스팀 트랩 바이메탈 밸브의 열 구조해석

김 동 환, 김 동 현[†], 류 경 중

국립경상대학교 항공우주시스템공학과 및 공학연구원

Thermal Structural Analysis of Steam Trap Bimetal Valve

Dong Hwan Kim, Dong Hyun Kim[†], Gyeong Joong Ryu

Dept of Aerospace and System Engineering, Gyeongsang National Univ. (GNU), JinJu 660-701, Korea

(Received November 13, 2011; revision received October 15, 2012)

ABSTRACT: In this study, structural thermal analyses for steam trap valve considering contact boundary condition have been conducted for high temperature and pressure conditions using non-linear finite element method. Full steam trap model also including regulator and housing structures is considered in order to accurately simulate the complex valve mechanism and investigate thermal stress levels, and structural behaviors of core structural parts. It is typically shown that the present computational approach can give very useful results for design engineers so that the operating performance and structural safety of the steam trap valve can be verified in the design process.

Key words: Steam trap(스팀 트랩), Bimetal(바이메탈), FEM(유한요소법), Thermal analysis(열 해석), Contact b.c(접촉경계조건), Valve(밸브)

1. 서 론

가정에서 쓰이는 압력 밥솥에서부터 발전소 발전 설비에 이르기까지 모든 증기 시스템은 스팀 트랩 없이 완성될 수 없다. 스팀 트랩은 증기 시스템과 응축수 회수 배관을 연결하는 핵심 장비로서, 응축수와 비압축성 가스는 배출하고, 생증기의 누출을 방지하기 위해 각각의 용도에 맞는 스팀 트랩이 필수적으로 설치되어야 한다.⁽¹⁾ 이는 증기가 필요한 곳에 효율적으로 공급되어야 함과 동시에 회수되는 열의 에너지 손실을 최소화하기 위한 필수불가결한 요소이다. 응축수를 원활히 제거하지 못했을 시에는 가열 효과가 저하되며, 가열 시간이 길어져 생산성이 저하되고, 수격 현상(water hammer)을 일으켜 설비와 배관을 손상 시킨다. 또 가열 온도의 불균형으로 제품

의 불량을 가져오며, 증기관과 사용 설비의 내부 부식 또는 재질의 노화를 촉진 시킨다.⁽²⁾ 반대로 생증기가 유출될 때는 증기의 잠열을 충분히 이용하지 못하므로 에너지 손실이 발생하고, 회수관 내의 압력이 높아져 효율적인 응축수 회수가 어려워진다. 다양한 스팀 트랩 모델 중 온도 조절식 스팀 트랩, 그중에서 바이메탈 스팀 트랩(bimetallic steam trap)의 국산화 개발과 관련되어, 역 설계된 국산화 제품을 열-구조 해석을 수행하여 안정성 평가 및 성능 평가를 시행하였다.

본 연구에서는 저온, 저압 용도의 BK-28 모델과 상대적으로 고온, 고압 용도의 BK-212 모델 각각의 바이메탈 밸브와 하우징의 구조 및 열 해석을 수행하였다. 바이메탈은 그 특성상 각각의 변형량이 크지 않기 때문에 여러 개를 적층하여 사용하게 된다. 또한, 증기 포화 온도 곡선에 근접하여 작동해야 하므로 이단 접촉 형태를 사용하여 온도 변화에 따른 시차를 두고 단계적 변형을 일으키게끔 하였다. 따라서 적층 순서에 따라 접촉 경계 조건이 달라지므로 이를 고

[†] Corresponding author

Tel.: +82-55-755-2083; fax: +82-55-755-2081

E-mail address: dhk@gnu.ac.kr

려한 바이메탈의 열변형 해석을 수행하였다. 또한, 고온, 고압의 증기에 의해 작동되는 장치인 만큼 충분한 안전율을 고려하여 설계된 하우징의 열응력/구조 해석을 수행하였다. 실제 장착하여 실험할 수 없는 장치인 만큼 첨단화된 CAE 기법으로 설계의 안전성을 검토하고, 작동성을 확인해 보았다.

2. 전산해석기법

바이메탈과 같은 이중 재료의 결합구조는 직교 이방성 재료로 모델링 할 수 있으며 탄성 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽³⁾

$$[E] = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} & 0 & 0 & 0 \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} & 0 & 0 & 0 \\ E_{31} & E_{32} & E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E_{66} \end{bmatrix} \quad (1)$$

고온 환경의 탄성 구조물에 온도 조건 $\Delta T(x, y, z)$ 이 주어지면 열변형 효과 $\{\epsilon_T\}$ 를 고려한 총 변형률은 후크의 법칙에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\epsilon\} = [C]\{\sigma\} + \{\epsilon_T\} \quad (2)$$

$$\{\epsilon_T\} = \{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 0 0 0\}^T \Delta T \quad (3)$$

여기서, compliance 행렬 $[C] = [E]^{-1}$ 로 정의되며, 응력-변형률 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\sigma\} = [E](\{\epsilon\} - \{\epsilon_T\}) \quad (4)$$

본 연구에서는 유한요소 열 구조 해석을 위해 상용 FEM 프로그램인 SAMCEF(Ver. 6.3)를 활용하였다. 바이메탈의 독특하게 설계된 두께 분포 형상 때문에 모든 구성 요소들은 3차원 tetrahedron parabolic second order mesh 요소에 기반을 두어 모델링 하였으며, 복합재 평판 요소에 대해 상호평가 및 검증을 수행하였다.

3. 해석결과 및 검토

3.1 바이메탈 시트의 열변형 해석

스팀 트랩의 구성 요소를 구분하자면 크게 바이

메탈 밸브와 하우징 두 부분으로 나눌 수 있다. 바이메탈 밸브는 스팀 트랩의 핵심 요소로서 증기와 응축수에 의한 온도 변화에 따른 스팀 트랩 시스템의 개폐 여부를 결정짓는다. 하우징은 바이메탈 밸브가 장착되는 부품으로서 고온, 고압의 극한 환경에서 증기와 응축수를 분리 배출하고, 내부에 장착되는 거름망으로 불순물을 거르는 역할을 하게 된다.

Fig. 1은 고온, 고압의 BK-212 모델의 바이메탈 밸브 체결 부품도를 보여주고 있다. 레귤레이터를 기준으로 위로는 두 장씩 겹쳐지며 마주 보는 한 쌍의 바이메탈(bimetal)이 다층을 이루며 접촉 조건으로 적층된다. 하부에는 시트(seat)와 접촉되어 온도 조건에 따른 열변형으로 스템(stem) 파트를 움직여 바이메탈 밸브의 개폐를 결정하는 원리로 작동하게 된다. 조절 링(adjust ring)과 스템은 나사산으로 결합되어 초기 장착 위치를 조절할 수 있으며, 전체 바이메탈 밸브를 구성하게 되어 있다. 이처럼 조절 링과 스템의 결합을 제외하고는 모두 접촉 경계 조건으로 이루어져 있어 경계 조건 설정에 유의할 필요가 있

Fig. 1 Part view of the bimetal valve assembly.

Table 1 Material property to bimetal valve parts

	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio	Mass density [kg/m ³]	Thermal expansion coefficient [10 ⁻⁶ /K]
Bimetal : FeNi18Cr12	200	0.3	7930	17.8
Bimetal : FeNi31Co8Cr6	180	0.3	8160	4.8
Bimetallic Regulator : titanium alloy	113	0.3	4420	8.8
Other Internals : Stainless steels	200	0.3	7850	16

다. 본 연구에서 함께 고려한 BK-28 모델의 바이메탈 밸브 또한 같은 설정을 하며, 단지 바이메탈 개수와 적층 순서만 다르게 되어 있다. 바이메탈 개수와 적층 순서의 차이는 바이메탈 만곡 시 발생하는 변형을 적층 순서로 적절히 분배하여 개폐시간을 조절하기 위함이다. Table 1은 바이메탈 밸브와 관련된 주요 부품의 재질과 물성치를 보여주고 있다.

3.2 바이메탈 시트의 열변형 해석

단일 바이메탈의 열 변형 정도를 알아보기 위해 93, 200, 316, 482, 593℃일 때의 조건을 부가하여 해석을 수행하였다. 유한요소 모델링에 사용된 총 절점(node)의 수는 7,785개이며, 총 solid 요소 수는 28,580개 이다. 본 연구에서는 이중 재질 간의 접합은 두 개의 solid 모델을 glue 요소로 묶어 하나의 solid 모델로 인식하도록 하였다. 본 연구에서 고려한 바이메탈은 표면에 미세한 원형의 단차가 형성되어 있는데, 이를 정밀하게 고려하기 위해 solid 요소를 적용하였다.

경계 조건은 레귤레이터에 부착되어 바이메탈의 변형을 제한하게 되는 가이드 홀의 모서리에 3자유도 구속 조건을 가하여 열 변형에 따른 접촉 경계 조건을 모사하였다.

Fig. 2(a)는 최대 온도 조건인 593℃를 부가하였을 때의 선형 열 변형 해석 결과이다. 본 해석 조건에서 빨간색으로 표현되는 최대 변위는 1.479 mm로 나타났는데, 이는 바이메탈 두께 1.6 mm의 약 92%에 해당한다. Fig. 2(b)는 기하학적 대변형 효과를 고려하여 해석한 결과이다. 같은 조건에서 비선형 해석 결과로 최대 변위는 약 1.407 mm를 보였다. Fig. 3는 단일 바이메탈의 온도 변화에 따른 열변형량 비교 결과를 보여주고 있다. 선형 해석 결과보다 비선형 해석 결과의 경우 stiffening 효과로 변위 수준이 좀 더 낮게 나오는 것을 확인할 수 있다.

3.3 바이메탈 레귤레이터 구조 열변형 해석

선형 해석으로 단일 바이메탈에 대한 열 변형 해석을 수행한 후, 각각의 모델에 맞는 적층 방법과 밸브 부품들을 모두 모델링하여 실제와 유사하게 접촉 경계 조건을 고려한 열 구조 해석을 수행하였다. 레귤레이터는 하우징에 볼트 체결 구조로 결합되므로 하단부는 자유도를 모두 구속하였고, 조절 링 또한 스템과 나사산으로 체결되므로 fix 결합 조건으로 상

(a) Linear analysis result

(b) Nonlinear analysis result

Fig. 2 Thermal deformed shape of single bimetal at critical temperature condition(593℃).

Fig. 3 Comparison of thermal displacements for the bimetal seat between linear and nonlinear analyses.

호 고정하였다. 그 외에는 모두 접촉 경계 조건으로 각각의 바이메탈 간 접촉, 최하단 바이메탈과 레귤레이터 접촉, 최상단 바이메탈과 조절 링 접촉, 레귤레이터와 시트의 접촉, 시트와 스템의 접촉이 있다. 따라서 온도가 올라가는 경우 바이메탈이 열 변형 굽힘 현상을 일으킴에 따라 조절 링을 밀어 올리고, 조절 링에 결합되어 있는 스템 또한 함께 위로 이동하면서 시트와 접촉하여 바이메탈 밸브를 밀폐시키게 된다.

Table 2 Bimetal valve FEM modeling

	Nodes	Elements
BK-28 Regulator	348,464	412,134
BK-212 Regulator	553,486	790,816

(a) BK-28 model (b) BK-212 model

Fig. 4 Sectional view of the bimetal valve assembly.

하우징 내부에 가해지는 증기압보다 바이메탈의 열 변형에 따른 바이메탈 밸브의 닫힘 효과가 더 커야 불필요한 증기 누출 현상을 방지할 수 있다. 또한, 포화수증기가 물로 상태 변화되어 바이메탈 온도를 떨어트리게 되면 스템이 아래로 이동하여 밸브가 열리는 개념이다. 발생하는 응력 수준은 시트 및 스템 재질의 항복강도 이하 이어야 하며, 접촉면에서의 접촉 압력은 증기압 이상이어야 한다.

Table 2는 열 변형 유한요소 해석에 사용된 총 절점 및 요소 수를 보여주고 있다. Fig. 4는 각각의 바이메탈 밸브 조립 단면도이다. Fig. 5~Fig. 6는 각각의 바이메탈 밸브 열 변형 해석 결과이다. 접촉 조건을 고려한 해석 값으로 각각 BK-28 모델은 바이메탈이 만족되며 스템을 최대 1.873 mm 끌어올려 국부적으로 최대 709 MPa 응력이 발생하였으며, BK-212 모델 역시 스템이 최대 2.9 mm 변형됨과 동시에 최대 843 MPa 응력이 발생하였다. 따라서 최대 변형 시 발생하는 응력 발생 수준이 티타늄의 항복 강도 이내에 있음을 확인하였다. 또한, 해석 결과로 BK-28 모델은 초기 조립 시 조절 링이 최소 1.127 mm 더 조여져야 하고, BK-212 모델은 최소 0.1 mm 더 조여져야 완벽히 밀폐될 것으로 예상된다.

3.4 하우징 열 변형 해석

고온, 고압 환경의 스팀 트랩 하우징 구조에 대한

(a) BK-28 displacement result

(b) BK-28 equivalent stress result

Fig. 5 Thermal displacement and equivalent stress distribution for the BK-28 bimetal valve.

(a) BK-212 bimetal valve displacement result

(b) BK-212 bimetal valve equivalent stress result

Fig. 6 Thermal displacement and equivalent stress distribution for the BK-212 bimetal valve.

(a) BK-28 bimetal valve displacement result

(b) BK-212 bimetal valve displacement result
Fig. 7 Thermal displacement for the bimetallic steam trap.

열 해석 또한 수행하였다. Fig. 8는 본 연구에서 고려한 2가지 스팀 트랩 모델에 대한 하우징 구조를 보여주고 있다. Fig. 8(a)는 BK-28 모델로 4개의 볼트가 커버와 바디를 관통하여 위아래서 8개의 너트로 체결이 되게끔 구성되어 있다. Fig. 8(b)는 BK-212 모델로 8개의 볼트가 커버에 바로 체결이 되고, 몸체를 통과하여 몸체 밑에서 너트로 체결되는 구조로 되어있다. Table 3에는 각 모델의 구조적인 물성치를 제시하였다.

Table 4는 본 해석에 사용된 격자의 수이고, Fig. 9는 각각의 모델에 대한 유한요소 열 해석 격자를 보여주고 있으며, BK-28, BK-212 모델의 하우징 구조는 같은 경계 조건을 갖고 있다. 즉 양단의 파이프 연결부는 각각 냉각관과 응축수 회수 관으로 연결되어 있으므로 clamp 요소로 6자유도 모두 구속하였으며, 커버와 몸체는 볼트로 체결되어 있으므로 fix 요소로 고정하였다. 또한, 온도, 압력 조건을 부가하기 위해 레귤레이터가 나사산으로 결합하는 지점을 경계로 삼아, 입구 조건과 출구 조건으로 나누어 부가하였으며 각각 열 해석 경계 조건은 Table 5에 제

Table 3 Material property to housing parts

	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio	Mass density [kg/m ³]	Thermal expansion coefficient [10 ⁻⁶ /K]
BK-28				
Cover/body : HSLA Steels	200	0.3	7850	16
BK-212				
Cover/body : HSLA Steels	200	0.3	7850	16
Bolt/nut : HSLA Steels	200	0.3	7850	16

Table 4 Housing FEM modeling summary

	Nodes	Elements
BK-28 Housing	138,081	685,805
BK-212 Housing	56,630	285,389

Table 5 Housing boundary condition

	내부				외부	
	입구		출구			
	℃	MPa	℃	MPa	℃	MPa
BK-28	450	8.5	36	0.09	0	0.1
BK-212	525	25	36	0.09	0	0.1

시하였다. 설치된 스팀 트랩의 외부 환경에 대한 측정 데이터가 부족하여 본 해석에서는 극한 조건에 해당하는 환경으로 가정하여 표면 온도 및 압력 조건으로 0℃와 1 atm을 부가하였으며, 먼저 열 해석을 수행하여 하우징 구조 자체의 온도 분포 특성이 열 구조 해석에 고려될 수 있도록 하였다.

Fig. 10~Fig. 11은 두 가지 스팀 트랩 모델의 하우징 구조에 대한 열 해석 결과를 보여주고 있다. 두 모델 모두 유사하게 최대 응력 수준은 하우징 커버 내부 상단 및 냉각관 연결 관내 입구 주변에서 발생하였다. Fig. 10 BK-28 모델은 0.014 mm의 변형과 최대 42 MPa의 열응력이 예측되었으며, Fig. 11의 BK-212 모델은 0.019 mm의 변형과 최대 46 MPa의 응력 수준을 보였다. 따라서 하우징 구조의 경우는 실제 운용 상황에서의 고온 열 크리프 특성을 고려하더라도 현재 설계 상태로도 충분한 구조 안전 여유를 가지고 있음을 알 수 있다.

(a) BK-28 model

(b) BK-212 model

Fig. 8 Transparent view of the bimetal type steam trap models.

(a) BK-28 mesh model

(b) BK-212 mesh model

Fig. 9 FEM mesh for steam trap housing models.

(a) BK-28 displacement result

(b) BK-28 equivalent stress result

Fig. 10 Contour of thermal displacement and equivalent stress at BK-28 steam trap housing.

(a) BK-212 displacement result

(b) BK-212 equivalent stress result

Fig. 11 Contour of thermal displacement and equivalent stress at BK-212 steam trap housing.

4. 결 론

본 연구에서는 집축 경계 및 바이메탈 적층부의 열 변형 운동 조건을 고려한 비선형 유한요소해석을 성공적으로 수행하였다. 본 연구의 결과로 거의 전량 수입에 의존하고 있는 발전소 바이메탈 밸브 및 스팀 트랩 장비의 국산화 설계 및 개발에 선행적으로 중요한 정밀 해석 기술을 확보할 수 있었다. 특히 개발된 국산 바이메탈 밸브를 요구 환경에 맞춰 조절 링의 조립 정도를 조율할 수 있었다. 저온 저압 모델인 BK-28 모델은 조절 링의 위치가 초기 설계된 위치보다 1.127 mm 더 조여져야 하고, 고온, 고압 모델인 BK-212 모델은 0.1 mm 더 조여져야 함을 알 수 있었다. 이를 통해 실험이 거의 불가능한 고온, 고압 조건의 실제적인 스팀 트랩 모델에 대해 설계 단계에서 작동성 및 구조 건전성을 예측

할 수 있는 정밀 해석 체계를 구축하였다.

후 기

본 연구는 한국남부발전(주)의 스팀트랩 국산화 개발사업 연구결과의 일부이며, 지원에 감사를 표하는 바입니다.

참고문헌

1. SAREK, 1983, Steam trapping, Proceedings of the SAREK Winter Annual Conference, Vol. 12, pp. 13-32.
2. Risko, J. R., 2011, Understanding steam traps, AIChE, pp. 21-26.
3. Samtech Samcef user's manual, 2005, Belgium.