

압축성 유체용 글로브 밸브의 유량특성 향상에 관한 연구

A Study on the Improvement of Flow Characteristics of the Glove Valve for Compressible Fluid

배지원¹ · 정우영² · 장지성^{1*}

Ji Won Bae¹, Woo Young Chung² and Ji Seong Jang^{1*}

Received: 04 Sept. 2019, Accepted: 29 Sept. 2019

Key Words : Flow Characteristics(유량특성), Flow Passage Shape(유로 형상), Glove Valve(글로브 밸브), Modeling(모델링), CFD(전산유체역학)

Abstract: Glove valves are used for various purposes in the process control field because such valves enable easy control of temperature and pressure. However, such valves are associated with significant loss of pressure and also have the disadvantage of complicating the shape of the cage or plug to facilitate linear flow rate change. In this paper, the shape of the plug, one of the valve flow control elements, was designed to improve the flow characteristics of the glove valve, and then CFD analysis was performed using compressible fluid. The numerical analysis results of the glove valve were analyzed according to the opening ratio and the pressure ratio of the valve. From these results, it was found that the proper notch on the side of the plug contributed to reducing the energy loss of the fluid through the valve and improving the linearity of the valve.

기호 설명

b : critical pressure ratio
 C : sonic conductance, $m^3/(s \cdot Pa)$
 E : total energy, J
 F_1 : SST blending function
 k : turbulent kinetic energy, J
 k_{eff} : thermal conductivity, W/m·K
 \dot{m} : mass flow-rate, kg/s
 P : pressure, Pa
 P_1 : upstream pressure, Pa
 P_2 : downstream pressure, Pa

T : temperature, K
 T_0 : temperature of air at reference conditions, K
 T_1 : upstream temperature of air, K
 t : time, s
 u_i, u_j, u_k : velocity tensor, m/s
 x_i, x_j, x_k : position tensor, m
 ρ : density, kg/m^3
 μ : dynamic turbulent viscosity, Pa·s
 δ_{ij} : kronecker delta
 ω : turbulence frequency, Hz
 τ_{ij} : viscous stresses tensor, N/m^2
 ν_t : kinematic turbulent viscosity, m^2/s
 ρ_0 : density of air at reference conditions, kg/m^3

* Corresponding author: jangjs@pknu.ac.kr

¹ Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

² Ebara Precision Machinery Korea INC., Seongnam-si Gyeonggi-Do 13494, Korea

Copyright © 2019, KSFC

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.

1. 서 론

밸브는 유체의 압력, 온도, 속도 및 이동방향을 제어하기 위한 부품이며 사용용도, 기능, 동작형태에 따라 여러 가지 종류로 분류된다.

그 중 프로세스 제어 분야 등에서 다양한 제어용

부품으로 사용되고 있는 글로브 밸브는 밸브 디스크를 밸브시트에 누르는 동작을 통해서 유로의 크기를 조절하는 밸브로서 구조가 간단하고 정비가 용이하며 광범위한 온도와 압력을 제어할 수 있고, 유로 형태의 설계에 따라 유량 특성을 원하는 형태로 조절할 수 있다. 그러나, 글로브 밸브는 유체가 밸브를 통과할 때의 에너지손실이 크므로 다른 유형의 밸브와 비교하여 동일한 유량을 제어할 때 밸브 외형 사이즈가 커지거나, 압력손실이 크고, 또한, 글로브 밸브의 디스크 변위에 따른 유량 변화를 선형적으로 만들기 위해서는 글로브 밸브 유로를 구성하는 케이지 또는 플러그의 유체 통과 부분 형상을 복잡하게 가공해야 하는 단점이 있다.¹⁻⁴⁾

본 연구에서는 글로브 밸브의 유로 조절 요소 중 하나인 플러그의 유로 형상을 설계 한 후 압축성 유체를 이용한 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 수행하여 개도율 및 밸브 입·출구 압력비에 따른 글로브 밸브의 유동해석 결과를 분석하였고, 이러한 수치해석 결과를 토대로 글로브 밸브의 유량특성을 향상시킬 수 있는 유로 형상 설계 방안을 제시하고자 한다.

2. 밸브 설계

2.1 밸브 구조

Fig. 1은 본 연구에서 대상으로 하는 글로브 밸브의 구조를 나타낸다.

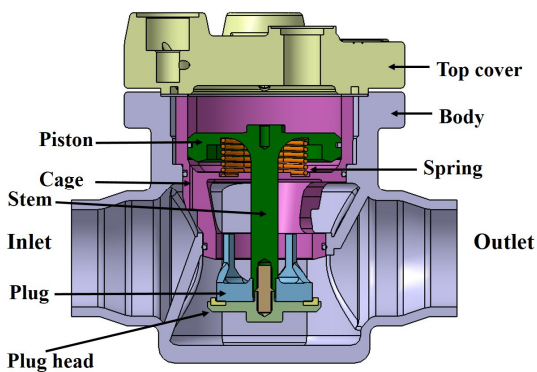


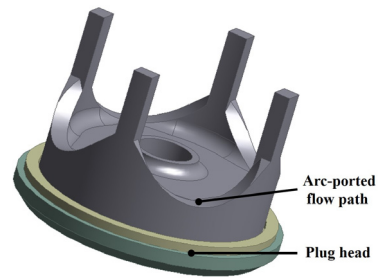
Fig. 1 Structure of a globe valve

Fig. 1에 나타난 글로브 밸브는 단일 시트 형태로써 피스톤(piston), 플러그(plug) 및 플러그 헤드(plug head) 상·하부의 압력차에 의한 힘과 피스톤 하부에 설치한 스프링의 스프링력에 의하여 피스톤, 스템(stem), 플러그(plug) 및 플러그 헤드로 구성된 액추에

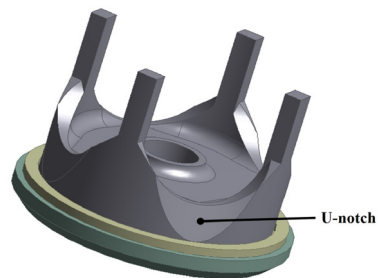
이터를 구동하는 구동력이 발생하므로 액추에이터가 상·하로 이동한다. 이 때 케이지(cage)와 플러그 사이에 형성된 유로를 통해 입구부에서 출구부로 유체가 흘러가게 된다. 구동력이 0(zero)인 초기 상태에서는 플러그 헤드가 케이지 하부에 밀착되어 유로가 폐쇄된다.

2.2 플러그 유로 모델

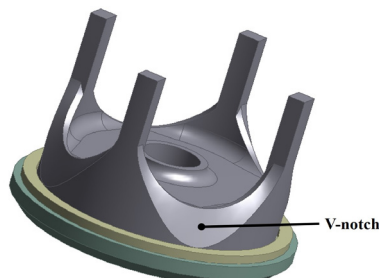
Fig. 2는 본 논문에서 3가지 형태로 모델링 한 플러그 형상을 나타낸다. Fig. 2에 나타난 플러그는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 스템에 연결되어 이동하고, 플러그가 하방향으로 이동하는 변위가 커질수록 케이지와의 거리가 멀어지므로 유체의 통과유로 크기가 커진다. 이러한 유로를 통하여 유체가 흘러갈 때 유체의 에너지 손실이 발생하므로 가능한 유체의 에너지 손실을 줄일 수 있도록 플러그와 케이지 사이의



(a) Arc-ported plug



(b) Arc-ported plug with a U-notch



(c) Arc-ported plug with a V-notch

Fig. 2 Designed shape of plug

Table 1 Physical parameters of the designed valve

Parameters	Value
plug head diameter	59.1 mm
maximum displacement of plug	20 mm
globe valve inlet diameter	50 mm
globe valve outlet diameter	50 mm

유로 형상을 설계해야 한다. Fig. 2의 (a)에 나타낸 원호 형상 플러그(Arc-ported plug)는 기본 모델로서 플러그 측면을 원호 형태로 가공하여 플러그와 케이지 사이에 형성되는 유체 통과 유로가 원호 형태가 되도록 설계하였다. Fig. 2의 (b), (c)는 직경, 전체 높이 등 기본적인 치수는 (a)와 같지만, 그림 (a)의 원호 형상 플러그 측면에 각각 U자형, V자형의 노치를 가공하여 케이지와 플러그 사이를 통과하는 유체의 저항이 달라지도록 설계하였다. Table 1은 설계한 밸브의 주요 치수를 나타낸다.

3. 수치 해석

3.1 지배방정식

밸브 내부 유동 수치 해석에는 압축성 Navier-Stokes 방정식을 적용한 2차원 압축성 정상상태 지배방정식^{5,6)}을 사용하였다. 사용한 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \quad (2)$$

에너지방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + P)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

글로브 밸브는 내부 유로의 형상이 복잡하기 때문에 와류가 많이 발생하며 유선이 복잡하다. 이러한 영역에서는 와류가 발생하는 영역에서의 예측이 정

확하고 복잡한 유선에 대한 수치안정성이 뛰어난 $k-\omega$ SST 난류모델⁷⁾을 사용하였다. 지배방정식은 식 (4), (5)와 같다.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i}$$

$$= \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i}$$

$$= \frac{\gamma}{\nu_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_{\omega 1} \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]$$

$$+ 2\rho(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (5)$$

$k-\omega$ SST 모델은 경계층 안에서는 $k-\omega$ 모델을 이용하여 계산하고 경계층 밖은 $k-\epsilon$ 모델을 이용하여 계산을 수행한다. 식 (5)에 나타낸 F_1 함수가 벽면으로 부터의 거리에 따라 난류 모델을 조절하는 역할을 수행하고 있으며 경계층 안에서는 1이 되고 바깥에서는 0이 된다. 식 (1)~(5)에 사용한 주요한 상수는 Table 2와 같다.⁶⁾

Table 2 Modeling constants

Parameters	Value	Parameters	Value
σ_k	1.0	γ	0.44
$\sigma_{\omega 1}$	2.0	β	0.083
$\sigma_{\omega 2}$	1.17	β^*	0.09

3.2 유동 조건

Fig. 3은 Fig. 1에 나타낸 피스톤 상부를 제외한 공간을 유동장으로 모델링한 결과를 나타낸다. 이 때, 유동의 완전 발달을 유도하여 유동 특성을 정확하게 확인할 수 있도록 배관을 확장한 유동장을 모델링 하였다. Fig. 3에서 밸브 입·출구 직경 A는 50mm, 밸브 전·후 관로 길이 B, C는 각각 200mm, 300mm로 설정하였다.

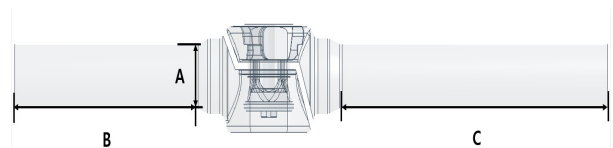


Fig. 3 Flow area modeling

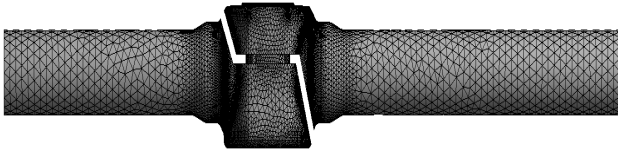


Fig. 4 Mesh generated in the flow area

Fig. 4는 유동장에 생성한 매시(mesh)를 나타낸다. 압축성 유체의 유동해석 시에는 내부 벽 벽면의 인플레이션(inflation)이 유체의 유동에 크게 영향을 끼치지 않는다. 그러므로 격자 품질을 향상하기 위해서 벽면의 인플레이션을 최소화하여 매시를 생성하였다.

3.3 격자 및 경계조건

본 연구에서 기본적으로 사용한 격자 조건을 Table 3에 나타낸다.

작동 유체는 이상기체 상태인 공기로 설정하였으며 열전달 모델은 압축성 유동의 해석을 위해 운동에너지 효과를 고려하는 총 에너지(Total energy)로 설정하여 진행하였다.

Table 3 Domain conditions

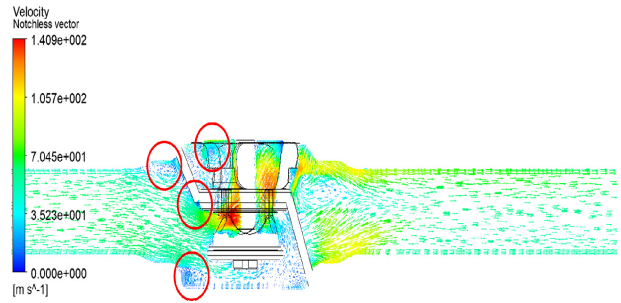
Domain	Name
Working fluid	Compressible fluid
Turbulence model	$k-\omega$ SST
Heat transfer	Total energy

경계조건으로는 입구 압력 P_1 과 출구 압력 P_2 의 압력비 P_2/P_1 및 플러그의 최대 변위와 실제 변위의 비를 나타내는 개도율을 사용하였다.

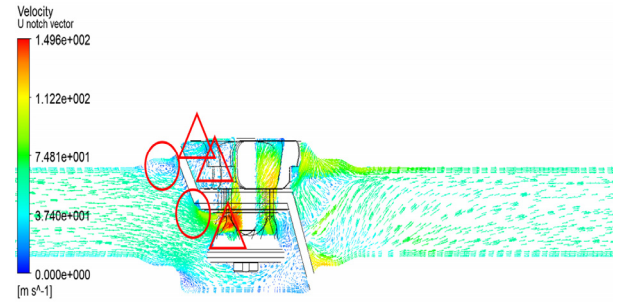
3.4 CFD해석 결과

Fig. 5는 압력비 P_2/P_1 가 0.96, 개도율이 100%일 때 Fig. 2에 나타낸 플러그 형상 별 유동특성을 해석하여 속도벡터 분포와 와류 발생 위치 그리고 와류 발달 정도를 분석한 결과를 나타낸다. Fig. 5에서 원으로 표시한 부분은 완전히 발달한 와류, 삼각형으로 표시한 부분은 부분적으로 발달한 와류를 나타낸다.

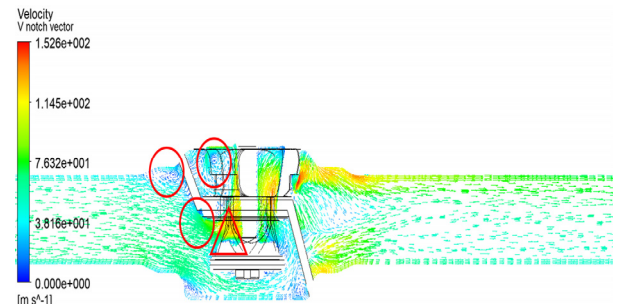
Table 4는 Fig. 5에 나타낸 와류 발달 정도를 정리한 결과이다. Fig. 5와 Table 4로부터 V자형의 노치를 가공한 플러그에서의 유동이 총 와류의 개수가 가장 적으면서 완전히 발달한 와류도 가장 적으므로 에너지 손실이 가장 적은 것을 알 수 있다.



(a) Arc-ported plug



(b) Arc-ported plug with a U-notch



(c) Arc-ported plug with a V-notch

Fig. 5 Analysis results of velocity distribution and vortex development by plug shape

Table 4 Vortex numbers by plug shape described in Fig. 5

Plug shape	Partial development vortex number, \triangle	Full development vortex number, \circ	Total vortex number
Arc-ported plug	0	4	4
Arc-ported plug with a U-notch	3	2	5
Arc-ported plug with a V-notch	1	3	4

Fig. 6은 플러그의 최대 변위에서 실제 변위를 나눈 값인 개도를 o_r 및 입구 압력 P_1 과 출구 압력 P_2 의 압력비 P_2/P_1 에 따른 플러그 형상 별 질량유량의 변화를 나타낸다. 압축성 유체를 사용할 때 압력비 P_2/P_1 가 0.97이상이면 비압축성 유체, 이 범위를 벗어나면 압축성 유체로 다룰 수 있다⁸⁾. 그러므로 Fig. 6에서는 압력비 P_2/P_1 를 0.04부터 0.96까지 총 8종류로 설정하였다. 또한, 개도율은 5[%]~100[%]에서 11단계로 설정하였다.

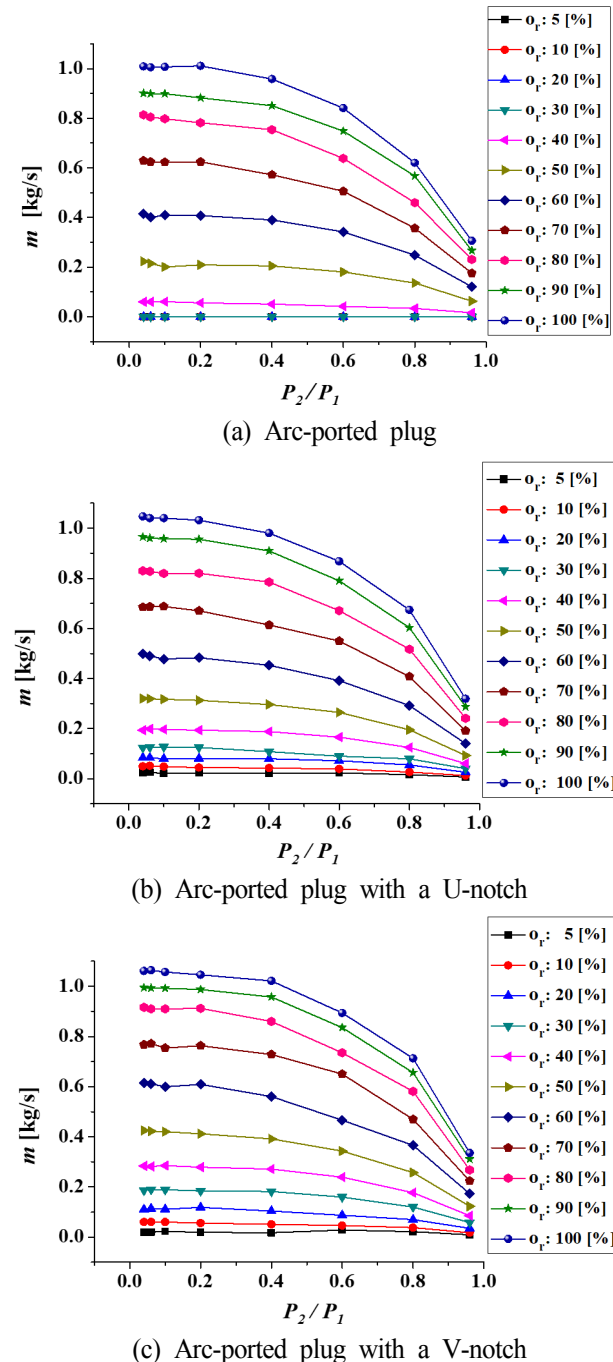


Fig. 6 Variation of flow rate by plug shape according to the opening ratio and pressure ratio

Fig. 6으로부터 (a)~(c) 모두 압력비가 약 0.1이하에서 질량유량이 증가하지 않는 초킹(Chocking) 상태에 도달하였으므로 설계한 플러그를 사용한 글로브 밸브의 임계압력비가 0.1부근임을 알 수 있다. (a)의 경우에는 플러그가 초기위치에서 하방향으로 7.62mm 정도 움직일 때까지 질량 유량이 0kg/s로 오버랩 구간이 존재함을 확인할 수 있었다. (b), (c)에서는 오버랩 구간이 나타나지 않으며 V자형 노치를 가공한 플러그를 사용할 때 동일한 압력비 및 개도율에서 가장 많은 질량 유량을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 플러그 형상별 소닉 컨덕턴스 C 를 분석한 결과를 나타낸다. 소닉 컨덕턴스 C 는 압력비가 공기가 초킹(Chocking) 상태에 도달한 상태인 임계압력비 b 이하일 때의 질량유량(\dot{m})으로부터 식 (6)을 이용하여 구할 수 있다.

$$P_2/P_1 \leq b,$$

$$C = \frac{\dot{m}}{P_1 \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}}} \quad (6)$$

Fig. 7에 나타난 소닉 컨덕턴스 C 의 도출에 사용한 각 상수값은 $P_1=500[\text{kPa}]$, $\rho_0=1.185[\text{kg/m}^3]$, $T_0=293.15[\text{K}]$, $T_1=298.15[\text{K}]$ 이다.

Fig. 7로부터 노치가 없는 플러그에서는 개도율 o_r 이 약 40%일때까지 불감대가 존재하고, V자형 노치를 가공한 플러그를 사용할 때 동일한 개도율에서 질량 유량이 가장 큼을 확인할 수 있다. 이 결과로부터 설계한 플러그 형상 중 V자형 노치를 가공한 플러그를 사용하면 밸브를 통과하는 유체의 압력강하가 작아지므로 에너지 손실이 저감됨을 유추할 수 있다.

Table 5는 Fig. 7에 나타난 형상별 소닉컨덕턴스를 각각 1차 방정식으로 선형화한 후 Fig. 7에 나타난 소닉컨덕턴스 값 C 와 선형화 1차 방정식을 이용하여 각 개도율에서 계산한 소닉컨덕턴스 값 C_l 을 식 (7)에 적용하여 분석한 RMS 오차를 나타낸다.

식 (7)에서 n 은 데이터 개수를 나타낸다. Table 5로부터 V자형 노치를 가공한 플러그를 이용할 때 소닉컨덕턴스 C 의 선형성에 대한 RMS 오차가 가장 작으므로 밸브의 유량 선형성이 향상됨을 알 수 있다.

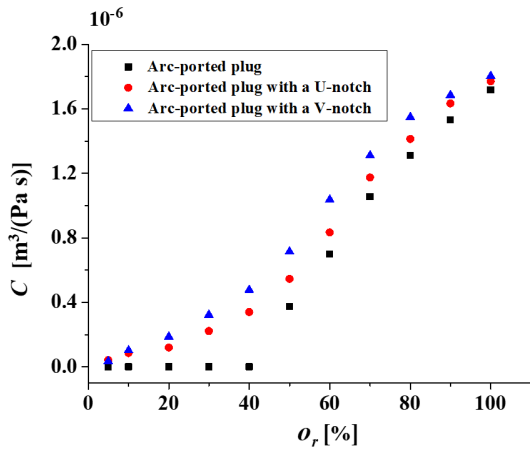


Fig. 7 Variation of sonic conductance C by plug shape according to the opening ratio

$$\text{RMS error} = \sqrt{\frac{(C_1 - C_{1l})^2 + \dots + (C_n - C_{ln})^2}{n}} \quad (7)$$

Table 5 RMS error according to plug shape

Plug shape	RMS error, $\text{m}^3/(\text{s Pa})$
Arc-ported plug	$1.125 \cdot 10^{-6}$
Arc-ported plug with a U-notch	$0.739 \cdot 10^{-6}$
Arc-ported plug with a V-notch	$0.498 \cdot 10^{-6}$

5. 결 론

본 논문에서는 압축성 유체용 글로브 밸브의 유량특성을 향상시키기 위하여 밸브 유로 조절 요소 중 하나인 플러그의 유로 형상을 설계 한 후 CFD 해석을 수행하였다. 본 논문에서 얻어진 성과는 다음과 같다.

1. 플러그 형상에 따른 속도 벡터 분포를 통해 와류 발생위치 및 발달 정도를 확인하였다. 그 결과 설계한 플러그 형상 중 V자형 노치를 형성한 플러그를 이용할 때 와류 개수가 가장 적고 완전 발달이 덜 이루어지는 것을 확인하였다.

2. 플러그 형상 별 밸브의 개도율 및 압력비에 따른 질량 유량 변화를 분석한 결과 V자형 노치를 가공한 플러그를 사용할 때 동일한 압력비 및 개도율에서 가장 큰 질량 유량을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

3. 소닉컨덕턴스에 대한 RMS 분석결과 플러그에 V자형 노치를 형성한 밸브의 선형성이 가장 좋음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터 플러그의 측면에 적절한 노치를 구성하면 유체가 밸브를 통과할 때의 에너지손실 저감과 선형성 향상에 의한 밸브의 유량특성 향상이 가능함을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 월드클래스300프로젝트 기술개발지원사업 (WC300 R&D) (과제번호: S2522408)의 연구 지원에 의하여 연구되었음을 밝힙니다.

References

- 1) P. L. Skousen, Valve Handbook, 2nd ed., Hongrung Publishing Company, Seoul, 2005.
- 2) J. H. Yoon et al., "Simulation of EPPR Valve Flow Force Characteristic using CFD Analysis", Journal of Drive and Control, Vol.14, No.1, pp.14-22, 2017.
- 3) C. Huang, "Finite Element Analysis and Structural Safety Evaluation of Globe Valve Body Under High Temperature and High Pressure", Master Thesis, Chungnam National University, 2017.
- 4) ASME B31.3 (3), Process Piping Guide: gas, steam, air and water, The American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- 5) J.-K. Jung et al, "Numerical Analysis on the Compressible Flow Characteristics of Supersonic Jet Caused by High-Pressure Pipe Rupture Using CFD", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol.41, No.10, pp.649-657, 2017.
- 6) H. K. Versteeg and W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics, Pearson Education Limited, Harlow, 2007.
- 7) F. R. Menter, M. Kuntz and R. Langtry, "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model", Turbulence, Heat and Mass Transfer 4, Begell House, Inc., Connecticut, 2003.
- 8) S. H. Han and J. S. Jang, "Design of a Robust Controller for a Watertight Damper Driving System", Journal of Drive and Control, Vol.14, No.2, pp.45-51, 2017.