

압력 평형식 온도 조절 밸브의 유동특성 연구

김태안* · 김윤제**

A study on the flow characteristics of temperature control valve by pressure compensation

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

Key Words: Temperature Control Valve by Pressure Compensation(TCV), Piston open(개도), Flow rate(유량), Cartesian cut-cell method(분할격자기법)

ABSTRACT

TCV(Temperature control valve by pressure compensation) controls temperature constantly, when it is sending steam or high temperature water to heating device of heat exchanger. For designing TCV, the ratio of piston and hole diameters is one of the important design parameters. Numerical analysis is carried out to elucidate the flow characteristics in the TCV with different port areas of cold and hot waters, using the $k-\epsilon$ turbulence model and Cartesian cut-cell method. Numerical results show that the exit flow rate is mainly affected by pressure distribution in the piston.

1. 서 론

온도가 서로 다른 유체를 두 개의 배관을 통해 공급하여 하나의 배관으로 유입시키는 경우, 각 유체 유입량을 조절하여 온도 및 물성을 일정하게 유지하는 역할은 매우 중요한 공정 조건이 된다. 산업체 현장에서 흔히 볼 수 있는 이러한 공정의 유입 비율 조정은 각각의 배관에 밸브를 장착하고, 밸브의 개폐를 통해 이루어지게 된다. 그러나 실제 운전시 여러 가지 비정상적인 운전 조건의 발생으로 유입측 배관의 공급유체가 일정하게 공급되지 않는 경우가 발생하게 된다.

TCV(Temperature Control Valve)는 한쪽 배관에 공급되는 유량 변동이 발생하여도 밸브 내부의 압력 변화에 피스톤이 반응하여 유체 유입구의 크기를 조절하여 2차측의 출구 유체 조성 비율을 일정하게 유지

하는 밸브이다. 따라서, TCV를 배관의 중간에 설치할 경우 별도의 조작이 필요없이 2차측의 유체 조성 비율을 일정하게 하여 유체 공급을 가능하게 한다. 이러한 압력 평형식 온도 조절 밸브를 설계하는데 있어서 피스톤의 직경과 냉·온수구의 비가 설계인자로서 중요한 역할을 한다. Fig. 1은 압력 평형식 온도 조절 밸브를 나타낸것이다. 압력 평형식 온도 조절 밸브 개발에 있어서 한가지 설계변수의 변경은 예측치 못한 여러 부분에 영향을 미치기 때문에, 유체역학적인 지식 기반이 없는 상태에서의 밸브개발은 실험에 의한 시행착오를 거쳐 이루어질 수밖에 없다. 그러므로 유동현상에 대한 종합적인 이해 없이는 많은 개발자금 및 시간의 낭비가 불가피하다. 또한, 해석 결과에 대한 분석 능력이 없이는 동일한 실수를 다음 설계시에 반복하게 되므로 예산 및 시간의 중복 소모가 이루어지게 된다. 따라서 밸브 내부유동에 대한 종합적인 이해 및 각각

* 성균관대학교 대학원

** 성균관대학교 기계공학부

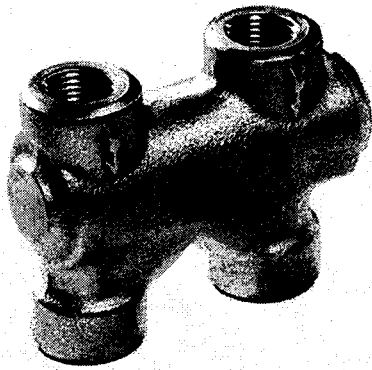


Fig. 1 TCV model

의 설계인자들 사이의 상호 연관성을 규명하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 밸브 내부 유동에 대한 종합적인 이해 및 설계인자들 사이의 상호 연관성을 규명하기 위해 밸브 내부의 피스톤 움직임에 따른 공급 유체의 냉·온수구의 비에 대한 피스톤 내부의 압력 및 출구 부분의 유체 속도를 수치해석을 통해 고찰하였다.

2. 수치해석

2.1. 지배방정식

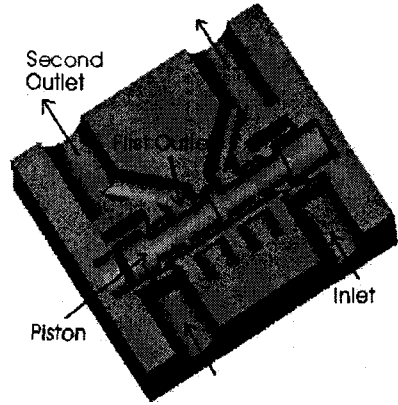
밸브의 유동 특성을 고찰하기 위해 유동장과 온도장에 사용된 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식 그리고 난류변수 k 와 ϵ 에 대한 방정식은 일반적인 보존형 Navier-Stokes 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi \vec{V}) - \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) = S_\phi \quad (1)$$

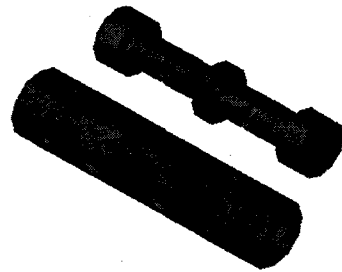
여기서 Γ_ϕ 는 변수 ϕ 에 대한 유효확산계수이며, S_ϕ 는 생성항을 나타내고 있다[1,2]. 또한 난류장 해석을 위하여 여러 가지 난류 모델중에서 본 연구에서는 Launder & Spalding (1974)이 제시한 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다[3].

2.2. 해석 모델 및 격자계

수치해석영역은 주된 관심사가 되는 피스톤을 중심으로 밸브 전체를 대상으로 하였다.



(a) Sectional drawing of TCV



(b) Piston

Fig. 2 Sectional drawing of TCV and piston

해석 모델은 크기가 가로 100mm, 세로 120mm, 높이를 36mm로 하였으며 밸브 유·출입구의 직경은 17mm로 동일하게 모델링 하였다. 또한 밸브 내부의 유입구는 10mm로 하였으며, 출구 부분은 12mm로 모델링 하였다. Fig. 2는 밸브의 단면과 피스톤을 묘사한 것이다. 밸브 내부의 유동 특성을 고찰하기 위하여 피스톤 부분을 중심으로 하여 3차원 격자계로 구성하였으며 밸브 내부의 피스톤을 이용하여 냉·온수구의 개도를 1/4씩 변화시켜 가면서 수치해석을 수행하였다.

작동유체로써 물을 사용하였다. 온수측은 60℃의 물을 사용하였고, 냉수측은 상온인 15℃의 물을 사용하였다. 입구속도는 냉·온수구에 동일하게 4.4m/s로 하였다. 본 연구에서는 현재 주류를 이루고 있는 일반 곡선좌 표계(body-fitted coordinate)를 사용하지 않고, 직각 좌표계(cartesian coordinate) 내에서의 분할격자

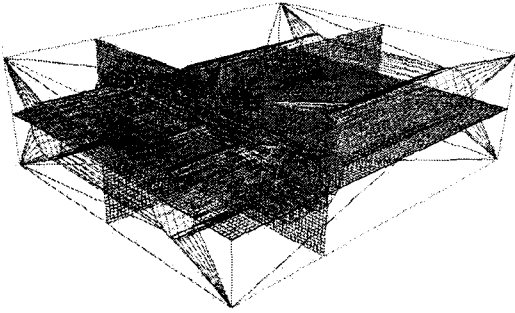


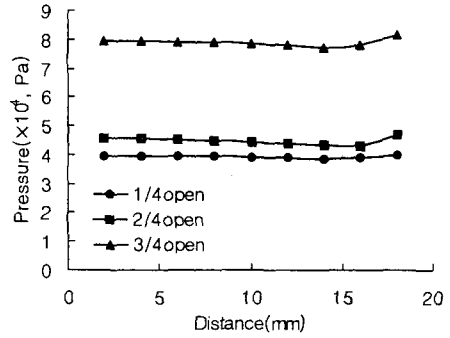
Fig. 3 Computational domain using cartesian cut-cell method

기법(Cartesian cut-cell method)[4]을 이용하였다. 이 방법은 격자생성 등 모델링 작업에 과도한 시간과 노력을 요구하는 난점을 보완할 수 있으며, 결과 도출이 어려운 문제에 보다 쉽게 접근할 수 있고 수렴성도 보장되는 방법이다. 밸브 모델은 CAD 프로그램을 사용하여 3차원 모델링 하였고, 분할격자기법을 제공하는 상용CFD 프로그램인 PHOENICS-VR(virtual reality)[5]을 이용하여 COMPAQ SP750 장비(Intel P3 Xeon 733MHz of 2CPU, 1GB memory)에서 계산을 수행하였다. Fig. 3은 해석에 사용된 $90 \times 100 \times 40$ 개의 격자를 도시하고 있다. 출구에는 압력조건과 종속변수의 구배가 0인 조건(Neumann condition)을 사용하였고, 벽경계면에서 속도성분은 점착조건(no-slip condition)을 사용하였다.

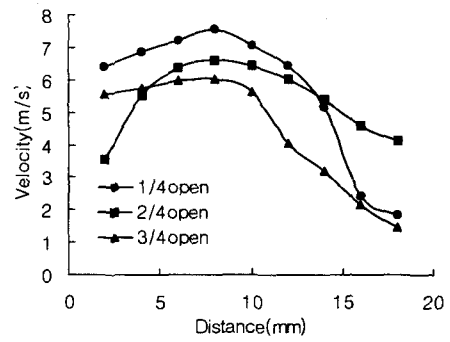
3. 결과 및 고찰

실제 경우 TCV는 외부 조건에 의한 유체 유입구의 압력변화에 냉·온수구의 압력차가 발생을 하며, 이로 인하여 밸브 내부의 피스톤이 압력변화에 반응을 하여 2차 출구측의 유량을 조절하는 기능을 가지고 있다. 하지만 수치해석을 수행하는데 있어서 피스톤의 변화를 직접적으로 해석할 수 없기 때문에 반대로 동일한 속도를 입구에 설정하고 피스톤 내부의 압력변화와 출구부분의 속도를 측정하는 방법을 택했다. 이는 역으로 2차 출구측과 같이 유입조건이 변화했을 때, 유체 유입구측에서 일정한 속도를 가질 수 있는 지 고찰하고자 하였다.

밸브 내부의 유동을 고찰하기 위해 피스톤을 이용하여 온수측 개도를 1/4, 2/4, 3/4로 변화시켜 가면서



(a) Pressure with various piston open



(b) Velocity with various piston open

Fig. 4 Pressure and velocity with various piston open

수치해석을 수행하였다. 온수구와 냉수구는 서로 대칭형이기 때문에 온수구 피스톤 내부의 압력분포와 실제 밸브 출구 부분인 79mm 되는 지점의 온수구 2차 출구부분의 속도를 고찰하였으며, 결과를 이용하여 각 개도에 따른 출구 부분의 유량을 비교하였다.

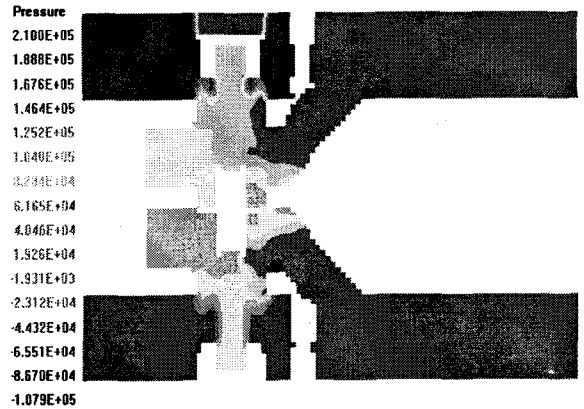
Fig. 4는 각각의 피스톤 개도에 따른 밸브의 압력 및 속도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 4-(a)의 x축은 피스톤 온수구 끝단으로부터의 거리를 나타내며, y축은 피스톤 내부의 압력을 나타낸 것이다. Fig. 4-(b)의 x축은 2차 온수구 출구의 직경방향으로의 거리를 나타낸 것이며(Fig. 2 (a)참조), y축은 2차 출구측의 속도를 나타낸 것이다. 온수측 개도가 2/4일 경우를 보면 냉·온수구의 피스톤 내부의 압력을 각지점에 대해 평균한 값들이 4.59×10^4 Pa 로 일정한 것을 알 수 있다. 또한 2차 출구측의 속도를 평균한 값이 5.4m/s 로 일정한 것을 알 수 있다. 이로부터 피스톤 내부의 압력이 동

일하면 출구측 유량도 동일하다는 것을 유추할 수 있다.

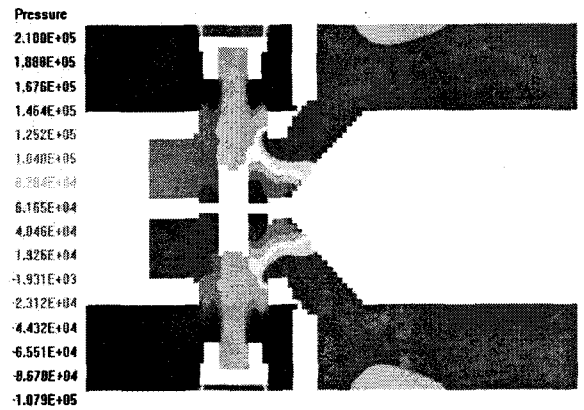
온수측의 개도가 1/4일 경우, 온수측의 압력이 $3.85 \times 10^4 \text{Pa}$ 로 냉수측 압력인 $7.85 \times 10^4 \text{Pa}$ 보다 낮은 것을 알 수 있다. 2차 출구측의 속도 분포를 살펴보면 온수측이 5.7m/s로 냉수측보다 큰 것을 알 수 있다. 이는 온수측 출구에서의 유량이 냉수측 출구의 유량보다 큰 것을 알 수 있다. 또한 피스톤 내부의 압력차에 의하여 피스톤이 온수측으로 압력 평형을 위해 이동을 하여 출구측의 유량을 일정하게 함을 알 수 있다. 온수측 개도가 3/4인 경우는 1/4 개도와 비교했을 때 압력과 속도 분포가 반대 현상을 나타내는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 각각의 개도에 따른 수치해석 결과 중 밸브 전체에 대하여 압력 분포를 도시한 것이다. 2/4 개도시 출구측의 압력 분포가 냉·온수구 모두 비슷한 값을 가지는 것을 알 수 있다. 하지만 1/4 개도와 3/4 개도시 압력 분포가 냉수측과 온수측이 서로 다른 것을 알 수 있다. 또한 피스톤 내부의 압력 분포는 서로 반대되는 값을 가지는 것을 알 수 있으며, 입구 부분의 압력이 피스톤을 통과하면서 손실이 일어나는 것을 볼 수 있다. 하지만 2/4 개도시 압력 손실량이 출구 부분에서 빠르게 회복되는 것을 볼 수 있다. 이것은 피스톤에 의해 압력 평형을 이루고 있는 경우 압력 손실이 작은 것으로 판단된다.

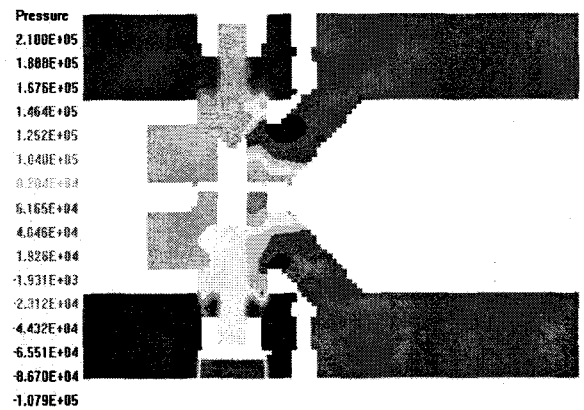
Fig. 6은 각 개도에 따른 속도 분포를 밸브 전체에 걸쳐서 도시한 것이다. 각각의 그림을 보면 출구 부분의 속도 분포가 일정하지 않은 것을 볼 수 있다. 이것은 수치 해석시 격자 문제로 출구 부분을 유동이 완전히 발달될 수 있을 만큼의 길이를 주지 않아 발생한 결과로 판단된다. 개도에 따라 유사한 값을 갖는 것 같지만 실제 출구 부분의 평균 속도를 계산한 결과를 보면 2/4 개도인 경우 5.4m/s로 일정하였고, 1/4 개도와 3/4 개도시에는 냉·온수구의 속도차가 1m/s 이상 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이는 결국 출구 부분에서 유량의 차이를 가져오게 된다. 따라서 유입부인 냉·온수구에 서로 다른 일정한 온도의 유체가 유입된다면 2/4 개도시는 항상 일정한 온도를 유지할 수 있으나, 그 외의 경우 혼합 유체의 온도차가 발생하는 것은 당연한 결과이다. 따라서 피스톤 내부의 압력 평형에 의해 항상 출구측의 유량을 일정하게 하는 것은 결국 밸브를 통해 빠져나가는 유체의 유량을 일정하게 하여 혼합 유체의 온도를 일정하게 유지시키는 것



(a) 1/4 piston open



(b) 2/4 piston open



(c) 3/4 piston open

Fig. 5 Contour plots of static pressure distribution

을 의미한다. 따라서 TCV는 온도 조절 기능을 갖는 것으로 판단된다.

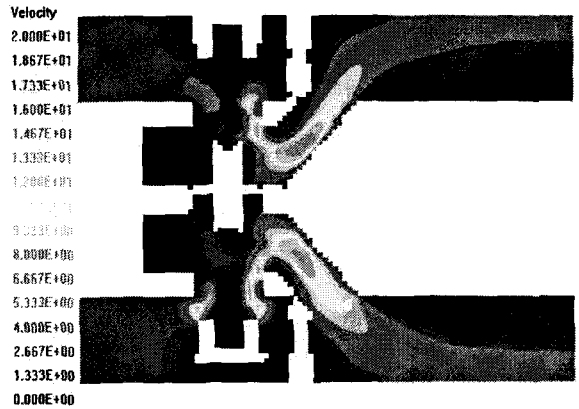
4. 결론

본 연구에서는 TCV 내부 피스톤의 위치에 따른 압력 분포와 출구 부분의 속도 분포를 수치 해석을 통해 고찰해본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

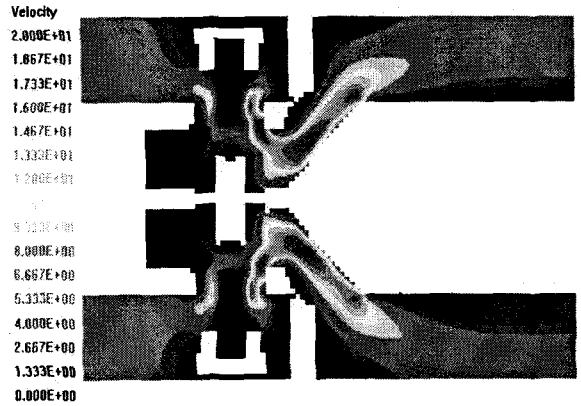
- 1) 밸브 내부의 피스톤 위치에 따른 내부 압력 분포를 살펴본 결과 2/4 개도에서 동일한 압력을 보였으며, 1/4, 3/4 개도의 경우는 냉·온수구의 비에 따라 서로 상반되는 압력 분포 경향을 보였다. 또한 출구부분의 압력을 분석해 본 결과 2/4 개도일 경우 가장 빠른 압력 회복을 보였다.
- 2) 출구 부분의 속도 분포를 고찰한 결과 1/4, 3/4 개도에서 냉·온수구의 출구 속도분포가 서로 달랐지만, 2/4 개도에서는 동일한 속도 분포를 보였다.
- 3) 피스톤 내부의 압력 분포에 따라 출구 부분의 속도 분포가 달랐으며 피스톤 내부의 압력이 동일할 경우 출구 유속이 일정한 것을 알 수 있었다. 따라서 피스톤 내부의 압력을 일정하게 한다면 출구부분의 동일한 유속을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 그러므로 TCV는 내부 피스톤의 압력 평형을 이용하여 출구측의 유속을 일정하게 할 수 있으며, 또한 유입구에서 일정한 온도의 유체가 공급된다면 출구를 지난 혼합 유체가 일정한 온도를 가질 수 있는 온도 조절 밸브의 기능을 가지는 것이라 판단된다.

후 기

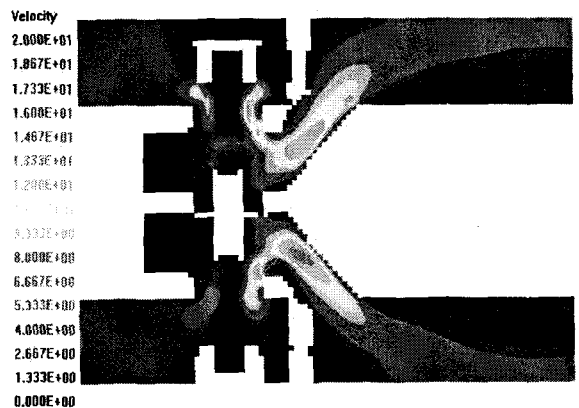
본 연구는 “산학연 공동기술개발 컨소시엄”의 지원 하에 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.



(a) 1/4 piston open



(b) 2/4 piston open



(c) 3/4 piston open

Fig. 6 Contour plots of velocity distribution

참고문헌

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