

# 평균분석을 이용한 설계변수가 포핏 밸브의 유동특성에 미치는 영향

정자영<sup>1</sup> · 최은호<sup>2</sup> · 강영진<sup>1</sup> · 노유정<sup>1</sup> · 임오강<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 기계공학부, <sup>2</sup>부산대학교 기계설계전산화인력양성센터

## Influence of Design Variables on Flow Characteristics of Poppet Valve using Analysis of Means

Ja-Young Jeong<sup>1</sup>, Eun-Ho Choi<sup>2</sup>, Young-Jin Kang<sup>1</sup>, Yoojeong Noh<sup>1</sup> and O-Kaung Lim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ., Busan, 46241, Korea

<sup>2</sup>Pusan Educational Center for Computer Aided Machine Design, Pusan Nat'l Univ., Busan, 46241, Korea

### Abstract

According to the structure, solenoid valve can be categorized as spool valve or poppet valve. While various research on spool valve which has simple structure and fine susceptibility to contamination has been conducted, poppet valve which has less susceptibility to contamination and advantage in a long time operation still need much research because of its complicated structure. In order to design the poppet valve, various parameters such as the diameter of the poppet, the angle of the poppet, the diameter of the disk, the spring stiffness, the spring preload and flow path structure should be considered. Conventional studies on poppet valve usually take only one design parameters and did not much focused on the effect of the parameters on flow characteristics. In this paper, the change of the flow characteristics according to the design parameters of the poppet valve for 3/2Way solenoid valve is analyzed. The previous studies and the results of initial model analysis was referred for the selection of the design parameters. The effects of design parameters on maximum pressure, minimum pressure, and pressure drop was examined using analysis of means(ANOM).

**Keywords** : 3/2Way solenoid valve, poppet valve, design variables, analysis of means(ANOM), CFD

### 1. 서 론

산업에 사용되는 솔레노이드 밸브는 유체 흐름의 통로가 열리고 닫히는 설계방식에 따라 스푼 밸브(spool valve)와 포핏 밸브(poppet valve)로 구분된다. 작동유의 밀봉에 스푼의 홈과 밸브바디의 홈 겹침(overlap)을 이용하여 단순한 구조로 설계가 용이한 스푼 밸브는 미끄럼 운동을 위한 약간의 간격이 장시간 가동할 경우 이물질에 민감하게 반응하여 누유나 손상의 발생 위험이 크다. 반면 포핏 밸브는 하우징(housing)안에 볼(ball), 콘(cone) 또는 디스크(disc) 형태의 밀봉장치를 사용하여 구조가 복잡하지만 밀봉력이 우수하고 이물질에 대한 민

감함이 낮기 때문에 장시간 가동이 필요한 산업에서 활용하기 좋다. 이러한 구조적 장점으로 인하여 스푼 밸브에서 포핏 밸브로 대체하려는 움직임이 나타나고 있다.

솔레노이드 밸브의 성능 개선이나 특성에 대하여 연구된 사례들은 주로 스푼 밸브 중심의 연구가 활발하게 이루어져 왔다. 유동 특성에 대한 연구에 대해 살펴보면 스푼 밸브의 개도길이에 따른 내부 유동 특성을 살펴보고, 산업에 쉽게 적용시키기 위해 개도 길이에 따른 유량계수를 산출하였다(Park *et al.*, 2012). 그리고 캐비테이션을 고려한 스푼해석을 스푼의 원주방향에 슬리브를 가공함에 있어 불균일한 압력분포가 균일하게 하는 역할을 할 수 있도록 Navier-Stokes 방정식과 Reynolds 방정식

\* Corresponding author:

Tel: +82-51-510-2306; E-mail: oklim@pusan.ac.kr  
Received March 14 2017; Revised March 22 2017;  
Accepted May 8 2017

© 2017 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

으로 비교한 연구를 하였다(Hong *et al.*, 2013).

밸브의 구조에 대한 연구동향을 살펴보면 밸브의 응답 성능과 구조 안정성은 슬레노이드 성능과 밸브 바디의 구조에 의해 작동 신뢰성이 향상 된다는 연구사례가 있는데 이것을 최적화하기 위해 스펴밸브의 구멍의 높이, 바디 중간 원통의 너비, 커버의 두께를 설계변수로 하여 최적의 모델을 제안하였고(Kim *et al.*, 2013), 스펴의 형상을 변경하여 스펴의 축 방향에 작용하는 힘을 감소시키는 방법을 제안하였다(Lisowski *et al.*, 2013). 또 스펴의 각도를 변경하여 스펴각도가 60°일 때 최적의 유량 형성되는 것을 확인하고 다른 각도에서 유량 특성이 낮아지는 원인을 분석하였다(Lee *et al.*, 2014). 직동형 포핏 밸브의 특성 해석에서는 포핏각, 밸브시트 지름, 스프링 강성, 스프링 예하중을 변화시키면서 실험값과 시뮬레이션 값을 비교하여 타당성을 검증하고 설계사양에 안정되게 도달하기 위한 요소를 확인하였다(Choi *et al.*, 2002). 그리고 드레인 오리피스를 갖는 포핏 밸브의 상대 안정도에 관한 연구에서는 포핏의 변위와 각도가 포핏 밸브의 안정도에 미치는 영향을 확인하고 유도된 안정도 판별식을 고찰하였다(Yun *et al.*, 2010). 마지막으로 포핏형상이 직동형 압력 릴리프 밸브내의 유동에 미치는 영향에서는 포핏의 형상과 열립량에 따른 유선과 압력 분포 및 포핏에 작용하는 힘을 조사하고 열립량이 커질수록 포핏에 작용하는 힘이 감소하는 경향이 유압유의 속도가 높아져 유동력의 영향이 증가하기 때문인 것을 추정하고 영향성을 확인하였다(Shin *et al.*, 2014). 선행연구에서 살펴보면 최적설계에 활용하기 위한 스펴 밸브의 구조와 유동특성에 대한 연구는 활발하게 이루어져 오고 있으나 포핏 밸브의 구조와 유동특성에 대해서는 여전히 많은 연구가 필요하다.

본 연구에서는 최대유량이 25ℓ/min인 포핏 밸브를 대상으로 하였다. 기존의 구조나 유량의 특성에 대한 연구들은 밸브 시트의 내경, 유로의 각도, 유로의 넓이, 스프링 탄성, 포핏각도 등 설계변수를 독립적인 상황에서 고려하여 전산해석을 수행하였다. 독립적으로 고려된 단일 설계변수로 설계를 진행하기에는 실제 설계에서는 형상적인 제약이 발생할 가능성이 높다. 그러므로 설계를 수행함에 있어 다양한 설계변수를 독립적으로 고려하여 실제 설계에 대한 기초로 활용할 수 있도록 성능에 영향을 미치는 주효과 인자를 확인하고 밸브설계에 핵심이 되는 설계변수를 평균분석으로 파악하여 효율적으로 설계가 가능하도록 영향을 분석하였다. 전산유동해석은 ANSYS CFX 16.0을 사용하였다.

## 2. 포핏 밸브의 구조 및 작동원리

연구대상으로 선정된 포핏 밸브는 Rexroth의 제품(Rexroth

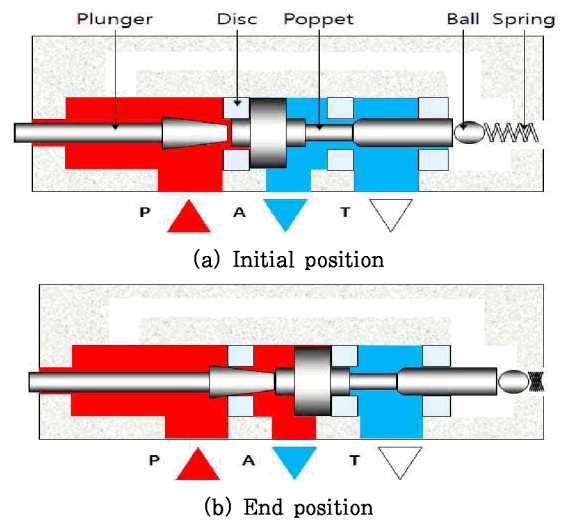


Fig. 1 Actuation principle of poppet valve

Bosch Group Catalogue, 2007)을 사용하였다. 포핏 밸브를 구성하는 요소로 유체가 흐르는 밸브 바디와 슬레노이드가 작동하면 포핏의 움직임을 제어하는 플런저, 유체를 제어하는 포핏, 포핏이 움직일 때 밀봉을 담당하는 디스크 그리고 최대 개도 길이에서 포핏을 복귀시키는 체크밸브로 구성된다. Fig. 1은 포핏 밸브의 작동 원리를 나타낸 것이다. 3/2Way 슬레노이드 밸브는 P, A, T 세 개의 포트가 구성되고, 이중 두 개의 포트가 연결되어 유체가 작동하고, 하나의 포트는 드레인 포트가 사용된다. 비통전시 슬레노이드 밸브의 초기 위치는 Fig. 1(a)와 같다. 비통전 상태에서 밸브 바디의 내부에 유체가 머물러 있는 상태인데 통전이 되면 플런저가 포핏을 밀어주게 되고, P 포트에 유입된 작동유는 포핏을 최대 개도 길이까지 밀어주게 된다. 최대 개도 길이까지 이동한 포핏은 T포트 방향의 디스크를 밀봉하게 되고 P포트에 유입된 작동유가 A포트로 토출되게 한다. 이러한 모습은 Fig. 1(b)에서 확인이 가능하다. Fig. 1(b)에서 비통전으로 슬레노이드가 전환되면 체크 밸브에 의해 포핏이 초기 위치로 복귀하게 되고, 이러한 과정이 반복되면 작동유가 P-A포트로 이동하거나 A-P포트로 이동할 수 있게 된다.

## 3. 유동해석

### 3.1 유동해석 설정

유동영역의 요소망(Mesh) 설정은 전체 요소망의 최소 크기는 0.01mm로 지정하고 영역별 요소망 설정에서는 포트에 대해서는 육면체 요소망을 적용하여 요소망 크기를 0.5mm로 설정하고, 인플레이션 설정에서 각층의 최대 두께를 0.5mm로 하였다. 그리고 나머지 유체영역에는 사면체 요소망을 적용하고

요소망의 크기는 0.3mm를 설정하였다. 디스크, 포핏, 플런저와 같은 고체 영역은 유체영역과 같은 사면체 요소망을 사용하면서 요소망의 크기는 0.5mm로 설정하였다. 이때 생성된 요소망의 노드는 약 120만개가 생성되었고, 요소는 약 370만개가 생성되었다.

해석조건은 최대 개도 길이(1.63mm)에서 단동 정상상태(Steady state)의 유동해석을 진행하기 위하여 경계 조건 설정을 Table 1과 같이 설정하였다. P포트를 8.29m/s의 유입구 조건으로 설정하고, A포트는 토출구 조건으로 0 을 설정, T포트에 오픈링 조건으로 0Pa를 설정하였다. 밸브 내부에 흐르는 작동유의 특성은 Table 2와 같다. 작동유의 밀도는 879 kg/m<sup>3</sup>이고, 동점성은 0.04kg/ms의 특성을 가지는 오일이다. 밸브에서의  $k-\epsilon$  모델을 사용해도 충분히 유동이 표현된다는 밸브 유동 연구를 참고하여 난류모델을  $k-\epsilon$ 으로 설정하여 전산 해석을 수행하였다(Lisowski *et al.*, 2013; Amirante *et al.*, 2014).

Table 1 Boundary conditions

Boundary	Condition	Unit	Value
P port	Inlet	m/s	8.29
A port	Outlet		0
T port	Opening	Pa	0

Table 2 Material properties of Hydraulic Oil HLP 46

Property	Symbol	Unit	Value
Density	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	879
Dynamic viscosity	$\mu$	kg/ms	0.04

### 3.2 수송방정식

CFD(computational fluid dynamics)에서 질량, 운동량, 에너지 등의 보존에 대한 일반 수송방정식은 유한체적법(FVM, finite volume method)을 기반으로 전산해석을 수행한다. 일반적인 수송방정식(transport equation)에 대한 식은 다음과 같다(An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, 2015).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi V \cdot dA = \oint_A \Gamma \cdot \phi \cdot dA + \int_V S_\phi dV \quad (1)$$

여기서,  $\phi$ 는 질량당의 변수,  $\Gamma$ 는 확산계수,  $S$ 는 체적력으로 정의된다. 이 식에서 각항이 의미하는 것은 우선 좌변항의 첫번째항은 비정상항이고, 두 번째 항은 대류항이다. 우변항에서

첫 번째항은 확산항을 의미하고, 두 번째항이 의미하는 것은 체적력에 대한 일반항이다. 좌변항에서 비정상항은 유체요소들의  $\phi$ 의 증가율을 대류항은 유체요소로부터의  $\phi$ 의 유출률을 의미한다. 우변항에서 확산항은 확산으로 인한  $\phi$ 의 증가율을 의미하고, 일반항은 소스(체적력)로 인한  $\phi$ 의 증가율을 의미한다. 소스항은 각각의 방정식에서 다르게 적용되므로 공통적이라고 말할 수는 없을 것이다. 또 액체와 저속으로 흐르는 기체는 비압축성 유체로 취급되므로 밀도가 변하지 않고 따라서 에너지 방정식을 질량보존 및 운동량 보존 방정식과 연계시킬 필요가 없다. 많은 경우의 유동장은 질량보존과 운동량 보존 방정식만으로 해를 구할 수 있다.

### 3.3 초기모델해석

최대 개도 길이에서 정상상태 유동해석에서 P포트로 유입된 작동유가 A포트로 토출되는 과정의 압력 분포 결과는 Fig. 2와 같다. P포트로 유입된 작동유는 격인 유로를 따라 플런저가 작동하는 챔버로 흘러들어 가게 된다. 작동유의 압력은 플런저가 작동하는 챔버로 흘러들어 가면서 압력이 감소하는 경향이 나타난다. 플런저가 작동하는 챔버에서 디스크로 작동유가 빠져 나가면서 압력의 분포가 한번 더 감소하는 것을 확인할 수 있다. 디스크로 이동한 작동유는 토출포트인 A포트로 이동하면서 다시 압력이 감소하게 된다. 압력분포에서 최대압력이 발생한 지점은 유입포트에서 유로가 처음 꺾이는 영역에서 발생하였고, 최소 압력은 디스크를 통하여 A포트로 작동유가 흘러나가면서 발생한 것을 확인할 수 있다.

P포트에서 A포트로 작동유가 흐르면서 발생한 속도의 경향성 확인은 Fig. 3을 참고할 수 있다. 베르누이 정리를 적용해 보면 처음 P포트로 유입된 작동유는 A포트로 빠져나가기 위하여 격인 유로 방향으로 이동하게 된다. 이 구간에서 각도가 큰 하단 유로에서 보다 각도가 작은 상단의 격인 유로에서 상대적으로 유속이 빠르게 발생한다. 플런저가 작동하는 챔버로 작동유가

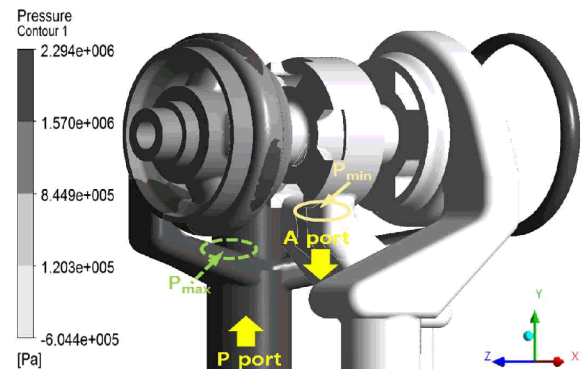


Fig. 2 Pressure distribution at isometric view

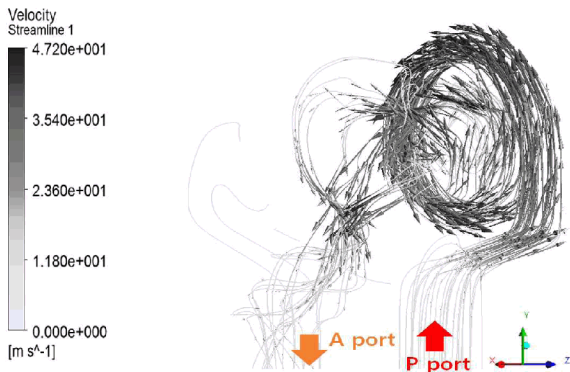
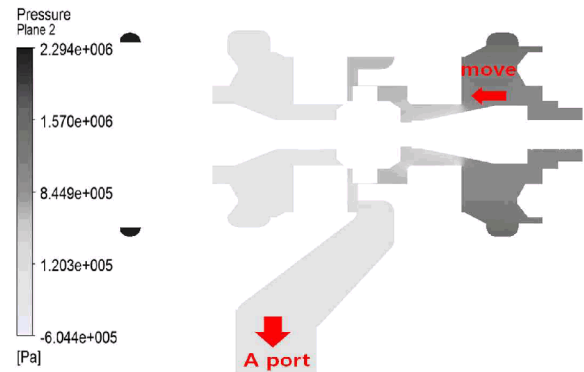
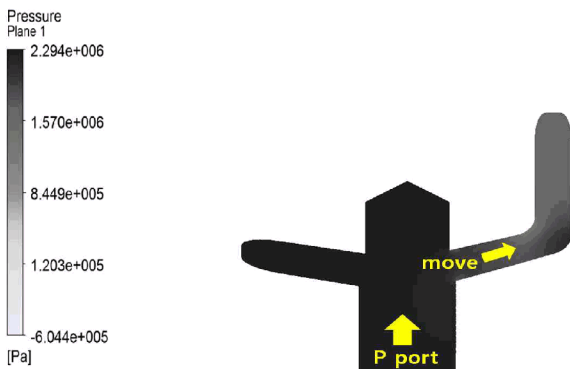


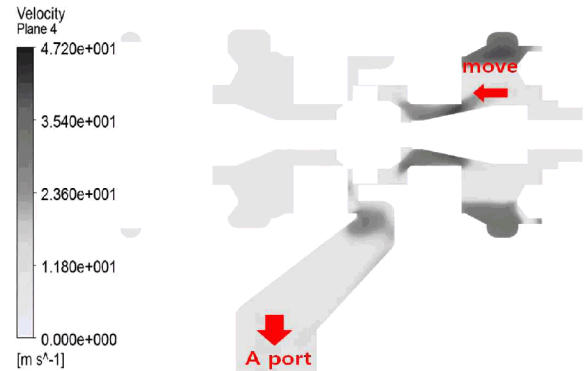
Fig. 3 velocity vectors on the stream lines of PA flow path



(a) Pressure distribution

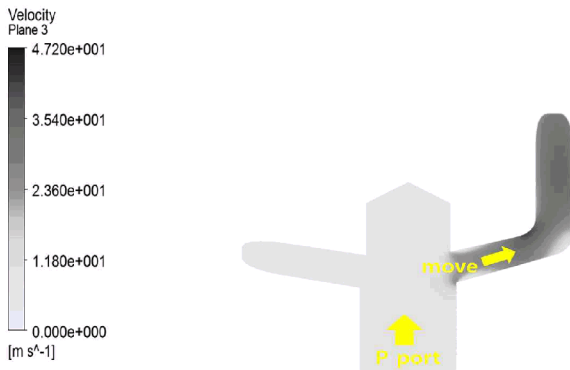


(a) Pressure distribution



(b) Velocity distribution

Fig. 5 Pressure and velocity distribution on Y-Z plane of A port



(b) Velocity distribution

Fig. 4 Pressure and velocity distribution on Y-Z plane of P port

홀러 들어가면서 구조의 영향으로 압력은 감소하는 반면 해당 영역에서의 속도는 빠르게 증가한다. 빠르게 증가한 속도의 영향으로 플런저가 작동하는 챔버 안에서 유체는 한방향으로 회전하면서 내부를 채우게 되고 P포트로 유입된 압력들에 비하여 상대적으로 낮은 압력의 분포를 가지게 된다. 챔버 내부를 채운 작동유의 속도는 유입될 때보다 안정되면서 속도가 낮아지게 된다. 챔버 내부를 채우던 작동유는 A포트로 토출되기 위하여 디스크를 지나가게 되는데 챔버보다 디스크의 내경이 작아 작동유가 집중되면서 유속이 빨라지며, 상대적으로 압력

분포가 챔버에서 보다 낮은 압력이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 디스크를 거쳐 흐르는 작동유는 토출유로인 A포트로 빠져나가는 과정에서 디스크의 측면 홀이 토출유로보다 작은 형상이기 때문에 일시적으로 작동유가 집중되었다가 빠져나가는 모습을 확인할 수 있다. 좁은 영역에서 넓은 영역으로 작동유가 이동하고 유체가 챔버의 형상을 따라 한방향으로 회전하면서 이동하였기 때문에 A포트로 토출되면서 와류가 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4에서는 P포트의 Y-Z단면에 대한 압력과 속도의 분포를 살펴볼 수 있다. Fig. 4(a)는 P포트의 유입된 압력이 나타난 Y-Z단면 형상이다. P포트로 유입된 압력은 곡면을 거치면서 부분적으로 압력이 감소하는 경향이 나타난다. 유입된 압력의 속도 변화는 Fig. 4(b)에서 확인 가능하다. P포트로 작동유가 유입된 후 꺾인 형상을 지나면서 속도가 증가한다. 작동유의 방향이 바뀌면서 유입된 작동유의 속도에 비하여 부분적으로 속도의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 P포트로 유입된 작동유가 챔버로 이동하면서 A포트로 토출되기까지의 입력과 속도 분포를 확인하기 위한 것이다. Fig. 5(a)는 A포트의 Y-Z단면에 대한 압력 분포인데, 챔버로 유입된 작동유가 디스크를 거치면서 압력이 감소하게 되고, 토출

되면서 상대적으로 압력이 더 감소되는 경향을 확인할 수 있다. 이러한 현상을 확인하기 위하여 속도 분포가 나타난 Fig. 5(b)를 참고하면 P포트에서 유입된 포트는 밸브 바디의 형상을 따라 내부 챔버에 작동유를 채우게 되고 플런저가 작동하는 챔버가 채워짐에 따라 디스크를 거쳐 A포트로 토출된다. 챔버에 유입된 작동유는 밸브 바디 형상을 따라 한방향으로 회전을 하면서 플런저 주변영역에서는 속도가 감소하면서 속도 분포가 낮아진다. 챔버보다 좁은 디스크 내경을 지날 때 속도가 증가하게 되는데 작동유가 토출구인 A포트로 가면서 다시 작동유는 속도 분포가 감소하는 유사한 속도 분포를 가진다.

### 3.4 설계변수 선정

직동형 포핏 밸브의 특성 해석 연구에서 밸브의 안정성에 영향을 크게 미치는 설계변수로는 포핏각, 시트직경, 스프링 강성(Choi *et al.*, 2002)으로 선정할 것을 참고하여 초기모델 해석에서 입력이나 유속의 변화가 크게 나타나 응력집중이나 캐비테이션의 위험이 있는 영역을 함께 고려하여 설계변수를 선정하였다. 설계변수 선정을 위하여 다양한 구조를 고려해야 하는데 본 모델에서는 스프링 강성과 스프링 예하중에 대한 실험값 측정이 제한적이고, 포핏의 각도는 디스크의 내경을 변경

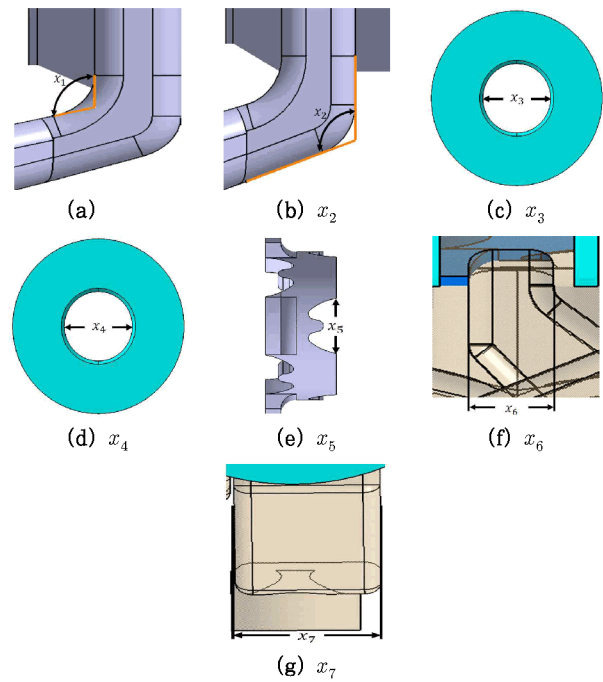
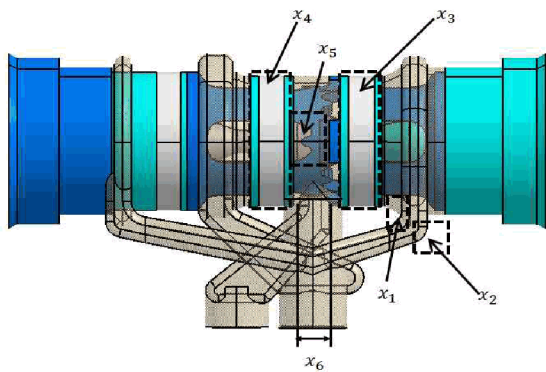


Fig. 7 Design variables

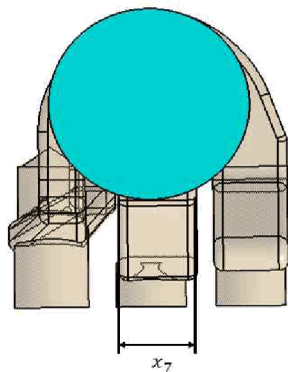
할 때 밀봉을 위하여 포핏의 지름이 바뀌고 이것과 함께 각도에도 변화가 발생하여 설계변수로 사용하기 제한적이었다.

Fig. 6에서는 포핏 밸브의 설계변수 위치이다. 정면에서 확인할 가능한 것은 Fig. 6(a)와 같다. 여기서는 유입구의 각도, 디스크, 토출부의 유로의 두께의 설계변수 위치를 확인 가능하다. Fig. 6(b)는 측면에서 바라본 포핏 밸브의 형상이다. 측면에서는 토출부의 유로 넓이 변경에 대한 설계변수 위치를 확인 가능하다.

Fig. 7은 설계변수의 상세도이다. Fig. 7(a)는 유입구의 상측 각도변화이고, Fig. 7(b)는 유입구의 하측 각도변화로 두 설계 변수는 각도에 대한 것이다. Fig. 7(c)는 프론트 디스크의 내경이고, Fig. 7(d)는 센터 디스크의 내경이다. Fig.



(a) Front side view



(b) Left side view

Fig. 6 Side view of poppet valve

Table 3 Design variables of Poppet valve

Design variable	Symbol	Value		
		L/B	Initial	U/B
Upper angle of curve line for inlet(°)	$x_1$	96	106	116
Lower angle of curve line for inlet(°)	$x_2$	90	110	130
Front disc bore(mm)	$x_3$	5.35	6.35	9.35
Center disc bore(mm)	$x_4$	5.35	6.35	9.35
Side hole offset with M hole disc(mm)	$x_5$	4.00	5.00	6.00
Thickness of fluid path for outlet(mm)	$x_6$	2.50	3.50	4.50
Width of fluid path for outlet(mm)	$x_7$	7.50	8.50	9.50

L/B : Lower bound, U/B : Upper bound

7(e)는 M홀 형상의 디스크의 측면 홀 오프셋량을 설계 변수로 지정한 것이고, Fig. 7(f)는 토출부 유로의 두께와 Fig. 7(g)는 토출부 유로의 넓이는 토출부에 대한 설계변수이다. 각각의 설계변수에 대한 상하한 치수는 솔레노이드가 밸브 바디와 연결되는 직경에 영향이 없는 범위 내에서 선정되었고, 유입구 각도와 디스크 내경의 지름, 측면 홀 오프셋량, 토출부의 폭과 두께는 Table 3과 같다.

#### 4. 설계변수에 따른 영향분석

##### 4.1 해석결과

형상제약을 고려하여 선정된 7개의 설계변수에 각각 상한 경계와 하한경계를 두고 독립적으로 변화되는 설계변수에 대하여 전산해석을 수행한 결과는 Table 4와 같다.  $x_i$ 를 제외한 나머지 설계변수는 초기값을 유지하도록 하였다. 최대 압력( $P_{max}$ )은 포핏이나 밸브바디에 응력집중을 일으킬 수 있는 요소로, 응력집중이 발생할 경우 포핏의 처짐이나 밸브 바디의 파손에 영향을 미칠 수 있다. 최소압력( $P_{min}$ )은 국부적인 지점에서 압력의 급격한 강하로 인해 기포가 되면서 발생한 기포가 다시 압력의 상승으로 터지면서 산란되는데 여기서 소음 및 진동이 발생할 가능성이 있다(Park *et al.*, 2011; Shin *et al.*, 2014). 최소압력의 기준은 일반적으로 해당 유체의 포화 증기선도를 통하여 포화증기압 이하로 떨어질 때 캐비테이션이 발생할 수 있다고 기준으로 하는데 HLP 46의 포화증기선도 확보에 대해 제한이 발생하여 여기서는 최소압력을 전산해석

에서 측정된 최소압력으로 가정하였다. 압력강하( $\Delta P$ )는 P포트와 A포트 단면에서의 압력 차이로 측정하였으며, 압력강하는 밸브에 흐르는 유량을 제어하는 것과 연관이 크다. 같은 크기의 밸브로 많은량의 유체를 수송하려면 밸브에서의 유체제어량이 커질 필요가 있다. 따라서 유체속도에너지 손실과 밸브 내부에서 유체가 방향을 변화시킬 때 생기는 난류 등에 의한 손실을 유체 제어에 적극 이용하는 것이다(Park *et al.*, 2003). 유입구의 상부 각도( $x_1$ )를 변경한 경우에서 설계변수의 치수를 감소시켜 보면 최대압력과 최소압력, 압력강하 변화가 초기모델에서 약 1% 수준의 변화를 보인다. 유입구 상부의 각도를 증가시킨 결과의 압력변화는 최대압력과 압력강하에서 압력이 약 1% 증가하고, 최소압력에서는 약 8%증가하는 경향이 나타났다. 유입구의 하부각도( $x_2$ )를 변경한 경우 각도를 감소시켰을 때, 최대압력과 압력강하는 약 0.5%의 증가가 나타났다. 하지만 최소압력에서는 유입구 상부의 각도를 줄인 것과 달리 약 4%의 압력 증가가 나타났다. 각도를 증가시킨 결과에서 살펴보면 최대 압력과 압력강하는 약 3%가 증가했고 최소압력은 약 0.5% 감소한 것을 확인할 수 있다. 프론트 디스크의 내경( $x_3$ )을 변경한 경우 설계변수를 감소시키면 최대압력은 초기모델에 비해 약 56% 증가하였고, 최소압력은 300% 이상 증가한 것으로 나타났다. 그리고 압력강하는 약 58%의 증가가 나타났다. 설계변수를 증가시킬 경우 최대압력과 압력강하에서 약 13% 압력감소 효과가 나타났고 최소압력에서는 약 1%의 변화가 나타났다. 센터 디스크의 내경( $x_4$ )을 변경한 경우에는 내경을 줄일 때 앞선 경우와 달리 압력이 1~2% 감소한 경향이 나타났다. 내경을 늘릴 경우 압력의 변화는 최대압력과 압력강하에서 약 2%의 압력 증가가 나타났고, 최소압력에서는 압력이 약 9% 증가하였다. M홀 디스크의 측면 홀 오프셋량( $x_5$ )을 조절한 경우에서 설계변수를 줄이면 최대압력과 압력강하가 약 9% 증가하고, 최소압력의 압력변화는 약 36%가 증가하는 것으로 나타난다. 또한 설계변수를 늘리면 최대압력과 압력강하는 약 5%가 감소하고 최소압력은 약 16%가 감소하였다. 토출유로의 두께( $x_6$ ) 변경에서 설계변수가 줄어들었을 때 최대 압력과 압력강하는 약 10%의 압력이 증가하는 것이 확인되었고 최소압력은 약 68%가 증가했다. 그리고 설계변수를 늘렸을 때 압력이 감소하는 경향이 나타나는데 최대압력과 압력강하에서는 약 5%가 감소하고 최소압력은 약 3%의 압력이 감소하였다. 토출유로의 폭( $x_7$ )에 대한 치수가 변경을 살펴보면 설계변수가 줄었을 때, 최대압력과 압력강하의 압력은 약 5% 증가하였고 최소압력은 약 20%가 증가한 것을 확인할 수 있다. 설계변수를 늘릴 경우 최대압력과 압력강하가 약 1% 감소하였고, 최소 압력은 약 15% 감소하는 것으로 나타났다.

Table 4 Analysis results

Design variables	Classification	$P_{max}$		$P_{min}$		$P$	
		Value (MPa)	P/C (%)	Value (MPa)	P/C (%)	Value (MPa)	P/C (%)
	L/B	2.322	1.20	-0.601	-0.54	2.250	1.03
	U/B	2.317	1.01	-0.654	7.98	2.249	0.95
$x_2$	L/B	2.307	0.56	-0.631	4.43	2.239	0.51
	U/B	2.378	3.64	-0.601	-0.49	2.305	3.47
$x_3$	L/B	2.601	56.94	-2.654	339.07	3.535	58.69
	U/B	1.997	-12.95	-0.609	0.83	1.931	-13.30
$x_4$	L/B	2.278	-0.70	-0.590	-2.40	2.212	-0.71
	U/B	2.358	2.78	-0.661	9.40	2.291	2.86
$x_5$	L/B	2.514	9.57	-0.828	36.99	2.443	9.68
	U/B	2.168	-5.52	-0.505	-16.43	2.101	-5.69
$x_6$	L/B	2.540	10.71	-1.016	68.16	2.472	10.96
	U/B	2.166	-5.60	-0.581	-3.88	2.110	-5.25
$x_7$	L/B	2.418	5.38	-0.727	20.35	2.350	5.52
	U/B	2.260	-1.50	-0.509	-15.78	2.194	-1.52
Initial		2.294	-	-0.604	-	2.227	-

L/B: Lower bound, U/B: Upper bound, P/C: Percentage change

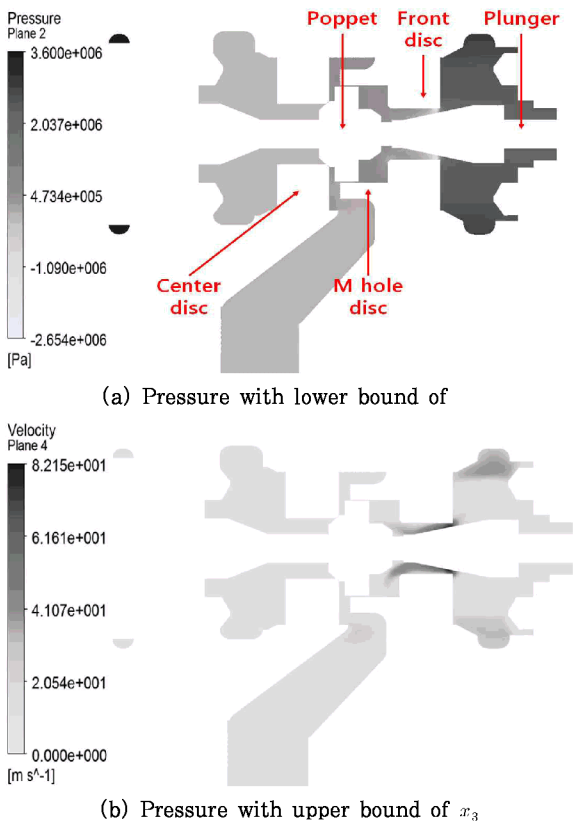


Fig. 8 Comparison of pressure by Y-Z Plane on A port of  $x_3$

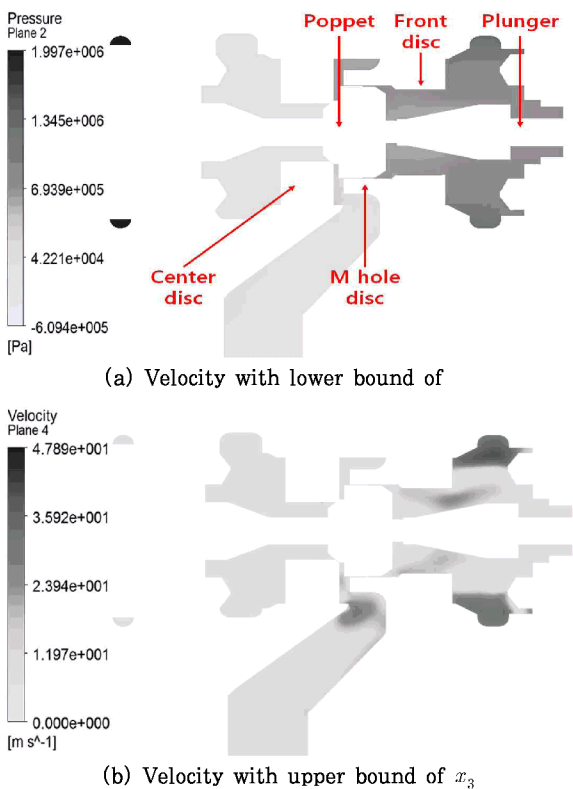


Fig. 9 Comparison of velocity by Y-Z Plane on A port of  $x_3$

설계변수 변경으로 인한 결과를 살펴보기 위하여 가장 변화가 크게 나타난 프론트 디스크 내경에 대한 결과는 Fig. 8, Fig. 9와 같다. 프론트 디스크의 압력분포는 Fig. 8과 같다. Fig. 8(a)는 프론트 디스크의 하한경계를 변경한 압력분포인데, 초기 모델보다 프론트 디스크가 줄어들면서 밀봉을 위해 종속적으로 프론트 디스크 방향의 포핏의 형상도 줄어들었다. 프론트 디스크를 지나가기 전의 영역에서 초기모델의 압력보다 50%이상 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 유입되는 작동유가 프론트 디스크를 지날 때 구조에 부하를 줄 수 있음을 의미한다. 또한 플런저 헤드와 줄어든 직경사이에서 대기압 이하의 영역이 나타나는 것을 보아 압력차이가 크게 나타나면서 캐비테이션 발생의 위험도 발생한 것으로 추정된다. 프론트 디스크의 내경을 크게 하였을 때 압력분포는 Fig. 8(b)와 같다. 프론트 디스크의 내경을 늘리면서 밀봉을 유지하기 위하여 포핏의 직경도 함께 증가하였다. 작동유가 흘러가는 프론트 디스크의 영역이 증가하면서 압력이 완화되어 유입되는 챔버의 압력이 초기모델보다 10%이상 완화되는 경향이 나타났다. 직경을 줄인 모델에서와 달리 플런저 헤드와 프론트 디스크 사이에서 급격한 압력 차이는 나타나지 않았다. Fig. 9에서는 프론트 디스크의 설계변수 변경에 대한 속도 분포 변화를 확인할 수 있다. Fig. 9(a)는 직경이 줄었을 때의 속도 분포이다. 직경을 줄였을 때 플런저와 줄어든 프론트 디스크의 내경사이에서 급격한 속도 증가 분포를 확인할 수 있다. 급격한 속도 차이는 급격한 압력의 차이가 발생할 가능성이 있다는 것이다. 이것은 기포가 발생할 가능성이 있다는 것이고 이렇게 발생한 기포는 작동유가 고속으로 움직일 때 분해되면서 캐비테이션이 발생할 위험을 동반한다. Fig. 9(b)는 디스크 내경을 늘렸을 때 속도의 분포이다. 초기모델과 비슷한 수준의 속도 분포가 나타났다. 초기모델이나 설계변수의 하한값을 조절한 경우와 달리 플런저 헤드와 있는 챔버 영역에서 속도변화가 프론트 디스크의 내경이 커지면서 집중되었던 속도 분포가 사라진 것을 확인할 수 있다. 설계변수를 변경할 때 상한경계에서 개선효과를 확인할 수 있는데, 유로 각도에 비해서 디스크 내경이나 유로의 치수에서 효과가 크게 나타났다.

#### 4.2 평균분석

인자간의 영향을 파악하는데 평균분석(analysis of means, ANOM), 분산분석(analysis of variance, ANOVA), 회귀 분석(regression analysis) 등과 같이 다양한 분석방법이 존재하는데, 해당 연구에서는 각 인자들의 상대적인 중요성을 확인하기 위해 평균분석을 사용하였다. 평균분석에서 그래프의 기울기가 클수록 주효과 인자로 판단하게 되는데 설계변수 변경에 따른 해석결과를 평균분석으로 확인하면 Fig. 10과 같다. 평균

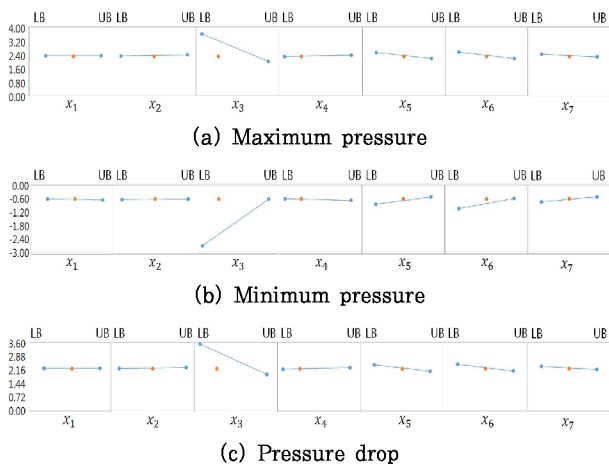


Fig. 10 Results of analysis of means

분석은 설계변수에 변화를 주었을 때 초기모델의 압력과 상한한 값의 차이를 기울기로 보여주는 분석방법이다. 최대압력의 평균 분석 결과는 Fig. 10(a)와 같다. 최대압력에 영향을 크게 미치는 설계변수는  $x_3, x_5, x_6$ 로 나타났고, 나머지 설계변수는 그 영향이 미미하게 나타났다. P포트로 유입되는 유로의 각도를 조절하였을 때 최대압력의 개선이 예상되었으나  $x_1, x_2$ 의 경우에서 최대압력의 변화가 미미한 수준으로 나타난 것이 확인되었다. 디스크의 내경 중  $x_4$ 의 경우는 최대 개도 길이에서 포핏이 T포트로 흐르는 작동유를 막아주는 위치에 있는 디스크의 결과로 작동유가 흐르는 영역에서 토출구와 직접적으로 연관이 없는 디스크의 경우 내경을 조절하더라도 그 영향이 미미한 것을 확인할 수 있었다. 최소압력의 평균분석 결과는 Fig. 10(b)와 같고, 주효과를 가지는 설계변수로는  $x_3, x_5, x_6, x_7$ 이 나타났다. 주의해야 할 점은  $x_3$ 의 경우 최소압력을 개선하는 것에 있어서 설계변수를 증가시켜 최소압력을 감소시킬 때 그 영향이 초기모델과 비슷한 수준으로 나타난 것으로  $x_3$ 의 증가는 최소압력을 개선할 때 그 영향이 미미한 것으로 확인되었다. 하지만 설계변수를 줄일 경우 최소압력이 급격히 증가한 것을 확인할 수 있었는데, 이것은 본 모델에서 프론트 디스크의 내경을 초기모델보다 작게 만들 경우에 캐비테이션의 발생위험이 급격하게 증가할 수 있어 설계변수를 줄일 때 다른 설계변수들 보다 더욱더 주의해야 함을 의미한다. P포트 유로의 각도 중  $x_1$ 을 증가시키면 미미하지만 최소압력이 증가하는 경우가 발생하였다. 전산해석 결과로 살펴보면 이것은 수치 오차로 고려할 수 있는 수준이다. Fig. 10(c)는 압력강하에 대한 평균분석이다. 압력강하에서 주효과를 가지는 설계변수는  $x_3, x_5, x_6, x_7$ 로 나타났다. 다른 세 변수는 변화가 미미한 수준이었고, 최대압력에서처럼  $x_3$ 의 설계변수가 상한경계의 영향 보다는 하한경계에서 영향력이 더 큰 것을 확인할 수 있다.

### 4.3 결과분석

해석결과와 평균분석을 종합하여 확인해 보면 유입구의 상부 각도( $x_1$ )를 줄인 경우 그 변화는 미미한 수준으로 나타났는데 이는 전산해석의 수치 오차로 판단할 수 있고, 수치 오차로 판단하는 것이 아닐 경우 실제 모델에 적용하더라도 그 영향이 다른 설계변수들에 비하여 상대적으로 미미할 것으로 예상된다. 유입구 상부 각도( $x_1$ )를 늘릴 경우 최소압력의 변화는 8%의 변화로 수치적으로는 큰 변화가 있었으나 평균분석의 결과를 살펴보면 다른 설계변수들에 비하여 영향도가 미미한 것으로 판단된다.

유입구의 하부각도( $x_2$ )를 변경한 경우 유입구의 상부 각도를 늘린 결과와 상이하고 두 경우 사이의 정확한 상관관계를 확인하기 어렵다. 하지만 평균분석에서 확인해 보면 각도에 대한 변화가 다른 설계변수의 변화들 보다 영향이 미미하여 성능 개선을 목적으로 하는 설계변수에 대해서는 우선 고려되어야 할 사항으로 판단하기는 어려워 보인다.

프론트 디스크의 내경( $x_3$ )을 조절한 경우 Table 4에서와 평균분석에서 모두 가장 큰 영향을 미치는 인자인 것으로 확인할 수 있었다.

센터 디스크의 내경( $x_4$ )을 변경한 결과에서 확인된 것은 프론트 디스크와 같이 작동유가 직접적으로 흐르는 영역 변화가 압력에 큰 영향을 주지만, 센터 디스크와 같이 포핏이 밀봉을 유지하는 구조에서도 설계변수의 변화가 생겼을 때 압력에 영향을 주는 것으로 추정된다. 이는 설계변수가 전체 체적의 변화에 영향을 주면 유체의 체적이 늘었을 때 압력의 감소가 나타나고, 체적이 줄어들면 압력이 증가하는 영향으로 추정된다.

M홀 디스크의 측면 홀 오프셋량( $x_5$ )을 조절한 경우에서 확인할 수 있는 것은 일반적인 포핏 밸브에서는 디스크 내경이나 스프링 강성이 밸브 성능 개선에 가장 큰 영향을 준다고 하지만 연구된 모델과 같이 디스크의 측면에 홀이 있고 해당 홀이 토출 유로와 이어진다면 디스크 내경이나 스프링처럼 밸브 성능에 큰 영향을 미치는 것으로 추정된다.

토출유로의 두께( $x_6$ )나 폭( $x_7$ )을 조절할 경우 압력의 변화에 영향을 주지만 유로의 폭을 조절하는 것보다 두께를 조절하였을 때 조금 더 압력 변화가 큰 것으로 확인되었다.

포핏 밸브 설계에서 최대압력에 영향을 미치는 설계변수는 프론트 디스크 내경( $x_3$ )을 조절할 때 가장 영향이 큰 것을 확인했다. 최소압력에 영향을 미치는 설계변수는 프론트 디스크( $x_3$ )와 M홀 디스크의 측면 홀 오프셋량( $x_5$ ), 토출 유로의 두께( $x_6$ )가 영향이 많은 것으로 나타났다. 압력강하에 대한 영향은



프론트 디스크( )와 M홀 디스크의 측면 홀 오프셋량( $x_5$ ), 토출 유로의 두께( $x_6$ )에 영향이 많은 것으로 확인되었다.

## 5. 결 론

포핏 밸브의 설계를 위해서 모든 설계변수를 고려하여 제작 하는 것이 가장 이상적이나 실제 설계에서는 시간적 제약, 형상적 제약 등 설계에 있어서 다양한 제한 상황이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 유로 각도, 디스크 내경, 유로 치수, 스프링 강성, 포핏 각도 등 다양한 설계 변수 중 형상적 제약이 발생할 때 유로의 각도, 디스크 내경, 유로 치수를 설계변수로 선정하여 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 일반적으로 압력이 작용하는 영역이 넓으면 낮은 부하가 발생할 것이고, 영역이 좁으면 높은 부하가 발생할 것으로 예측할 수 있다. 하지만, 실제 시스템에서 어떠한 영역이 이러한 변화에 민감한지는 확인하기 어렵고 이를 확인하기 위해 최대한 많은 설계변수를 선정하고 인자 간 영향을 분석하여 효율적인 설계변수 선정을 가능하도록 하였다.

유입구의 상측 각도, 유입구의 하측 각도, 프론트 디스크의 내경, 센터 디스크의 내경, M홀 형상의 디스크 측면 홀 오프셋량, 토출부 유로의 두께, 토출부 유로의 넓이와 같이 7개의 설계변수 중 프론트 디스크의 내경을 줄였을 때 최대압력이 가장 많이 감소하였고 프론트 디스크의 내경을 늘렸을 때 최대압력이 가장 많이 증가하였다. 최소압력이 가장 많이 감소된 경우는 M홀 디스크의 측면 홀 오프셋량을 늘렸을 때이고 프론트 디스크의 내경을 줄이면 최소압력이 가장 많이 증가한다. 압력강하가 가장 많이 줄어든 경우는 프론트 디스크의 내경을 줄였을 때 이고, 프론트 디스크의 내경을 늘리면 압력강하가 가장 많이 증가한다.

해당 모델의 전산해석 결과를 평균분석으로 분석하면 설계 변수를 변경하였을 때 프론트 디스크 내경, M홀 디스크의 측면 홀 오프셋량, 토출유로의 두께가 주로 성능의 변화에 민감하게 반응하였다. 프론트 디스크 내경의 치수를 변경함으로써 최대 압력과 압력강하의 변화에 가장 민감한 것으로 나타났다. 프론트 디스크 내경을 조절하여 최대압력과 압력강하를 효과적으로 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 M홀 디스크의 측면 홀 오프셋량과 토출유로의 두께를 변화시키면 프론트 디스크 내경에 비하여 최대압력과 압력강하의 감소 효과는 미미하나 최소압력을 개선하기 위해서는 프론트 디스크 내경 보다 상대적으로 높은 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

전산해석 결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 실험값을 확보 하여 비교해 보면 좋을 것으로 생각되고 또한 실제 설계에서는 설계변수간의 교호작용이 나타날 가능성이 있으므로 교호작용을 고려한 해석을 수행하는 것도 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 예상된다.

## 감사의 글

본 연구는 (주)한영의 일반연구용역과제인 "ME엔진 루브리 케이터용 솔레노이드 밸브 개발"에서 수행되었으며 이에 감사 드립니다(No. 201519320001).

## References

- Choi, Y.H., Yun, Y.N., Ham, Y.B., Jo, J.D. (2002) Characteristics Analysis of Direct-operated Poppet Valve, *Korean Soc. Precis. Eng.*, pp.729~732.
- Lisowski, E., Czyzycki, W., Rajda, J. (2013) Three Dimensional CFD Analysis and Experimental Test of Flow Force Acting on the Spool of Solenoid Operated Directional Control Valve, *Energy Convers. & Manag.*, 70, pp.220~229.
- Hong, S.H., Son, S.I., Kim, K.W. (2013) Comparative Study of the Navier-Stokes Equation & the Reynolds Equation in Spool Valve Analysis Considering Cavitation, *Korean Soc. Tribol. & Lubr. Eng.*, 29(5), pp.275~285.
- Versteeg, H.K., Malalasekera, W. (2015) *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, Hongpub, Seoul, p.549.
- Kim, J.O., Baek, S.H., Kim, T.W., Kang, S.M. (2013) Multi-objective Optimization of Marine 3/2WAY Pneumatic Valve using Compromise Decision-Making Method, *J. Korean Soc. Manuf. Process Eng.*, 12(2), pp.80~89.
- Lee, C.S., Kang, B.S., Ko, S.H. (2014) Study on the Flow Characteristics in Accordance with the Shape of the Spool Pneumatic Solenoid Valve, *Korean Soc. Precis. Eng.*, p.103.
- Park, J.H., Kim, J.M., Lee, C.J., Kang, J.H. (2012) A Study on the Flow Characteristic of High Pressure 3/2-Way Valve for a Ship Engine, *J. Korean Soc. Manuf. Process Eng.*, 11(3), pp.35~40.
- Park, T.J. (2011) Lubrication Characteristics of Laser Textured Parallel Thrust Bearing : Part 3 - Effect of Number of Dimples, *KSTLE*, 27(6), pp.302~307.
- Park, U.H., Lee, H.W., Choi, S.C., Jeng, K.H. (2003) Effects of Control Valve Trim Characteristics due to a Pressure Drop, *Korean Soc. Automot. Eng.*, pp.167~174.
- Rexroth Bosch Group Catalogue (2007) 2/2, 3/2 and 4/2 Directional Seat Valve with Solenoid

- Actuation*, Type M-.SED, RE 22049/07.09.
- Riccardo Amirante, Luciano Andrea Catalano, Carlo Poloni & Paolo Tamburrano** (2014) Fluid-dynamic Design Optimization of Hydraulic Proportional Directional Valves, *Eng. Optim.*, 46(10), pp.1295~1314.
- Shin, M.J., Jeong, Y.H., Park, T.J., Kwon, G.R.** (2014) Influence of Poppet Shape on The Flow of a Direct-Operated Pressure Relief Valve, *Korean Soc. Comput. Fluids Eng.*, pp.84~85.
- Yun, S.N., Jeong, H.H., Seo, J.K., Ham, Y.B.** (2010) A Study on Relative Stability for Poppet Valve with Drain Orifice, *Korea Soc. Fluid Power & Constr. Equip.*, pp.12~17.

---

## 요 지

솔레노이드 밸브는 구조에 따라 스톱 밸브와 포핏 밸브로 구분된다. 구조가 단순하고 오염에 민감한 스톱 밸브에 대하여 연구가 많이 진행되고 있는 반면 오염에 덜 민감하고 장시간 작동에 용이한 포핏 밸브는 구조가 복잡하여 여전히 많은 연구가 필요하다. 포핏 밸브를 설계하기 위해서 고려해야 하는 사항으로 포핏의 직경, 포핏의 각도, 디스크의 지름, 스프링 강성, 스프링 예하중, 유로 구조 등 다양한 설계변수가 있다. 기존 연구에서는 설계변수를 한가지로 선정하여 연구가 진행되었고, 설계변수가 포핏 밸브의 유동특성에 미치는 영향에 대한 연구가 부족하다. 본 논문에서는 3/2Way 솔레노이드 밸브용 포핏 밸브의 설계변수 변화에 따른 유동특성의 변화를 분석하였다. 포핏 밸브의 설계변수 선정은 선행연구된 사례와 초기모델해석결과를 참고하여 진행하였다. 그리고 설계변수에 따른 최대압력, 최소압력, 압력강하의 영향을 평균분석(ANOM)을 사용하여 살펴보았다. 향후 3/2Way 솔레노이드 밸브용 포핏 밸브를 설계할 때 주효과를 파악하여 설계변수 선정에 사용하면 효율적인 설계변수 선정이 가능할 것으로 예상된다.

**핵심용어** : 3/2Way 솔레노이드 밸브, 포핏 밸브, 설계변수, 평균분석(ANOM), 전산유체역학