

고온·고압용 벨로우즈 실 밸브의 유동 특성 및 열응력 해석

김광수* · 이종철** · 김윤제**

Thermal Stress Analysis and Flow Characteristics of a Bellows-Seal Valve for High Pressure and Temperature

Kwang-Su Kim*, Jong-Chul Lee** and Youn-Jea Kim**

Key Words: Bellows (벨로우즈), Thermal Stress (열응력), Fluid-Structural Interactions (유체-구조 연성해석)

ABSTRACT

Because of design and manufacturing costs, it is important to predict an expected life of bellows with component stresses of bellows as its design factors and material characteristics. In this study, numerical analyses are carried out to elucidate the thermal and flow characteristics of the bellows-seal gate and globe valves for high temperature (max. 600°C) and for high pressure (max. 104 kgf/cm²) conditions. Using commercial codes, FLUENT, which uses FVM and SIMPLE algorithm, and ANSYS, which uses FEM, the pressure and temperature fields are graphically depicted. In addition, when bellows have an axial displacement, thermal stress affecting bellows life is studied. The pressure and temperature values obtained from the flow analyses are adopted as the boundary conditions for thermal stress analyses. As the result of this study, we got the reasonable coefficients for valve and thermal stress for bellows, compared with existing coefficients and calculated values.

1. 서론

유독성 가스나 액체, 방사선 물질 또는 인화성 물질 등과 같이 인체 및 환경에 유해한 유체가 계통 외부로 누출되어서는 안되는 물질을 취급하는 산업 시설에서, 만약 누출이 발생한다면 매우 커다란 사고가 발생할 수 있다. 특히 외부 누출의 가능성은 밸브와 같은 유동제어시스템에서 스템의 운동에 따른 패킹재의 마모와 시효에 따른 패킹재의 탄력성 저하로 항상 존재한다. 그러므로 벨로우즈 실 밸브는 위와 같은 위험한 물질을 취급하는 시스템에 설치되어야 한다. 벨로

우즈 실 밸브는 외부 누설을 근본적으로 차단하는 금속제의 벨로우즈 기구를 밸브의 운동부에 설치하여 유체 수송 및 제어의 운전 신뢰성을 높이고, 아울러 밸브를 통한 외부 누출을 근본적으로 차단하기 위하여 개발된 제품이다. 따라서 벨로우즈 실 밸브는 외부 누출에 의한 사고를 차단하기 때문에 환경 친화적인 밸브라 말할 수 있다.

환경 문제가 중요한 문제로 제기되는 현실에서 대규모 석유화학 공정 플랜트에 있어서 휘발성 유기 물질의 누설은 심각한 환경 문제로 대두되었을 뿐만 아니라 1990년 미국의 환경 보호청 (EPA: Environmental Protection Agency)은 공기오염 물질을 일으키는 189개의 오염물질을 발표하고 오염 원인이 되는 누설문제를 조사한 결과 전체누설의 약 60%가 밸브에

* 성균관대 대학원

** 성균관대 기계공학부

책임저자 E-mail : yjkim@skku.edu

서 발생함을 알게 되었다. 이에 EPA는 외부 누출에 대한 규제를 500 ppm 이하로 제한하고 이러한 규제 경향은 점차 강화되고 전 세계적으로 확대되고 있는 실정이다. 또한 벨로우즈 밸브는 외부 누출을 방지하는 최적의 밸브로 인식되어 수요와 사용 빈도는 날이 갈수록 증가하고 있다.

그러나 벨로우즈 실 밸브를 개발하는데 있어, 밸브 내 유동과 벨로우즈의 특성에 대한 분석과 이해 없이는 시간과 경비만 증가할 뿐이다. 특히 벨로우즈 밸브의 주요 부품인 벨로우즈와 밸브의 내부 요소에 대한 고온 또는 고압의 영향은 반드시 고려되어야 한다. 더구나 벨로우즈는 조작빈도에 따라 수명의 한계가 있는 것이 단점이다. 그러므로 벨로우즈의 재료 특성과 설계 값, 하중, 열응력 등에 의한 벨로우즈의 수명을 예측하는 것은 매우 중요하다. 또한 작동 유체가 밸브를 지날 때 외류의 성장으로 인한 정체 영역이 유동을 방해하고 압력강하를 발생시켜 에너지 손실을 가져오기 때문에 이에 대한 연구도 필요하다.

본 연구에서는, 0.1 m (4 inch) 벨로우즈 실 게이트 및 글로브 밸브에 대해 고온 (600 °C)과 고압 (104 kgf/cm²)이 각각 적용되는 경우, 발생하는 열 특성과 유동 특성에 대해 연구하였다. 수치적 연구를 통해 밸브 내 압력 및 속도 분포를 구하였고, 설계된 밸브 성능을 고찰하기 위해 저항계수와 유량계수를 구하여 대표 값과 비교하였다. 특히 벨로우즈가 축 방향 변위를 가지고 운동할 때, 고온과 고압에 의해 발생하는 벨로우즈의 열응력을 예측하여 벨로우즈 파단 시, 예상 파단 지점을 도출하였다.

2. 지배 방정식

2.1. 유동 지배 방정식

정상상태 난류 유동을 해석하기 위한 지배 방정식은 다음과 같다.

연속 방정식:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) \quad (2)$$

에너지 방정식:

$$\nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) \quad (3)$$

위 식에 k_{eff} 는 유효 열전도도를 나타내며, $\vec{\tau}$ 는 점성 항으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{\tau} = \mu((\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \vec{I}) \quad (4)$$

여기서 I 는 단위 텐서를 나타낸다. 이러한 비선형 지배 방정식의 해를 구하기 위해 FVM과 하이브리드 기법을 사용하였다⁽¹⁾. 또한 SIMPLE 알고리즘⁽²⁾을 사용하여 방정식을 이산화하였으며, 난류 유동 해석을 위해 Launder와 Spalding⁽³⁾이 제시한 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

2.2. 벨로우즈 운동 방정식

온도, 압력 및 변위 등의 경계 조건이 시간에 따라 변화하는 과도 비선형 운동을 해석하기 위해 Newmark 시간 적분법과 Newton-Raphson 알고리즘을 사용하였다⁽⁴⁾. Newmark 시간 적분법은 과도 선형 운동 해석에 사용되며 선형 구조 해석을 위한 과도 동적 평형 방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F^a\} \quad (5)$$

여기서 $[M]$, $[C]$, $[K]$, $\{u\}$, $\{F^a\}$ 는 각각 질량 행렬, 감쇠 (damping) 행렬, 강성 (stiffness) 행렬, 변위 벡터, 그리고 하중을 나타낸다. 식 (5)의 해는 full, reduced 그리고 모드 중첩의 세 가지 방법으로 구할 수 있다. 본 연구에서는 full Newmark 시간 적분법을 사용하였다. 또한 비선형 조건을 만족시키기 위해 아래와 같은 Newton-Raphson 알고리즘을 도입하였다.

$$[K_i^T]\{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F_i^{nr}\} \quad (6)$$

$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} + \{\Delta u_i\} \quad (7)$$

위 식에서 $\{u_i\}$ 는 미지의 자유도 (DOF, Degree of Freedom) 벡터이고, $[K_i^T]$ 와 $\{F_i^{nr}\}$ 은 각각 자코비안 (Jacobian) 행렬과 요소 내부 하중에 상응하는

벡터 복원 하중 (vector restoring loads)이다. 본 연구에서 $\{u_i\}$ 와 $[K_i^T]$ 는 각각 접선 강성 행렬과 전도도 행렬로 요소 응력과 복원력 벡터 그리고 요소 열 흐름으로부터 계산된다. $\{F^m\}$ 과 $\{F^c\}$ 는 복원력 벡터와 전체 변위량이다.

벨로우즈 운동을 해석하기 위해서는 열전달 해석이 먼저 수행되어야 한다. 과도 열전달은 시간과 위치 함수인 Fourier 방정식을 이용하여 해석할 수 있다.

$$K_{xx} \frac{d^2 T}{dx^2} + K_{yy} \frac{d^2 T}{dy^2} = \rho c \frac{dT}{dt} \quad (8)$$

식 (8)은 강성 행렬을 이용하여 다음과 같은 비선형 과도 열전달 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$[C(T)][\dot{T}] + [K(T)]\{T\} = \{Q(T, t)\} \quad (9)$$

위의 해를 구하기 위하여 FEM을 사용하였으며 이산화 시간에서 비선형 방정식의 해를 구하기 위하여 전술한 바와 같이 Newmark 시간적분법과 Newton-Raphson 알고리즘을 사용하였다⁽⁵⁾.

2.3. 유량계수와 저항계수

밸브의 성능은 3가지 계수로 나타낼 수 있는데 본 연구에서는 통상 사용되는 유량계수 ($C_v [m^2]$)와 저항계수 (K)로 밸브의 성능을 확인하고 수치해석의 타당성을 확인하였다.

유량계수:

$$Q = C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad (10)$$

운동량 방정식:

$$C_v = \frac{29.9 D^2}{\sqrt{K}} \quad (11)$$

여기서, $\Delta P [Pa]$ 는 밸브의 입출구간 압력차이며, $D [m]$ 는 밸브 입출구 직경을, $\rho [kg/m^3]$ 는 작동 유체의 밀도를 나타낸다.^{(6),(7)}

3. 해석 모델과 격자계

밸브의 유동해석에 있어 특성상 개도 변화에 따라 많은 모델에 대해 해석을 수행하여야 한다. 이는 해석 시 많은 시간을 낭비하게 하는 요소가 된다. 따라서 본 연구에서는 상용코드인 FLUENT에서 제공되는 UDF (User Defined Function)와 MDM (Moving/Deforming Mesh)을 사용하여 계산시간을 단축하였다⁽⁸⁾. UDF와 MDM을 이용하여 벨로우즈 변위의 변화로 밸브 스템의 속도를 정의하여 밸브 개도를 변화시켰다. 이를 통해 한 번의 계산으로 다양한 개도변화에 대한 결과를 얻음으로써 계산시간을 수배 단축하였다. Figure 1과 같은 모델에 대하여 고압 (max. 10.2 MPa)과 대기온도가 적용되는 경우 (모델 1)와 고온 (max. 600°C)과 대기압이 적용되는 경우 (모델 2), 모두 2가지에 대해 해석하였다. 작동유체는 물을 사용하였고 밸브와 벨로우즈의 재질은 321SS를 사용하였다. Figures 1(a)와 (b)는 각각 유동해석에 사용된 0.1 m (4") 글로브 밸브와 게이트 밸브의 격자계이며, (c)는 벨로우즈 해석에 사용된 격자계이다. 유동해석에 사용된 총 격자수는 약 25만 여개이며 벨로우즈 해석에 사용된 노드 수는 글로브 밸브용 벨로우즈가 32,000 여개, 게이트 밸브용 벨로우즈가 200,000 여개이다.

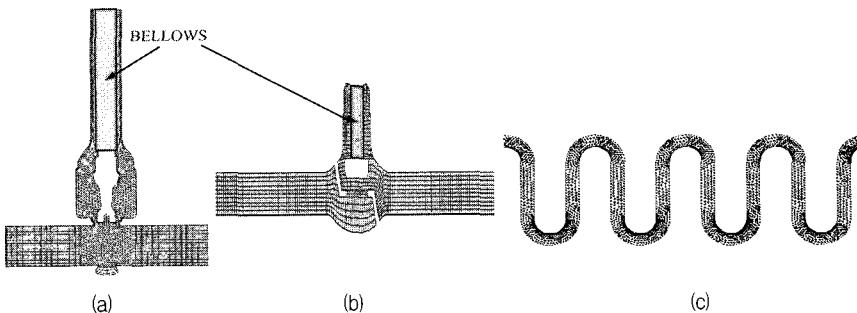


Fig. 1 Grid systems of the valves and bellows: (a) gate valve, (b) globe valve and (c) bellows for gate valve

유동 해석을 위해 압력과 온도가 입구 경계조건으로 주어졌으며 관 내부와 밸브 내부 벽면은 no-slip 조건을 주었다. 또한 밸브의 개폐를 위해 벨로우즈가 변형할 때, 벨로우즈에 작용하는 과도 열응력을 구하기 위해 최대 신장 변위 (14.4×10^{-3} m)부터 최대 압축 변위 (21.6×10^{-3} m)까지 총 36×10^{-3} m의 변위를 글로브 밸브용 벨로우즈에, 최대 신장 변위 (45.3×10^{-3} m)부터 최대 압축 변위 (132×10^{-3} m)까지 총 177.3×10^{-3} m의 변위를 게이트 밸브용 벨로우즈에 하중으로 주었다.

만일 유동에 의한 벨로우즈 주변의 압력과 온도 분포를 알지 못하고 적당한 값을 조건으로 주게 되면, 벨로우즈 내 열응력 분포를 정확히 얻을 수 없다. 뿐만 아니라 열응력으로부터 계산되는 벨로우즈의 수명 및 예상 파단 지점 또한 잘못 예측할 수밖에 없다. 본 연구에서는 이러한 오류를 피하기 위해 일방향 연성해석 (one-way FSI (Fluid-Structural Interaction)) 기법을 사용하여 유동과 구조를 연성 해석하였다⁽⁹⁾.

먼저 유동해석을 통해 벨로우즈 표면 압력과 온도 분포를 구하였다. 계산된 표면 압력과 온도 분포를 벨로우즈 해석 시 초기 조건 및 경계조건으로 주어 열응력을 계산하였다.

4. 해석 결과

4.1 유동해석

4.1.1 모델 1

Figures 2와 3은 모델 1의 조건 하에서 계산된 각 밸브별 압력 분포를 개도 변화에 따라 나타낸 것이다. 두 그림 모두 스템이 하강함에 따라 (개도가 감소함에 따라) 스템 바로 아래의 압력이 현격하게 변화하는 것을 알 수 있다. 그리고 작동 유체가 밸브를 통과하면서 압력 강하가 발생하는 것 역시 쉽게 알 수 있다. 게이트 밸브의 경우, 압력 강하의 크기는 개도

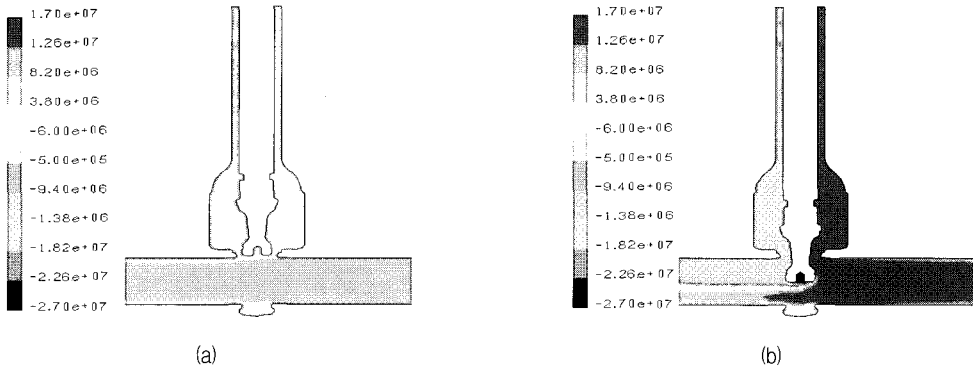


Fig. 2 Pressure distribution at the mid-section as the changes of the level of open for model 1 with 0.1m bellows seal gate valve [Unit: Pa]: (a) 100% open and (b) 50% open

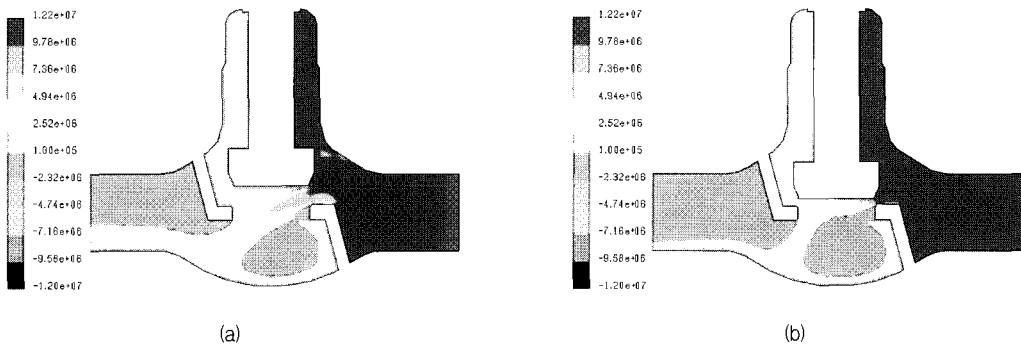


Fig. 3 Pressure distribution at the mid-section as the changes of the level of open for model 1 with 0.1m bellows seal globe valve [unit: Pa]: (a) 100% open and (b) 50% open

가 100%인 경우를 제외하고 모든 개도에서 유사하였다. 압력강하는 밸브를 통과한 후 회복되는데 개도가 클수록 더 빨리 회복되었다 (Fig. 2 참조). 이는 게이트의 하강 정도가 낮아서 유동을 덜 방해하기 때문이다. Figure 2(b)를 보면 게이트 하단부에 압력이 현저히 낮은 영역을 확인할 수 있는데 이러한 정체 영역이 바로 유동을 방해하고 에너지 손실을 유발한다. 벨로우즈 운동해석에 사용된 벨로우즈 주변의 압력 분포는 개도가 100%인 경우를 제외하고 모든 개도에서 유사하였다.

글로브 밸브의 경우, 스템 바로 아래 압력이 낮은 영역이 비교적 넓게 분포하고 있다 (Fig. 3 참조). 이는 유동이 글로브를 통과하면서 밸브 전 영역에 퍼지는 것이 아니라 대부분 관으로 향하기 때문에 발생한 와류로 인한 결과이다. 또한, 게이트 밸브와 마찬가지로 개도가 클수록 와류의 크기가 작으며 에너지 손실이 작다. 그러나 개도가 큰 경우 유동이 밸브를 빠져나가면서 내부 벽과 고속으로 충돌하고 글로브 근처에 부분적으로 부압을 형성하여 적절한 재질의 선택이 이루어지지 않는다면 마모 및 손상으로 인해 관 전체를 교체해야 하는 문제를 일으킬 수 있다.

4.1.2 모델 2

Figure 4는 모델 2의 조건하에서 각 밸브의 압력 분포를 나타내고 있다. 해석 결과 모든 개도에서 모델 1과 그 크기만 다를 뿐 정체 영역이나 와류와 같은 압력 분포는 유사하게 나타났다. 그러나 압력 회복 정도는 모델 1에 비해 모델 2가 빠르게 나타나고 있음

을 Figs. 2와 4(a)를 비교하면 쉽게 알 수 있다. 글로브 밸브의 경우, 50% 개도에서 모델 1에서 발생했던 와류는 모델 2에서 발생하지 않는다는 사실을 알 수 있다.

Figure 5는 각각의 밸브에 대해 벨로우즈 주위의 온도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적인 온도 분포는 작동유체의 온도와 비슷하나 벨로우즈 근처 온도는 두 밸브 모두 작동 유체의 온도보다 낮다. 이는 벨로우즈 근처로 유입되는 작동유체의 양이 적고, 벨로우즈 두께가 얇아 상대적으로 온도가 낮은 대기가 냉각 효과를 보이기 때문에 발생하는 현상이다. 즉 U자 형태의 벨로우즈가 마치 휀 (fin) 처럼 작용을 하여 내부 온도 분포에 영향을 미치는 것이다. U자 형태가 많이 분포하고 있는 게이트 밸브의 온도 변화가 글로브 밸브보다 더 큰 사실이 이를 말해주고 있다. 이러한 온도 분포는 벨로우즈의 열응력과 수명에 영향을 미치며 벨로우즈 해석 시 중요 인자로 작용한다.

4.1.3. 유량 계수와 저항 계수

Table 1은 개도가 100%인 경우에 대해 수치 해석을 통해 얻은 유량 계수와 저항 계수를 대표 값과 비교한 것이다. 저항 계수 K가 대표 값과 비교하여 작다는 사실을 알 수 있다. 이는 수치 해석시 주어진 표면 거칠기가 실제 거칠기보다 작아 생긴 현상임을 유추할 수 있다^{(7),(10)}. 또한 유량 계수와 저항 계수는 식 (10)과 (11)에서 알 수 있듯이 반비례 관계를 가지고 있다. 따라서 수치해석에서 얻은 유량 계수가 대표 값보다 클 것이라는 것을 예측할 수 있으며 계산

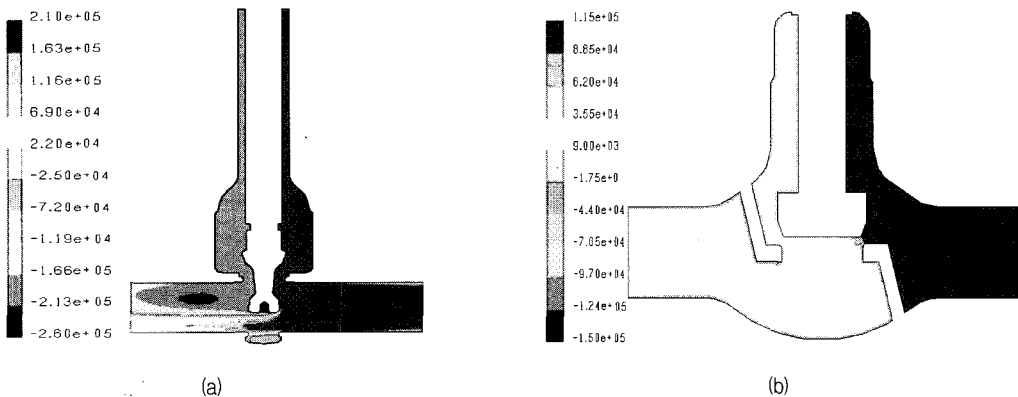


Fig. 4 Pressure distribution at the mid-section of model 2 with 50% level of open [unit: Pa]: (a) 0.1 m bellows seal gate valve and (b) 0.1 m bellows seal globe valve

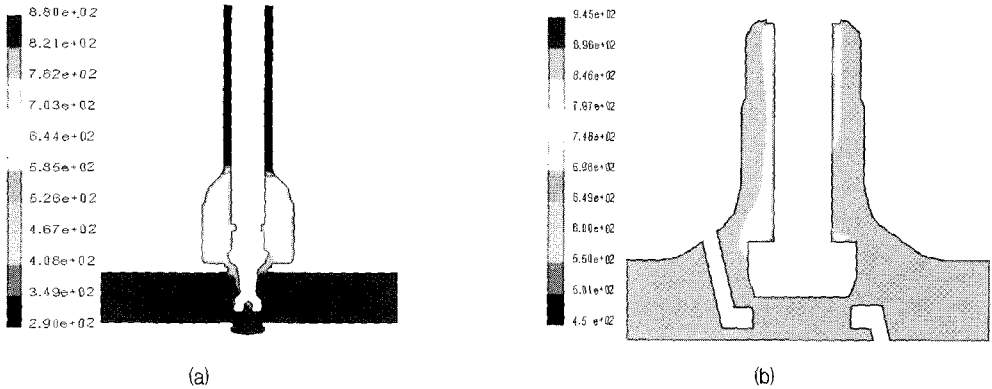


Fig. 5 Temperature distribution [unit: K]: (a) bellows-seal gate valve with 25% open and (b) bellows-seal globe valve with 50% open

Table 1 Flow and resistance coefficients for 100% open

	Numerical analysis		Typical data ⁽⁹⁾	
	Cv	K	Cv	K
Globe	0.123	5.81	0.11	6.5
Gate	0.803	0.138	0.77	0.15

결과 이를 확인할 수 있었다.

4.2. 벨로우즈 운동 해석

Figures 6과 7은 각각 게이트 밸브와 글로브 밸브의 열응력 강도와 축 방향 변위를 나타낸 것이다. 벨로우즈 내 온도는 작동 유체와 접하고 있는 곳에서 최대 600℃부터 대기와 접하고 있는 곳에서 265.9 2℃로 분포하고 있다. 각 그림의 (a)에서 보듯이 최대 열응력은 U자 모양의 파인 곳에서 발생하고 있으며 약 900 MPa 이다. 일반적으로 스테인레스 스틸은 최대 1 GPa의 항복 응력을 가진다. 따라서 U자형 벨로우즈는 피로에 의한 파괴를 제외하고 안전하게 사용될 수 있다. 그러나 정확한 벨로우즈의 예상 수명을 알기 위해 S-N 곡선을 이용한 계산과 실험이 필요하다.

또한, 각 그림의 (b)는 벨로우즈가 압축될 때, U자형 벨로우즈 요소당 총 변위를 나타낸다. 1개의 U자 당 최대 변위는 하중 조건을 주었던 벨로우즈의 끝단(스탬과 접한 부분)에서 발생하였다. 벨로우즈가 신장될 때 역시 동일한 결과가 나타났다. 계산된 열응력과 최대 변위가 발생하는 지점을 통해 벨로우즈의 수명을 예측할 수 있고, 최초 파단 지점이 벨로우즈의 끝단이 될 것이라는 것을 쉽게 예측할 수 있다

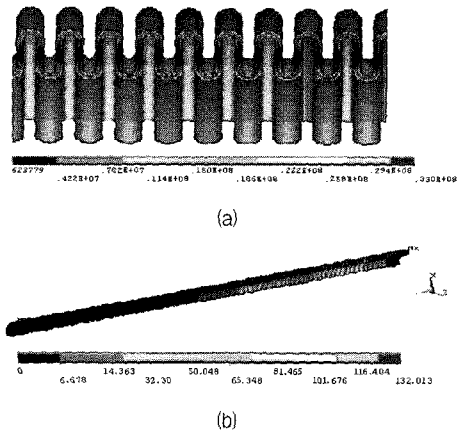


Fig. 6 Thermal stress intensity and displacement of bellows for gate valve: (a) thermal stress intensity and (b) displacement of U-shape bellows [Unit: mm]

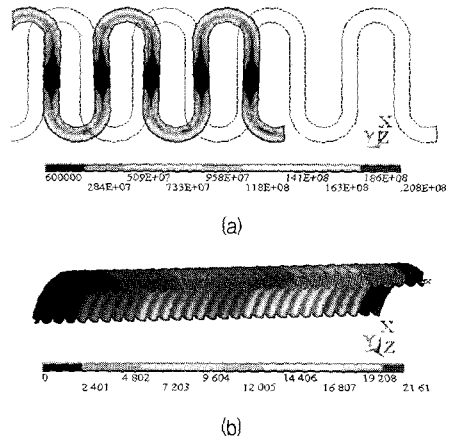


Fig. 7 Thermal stress intensity and displacement of bellows for globe valve: (a) thermal stress intensity and (b) displacement of U-shape bellows [Unit: mm]

5. 결론

본 연구에서는 0.1 m (4 inch) 벨로우즈 실 게이트 및 글로브 밸브에 대한 유동 특성을 수치적으로 연구하였다. 또한 일방향 FSI 기법을 사용하여 벨로우즈 실 밸브에 사용되는 벨로우즈에 대해 작동 유체의 압력과 온도에 의해 발생하는 열응력에 대해 축 방향 변위를 주어 수치적으로 연구하였다. 해석 결과로부터 유량 계수, 저항 계수를 구하여 밸브 성능을 고찰하였고, 벨로우즈에 걸리는 열응력 등을 확인하였다. 이러한 결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1) MDM과 UDF를 이용하여 개도 변화에 따른 유동해석을 하였다. 개도가 클수록 압력 강하에 대한 회복이 빨리 이루어졌으며 와류가 상대적으로 작았다. 또한 작동 유체의 압력이 낮은 밸브 내에서는 와류가 소멸되었다.

2) 해석 결과를 이용하여 100% 개도에 대한 유량 계수와 저항 계수를 구하였다. 계산된 계수를 일반적인 대표 값과 비교하였을 때 적절하였으며 해석을 통해 얻은 K는 실제 값보다 작다는 것을 확인하였다.

3) 유동 해석을 통해 얻은 벨로우즈 표면에서의 압력과 온도 분포를 이용하여, 벨로우즈의 열응력과 U자형 벨로우즈 요소당 총 축방향 변위를 계산하였다. 최대 열응력은 재료의 일반적인 항복응력보다 낮았으며 최대 변위는 스템과 연결된 끝단에서 발생하였다. 따라서 U자형 벨로우즈와 사용된 재료는 사용하기에 적합함을 알 수 있었다. 또한 해석 결과로부터 벨로우즈의 최초 파단 지점이 끝단이 될 것이라는 것을 예상할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Patankar, S. V., 1990, Theoretical Hydrodynamics, 5thEd, Hemisphere, New York.
- (2) Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington, D.C.
- (3) Launder, B. E. and Spalding, D. B., 1972, Lectures in Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, London.
- (4) ANSYS Software, <http://www.ansys.com>.
- (5) Pinheiro, B. and Favilla Ebecken, N. F., 1994, "An optimized implementation of the Newmark /Newton-Raphson algorithm for the time integration of nonlinear problems," Communications in Numerical Methods in Engineering, Vol. 10, No. 12, pp. 983~902.
- (6) 김태안, 김윤제, 2002, "압력평형식 온도조절밸브 성능 향상을 위한 연구," 제 2회 한국유체공학학술대회, pp. 671~674.
- (7) Dickenson, C. T., 1999, Valves, Piping and Pipelines Handbook, Elsevier Advanced Technology, New York.
- (8) Fluent Software, <http://fluent.com>.
- (9) Turnock, S.R. and Wright, A.M., 2000, "Directly coupled fluid structural model of a ship rudder behind a propeller," Marine Structure, Vol. 13, pp. 53~72.
- (10) Fisher Controls International, Inc., 1977, Control valve handbook, Fisher Controls International, Inc., Iowa.