

## 유동해석을 통한 유체제어밸브 시스템의 내부 유동 특성 분석

손창우<sup>1</sup>, 서태일<sup>\*</sup>, 김광희<sup>2</sup>, 이선용<sup>3</sup>

<sup>1</sup>인천대학교 기계공학과, <sup>2</sup>인천경제산업정보테크노파크, <sup>3</sup>(주)유니락

## Numerical Analysis of Flow Characteristics inside inner part of Fluid Control Valve System

Chang-Woo Son<sup>1</sup>, Tae-II Seo<sup>\*</sup>, Kwang-Hee Kim<sup>2</sup>, Sun-Ryong Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Division of Mechanical Engineering, Incheon National University

<sup>2</sup>Design Support Center, Incheon Business Information Technopark

<sup>3</sup>Technology Research Center, Unilok Corporation

요 약 세계적으로 반도체장비 시장은 오래전부터 성장하고 있다. 유체제어시스템은 반도체 제조 장비에 사용되어지는 배관을 집적화시켜 유체의 공급을 제어할 수 있도록 모듈화, 소형화한 시스템이다. 반도체의 제조공정은 여러 종류의 맹독성 가스를 필수적으로 다루어야 한다. 특히 실제 작업 공정에서는 이러한 맹독성 가스의 정밀한 제어가 필요하다. 이러한 맹독성가스를 제어하는 시스템은 피팅, 밸브, 튜브, 필터, 레귤레이터 등 다양한 부품들로 구성되어 있다. 이 부품들은 누출 없이 고압 가스를 계속 제어해야 하기 때문에 정밀하게 제조되어야 하고 내부식성이 있어야 한다. 이를 위해 금속 블록 및 금속 가스킷의 표면 가공 및 강화 기술을 연구해야 한다. 본 논문에서는 이러한 유체제어시스템에서 가장 기본이 되는 V-Block의 직경, 유량, 각도를 다르게 설계하여 내부에서 어떠한 유동흐름을 보이는지 파악하고자 하며, 유체제어시스템에서 가장 기본이 되는 유체제어밸브 시스템의 내부 유동해석을 통하여 안정적인 유량을 공급할 수 있는 설계의 최적화에 대해 연구하고 분석하였다.

**Abstract** The worldwide semi-conductor market has been growing for a long time. Manufacturing lines of semi-conductors need to handle several types of toxic gases. In particular, they need to be controlled accurately in real time. This type of toxic gas control system consists of many different kinds of parts, e.g., fittings, valves, tubes, filters, and regulators. These parts obviously need to be manufactured precisely and be corrosion resistant because they have to control high pressure gases for long periods without any leakage. For this, surface machining and hardening technologies of the metal block and metal gasket need to be studied. This type of study depends on various factors, such as geometric shapes, part materials, surface hardening method, and gas pressures. This paper presents strong concerns on a series of simulation processes regarding the differences between the inlet and outlet pressures considering several different fluid velocity, tube diameters, and V-angles. Indeed, this study will very helpful to determine the important design factors as well as precisely manufacture these parts. The EP (Electrolytic Polishing) process was used to obtain cleaner surfaces, and hardness tests were carried out after the EP process.

**Keywords** : Electrolytic Polishing, FEM, Fluid Control System, Hardness, Surface Hardening

---

본 논문은 2016년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임('10062288').

\*Corresponding Author : Tae-II Seo (Incheon National Univ.)

Tel: +82-10-8769-8769 email: tiseo@inu.ac.kr

Received March 22, 2018

Revised April 20, 2018

Accepted June 1, 2018

Published June 30, 2018

## 1. 서론

반도체제조공정에 사용되는 주요 재료중 하나인 가스는 에피택셜성장, 도핑, 에칭 및 세정, 박막공정에 필수적으로 사용되고 있다. 이때 사용되는 가스중 불순물이 있을 경우 반도체제품의 부식과 결함을 유발할 수 있고, Si의 이상성장 및 성장속도를 지연시킨다. 일반적으로 반도체공정에 사용되는 재료가스는 초고순도(99.99%)을 요구한다. 그러므로 반도체 재료가스를 공급할 때에는 불순물의 오염 없이 안전하게 공급이 되어야한다 [1]. 현재 국내 반도체 제조공정에서 사용되고 있는 강산성 액체는 인체에 매우 유해하며, 누수에 의한 경제적 손실 및 사고의 위험성이 잔존하고 있다. 이를 방지하기 위한 하나의 방법으로, 유체제어시스템 설계는 누수에 의한 손실 감소 및 환경 개선이 중요하다 [2]. 또한, 유동특성에 의해 유량 및 유동이 압력 변화에 매우 민감하다.

따라서 압력 손실을 완화시켜 줄 수 있는 적절한 설계가 필요하다. 이러한 압력 손실을 완화하기 위한 전산해석에 관한 연구는 많은 연구자들이 수행하고 있다 [3,4]. 하지만 대부분의 연구는 특정형상의 제품에만 제한되었다. 유체제어시스템은 여러개의 Block으로 이루어져있는 시스템이다. 본 논문에서는 가장 기본이 되는 V-Block을 유체 해석을 통해 직경, 유량, 각도에 따른 분석을 하고 전체 시스템의 유동 특성과 유량변화를 비교하여 가장 효과적인 형상을 설계하였다 [5,6]. Fig. 1, 2는 V-Block과 내부형상을 보여준다. 또한, 유체제어시스템 전체를 시뮬레이션하여 각 구간에서의 직경, 유량, 각도에 따른 유량변화를 비교하여 가장 효과적인 형상을 설계하였다.

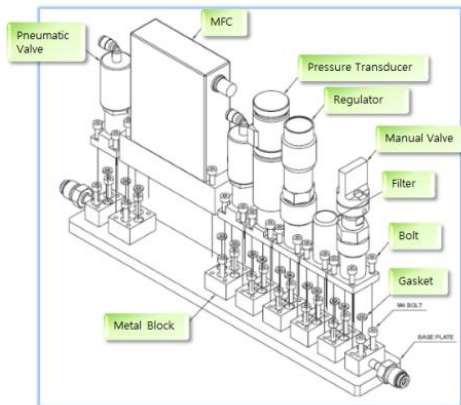


Fig. 1. Fluid Control System Sketch Map



Fig. 2. V-Block Internal Object

## 2. 유체 이론

채널이나 파이프에서의 난류 유동은 공학적으로 매우 중요한 메커니즘으로 많은 연구자들에 의해 수치해석 및 실험을 통한 연구가 진행되어왔다 [7,8].

파이프 유동의 일반적인 유체의 특성은 입구영역, 완전발달유동이 존재한다. 입구영역은 유체가 파이프로 들어가는 입구 근방의 영역을 나타내며, 들어온 입구는 완전 발달유동이 된다. 파이프 내의 속도분포의 모양은 입구영역의 길이가 층류인지 난류인지에 따라 다르다. 입구길이는 층류인 경우, 난류인 경우로 나뉜다. Equation. 1은 층류의 경우이며, Equations. 2는 난류의 경우를 나타낸다. 여기서,  $L_e$ 는 입구영역의 길이이며,  $D$ 는 해당관의 직경을 의미한다.

$$L_e/D=0.6Re \quad (1)$$

$$L_e/D=4.4(Re)^{1/6} \quad (2)$$

따라서 V-Block 모델링을 시뮬레이션을 위해 수정하기 위해서는 우선 레이놀즈수를 구하고 그에 해당하는 입구길이를 구해서 모델링을 수정하여야 한다. 유체제어시스템 내부에 흐르는 유체 질소( $N_2$ )의 점성계수는  $1.66 \times 10^{-5} \text{kg/ms}$ , 밀도는  $1.138 \text{kg/m}^3$ 이다. 이를 직경과 부피를 계산하였을 때, 50L/m, 10L/m은  $Re > 4000$ 이므로 난류이며, 1L/m, 0.1L/m의 경우  $Re < 4000$ 이하 이므로 층류라 할 수 있다. 계산결과 얻어진 값은 아래의 Table. 1과 같다.

Table 1. Flux Reynolds number

Flow	Diameter	Reynold's number	Entrance region (mm)	Velocity (m/s)
50L/m	3.0 $\Phi$	24300.0	71.04	117.89
	3.3 $\Phi$	22100.0	69.93	97.43
	3.6 $\Phi$	20200.0	98.89	81.87
10L/m	3.0 $\Phi$	4860.0	54.33	23.58
	3.3 $\Phi$	4410.0	53.45	19.49
	3.6 $\Phi$	4050.0	52.70	16.37
1L/m	3.0 $\Phi$	486.0	87.48	2.36
	3.3 $\Phi$	441.0	79.38	1.95
	3.6 $\Phi$	405.0	72.90	1.64
0.1L/m	3.0 $\Phi$	48.6	8.75	0.24
	3.3 $\Phi$	44.1	7.94	0.20
	3.6 $\Phi$	40.5	7.29	0.16

### 3. V-Block 유동해석

#### 3.1 V-Block 해석 모델

유체제어시스템에서 현재 사용되는 가장 기본이 되는 부품인 V-Block의 형상을 설계하였다. 모델링은 NX10을 이용하였으며, 가공 가능한 범위를 고려하여 X축으로 30mm, Z축 15mm, Y축 20mm을 나타내며, V-Block의 중심 간의 간격을 10, 14mm로 설정하였다.

#### 3.2 해석 조건

Table. 2는 실제 가공이 가능한 범위 내에서의 각도, 직경, 압력을 나타내고 있으며, FLUNT를 통해 유량 50L/m, 10L/m, 1L/m, 0.1L/m의 유량을 주어 시뮬레이션을 수행하였다. Mesh Node 수는 약 200,000개 이며, Element 수는 약 650,000개로 설정하였다. 집성모델은 k-epsilon을 설정하였으며, 경계조건은 난류는 Turbulence를 설정, Turbulent Intensity를 5%로 설정하였다. 입구에서는 속도를 입력하고, 출구에서는 압력을 확인하고자 하였으며, 시뮬레이션 반복수를 1,000회 설정하여 진행하였다.

Table 2. Conditions of Simulations

Hole distance(mm)	Angle(°C)	Diameter(mm)	Pressure(bar)
10	65	3.6	4
	70	3.3	
	75	3.0	
14	66	3.6	
	70	3.3	
	74	3.0	

#### 3.3 해석 결과

Fig. 3은 위의 유체 이론에 대한 데이터를 반영하여 시뮬레이션을 위해 V-Block을 수정한 모델링의 유동벡터를 나타낸다.

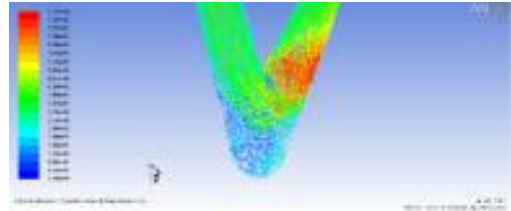


Fig. 3. V-Block Simulation Flux Vectors

Fig. 4는 시뮬레이션에서 수렴하는 그래프의 예시를 나타내고 있다. Fig. 4은 50L/m일 때 75°C에서 수렴하는 그래프를 나타낸다.

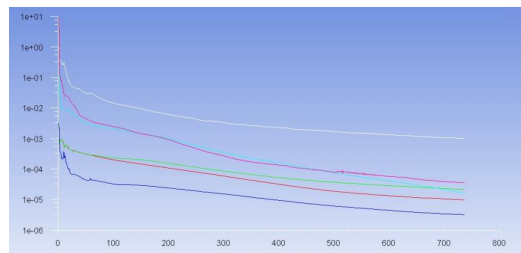


Fig. 4. Results of convergent about 50L/m, 75°C

아래 Table. 3~6는 각 유량에 따른 시뮬레이션 결과를 나타낸다. A는 V 유로관의 각도를 의미하며, D는 직경, I는 V자 유로에 들어가는 입구압력(Pa), O는 나오는 출구쪽 압력(Pa)을 의미한다.

Table 3. Summary of simulation with 50L/m

		Q=50L/min (1 atm)								
		65°C			70°C			75°C		
10	A									
	D	3.0	3.3	3.6	3.0	3.3	3.6	3.0	3.3	3.6
	I	3.62	2.50	1.81	3.44	2.40	1.73	3.34	2.06	1.67
	O	1.15	0.93	0.54	1.12	0.77	0.50	1.08	0.52	0.38
14	A									
	D	66°C			70°C			74°C		
	D	3.0	3.3	3.6	3.0	3.3	3.6	3.0	3.3	3.6
	I	3.56	2.50	1.80	3.47	2.43	1.75	3.39	2.37	1.71
O	1.32	0.95	0.81	1.35	0.94	0.59	1.33	0.87	0.59	

Table 4. Summary of simulation with 10L/m

Q=10L/min (1 atm)										
10 mm	A	65℃			70℃			75℃		
	D	3.0	3.3	3.6	3.0	3.3	3.6	3.0	3.3	3.6
I	0.21	0.14	0.95	0.20	0.10	0.05	0.20	0.14	0.10	
O	1.11	0.06	0.53	0.05	0.06	0.05	0.10	0.06	0.05	
14 mm	A	66℃			70℃			74℃		
	D	3.0	3.3	3.6	3.0	3.3	3.6	3.0	3.3	3.6
	I	0.22	0.15	0.10	0.21	0.14	0.10	0.20	0.14	0.10
	O	0.11	0.08	0.05	0.11	0.07	0.05	0.11	0.08	0.05

Table 5. Summary of simulation with 1L/m

Q=1L/min (1 atm)										
10 mm	A	65℃			70℃			75℃		
	D	3.0	3.3	3.6	3.0	3.3	3.6	3.0	3.3	3.6
	I	62 ×10 <sup>-5</sup>	41.7 ×10 <sup>-5</sup>	29 ×10 <sup>-5</sup>	61.4 ×10 <sup>-5</sup>	41.1 ×10 <sup>-5</sup>	28.8 ×10 <sup>-5</sup>	60.7 ×10 <sup>-5</sup>	40.7 ×10 <sup>-5</sup>	28.5 ×10 <sup>-5</sup>
	O	1.59 ×10 <sup>-5</sup>	1.07 ×10 <sup>-5</sup>	7 ×10 <sup>-5</sup>	1.57 ×10 <sup>-5</sup>	1.55 ×10 <sup>-5</sup>	74 ×10 <sup>-5</sup>	1.56 ×10 <sup>-5</sup>	1.05 ×10 <sup>-5</sup>	73 ×10 <sup>-5</sup>
14 mm	A	66℃			70℃			74℃		
	D	3.0	3.3	3.6	3.0	3.3	3.6	3.0	3.3	3.6
	I	64.2 ×10 <sup>-5</sup>	42.6 ×10 <sup>-5</sup>	30.1 ×10 <sup>-5</sup>	63.5 ×10 <sup>-5</sup>	42.5 ×10 <sup>-5</sup>	29.7 ×10 <sup>-5</sup>	62.7 ×10 <sup>-5</sup>	42 ×10 <sup>-5</sup>	29.4 ×10 <sup>-5</sup>
	O	1.64 ×10 <sup>-5</sup>	1.59 ×10 <sup>-5</sup>	77 ×10 <sup>-5</sup>	1.63 ×10 <sup>-5</sup>	1.09 ×10 <sup>-5</sup>	76 ×10 <sup>-5</sup>	1.61 ×10 <sup>-5</sup>	1.08 ×10 <sup>-5</sup>	75 ×10 <sup>-5</sup>

Table 6. Summary of simulation with 0.1L/m

Q=0.1L/min (1 atm)										
10 mm	A	65℃			70℃			75℃		
	D	3.0	3.3	3.6	3.0	3.3	3.6	3.0	3.3	3.6
	I	1.95 ×10 <sup>-5</sup>	1.29 ×10 <sup>-5</sup>	86 ×10 <sup>-5</sup>	1.94 ×10 <sup>-5</sup>	1.28 ×10 <sup>-5</sup>	8.56 ×10 <sup>-5</sup>	1.92 ×10 <sup>-5</sup>	1.27 ×10 <sup>-5</sup>	85 ×10 <sup>-5</sup>
	O	1.63 ×10 <sup>-5</sup>	1.08 ×10 <sup>-5</sup>	79 ×10 <sup>-5</sup>	1.63 ×10 <sup>-5</sup>	1.08 ×10 <sup>-5</sup>	7.82 ×10 <sup>-5</sup>	1.62 ×10 <sup>-5</sup>	1.07 ×10 <sup>-5</sup>	78 ×10 <sup>-5</sup>
14 mm	A	66℃			70℃			74℃		
	D	3.0	3.3	3.6	3.0	3.3	3.6	3.0	3.3	3.6
	I	2.03 ×10 <sup>-5</sup>	1.35 ×10 <sup>-5</sup>	96 ×10 <sup>-5</sup>	2.12 ×10 <sup>-5</sup>	1.32 ×10 <sup>-5</sup>	96 ×10 <sup>-5</sup>	2 ×10 <sup>-5</sup>	1.32 ×10 <sup>-5</sup>	96 ×10 <sup>-5</sup>
	O	1.71 ×10 <sup>-5</sup>	1.12 ×10 <sup>-5</sup>	81 ×10 <sup>-5</sup>	1.79 ×10 <sup>-5</sup>	1.11 ×10 <sup>-5</sup>	73 ×10 <sup>-5</sup>	1.67 ×10 <sup>-5</sup>	1.11 ×10 <sup>-5</sup>	73 ×10 <sup>-5</sup>

V-Block 내부 형상의 입구영역과 출구영역을 분석한 결과 초기에 선정된 모든 조건에서 속도의 손실이 거의 없음을 알 수 있었다. 이는 V자 유로 내에서 유동액체에 저항을 줄 수 있는 부분이 거의 없기 때문인 것으로 판단되며, 내부 유동을 고려하지 않고 가공상에서 용이한 관의 직경, 중심점 사이의 거리, 사잇각을 선정하여 V-Block을 설계하여도 문제가 되지 않는 것으로 사료된다.

#### 4. 유체제어시스템 하부 유동해석

##### 4.1 유체제어시스템 하부 설계

앞선 연구를 기반으로 실제 유동이 흐르는 유체제어 시스템을 UG를 통해 설계하였다.

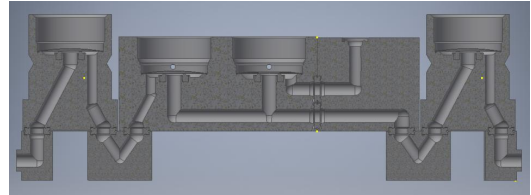


Fig. 5. Internal Object of Fluid Control System

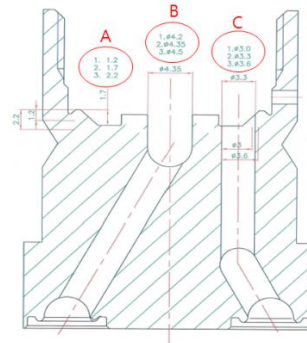


Fig. 6. Condition of Simulation

##### 4.2 해석 조건

모델링데이터에서 처음 유체가 들어가는 부품의 입구, 출구의 직경을 변경하고, 높이를 조절하여 시뮬레이션을 하였다. 작동유체를 질소(N<sub>2</sub>)로 동일하게 주었으며, ρ : 1.138 kg/m<sup>3</sup>, V : 1.3259 m/s 으로 선정하였다. 또한, 유속을 0.1L/m, 1L/m, 10L/m, 50L/m으로 설정하였으며, 아래 Table. 7은 Reynolds 수를 계산한 값이다.

Table 7. Reynold's number of Flow 0.1L/m

	$Re = \frac{\rho VD}{\mu}$	Type
0.1L/min	36.36914163	Laminar flow
1L/min	363.5841446	Laminar flow
10L/min	3636.986901	Laminar flow
50L/min	18184.49807	Turbulence flow

Table 8~11은 각 유량별 시뮬레이션 결과이다.

CFD 계산시 경계조건의 입구와 출구에서 발생할 수 있는 reversed flow를 방지하기 위하여, 입구와 출구에서의 배관길이를 확장하여 유동해석을 진행하였다 [9]. 입구영역은 식(1), (2)를 통해 계산하였다.

Mesh Node는 약 980,000개, Elements는 약 320,000개로 설정하였다.

Fig. 7, 8은 형상을 앞, 뒷 부분으로 나누어 시뮬레이션 하였으며, Fig. 7은 시뮬레이션 중 유량 0.1L/min에서 높이 1.2, 입구직경 4.5mm, 출구직경 3.0mm의 모델을 시뮬레이션 한 그림이다.

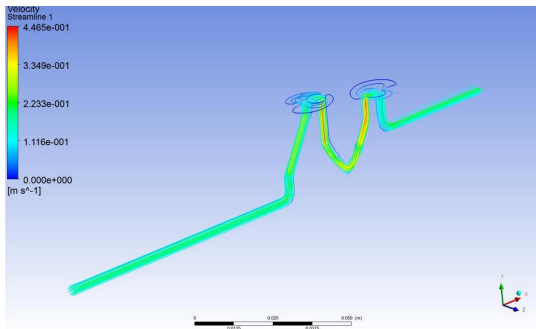


Fig. 7. Result of simulations about front

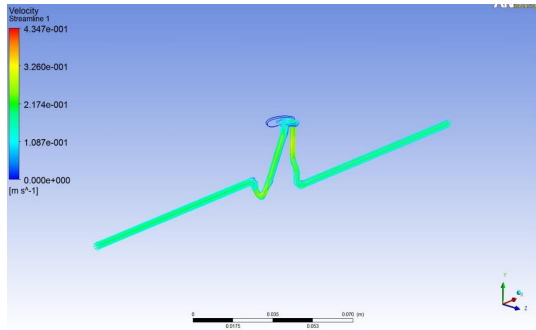


Fig. 8. Result of simulations about back

### 4.3 해석 결과

해석결과는 Table. 8~9와 같으며, Fig. 6에 나타나 있는 모델링 시뮬레이션 조건을 반영하였다.

Table 8. Reynolds number of 0.1L/m

A(mm)	B(mm)	C(mm)	Inlet velocity(m/s)	Outlet velocity(m/s)
1.2	4.2	3.6	0.133	0.148
1.2	4.35	3.3	0.133	0.132
1.2	4.5	3.0	0.133	0.128
1.7	4.2	3.6	0.136	0.128
1.7	4.35	3.3	0.136	0.128
1.7	4.5	3.0	0.136	0.128
2.2	4.2	3.6	0.136	0.130
2.2	4.35	3.3	0.136	0.128
2.2	4.5	3.0	0.136	0.128

Table 9. Reynolds number of 1L/m

A(mm)	B(mm)	C(mm)	Inlet velocity(m/s)	Outlet velocity(m/s)
1.2	4.2	3.6	1.326	1.283
1.2	4.35	3.3	1.326	1.304
1.2	4.5	3.0	1.326	1.280
1.7	4.2	3.6	1.326	1.283
1.7	4.35	3.3	1.326	1.283
1.7	4.5	3.0	1.326	1.282
2.2	4.2	3.6	1.326	1.283
2.2	4.35	3.3	1.326	1.283
2.2	4.5	3.0	1.326	1.283

Table 10. Reynolds number of 10L/m

A(mm)	B(mm)	C(mm)	Inlet velocity(m/s)	Outlet velocity(m/s)
1.2	4.2	3.6	13.263	12.832
1.2	4.35	3.3	13.263	12.811
1.2	4.5	3.0	13.263	12.898
1.7	4.2	3.6	13.263	12.812
1.7	4.35	3.3	13.263	12.913
1.7	4.5	3.0	13.263	12.817
2.2	4.2	3.6	13.263	12.955
2.2	4.35	3.3	13.263	12.825
2.2	4.5	3.0	13.263	12.949

Table 11. Reynolds number of 50L/m

A(mm)	B(mm)	C(mm)	Inlet velocity(m/s)	Outlet velocity(m/s)
1.2	4.2	3.6	66.314	64.160
1.2	4.35	3.3	66.314	64.159
1.2	4.5	3.0	66.314	64.044
1.7	4.2	3.6	66.314	64.159
1.7	4.35	3.3	66.314	64.160
1.7	4.5	3.0	66.314	64.611
2.2	4.2	3.6	66.314	64.233
2.2	4.35	3.3	66.314	64.074
2.2	4.5	3.0	66.314	64.159

각 유량, 직경, 높이에 따라 입구와 출구의 속도차가 크게 변형되지 않음을 알 수 있다.

#### 4.4 해석 검증 실험

유동해석을 검증하기 위해 유량계수 확인 실험을 수행하였다.



Fig. 9. Block Valve CV Test

Fig. 9는 해석을 검증하기 위한 Test Line을 나타내고 있으며, 왼쪽에서부터 유량을 입력하고 중간에 P1, P2 포트에서 압력을 측정하고 나오는 값을 기반으로 유량계수를 비교하였다.

Table 12. Results of CV Test

Temperature (°C)	LPM (stdl/min)	P1 (PSIG)	P2 (PISG)	CV
20°C	0.1	0.04	0.03	0.009
	1	0.38	0.37	0.084
	10	0.75	0.1	0.106
	50	9.67	0.74	0.147

Table. 12는 유량실험 결과를 나타내고 있다. 실험결과값에서 알 수 있듯이 유량계수 값이 클수록 유량이 더 많아진다는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 시뮬레이션 결과처럼 유량이 달라질수록 많은 차이가 발생하지 않는다는 것을 확인하였다.

### 5. 결론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유체제어밸브시스템의 기본이 되는 V-Block의 직경, 각도에 따른 유속의 변화는 큰 차이가 없었다.
2. 이는 V자 유로 내에서 유동액체에 저항을 줄 수 있는 부분이 거의 없기 때문에 판단되며, 내부 유동을 고려하지 않고 가공상에서 용이한 판의 직경, 중심점 사이의 거리, 사잇각을 선정하여 V-Block을 설계가 가능하다.

3. 또한, 전체 하부유동시스템의 시뮬레이션 결과 유량, 직경, 높이에 따른 속도차가 크게 변하지 않음을 알 수 있었으며, 실제 유량과 가장 적합한 10L/m 유량뿐만 아니라 그 보다 적은 유량, 많은 유량에 대해서도 큰 차이를 보이지 않았다.
4. 시뮬레이션뿐만 아니라, 유량계수 확인 실험결과도 시뮬레이션 결과와 유사하게 크게 변하지 않음을 알 수 있었다.
5. 따라서 유체제어밸브시스템의 직경, 높이에 대한 차이보다는 내부의 형상이 유동의 흐름에 큰 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었다.

### References

- [1] J.T. Han, T.H. Lee, D.S. Park, M.R. Son, The Role of Material Gases and Gas Supply System Applied in Semiconductor Process, *The Korean Institute of Gas*, pp. 292-301, 1997.
- [2] G.H. Lee, E.S. Lee, M.K. Lee, J.S. Kim, I.J. Bae, Internal Flow Analysis and Structural Design in Plastic Automatic Control Valve for the Semiconductor Chemical Liquid, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 2012.
- [3] J. A. Davis, M. Stewart, Predicting Globe Control Valve Performance Part 1:CFD Modeling, *ASME Journal of Fluids Engineering*, vol. 124, pp. 772-777, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1490126>
- [4] J. A. Davis, M. Stewart, Predicting Globe Control Valve Performance Part: Experimental Verification, *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 124, pp. 778-783, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1490126>
- [5] Y.R. Lee, S.K. Gi, S.G. Jang, Jang, M. J. Do, A Study on Flow Characteristics with the Variation of Fluid Pipe Line in Hydrogen Regulator, *Korean Society for Precision Engineering*, pp. 939-940, 2017.
- [6] M.H.Chung, S.M. Yang, H.Y. Lee, 3D Flow Analysis of Globe Valve with Air Operated Actuator, *Korean Society For Fluid Machinery*, pp. 7-13, 2005. DOI: <https://doi.org/10.5293/KFMA.2005.8.4.007>
- [7] C. W. Kang, K. S. Yang, "REYNOLDS NUMBER EFFECTS ON TURBULENT PIPE FLOW PART1. MEAN FLOW FIELD AND LOW-ORDER STATISTICS," *Journal of Computational Fluids Engineering*, 2011.
- [8] J. Kim, P. Moin, R. Moser, "Turbulence statics in fully developed channel flow at low Reynolds number," *J. Fluid Mech*, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112087000892>
- [9] S.H. Yoo, B.G. Huh, D.G. Kang, K.W. Seoul, Flow Analysis of Gas Transport Test in the Safety System Piping, *The Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 4153-4157, 2013.

손 창 우(Chang-Woo Son)

[정회원]



- 2014년 2월 : 인천대학교 기계로봇 공학과(공학사)
- 2016년 2월 : 인천대학교 기계공학과(공학석사)
- 2018년 4월 ~ 현재 : 인천대학교 기계공학과 박사과정

<관심분야>

초정밀가공, 정밀금형가공, CAD/CAM/CAE

이 선 용(Sun-Ryong Lee)

[정회원]



- 1997년 2월 : 부경대학교 기계설계학과(공학사)
- 1998년 3월 : 태광 부설연구소 주임연구원
- 2013년 6월 : 유니락 부설연구소 연구소장

<관심분야>

메카트로닉스, 정밀가공, 금속표면처리

서 태 일(Tae-II Seo)

[정회원]



- 1999년 12월 : 인하대학교 기계기술공동연구소 전임연구원
- 2001년 2월 : 한국생산기술연구원 정밀금형팀 선임연구원
- 2003년 7월 : 인천대학교 기계공학과 부교수
- 2012년 10월 : 인천대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

정밀금형가공, CAD/CAM/CAE 통합시스템, 태양열발전

김 광 희(Kwang-Hee Kim)

[정회원]



- 2005년 1월 : 인천테크노파크 기술혁신본부장
- 2005년 4월 : 국민대학교 기계설계학과 공학박사
- 2016년 7월 : 인천경제산업정보테크노파크 디자인지원단장

<관심분야>

정밀금형가공, CAD/CAM/CAE, 동시공학, 생산공학