

압력 평형식 온도조절 밸브 내부 유동 특성에 대한 수치적 연구

황정훈* · 김태안** · 김윤제***

A Numerical Study on the Flow Characteristics of Temperature Control Valve by Pressure Compensation

J.-H. Hwang*, T.-A. Kim**, Youn J. Kim***

Key Words : Temperature control valve by pressure compensation (TCV), Piston opening rate (피스톤 개도), Flow rate(유량), Numerical analysis(수치해석)

ABSTRACT

Temperature Control Valve (TCV) is one of the useful temperature control devices, which is used to control constant temperature of working fluid in power and chemical plants and domestic water supply systems. TCV is composed of body, cylinder and piston, and the body shape has a symmetrical H-type. In general, it has several inlet and outlet holes, and its shape is like as tubular sleeve. The piston has three rings: two rings of the end of piston have the function of controlling inlet flow rate with hot and cold working fluids, the center ring has the function of preventing hot and cold water from intermixing. Consequently, the shapes of piston and cylinder are the main design parameters in the performance of TCV. In this study, numerical analyses were carried out with two different piston and cylinder shapes to investigate the functions as a temperature control valve and the flow characteristics according to piston opening grade in TCV. Using a commercial code, FLUENT, velocity and pressure fields in TCV are obtained under steady, standard $k-\epsilon$ turbulence model and no-slip condition.

1. 서론

현대인의 생활 속에서 사용하고 있는 수많은 기계 및 산업장치를 살펴보면 다양한 기계요소들을 관찰할 수 있다. 그 중 밸브는 유체의 흐름을 조절하거나 제한하는 기능을 갖는 장치로서 산업설비의 핵심 부품으로 기술 집약적인 기기이다.

온도가 서로 다른 유체가 각기 다른 배관을 통해 공급되어 하나의 배관으로 유입되는 경우, 각 배관의 유체 유입량을 조절하여 온도를 일정하게 유지하는 역할은 매우 중요한 공정 조건이 된다. 산업 현장에서 흔히 볼 수 있는 이러한 공정의 유입 비율 조정은 각 배관에 밸브를 장착하여 그의 개폐를 통해 이루어지게 된다. 그러나 실제 운전 시 여러 가지 비정상적인 조

건의 발생으로 유입측 배관의 공급유체가 일정하게 공급되지 않는 경우가 발생하게 된다. 이러한 유체 공급을 일정하게 제어하기 위해 고가의 장비가 사용되고 있다. 따라서 이러한 고가의 제어장비를 대체하고 온도 조절 기능을 가지는 밸브 개발이 요구된다.

압력 평형식 온도 조절 밸브 (temperature control valve by pressure compensation)는 별도의 제어 장비나 조작 없이 한쪽 배관에 공급되는 유량이 변동되면 밸브 내부의 압력 변화에 피스톤이 반응하여 유체 유입구 개도를 자동으로 조절, 밸브를 지난 후의 혼합 유체가 일정한 온도를 유지할 수 있도록 하는 밸브이다. 이러한 압력 평형식 온도 조절 밸브 설계에서 피스톤 및 실린더의 직경 및 제 형상들이 중요한 설계인자로 작용하게 된다. 이러한 밸브 개발에 있어 한 가지 설계변수의 변경은 예측치 못한 여러 부분에 영향을 미치기 때문에, 유체역학적인 지식 기반 및 유동현상에 대한 이해가 없는 상태에서의 밸브 개발은 실험에 의한 시행착오를 거쳐 이루어질 수밖에 없다. 이는

* 성균관대학교

** 성균관대학교 대학원

*** 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjkim@skku.edu

많은 예산과 시간의 낭비가 불가피 하므로 밸브 내부의 유동에 대한 종합적인 이해 및 각각의 설계 인자들 사이의 상호 연관성을 규명하는 것은 매우 중요하다.⁽¹⁾

본 연구에서는 압력 평형식 온도 조절 밸브 내부 유동에 대한 종합적인 이해 및 설계 인자들 사이의 상호 연관성을 규명하기 위해 밸브 내부의 실린더 및 피스톤의 형상 변화와 피스톤 개도에 따른 속도 및 압력 분포를 CFD (Computational Fluid Dynamics)를 이용한 유동장 해석을 통해 고찰하였다.^(2,3)

2. 수치해석

2.1 지배방정식

수치해석에서 사용된 속도 및 압력 유동장의 삼차원 정상상태 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식(continuity equation) :

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식(momentum equation) :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \bar{u}_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

여기서 x_i 는 직교 좌표계($i=1, 2, 3$) 이고, \bar{u}_i 는 x_i 방향의 속도이다. u_i' 는 x_i 방향 속도의 섭동 성분이고, p 는 동압, ρ 는 밀도이다. τ_{ij} 는 점성항으로 다음과 같다.

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

여기서 μ 는 점성계수, δ_{ij} 는 Kronecker delta 함수이고, μ_t 는 와점성계수(eddy viscosity coefficient) 이다.^(4,5)

2.2 해석 모델 및 격자계

해석 모델은 크기가 x-방향으로 220 mm, y-방향으로 90 mm, z-방향으로 36 mm이며 밸브 유·출입구 직경은 17 mm로 동일하다. Figs. 1과 2는 두 가지 형태에 대한 각각의 밸브 단면과 실린더 및 피스톤 형상으로 Inventor를 이용하여 3D 모델링 하였다.

Figure 1에 나타난 Type 1의 형상은 작동유체가 밸브 몸체 중 직관으로 유입되어 곡관을 통해 유출되는 구조를 가진다. 내부 실린더는 유·출입구 직경이 각각 8 mm, 10 mm이며 냉·온수 각각의 배관에 대해 유입구와 출입구의 개수가 각각 4개씩으로 이루어져 있다. 피스톤의 형태를 살펴보면 양쪽 끝부분에 위치한 두 개의 링이 유입구 개도를 조절할 수 있도록 되어 있으며, 가운데 링이 내부로 유입된 냉·온수가 서로 혼합되지 않도록 하는 역할을 한다. 또한 실린더 내부의 압력 변화에 반응하기 위해 양 끝부분에 y방향으로 직경 6 mm의 홀이 뚫려 있다.

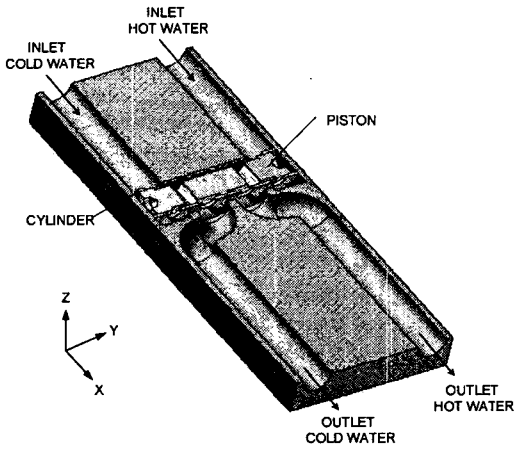
Figure 2에서 Type 2의 밸브 몸체는 Type 1과는 반대로 작동유체가 곡관을 통해 유입되어 직관을 통해 유출되는 구조를 가진다. 밸브 내부 실린더는 유입구의 직경이 8 mm이며 유출되는 유체의 저항을 최소화하기 위해 출구 부분을 잘라내어 49 mm로 짧아진 구조를 가지고 있다. 피스톤의 형상은 내부 압력 변화에 빠르게 반응하기 위해 41 mm로 줄였으며 Type 1과 마찬가지로 세 개의 링이 각각의 역할을 수행할 수 있는 구조를 가진다.

밸브 내부의 유동 특성을 고찰하기 위해 피스톤과 실린더를 중심으로 Fluent의 계산격자 전처리 프로그램인 Gambit을 이용하여 3차원 격자계를 구성하였다. Fig. 3은 수치해석에 사용된 격자계를 나타낸 것이다. 작동유체의 유·출입 배관의 경우 정렬격자를 이용하였으며, 상대적으로 유로가 좁고 복잡한 실린더와 피스톤 부분은 비정렬 격자를 부분적으로 혼합하여 전체적인 격자계를 구성하였다. 두 가지 다른 형태의 각기 다른 개도에 따른 최적의 격자수를 구하기 위해 20~50만개 사이에서 격자수를 약 10만개 단위로 변화시켜 가면서 해석해 본 결과 약 25만~35만개 사이의 격자수에서 수렴성과 결과에 대해 가장 우수한 상태를 나타내었다. 상용 CFD 코드인 Fluent를 이용하여 Intel Pentium 4A CPU 2GHz, 1GB memory 장비에서 수치해석을 수행하였다. 해석에 사용된 지배 방정식은 유한체적법(Finite Volume Method)으로 이산화 하였고 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 계산을 수행하였으며, 난류모델로는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.⁽⁶⁾ 또한 출구에서는 압력조건과 종속변수의 구배가 0인 조건(Neumann condition)을 적용하였으며, 벽 경계면에서 속도성분은 점착조건(no-slip condition)을 적용하였다.

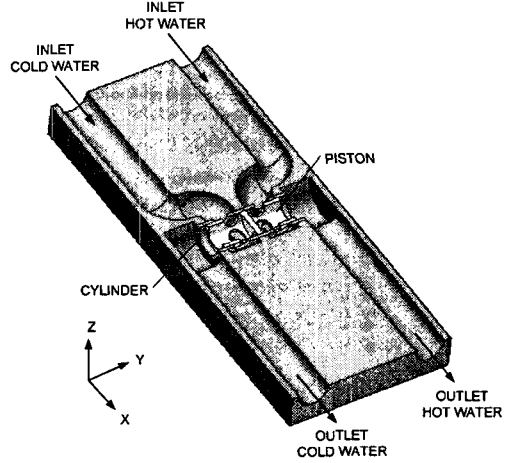
실제 밸브에서 유입측 배관의 유량이나 압력 변동이 발생하게 되면 피스톤의 압력 평형에 의해 실린더 유입구 개도를 조정하게 되지만 수치해석에서는 피스톤의 위치 변화를 직접적으로 표현하는 대신 피스톤을 이용하여 실린더의 냉수구 개도를 1/8개도에서 4/8개도까지 변화시키는 동안 대칭이 되는 온수구는 각각 5/8에서 7/8까지 1/8씩 변화시켜 가면서 수치해석을 수

행하였다. 또한 압력 평형식 온도 조절 밸브가 기하학적으로 좌우 대칭인 형상을 가지고 있어 한쪽 배관의

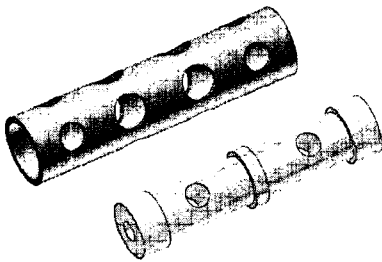
위해 1/8 개도부터 7/8 개도까지 서로 다른 피스톤 개도에 따라 수치해석을 수행하였다. Fig. 4는 Type 1과



(a) Sectional drawing of TCV.

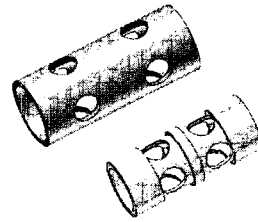


(a) Sectional drawing of TCV.



(b) Piston and cylinder.

Fig. 1 TCV model of Type 1.



(b) Piston and cylinder.

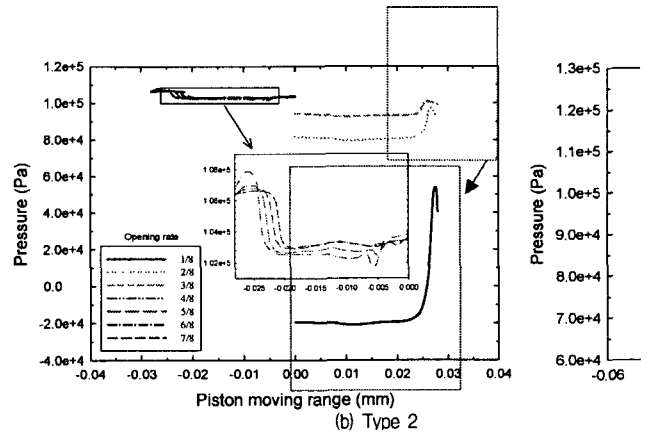
Fig. 2 TCV model of Type 2.

개도를 조절하게 되면 반대쪽 배관의 개도는 4/8를 기준으로 대칭인 개도를 나타내는 특징을 이용, 냉수구 개도 변화와 그에 대칭이 되는 온수구 개도 변화를 고려하여 수치해석을 수행하였다. 또한 $z = 18 \text{ mm}$ 인 지점에서 x - y 평면에 대해 기하학적인 대칭을 이루기 때문에 대칭 조건을 적용하여 해석을 수행하였다. 이는 과도한 격자수에 의한 해석 시간 지연 방지 및 결과에 대한 수렴도와 신뢰도를 보장해 주는 요인으로 판단된다. 작동 유체로는 20°C 의 물을 사용하였고 유량은 냉·온수구 모두 10 l/min ($Re = 12.47 \times 10^3$)으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

두 가지 형태의 압력 평형식 온도조절 밸브의 유동 특성을 파악하고 온도조절 기능 및 성능을 평가하기

Type 2에 대해 피스톤 개도에 따른 실린더 내부 압력



(b) Type 2



Fig. 4 Pressure distribution for various piston opening rate.

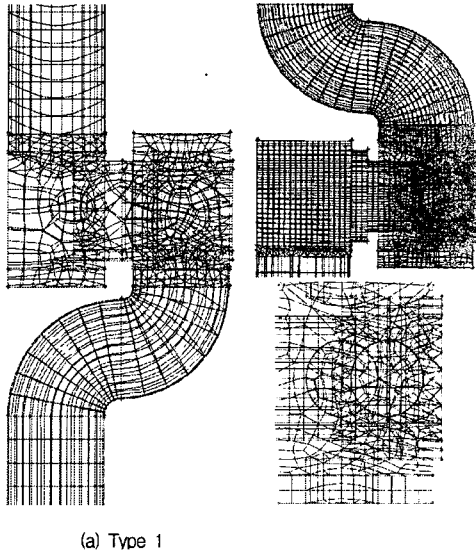


Fig. 3 Grid system.

분포를 도시한 것이다. Type 1의 경우 피스톤 개도는 냉수구의 경우 4/8~7/8이며, 온수구의 경우는 1/8~3/8이다. 그래프에서 x-축은 피스톤의 중앙점을 기준으로 하여 냉수 측과 온수 측으로 피스톤이 이동한 거리를 나타낸다. y-축은 Type 1의 경우 실제 유체가 흐르는 부분인 피스톤과 실린더 사이의 압력을 나타내며, Type 2의 경우 피스톤 내부까지 유체가 유입되기 때문에 실린더와 피스톤 중심 부분의 압력을 나타낸다. 피스톤과 실린더 그림에서 좌측은 냉수측, 우측은 온수측을 나타내며, Type 1보다 Type 2의 x-축 범위가 작은 것은 Type 1에 비해 Type 2의 실린더와 피스톤 길이가 짧기 때문이다. 결과를 살펴보면 피스톤 개도가 작은 쪽에 비해 개도가 큰 쪽의 실린더 내부 압력이 훨씬 높다는 것을 알 수 있다. 이는 피스톤이 압력 평형을 이루기 위해 냉·온수측 압력 변화에 따라 이동하며 유입 개도를 조정하여 유입 유량을 조절함으로써 냉수 측과 온수 측의 출력 유량을 항상 일정하게 유지시켜 온도 조절 기능을 수행할 수 있을 것으로 판단된다. Type 2는 냉수구의 경우 1/8~4/8개도 및 온수구의 경우는 5/8~7/8개도까지 각각의 경우에 대해 해석 결과를 얻었다. Type 1과 마찬가지로 그래프를 통해 피스톤 개도가 큰 쪽에서 개도가 작은 쪽에 비해

실린더 내부 압력이 높은 것을 알 수 있었으며 이는 Types 1, 2 모두 온도 조절 밸브로서의 기능을 수행할 수 있음을 말해주는 결과이다. 동일 개도에서 Types 1과 2의 실린더 내부 압력 분포를 비교해 보면 전체적으로 Type 2의 경우가 Type 1보다 높은 압력 분포를 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 Type 2가 Type 1에 비해 실린더 부분을 통과한 유체의 압력 회복이 빠르다는 사실을 예측할 수 있게 하며 결과적으로 실린더 및 피스톤 내부에서 압력 손실이 작다는 것을 의미한다. 이는 Type 2의 경우가 실린더와 피스톤의 길이가 짧아지면서 밸브 내부로 유입되는 유체에 의한 유동저항을 줄여 유체가 실린더 내부로 유입되는 것이 훨씬 원활한 형태를 가짐으로써 발생한 결과로 판단된다. 또한 피스톤 형상의 차이에 의해 Type 1에 비해 Type 2의 경우가 피스톤 중앙부 링과 유체가 맞닿는 면적이 훨씬 크며 무게 또한 감소하였다. 따라서 Type 2의 경우가 Type 1에 비해 압력 변화에 따른 피스톤의 반응성이 우수할 것으로 판단되며 Type 1보다 좀더 정확하게 압력 평형에 의한 온도 조절 기능을 수행할 수 있음을 알 수 있다. Type 1의 경우 1/8~3/8개도까지의 경우 개도에 따른 압력차가 심하며 나머지 경우에는 압력차가 거의 나지 않는 것을 볼 수 있다. 이에 비해 Type 2의 경우는 개도에 따라 압력 분포가 비교적 일정한 형태를 보이는 것으로 미루어 Type 2의 경우가 Type 1에 비해 좀 더 안정적인 유동이 이루어짐을 예측할 수 있다.

Figures 5와 6은 Types 1과 2에 대해 각각의 피스톤 개도에 따라 대칭면이 되는 밸브 중앙 단면에서의 속도 분포를 도시한 것이다. 두 가지 형상 모두 피스톤의 개도가 작을수록 실린더 내부로 유입되는 유체의 속도가 밸브 내부로 들어오는 초기 속도보다 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 유체가 배관을 지나 밸브로 진입 시에 실린더 유입구 부분과 피스톤의 운동에 의해 갑자기 좁아진 유로로 인한 정체 현상 때문에 발생한 결과로 큰 속도로 실린더를 빠져나간 유체가 밸브 몸체와의 마찰 손실을 수반할 것으로 판단된다. 이러한 결과는 유동 손실 뿐 아니라 마찰 손실로 인하여 밸브 성능 및 내구성을 저하시키는 요인 중 하나임을 알 수 있다.

Figure 7은 밸브 내부 속도 분포를 통해 Type 2의

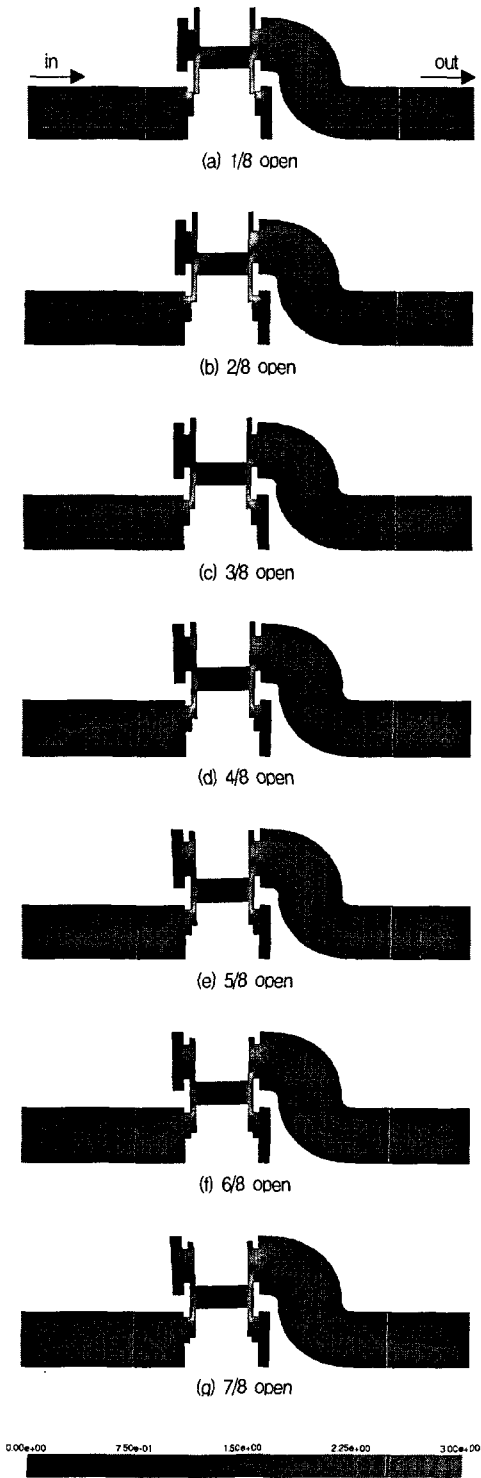


Fig. 5 Velocity distribution for various opening rate with Type 1.

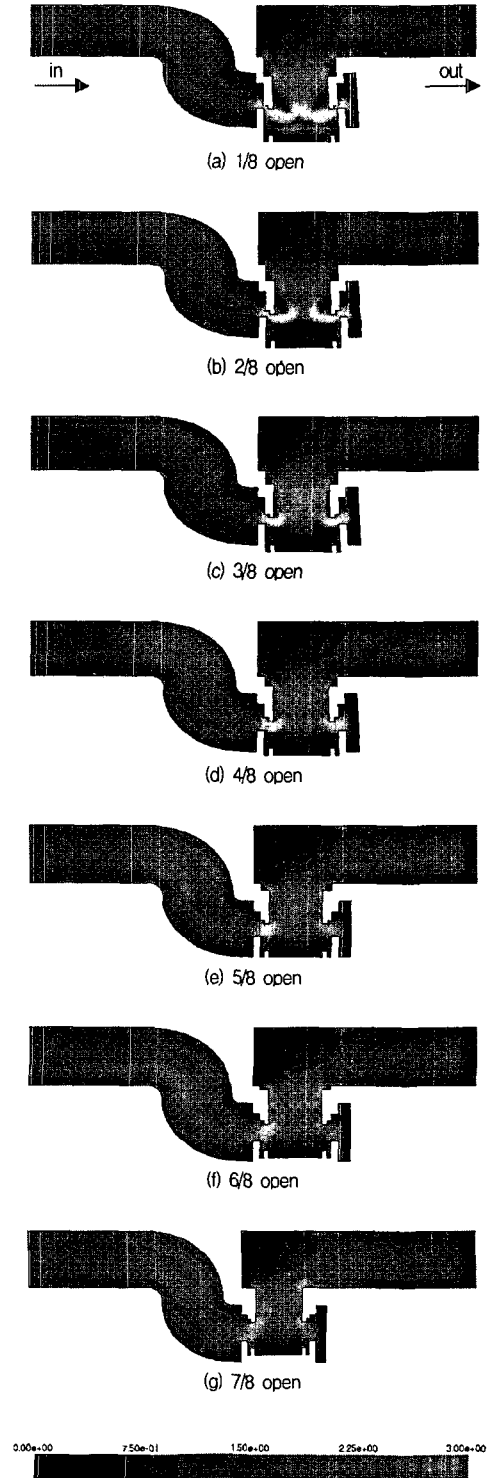


Fig. 6 Velocity distribution for various opening rate with Type 2.

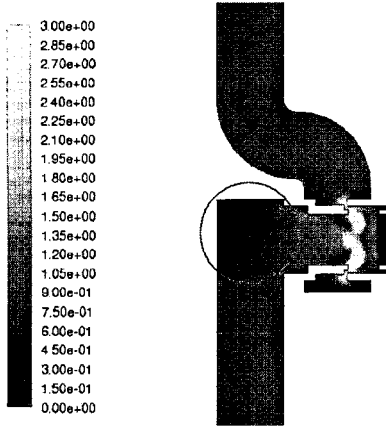


Fig. 7 Dead space for a vortex flow with Type 2.

경우 실린더를 통과한 유체가 출구 부분에서 와(渦)를 형성하는 것을 나타낸 것이다. 이러한 와에 의한 사공간 (dead space)을 줄이기 위해 최적의 유로 형상을 찾는 연구가 더 필요할 것으로 사료되며 이러한 사공간의 감소는 밸브의 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 압력 평형식 온도조절 밸브 내부 유동 특성을 수치해석을 통해 고찰하였으며 특히, 실린더 및 피스톤의 두 가지 형상에 대한 온도조절 기능 및 성능을 비교 평가하였다. 실제의 경우 TCV는 유체 유입구 압력 변화에 의해 냉·온수구의 압력차가 발생하며, 이에 대해 밸브 내부의 피스톤이 압력변화에 반응하여 출구 측의 유량을 조절하는 기능을 가지고 있다. 하지만 본 연구에서는 피스톤의 변화를 직접 해석하는 대신, 역으로 동일한 유량이 유입되는 경우 각 개도에 따른 밸브 내부 압력과 속도분포를 해석하여 온도 조절 기능 및 밸브 성능을 고찰하고자 하였다. 본 연구의 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 실린더 및 피스톤의 형상이 다른 Types 1, 2에 대해 피스톤 개도에 따른 밸브 내부 압력 분포를 비교해 본 결과, Types 1, 2 모두 피스톤 개도가 증가할수록 밸브 입구 압력이 감소하며, 실린더 내부 압력 분포는 개도가 작을수록 압력이 낮은 것을 알 수 있었다. 이는 피스톤이 압력 평형을 이루기 위한 방향으로 이동하며 출구 유량을 일정하게 유지시켜 온도 조절 기능을 수행할 수 있음을 반증하는 결과이다.

- 2) 동일 개도에서 실린더 내부 압력 분포를 비교해 본 결과, Type 1보다 Type 2가 개도에 따른 압력차가 작은 것을 알 수 있었다. 이는 Type 2가 유동 손실이 적은 것을 나타내며, 성능 면에서 Type 1에 비해 우수하다는 것을 나타낸다. 따라서 Type 2의 경우를 사용하면 좀 더 안정적이고 정확한 온도조절 기능을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

- 3) Type 2의 경우 밸브 내부에서 발생하는 와류에 의한 사공간을 줄일 수 있는 최적의 밸브 유로 형상을 도출하여 좀 더 안정적인 유동이 이루어질 수 있는 연구가 필요할 것이라 사료된다.

참고문헌

- (1) Control Valve Handbook, 1994, Fisher Controls, Iowa.
- (2) Eryilmaz, B. and Wilson, B. H., 2001, "Improved Tracking Control of Hydraulic System", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 123, pp. 457~462
- (3) Botros, K. K., Dunn, G. H., and Hrycyk, J. A., 1997, "Riser-Relief Valve Dynamic Interactions", ASME Journal of Fluid Engineering, Vol. 119, pp. 671~679.
- (4) Patankar, S. V., Numerical Heat transfer and fluid Flow, Hemisphere, Washington, D.C.
- (5) 荒川忠一, 1997, 數値流體工學, 한미출판사, 서울
- (6) Versteeg, H. K. and Malalasekera, M., 1995, An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method, Jhon & Sons Inc., New York.