

## 압력 평형식 온도조절 밸브 성능 향상을 위한 연구

김태안\*, 김윤제\*\*

### A Study on the Performance Improvement of Pressure Compensating Temperature Control Valve

T.-A. Kim\*, Youn J. Kim\*\*

**Key Words :** Pressure Compensating Temperature Control Valve(TCV), Diameter Ratio of Cylinder Hole(직경비), Flow coefficient (유량계수), Resistance coefficient(저항계수).

#### Abstract

Pressure compensating temperature control valve(TCV) is one of the important control devices, which is used to maintain the constant temperature of working fluid in power and chemical plants. The ratio of cylinder hole diameters of inlet and outlet is the main design parameters of TCV. So this needs to be investigated to improve the function of control of temperature and void fraction. In this study, numerical analysis is carried out with various ratios of cylinder hole diameters of the inlet and outlet in the TCV. Especially, the distribution of the static pressure is investigated to calculate the flow coefficient( $C_v$ ) and resistance coefficient( $K$ ). The governing equations are derived from making using of three-dimensional Navier-Stokes equations with standard  $k-\epsilon$  turbulence model and SIMPLE algorithm. Using a commercial code, PHOENICS, pressure and flow fields in TCV are calculated with different inlet and outlet diameters of the cylinder hole for cold and hot water passages.

#### 1. 서론

온도가 서로 다른 유체를 배관을 통해 공급하여 하나의 배관으로 유입시키는 경우, 각 유체의 유입량을 조절하여 온도를 일정하게 유지하는 역할은 플랜트에서 매우 중요한 공정 조건중 하나이다. 산업체 현장에서 흔히 볼 수 있는 이러한 공정의 유입 비율 조정은 각각의 배관에 밸브를 장착하고, 별도의 액추에이터(actuator)를 이용하여 밸브의 개폐를 통하여 이루어진다. 그러나 실제 운전시 여러 가지 비정상적인 조건의 발생으로 유입측 배관의 작동 유체가 일정하게 공급되지 않는 경우가 발생하게 된다.

압력 평형식 온도조절 밸브 (pressure compensating temperature control valve, TCV)는 한쪽 배관에 공급되는 유량 또는 압력 변동이 발생하여도 밸브 내부의 압력 변화에 의해 실린더 내부의 피스톤이 반응하여 유체 유입구 크기를 조절하여 출구 유체 비율을 일정하게 유지할 수 있으며, 내부의 피스톤 움직임을 위해 별도의 액추에이터가 필요하지 않는 밸브이다. Fig. 1은 TCV의 실제 사진이다.

TCV를 개발하는데 있어서 유체역학적인 지식 기반이 없는 상태에서의 밸브 개발은 실험에 의한 시행착오를 거쳐 이루어질 수밖에 없다. 그러므로 유동현상에 대한 종합적인 이해 없이는 많은 개발자금 및 시간의 낭비가 불가피하다. 또한 해석 결과에 대한

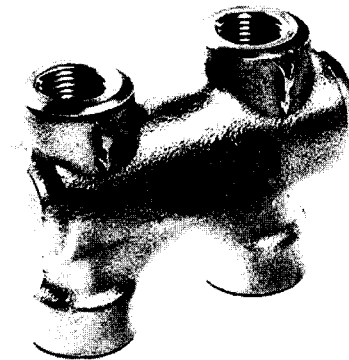


Fig. 1 TCV model

분석 없이는 동일한 실수를 다음 설계 시 반복하게 되므로 예산 및 시간의 중복 소요가 이루어지게 된다. 따라서 밸브 내부 유동에 대한 종합적인 이해 및 각각의 설계 인자들 사이에 상호 연관성을 규명하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 수치해석을 통해 동일한 유입 유량 조건에서 밸브 내부의 실린더 직경 (diameter of cylinder hole) 변화가 밸브를 통과하는 동안의 압력강하에 미치는 영향을 고찰하였으며, 이러한 결과를 이용하여 밸브의 유량계수와 저항계수를 계산하였다. 또한 각각의 직경비에 대한 유량계수와 저항계수를 비교하여 우수한 성능을 가질 수 있는 밸브 내부 실린더의 최적 입-출구 직경을 찾았다.

\* 성균관대학교 대학원

\*\* 성균관대학교 기계공학부

E-mail kimyj@me.skku.ac.kr

TEL: (031) 290-7448 FAX: (031) 290-5849

## 2. 지배방정식

정상상태 난류유동을 해석하기 위한 시간 평균된 지배방정식을 텐서 형태로 표현하면 다음과 같다.

연속방정식:

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

운동량방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

여기서  $\tau_{ij}$ 는 점성항이며 다음과 같이 나타낸다.

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

위와 같은 비선형 지배방정식의 해를 구하기 위해 유한 체적법(finite volume method)을 사용하였고, 하이브리드 도식(hybrid scheme)<sup>[1]</sup>을 이용하였다. 이산화를 통해 구해진 각각의 변수들에 대한 방정식은 SIMPLE 알고리즘<sup>[2,3]</sup>을 사용하여 계산하였다. 또한 난류장 해석을 위하여 여러 가지 난류 모델중에서 본 연구에서는 Launder & Spalding (1974)이 제시한 표준  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다<sup>[4]</sup>.

일반적으로 밸브의 성능을 나타내는 유량계수( $C_v$ )와 저항계수( $K$ )는 다음 식에 의해 계산되어진다.

$$Q = C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad (4)$$

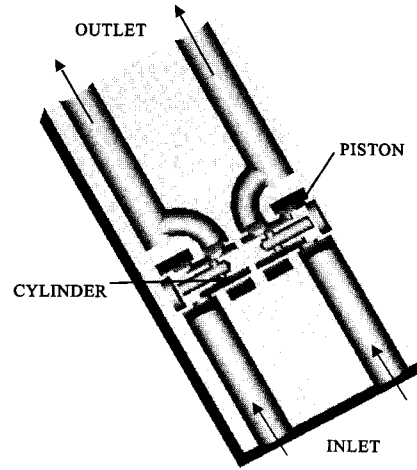
$$C_v = \frac{D^2}{\sqrt{K}} \quad (5)$$

여기서  $\Delta P$ 는 밸브 유출입구 양단의 압력차이며,  $D$ 는 밸브 유출입구의 직경을 나타낸다.

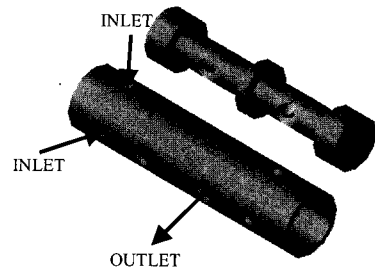
## 3. 해석 모델 및 격자계

Fig. 2는 모델링에 사용된 TCV 단면과 피스톤, 그리고 실린더를 묘사한 것이다. 밸브의 아래쪽에서 유체가 유입되어 내부의 실린더를 지나 피스톤에 의해 유입 유량이 조절되어 위로 빠져나가는 구조로 되어 있다 (Fig. 2a 참조). 또한 Fig. 2(b)는 실린더와 실린더 내부에서 유체 유입량을 조절하는 피스톤을 나타낸다. 실린더는 한쪽 배관에서 4개의 유입구를 가지며, 1개의 출구를 가지는 것을 볼 수 있다. 피스톤은 실린더 내부에서 압력 평형에 의해 좌우로 자동으로 움직이면서 유입구의 크기를 조절하여 유체 유입량을 조절하는 기능을 가지고 있으며, 두 배관에서 유입된 유체가 섞이지 않도록 하는 역할을 한다.

수치해석영역은 주된 관심사가 되는 실린더를 중심으로 TCV



(a) Section drawing of TCV



(b) Cylinder & piston

Fig. 2 Configuration of the modeled TCV.

전체를 대상으로 하였다. 해석 모델은 크기가 가로 179mm, 세로 42.5mm, 높이 34mm로 하였으며, 각각의 배관으로부터 TCV로 유출입되는 직경은 17mm로 실제 밸브와 동일하게 모델링 하였다. 또한 실제 TCV 내부실린더의 유입구 직경 8mm, 출구 직경 10mm를 기본으로 하여, 출구 직경을 10~12mm으로 1mm 단위로 변화시켰으며, 각 출구 직경에 대해 유입구 직경을 8~10mm로 유입구와 동일하게 1mm 단위로 변화시켜 모델링 하였다.

TCV 내부의 유동 특성을 고찰하기 위하여 실린더를 중심으로 3차원 격자계를 구성하였다. TCV 내부의 피스톤 위치를 1/2로 고정시키고, 각 배관을 통해 유입되는 유량을 3.6m<sup>3</sup>/h로 하였다. TCV 내부실린더의 유입구와 출구의 직경을 1mm 단위로 변화시켜 가면서 수치해석을 수행하였다. 작동유체는 20℃의 물을 사용하였다. 또한 TCV는 두 배관을 통해 유입된 유체가 서로 섞이지 않으며, 밸브의 유출입구가 서로 대칭을 이루기 때문에 두 유출입구를 모두 해석하지 않고 한쪽 부분만을 해석하였다.

본 연구에서는 수치해석 방법으로 직각 좌표계 내에서의 분할 격자계법 (Cartesian cut-cell method)<sup>[5]</sup>를 이용하였다. 이 방법은 결과 도출이 어려운 문제에 보다 쉽게 접근할 수 있고 수렴성도 보장되는 방법이다. TCV 모델은 CAD 프로그램을 이용하여 3차원으로 모델링 하였고, 분할격자계법을 제공하는 상용 프로그램인 PHOENICS-VR<sup>[6]</sup>를 이용하여 계산을 수행하였다. 수치해석에 사용된 격자계는 전체적으로 180×50×40개의 셀(cell)을 사용하였으며, TCV 모델의 격자계는 Fig. 3에 도시하였다. 출구에서는 압력조건과 종속변수 구배가 0인 조건(Neumann condition)을 사용하였고, 벽 경계면에서의 속도성분은 점착조건(no-slip condition)을 사용하였다.

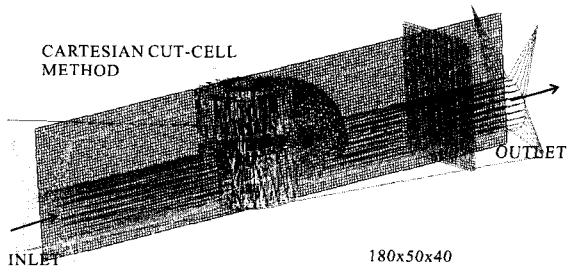


Fig. 3 Grid systems.

#### 4. 결과 및 고찰

Figs. 4-6는 실린더의 출구직경을 10, 11, 12mm로 고정시키고, 입구직경이 8, 9, 10mm인 경우의 한쪽 배관에 대한 압력 분포를 도시한 것이다. 각각의 그림을 살펴보면, 유출입구 직경이 커질수록 입구 압력이 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만 출구 압력은 출구직경의 크기에 따라 서로 다른 압력을 나타내었다. 출구직경이 10, 11mm인 경우에는, 입구직경이 9, 10mm에서 출구압력이  $4 \times 10^3 \text{Pa}$  정도로 거의 일정한 것을 알 수 있다. 하지만 입구직경이 8mm에서는 TCV 출구부분에서 압력이 크게 강하하는 것을 볼 수 있다. 이는 유입직경이 작아 실린더 내로 유체가 유입될 때, 속도가 증가하게 되며, 이렇게 증가한 속도가 실린더 출구부분에서 줄어들지 않아 발생하는 것임을 알 수 있다. 또한 출구 직경이 10, 11mm이고 유입직경이 8mm인 경우의 출구 부분의 유동을 살펴보면, 피스톤을 통과한 유체가 A부분의 곡면의 영향으로 인해 길이 방향을 축으로 하여 회전하는 것을 볼 수 있다 (Figs. 4(a)와 5(a) 참조). 하지만 출구직경이 12mm인 경우에는 이러한 유동의 회전

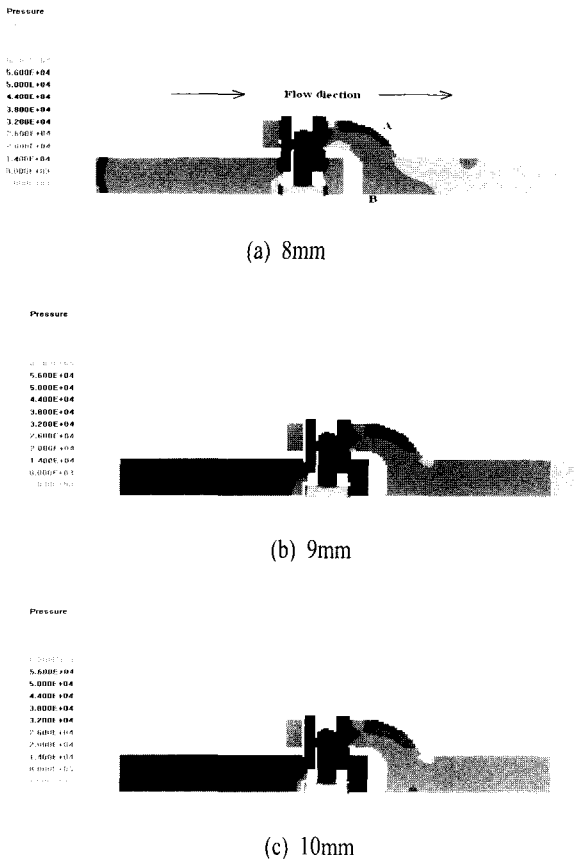


Fig. 4 Distribution of static pressure for various inlet hole diameters 8, 9 and 10mm with the outlet hole size 10mm.

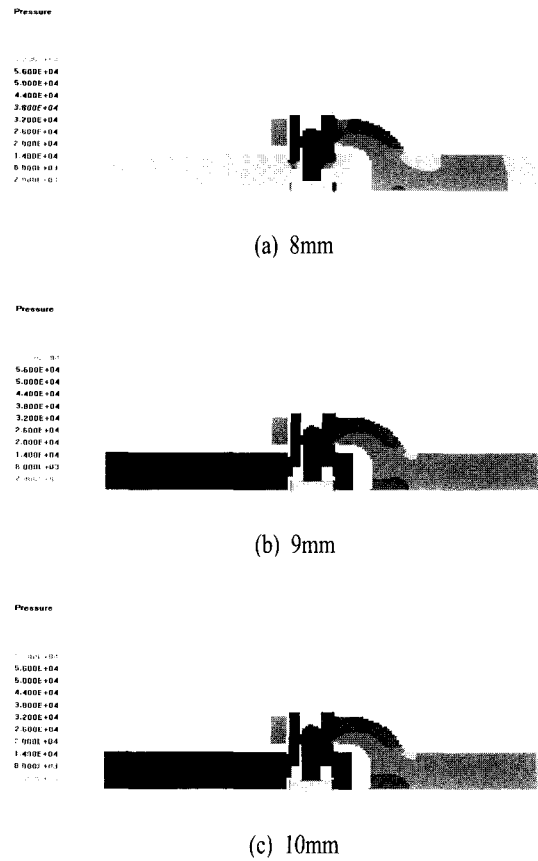


Fig. 5 Distribution of static pressure for various inlet hole diameters 8, 9 and 10mm with the outlet hole size 11mm.

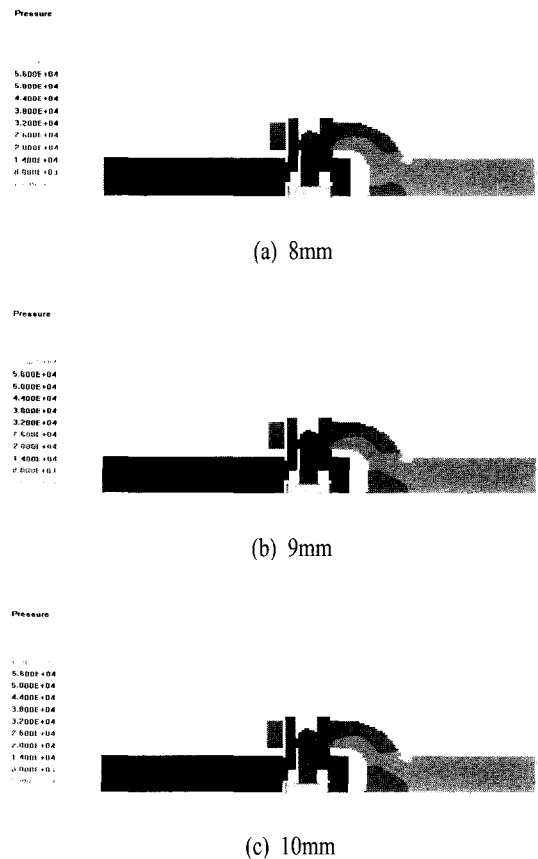


Fig. 6 Distribution of static pressure for various inlet hole diameters 8, 9 and 10mm with the outlet hole size 12mm

을 찾아볼 수 없었다. 이는 출구직경이 크기 때문에 실린더 내부를 통과한 유체가 출구로 나오면서 단면의 확대에 의하여 속도가 감소하여 발생한 결과로 사료된다. 출구직경이 10, 11mm인 경우 각각에 대해 유체유입구 직경이 작아질수록 피스톤 내부의 실린더 내부의 압력과 A부분의 압력차가 큰 것을 알 수 있다. 이러한 압력차는 유체 유동의 흐름을 방해하는 역할을 한다. 또한 유체와 밸브 몸체와의 많은 마찰로 인하여 A부분에 마모현상이 많이 발생할 것으로 판단된다. 따라서 실린더 입출구의 압력차는 입구 직경이 클수록 작아지는 것을 알 수 있다. 하지만 출구직경이 12mm인 경우에는 유입구직경과는 관계없이 실린더 내부와 A부분의 압력차가 크게 발생하지 않는 것을 보여준다. 이는 출구직경이 유체 유동을 원활하게 하는 요소인 것을 나타낸다.

Figs. 7과 8은 식 (4)와 (5)를 이용하여 유량계수와 저항계수를 구한 결과이다. Fig. 7의 x축은 실린더의 입구직경을 출구직경으로 나눈 직경비( $\theta$ )를 나타내며, y축은 유량계수( $C_D$ )를 나타낸다. 전체적으로 출구직경이 일정할 경우, 입구직경이 커질수록 유량계수가 커지는 것을 알 수 있으며, 출구직경이 커질수록 유량계수가 커지는 것을 알 수 있다. 특히 출구 직경이 12mm일 경우, 입구 직경이 작아도 유량계수가 다른 경우에 비해 큰 것을 볼 수 있다. 출구직경이 10mm인 경우를 살펴보면, 입구직경 크기에 따라 유량계수가 증가하는 경향을 나타낸다. 하지만 유량계수는 전체적으로 작은 값을 나타내고 있다. 출구직경이 11mm일 경우에는, 직경비가 0.73일 경우에 유량계수가 5.03으로 제일 작은 값을 나타내었으며, 이러한 결과는 Fig. 5(a)의 그래프에서 입구 압력이 크게 증가한 것으로도 알 수 있다. 하지만 직경비가 0.82일 경우에는 유량계수가 크게 증가하는 것을 알 수 있으며, 직경비가 0.91일 경우에는 직경비 0.82일 경우의 유량계수와는 큰 차이를 나타내지

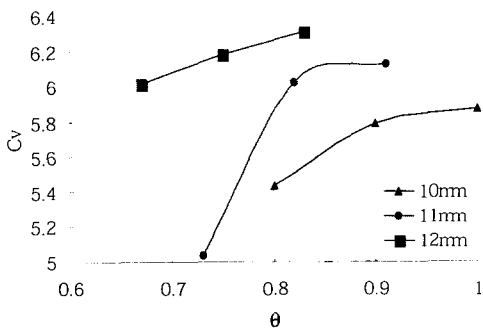


Fig. 7 Flow coefficient with various ratios of cylinder hole diameters of the inlet and outlet in the TCV.

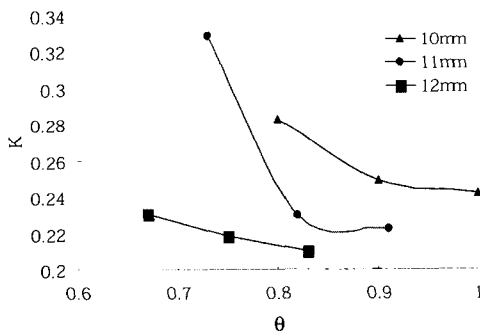


Fig. 8 Resistance coefficients with various ratios of cylinder hole diameters of the inlet and outlet in the TCV.

않았다. 이러한 결과로 부터 입구직경이 9mm 또는 10mm인 경우가 8mm보다 실린더로의 유체 유입량이 많음을 알 수 있다. 또한, 출구직경이 12mm인 경우에는, 유량계수가 입구직경에 비례적으로 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 결과는 출구직경 10, 11mm인 경우보다 유체가 실린더를 빠져나가는 저항이 작은 것을 보여주며, 입구직경이 증가할수록 유량계수가 증가함을 유추할 수 있다.

Fig. 8은 각기 다른 입출구 직경비 변화에 따른 저항계수를 도시하였다. 그래프의 x축은 직경비, y축은 저항계수( $K$ )를 나타내는데, 각각의 입출구직경에 대해 유량계수와는 반대되는 경향을 나타내고 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 동일한 유입 유량 조건에서 밸브 내부 실린더의 입출구 직경 변화에 대해 수치해석을 수행하였으며 TCV 입출구의 압력강하값을 고찰하였다. 이러한 결과를 이용하여 밸브의 유량계수와 저항계수를 계산하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 실린더의 출구직경을 고정시키고 입구직경을 변화시켜 TCV 입출구 압력강하를 살펴본 결과 입구직경이 증가할수록 밸브 전후의 압력차가 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 출구직경이 증가할수록 압력차가 감소하는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 TCV 설계 시 밸브 내부 실린더의 입출구 직경을 크게 할수록 밸브 전후의 압력차가 작아져 우수한 성능을 가질 수 있을 것으로 판단된다.

2) 수치해석 결과를 이용하여 유량계수와 저항계수를 계산한 결과 입출구 직경이 증가할수록 유량계수는 증가하고 저항계수가 감소함을 알 수 있었다. 특히, 출구직경이 12mm인 경우, 유입구경에 관계없이 전체적으로 큰 유량계수 값을 얻었으며, 입구직경이 증가할수록 비례적으로 유량계수가 증가함을 알 수 있었다.

3) 상기 결과를 종합해 본 결과 TCV 내부의 실린더 입출구 직경 크기가, 입구 10mm, 출구 12mm일 경우 밸브 전후의 압력차가 가장 적었으며, 유량계수가 가장 크게 나타났다. 따라서 본 연구를 통하여 고찰한 모델 중 실린더의 입출구 직경이 각각 10, 12mm일 경우가 가장 우수한 성능을 가진 밸브임을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] Patankar, S. V., Theoretical Hydordynamics, 5th ed, Hemisphere, New York(1990).
- [2] Patankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington, D. C.(1980).
- [3] 荒川忠一, 數値流體工學, 한미출판사, 서울(1997).
- [4] Versteeg, H. K. and Malalasekera, M., An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method, John Wiley & Sons Inc., New York.(1995).
- [5] Yang, G., Causon, D., Saunders, R., and Batten, P., A Cartesian Cut Cell Method for Compressible Flows - Part B: Moving Body Problems, Aeronautical Journal, Vol. 101, No. 1001(1997).
- [6] Spalding, B., PHOENICS Encyclopedia, article on CFD to SFT, The status and future of CFD(1998).