5MPa이며 3ms에서 0.288mm일 때보다 3.7MPa 증가한 16.2MPa까지 증가하고, 최고압력은 약 6.1MPa 증가한 36.6MPa을 유지한다. 노즐 홀 직경이 0.328mm일 때 초기압력은 7.2MPa이며 3ms에서 17.1MPa까지 증가하며, 최고압력은 36.8MPa을 유지한다. 노즐 홀 직경이 0.308mm 이상으로 증가하면서 동압의 변화량이 작은 것을 볼 수 있다. Fig. 3.28은 니들 양정이 0.5mm일 때 노즐 홀 직경 변화에 대한 정압 분포를 보여주고 있다. 노즐 홀 직경이 0.308mm로 증가하면서 O부분에서의 정압이 감소하는 것을 볼 수 있으나 0.328mm로 되면서 거의 변화가 없음을 볼 수 있다. 노즐 홀 직경이 커질수록 O부분에서의 정압의 감소로 인해 노즐 입구에서의 확연한 정압 감소를 보이며, 그로 인해 노즐 내부에서의 정압이 감소하는 것으로 사료된다. Fig. 3.29는 니들 양정이 0.5mm일 때 노즐 홀 직경 변화에 대한 속도 분포를 보여주고 있다. 노즐 홀 직경이 증가할수록 O부분에서의 속도가 증가하며, 이로 인해 노즐 입구에서의 속도가 증가함을 볼 수 있으며, O부분에서 입구까지의 흐름이 좀 더 급격하게 유입되는 것을 볼 수 있다.

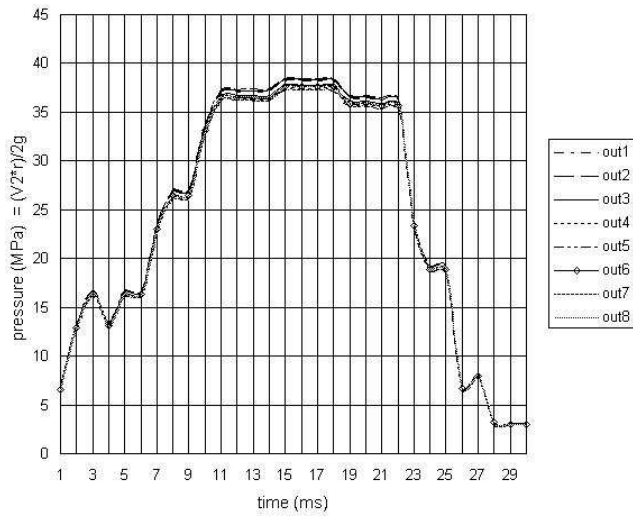


Outlet dynamic pressure variation of TB-0.5mm 0.288mm



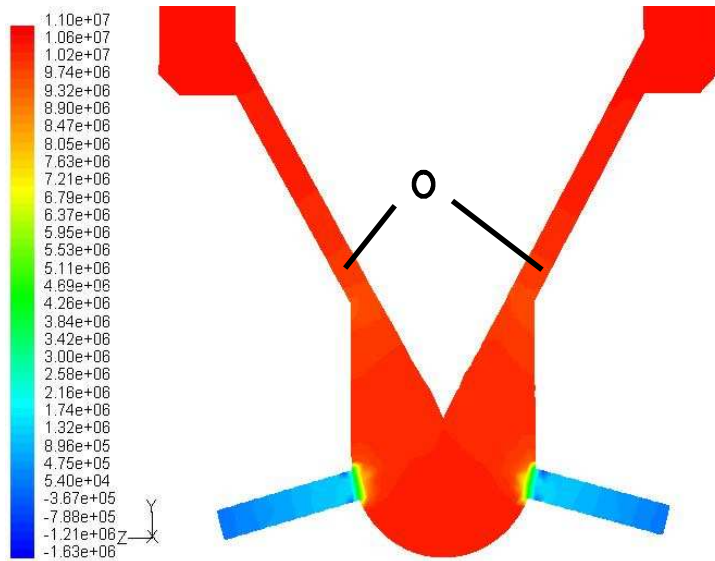
Outlet dynamic pressure variation of TB-0.5mm 0.308mm

Fig. 3.27 Outlet dynamic pressure variation with changing nozzle hole diameter

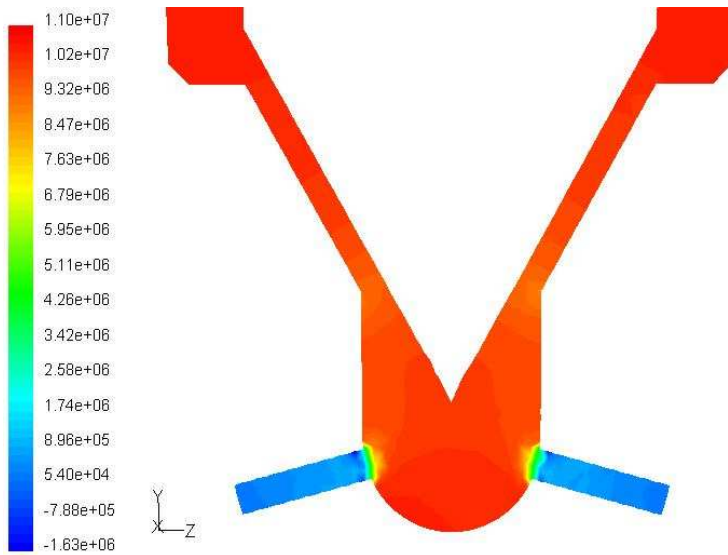


Outlet dynamic pressure variation of TB-0.5mm 0.328mm

Fig. 3.27 To be continued



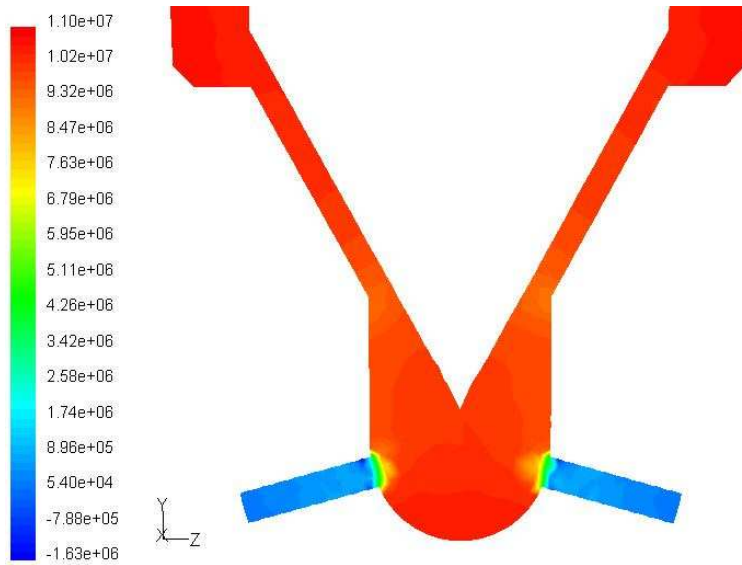
Static pressure of TB-0.5mm 0.288mm(at t=15ms)



Static pressure of TB-0.5mm 0.308mm(at t=15ms)

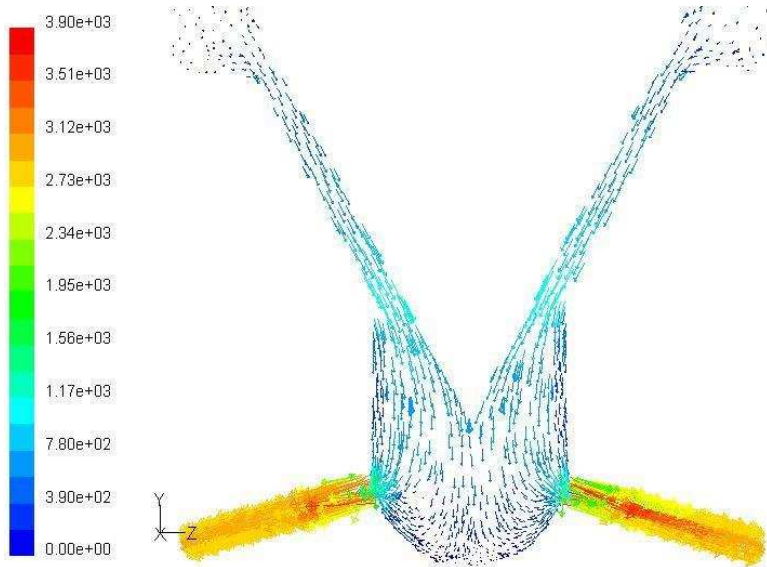
Fig. 3.28 Static pressure with changing nozzle hole diameter



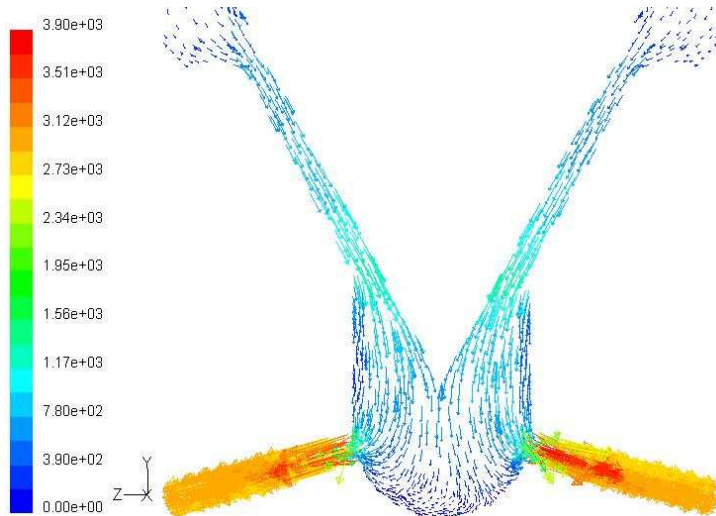


Static pressure of TB-0.5mm 0.328mm(at t=15ms)

Fig. 3.28 To be continued

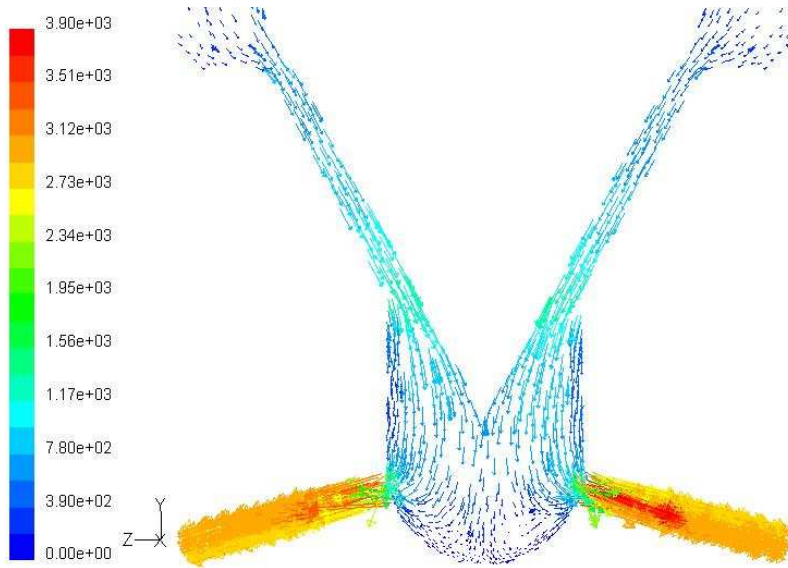


Velocity of TB-0.5mm 0.288mm(at t=15ms)



Velocity of TB-0.5mm 0.308mm(at t=15ms)

Fig. 3.29 Velocity with changing nozzle hole diameter

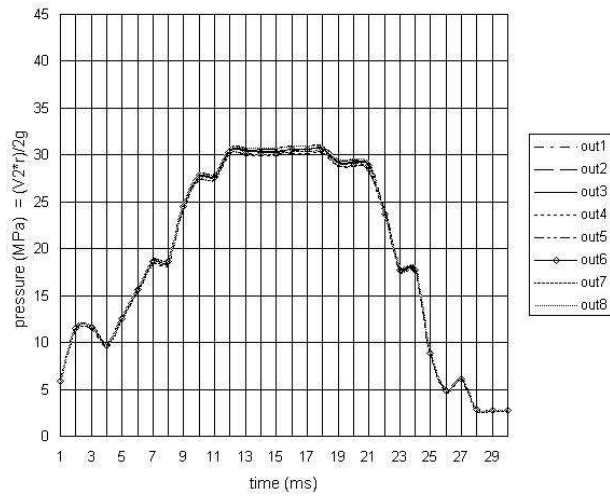


Velocity of TB-0.5mm 0.328mm(at t=15ms)

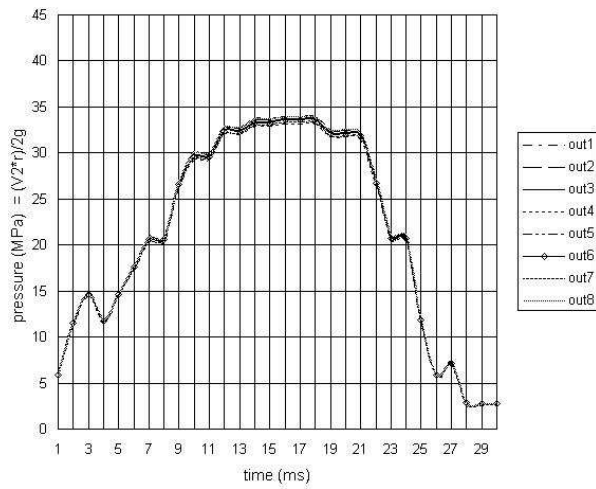
Fig. 3.29 To be continued

### 3.2.3.3 니들 양정이 0.6mm일 때

Fig. 3.30은 니들 양정이 0.6mm일 때 노즐 홀 직경 변화에 대한 출구에서의 동압 변화를 보여주고 있다. 노즐 홀 직경이 0.288mm일 때 초기압력은 약 6MPa이며 3ms에서 12MPa까지 증가하고, 최고압력은 30MPa을 유지한다. 노즐 홀 직경이 0.308mm일 때 초기압력은 0.288일 때와 같은 6MPa이며 3ms에서 0.288mm일 때보다 2.9MPa 증가한 14.9MPa까지 증가하고, 최고압력은 약 3.5MPa 증가한 33.5MPa을 유지한다. 노즐 홀 직경이 0.328mm일 때 초기압력은 6.6MPa이며 3ms에서 16.5MPa까지 증가하며, 최고압력은 37MPa을 유지한다. Fig. 3.31은 니들 양정이 0.6mm일 때 노즐 홀 직경 변화에 대한 정압 분포를 보여주고 있다. 노즐 홀 직경이 증가하면서 O부분과 노즐 입구에서의 정압이 낮아지는 것을 볼 수 있으며, 이는 출구에서 동압의 결과와 일치한다. 3가지 경우 모두 노즐 입구에서 부압이 발생했음을 볼 수 있으며, O부분에서 정압이 낮아질수록 노즐 입구까지 영향을 미치는 것으로 보인다. Fig. 3.32는 니들 양정이 0.6mm일 때 노즐 홀 직경 변화에 대한 속도 분포를 보여주고 있다. 노즐 홀 직경이 0.288mm에서 0.328mm로 증가할수록 O부분과 노즐 입구에서 속도의 증가를 보이며, O부분에서 노즐 입구로의 흐름은 노즐 홀 직경이 커질수록 급격히 유입됨을 볼 수 있다.

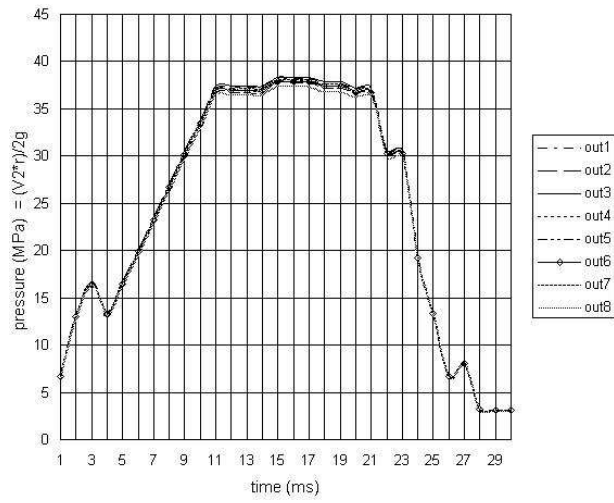


Outlet dynamic pressure variation of TB-0.6mm 0.288mm



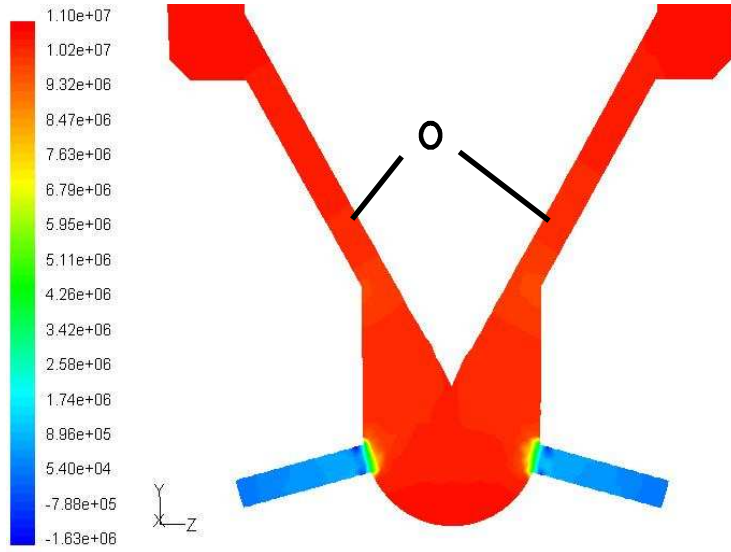
Outlet dynamic pressure variation of TB-0.6mm 0.308mm

Fig. 3.30 Outlet dynamic pressure variation with changing nozzle hole diameter

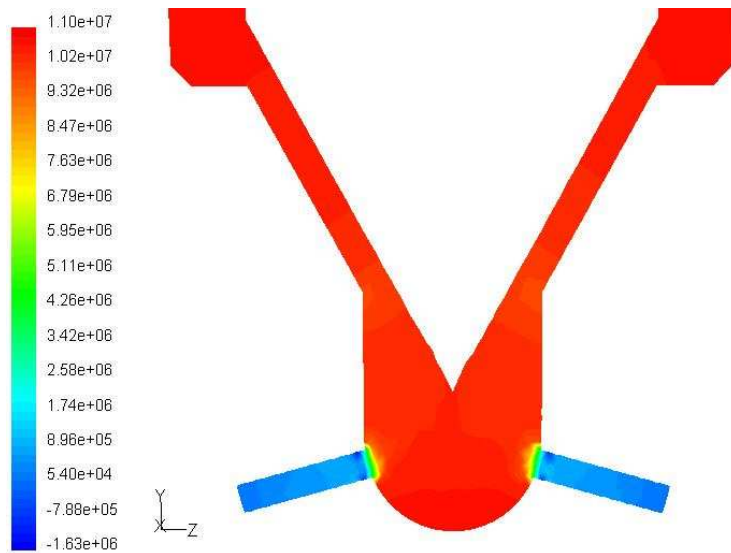


Outlet dynamic pressure variation of TB-0.6mm 0.328mm

Fig. 3.30 To be continued

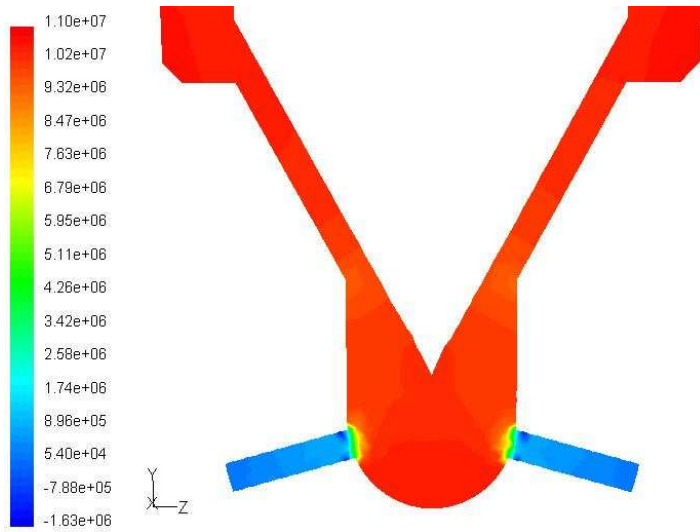


Static pressure of TB-0.6mm 0.288mm(at t=15ms)



Static pressure of TB-0.6mm 0.308mm(at t=15ms)

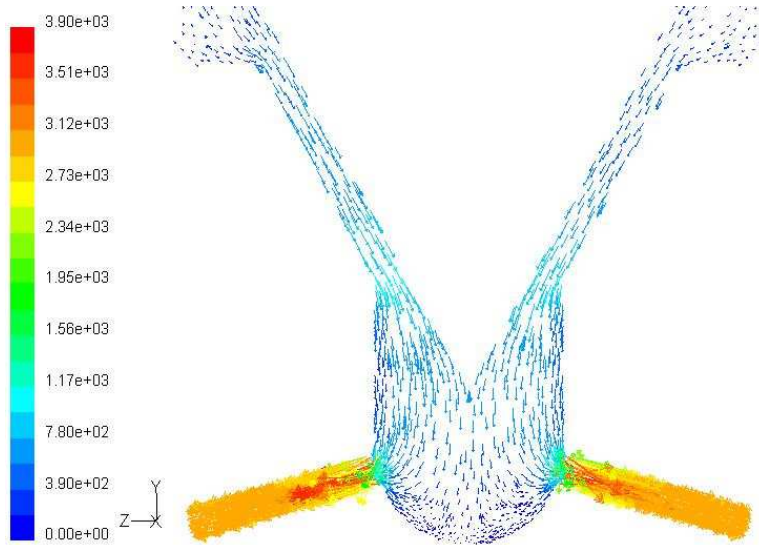
Fig. 3.31 Static pressure with changing nozzle hole diameter



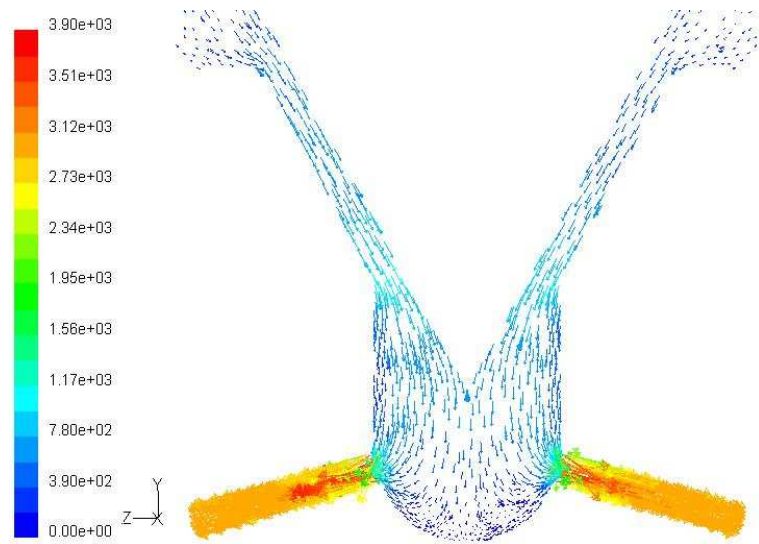
Static pressure of TB-0.6mm 0.328mm(at t=15ms)

Fig. 3.31 To be continued



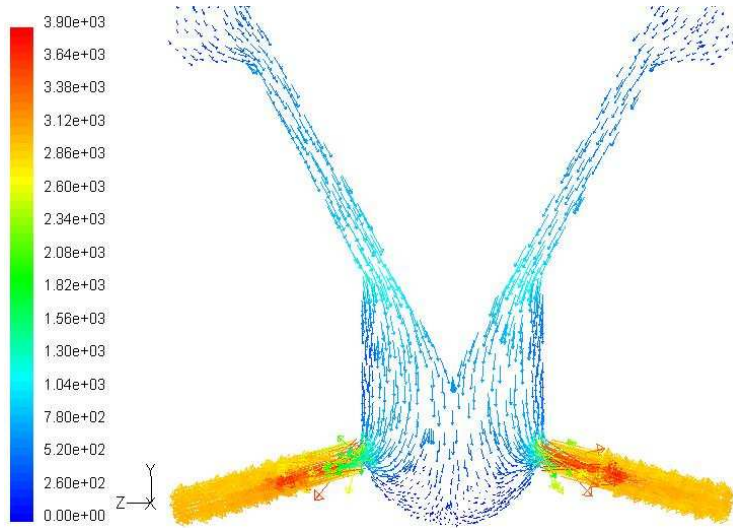


Velocity of TB-0.6mm 0.288mm(at t=15ms)



Velocity of TB-0.6mm 0.308mm(at t=15ms)

Fig. 3.32 Velocity with changing nozzle hole diameter



Velocity of TB-0.6mm 0.328mm(at t=15ms)

Fig. 3.32 To be continued

### 3.3 결과 요약

노즐 홀 직경 변화 0.288mm, 0.308mm, 0.328mm에서 출구에서의 동압은 니들 양정이 0.4mm일 때 가장 높게 나타났으며, 동압과 분사율(단위시간당 체적)의 관계에서 볼 때 분사율의 증가로 볼 수 있다. 또한 각각의 노즐 홀 직경에서 니들 양정의 변화를 보면 니들 양정이 작아질수록 O부분에서의 정압이 감소하였으며 이로 인해 노즐 입구부분까지 낮은 정압이 넓게 나타났으며 출구에서의 동압(분사율)은 증가하였다. 각각의 니들 양정에 대한 노즐 홀 직경 변화를 보면 노즐 홀 직경이 커질수록 O부분에서의 정압이 감소하고, 출구에서의 동압이 증가하였고, 니들 양정이 가장 작은 0.4mm일 때 그 증가량은 가장 높게 나타났다.

모든 경우에 대해서 노즐 입구부분에서의 부압이 발생하는 것을 볼 수 있었으며, 그 강도의 변화는 O부분에서의 정압의 변화와 관련된 것으로 사료된다. 가장 높은 동압(분사율)을 보인 경우는 니들 양정이 0.4mm이고, 노즐 홀 직경이 0.328mm일 때로 나타났다.

## IV. 결 론

선박발전용 분사밸브 형상에 따른 분사와 분무특성을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 연료실 형상 변화 : 연료실이 분사홀에서 멀리 위치하고 연료공급홀이 하나인 DV 타입은 연료실이 분사홀에 가깝게 위치하고 공급홀이 2개인 TB 타입에 비하여 분사압력이 7% 높아지고 분사기간이 36% 증가한다. 노즐 홀 출구의 동압은 TB타입이 높기 때문에 분사속도가 크고 분사진행거리의 증가와 연소 활성화에 유리할 것으로 생각된다.

2) 니들 양정 변화 : 양정이 높을수록 분사기간이 줄어들고 분사압력은 높아진다. 하지만 양정이 0.5mm 이상이 되면 큰 변화가 없다. 니들양정이 증가할수록 분사압력의 증가로 인해 분산이 증가하며 관통은 감소한다.

3) 노즐 홀 직경 변화 : 노즐직경이 0.308mm 이상으로 증가하면 분사압력과 분사기간이 급격히 줄어들기 때문에 정밀한 제작이 요구된다. 노즐직경이 0.288mm일 때 분산과 관통이 가장 좋으며 0.308mm이상일 때 급격히 저하된다.

4) 니들 양정에서 노즐 홀 직경의 증가는 니들과 노즐의 틈인 O부분에서의 정압의 감소와 노즐 출구에서의 동압을 증가시키는 것을 볼 수 있었으며, 니들 양정이 0.4mm일 때 동압의 증가량은 가장 크게 나타났다.

## 參 考 文 獻

- [1] 조래희, *핀틀형 노즐의 뿔형상에 따른 분사특성 및 클로우 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 and 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*, 한

국과학기술원 박사학위논문, 1989.

[11] 구자예, 박장혁, 오두석, 정홍철, “연료노즐 내부유동 현상의 수치해석”, 대한기계학회논문집(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] 하성업, 김홍열, 류구영, 구자예, “노즐분공내 유체충돌이 있는 디젤노즐의 유동 및 분무특성 연구”, 대한기계학회논문집(B), 제21권 제12호, pp. 1635-1646, 1997.

[15] 차건종, 김덕줄, “충돌판에 의한 분무의 공간분포에 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.

[18] 류성목, 차건종, 김덕줄, 박권하, “디젤연소실에서 새로운 충돌분무 형성에 대한 수치적 고찰”, 대한기계학회 B권, 제 22권 11호, pp. 1625~1634, 1998.

[19] 김만식, 장용석, 민경덕, “가시화용 디젤노즐에서의 캐비테이션 유동 특성 및 3차원 해석 연구”, 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집 pp. 1421~1426, 2002.

[20] 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.

[21] Arcoumanis C., Badami, M. Flora, H. and Gavaises, M., "Cavitation in Real-Size Multi-Hole Diesel Injector Nozzles", SAE Paper 2000-01-1249, 2000.

[22] 하성업, 김홍열, 류구영, 구자예, "노즐분공내 유체충돌이 있는 디젤노즐의 유동 및 분무특성 연구", 대한기계학회논문집(B), Vol. 21, No. 12, pp. 1635-1646, 1997.

[23] 박장혁, 홍성태, 구자예, "연료노즐을 확대한 모형노즐에서의 내부유동특성", 한국자동차공학회논문집, Vol. 4, No. 3, pp. 199-210, 1996.

## 부 록

```
#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE(unsteady_pressure, thread, position)
{
    float t;
    face_t f;
    begin_f_loop(f, thread)
        real t = RP_Get_Real("flow-time");
        if (t < 0.0011)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 2.21*1000000 ;
        else if (t >= 0.001 && t < 0.002)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 2.21*1000000 ;
        else if (t >= 0.002 && t < 0.003)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 4*1000000 ;
        else if (t >= 0.003 && t < 0.004)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 5*1000000 ;
        else if (t >= 0.004 && t < 0.005)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 4*1000000 ;
        else if (t >= 0.005 && t < 0.006)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 5*1000000 ;
        else if (t >= 0.006 && t < 0.007)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 6*1000000 ;
        else if (t >= 0.007 && t < 0.008)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 7*1000000 ;
        else if (t >= 0.008 && t < 0.009)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 8*1000000 ;
        else if (t >= 0.009 && t < 0.01)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 9*1000000 ;
        else if (t >= 0.01 && t < 0.011)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 10*1000000 ;
        else if (t >= 0.011 && t < 0.012)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 11*1000000 ;
        else if (t >= 0.012 && t < 0.013)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 10.9*1000000 ;
```



```
else if (t >= 0.013 && t < 0.014)
F_PROFILE(f, thread, position) = 11*1000000 ;
else if (t >= 0.014 && t < 0.015)
F_PROFILE(f, thread, position) = 11.2*1000000 ;
else if (t >= 0.015 && t < 0.016)
F_PROFILE(f, thread, position) = 11.3*1000000 ;
else if (t >= 0.016 && t < 0.017)
F_PROFILE(f, thread, position) = 11.3*1000000 ;
else if (t >= 0.017 && t < 0.018)
F_PROFILE(f, thread, position) = 11.3*1000000 ;
else if (t >= 0.018 && t < 0.019)
F_PROFILE(f, thread, position) = 11.1*1000000 ;
else if (t >= 0.019 && t < 0.020)
F_PROFILE(f, thread, position) = 10.8*1000000 ;
else if (t >= 0.020 && t < 0.021)
F_PROFILE(f, thread, position) = 10.9*1000000 ;
else if (t >= 0.021 && t < 0.022)
F_PROFILE(f, thread, position) = 10.7*1000000 ;
else if (t >= 0.022 && t < 0.023)
F_PROFILE(f, thread, position) = 9*1000000 ;
else if (t >= 0.023 && t < 0.024)
F_PROFILE(f, thread, position) = 7*1000000 ;
else if (t >= 0.024 && t < 0.025)
F_PROFILE(f, thread, position) = 5.7*1000000 ;
else if (t >= 0.025 && t < 0.026)
F_PROFILE(f, thread, position) = 4*1000000 ;
else if (t >= 0.026 && t < 0.027)
F_PROFILE(f, thread, position) = 2*1000000 ;
else if (t >= 0.027 && t < 0.028)
F_PROFILE(f, thread, position) = 2.5*1000000 ;
else if (t >= 0.028 && t < 0.029)
F_PROFILE(f, thread, position) = 1*1000000 ;
else if (t >= 0.029 && t < 0.03)
F_PROFILE(f, thread, position) = 1*1000000 ;
end_f_loop(f, thread)
}
```

## 논문을 마치며

대학원 생활을 하면서 제가 정말 인격적으로 존경하고, “스승이란 이런 것이다”란 느낌을 가지게 해주시고, 항상 학생들을 존중하고 기다려주신 박권하교수님께 감사의 말씀을 전합니다. 좀 더 좋은 논문이 되도록 신경써주신 이영호교수님과 도덕희교수님께도 감사의 말씀을 전합니다.

26년 동안 저를 믿고, 용기를 주신 저의 정신적인 안식처 어머니 김영숙씨에게 정말 감사하고 사랑한다는 말을 전합니다. 멀리 일본에서 나에게 경제적으로 도움을 주었던 누나 김해린에게도 고맙단 말과 사랑한다는 말을 전합니다.

타지에 나와서 느끼는 외로움을 달래주고, 힘들 때면 위로해준 포근한 안식처가 되어준 성주원에게 특별히 고맙단 말과 사랑한다는 말을 전합니다.

선배이면서도 정말 친구처럼 대해주고, 웃음을 주었던 재혁이형, 승우형, 다른 실험실에 있으면서 항상 같이 고민하고 기댈 수 있었던 종식이형, 민수형, 다른 과에 있으면서 마음이 통하고 성실한 친구 수현, 항상 웃긴 얘기를 하려고 노력했던 정재, 졸업생들의 뒤를 이어 실험실의 빈자리를 채워준 영환이형, 성실한 은영, 성격 좋은 혜민, 착한 창우, 외유내강의 모습을 지니면서 독특한 재채기를 하는 인선, 별로 좋지 않은 상황에서도 나의 진로를 신경써주고 웃음을 주었던 졸업생 상무형, 모두의 앞날이 밝길 바랍니다.