열-구조연성해석을 이용한 Butterfly Valve의 구조안정성 평가

The Structural Stability Analysis of Butterfly Valve using Thermal-Structural Analysis

*#이문재[1], 한동섭[2], 한근조[3]

*#M. J. Lee[1](milanholic@naver.com), D. S. Han[2] , G. J. Han[3]

[1] 동아대학교 기계공학과 대학원, [2]동아대학교 BK21총괄사업단, [3]동아대학교 기계공학부

Key words : Butterfly Valve, Thermal-Structural analysis, Structural stability

1. 서론

현재 천연가스는 중요한 에너지원으로서 뿐만 아니라 산유국 및 주변국 정세 불안에서 야기되는 석유수급 불안정을 해소하고 환경문제를 고려하여 수요가 급속도로 증가되고 있다. 따라서 급속도로 증가된 천연가스의 수요를 충족시키기 위해 미국, 프랑스, 일본 등 선진국에서는 LNG의 원활한 수송과 보관을 위한 극저온 부품 기술이 함께 발전하여 전세계 시장을 장악하고 있다. 국내의 경우, 선박 건조량이 세계점유율 35%에 달하며, LNG선 건조량 세계 1위의 조선해양산업국임에도 불구하고 국내 극저온 부품소재의 기술력의 저하로 인하여 극저온 버터플라이 밸브 등과 같은 핵심부품은 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 우리나라 조선해양산업이 세계적인 경쟁력 확보가 가능하게 된 것은 경쟁력 있는 조선 기자재산업이 존재하고 있기 때문이나 기술 수준의 국산화율은 95%에 달하는 일본에 비해 우리나라의 경우 국산화율은 약 85%수준으로 경쟁국에 비해 뒤처지고 있다. 조선해양산업의 경쟁력 우위를 지속적으로 유지하기 위하여 조선해양산업의 고도화와 관련제품의 고부가가치가 시급하다. 또한 LNG 및 LPG 등은 미래의 핵심 청정연료이므로 이에 관련된 극저온 기술이 발전되어야 하며, 특히 극저온 버터플라이 밸브와 같은 핵심부품은 국산화가 시급한 시점이다. LNG 및 LPG와 같은 극저온 유체에 적용되는 버터플라이 밸브는 고도의 안전관리 체계가 가동되더라도 라인 내에 설치된 밸브가 오작하게 될 경우 엄청난 인적·물적 재해를 야기하게 되므로 밸브의 소재, 구조설계, Seat Ring 메커니즘 및 제작에 고도의 기술이 요구되므로 본 논문에서는 극저온 환경 하에서 우수한 신뢰성과 안전성이 보장될 수 있는 극저온 버터플라이 밸브에 대한 열-구조 연성해석을 이용한 강도평가를 수행하였다.

2. 제목

2.1 유한요소모델

버터플라이 밸브의 강도평가를 위해 초기모델은 3D설계 전용프로그램인 INVENTOR 10을 이용하였고, 열-구조연성해석은 범용유한요소해석프로그램인 ANSYS WORKBENCH 10.0을 사용하였다. 열-구조 연성해석을 위한 유한요소모델이 Fig. 1에서 보여지고 있다. 유한요소모델의 절점수는 129,585개이고 요소수는 222,074개이다.LNG용 초저온 버터플라이 밸브가 사용되어지는 조건을 보면, 배관이 연결된 밸브의 외부는 상온(23℃)에 노출되어 있고, 밸브내부에는 -196℃의 초저온의 유체가 흐른다. 이 조건에서는 큰 온도차로 인해 밸브의 열응력이 발생한다. 따라서 정확한 밸브의 강도해석을 수행하기 위해서 최대 압력이 작용하는 디스크가 닫힌 상태에서의 밸브의 온도차에 의한 열해석이 수반되는 열-구조 연성해석을 통해 밸브의 주요 부품인 바디(Body), 디스크(Disc), 스템(Stem), 보닛(Bonnet)에 대한 강도평가를 수행하였다. 버터플라이 밸브의 각 주요부품에 대한 물성치를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Comparison of measured roughness data

	Material	Tensile Strength	Yield Strength
Body	SUS 316	205MPa	520MPa
Disc	SCS13	205MPa	480MPa
Stem	SUS420J2	540MPa	740MPa
Bonnet	FCD450	280MPa	450MPa

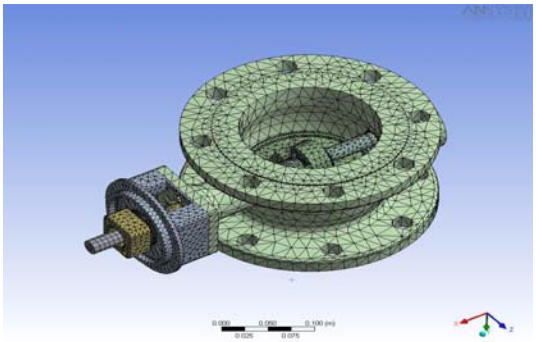

Fig. 1 Finite element shape of Butterfly valve

2.2 경계조건 및 하중조건

밸브의 외부에 23℃의 대기가 열전달이 될 수 있도록 대류조건을 적용하고 밸브 내부의 경우 앞으로는 저온 유체가 닿아있지만 뒤로는 유체가 흐르지 않기 때문에 유체가 흐르는 밸브 앞에는 -196℃의 LNG가 열전달이 되도록, 밸브의 뒤로는 23℃의 대기가 열전달이 되도록 대류조건을 적용하였다. 구속조건으로 바디와 배관이 체결되는 부위에 완전구속을 주었으며 하중조건은 유체와 맞닿는 밸브내의 부분 전체에 최대 작동압 10bar를 적용하였다. Fig. 2~Fig. 3은 밸브의 경계조건 및 하중조건을 부여한 모습이다.

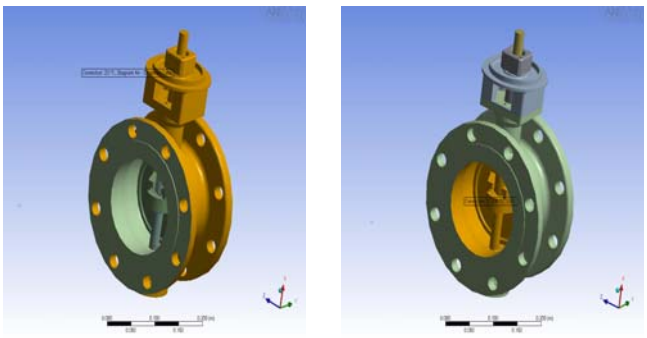

Fig. 2 Boundary condition of Butterfly valve

상온에서 사용되어지는 일반 밸브의 설계시에는 안전율을 2.0±0.3을 기준으로 하여 안정성평가를 실시하지만, 극저온 밸브에서는 열응력으로 인해 밸브에 큰 응력이 발생하므로 안전율을 3.5±0.5로 기준하여 안전성 평가를 하였다.

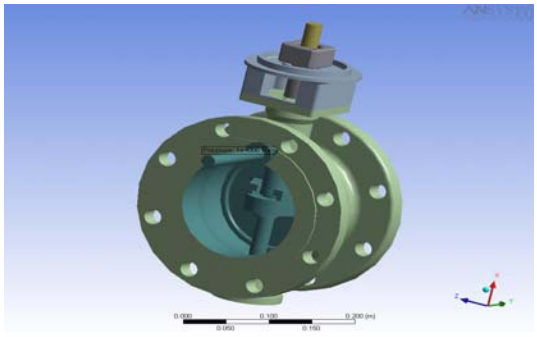

Fig. 3 Loading condition of Butterfly valve

3. 해석결과

3.1 바디의 해석결과

바디의 해석에서 최대온도는 -117.665℃이고, 최저온도는 -182.282℃이다. Fig. 4의 응력분포에서 바디와 디스크가 접하는 부분에 최대응력 42.25MPa이 발생하는 것을 알 수 있다. 재료의 항복강도와 비교하여 안전율이 4.85로 구조적으로 안정하다는 것을 알 수 있다.

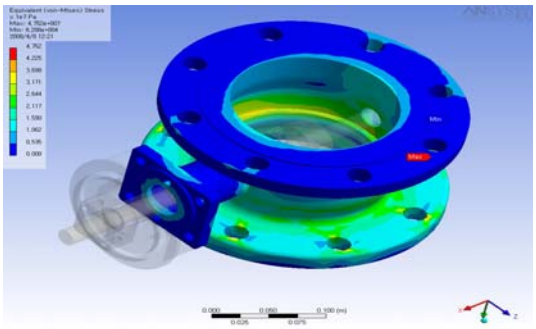

Fig. 4 Stress distribution of body

3.2 디스크의 해석결과

디스크의 해석에서 최대온도는 -158.292℃이고, 최저온도는 -191.723℃이다. Fig. 5의 응력분포에서 바디와 디스크가 접하는 디스크의 하단부의 끝단에 최대응력 107.3MPa이 발생하는 것을 알 수 있다. 재료의 항복강도와 비교하여 안전율이 3.3로 구조적으로 안정하다는 것을 알 수 있으나 다른 부품에 비해 상대적으로 낮고 디스크가 차지하는 중요도를 감안해서 보강을 포함한 재설계가 필요할 것이다.

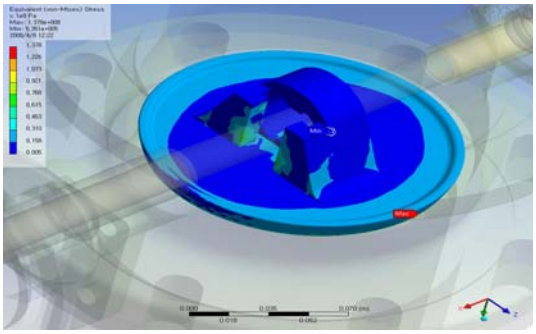

Fig. 5 Stress distribution of disc

3.3 스템의 해석결과

스템의 해석에서 최대온도는 -158.292℃이고, 최저온도는 -191.723℃이다. Fig. 6에서 보여지는 응력분포에서 스템과 디스크가 접하는 부분에 최대응력 88.49MPa이 발생하는 것을 알 수 있다. 재료의 항복강도와 비교하여 안전율이 6.1로 구조적으로 안정하다는 것을 알 수 있다.

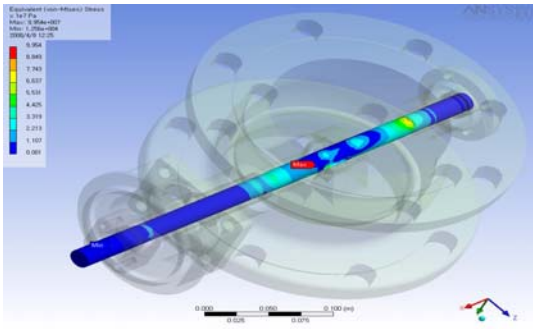

Fig. 6 Stress distribution of stem

3.4 보닛의 해석결과

보닛의 해석에서 최대온도는 -109.634℃이고, 최저온도는 -123.331℃이다. Fig. 7에서 보닛과 스템이 접하는 보닛의 상단부에 최대응력 40.2MPa이 발생하는 것을 알 수 있으며 압력보다는 대류에 의한 열응력이 스템의 응력에 영향이 있다고 할 수 있다. 재료의 항복강도와 비교하여 안전율이 6.96로 구조적으로 안정한 것을 알 수 있다.

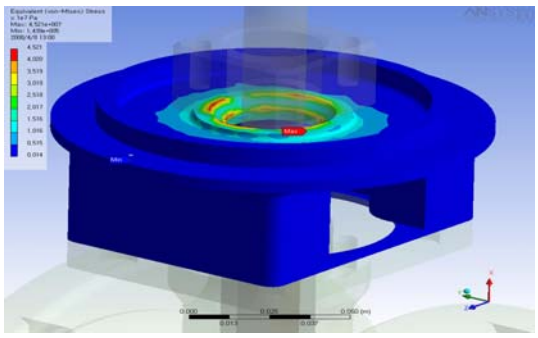

Fig. 7 Stress distribution of bonnet

4. 결론

버터플라이 밸브의 열-구조 연성해석을 시행하여 보다 실제에 가까운 정확한 해석 결과를 얻을 수 있으며, 향후 열-유동-주조의 연성해석을 통해 기존의 정적하중 상태를 고려한 밸브의 설계를 벗어나 유체가 이동하면서 밸브의 주요 제품인 바디, 디스크, 스템, 보닛과 접촉하면서 동적에너지 전달에 의한 압력을 받게 되는 정확한 밸브의 설계뿐만 아니라 향후 열-유동-구조의 연성해석을 통해 경제적이고 구조적으로 안정된 밸브를 생산할 수 있을 것이다.

1. 바디, 디스크, 스템, 보닛 등 LNG용 초저온 버터플라이 밸브의 주요 부품에 대하여 FEM방법을 이용한 열-구조 연성해석을 수행하였다.
2. 최대하중이 작용하는 조건하에서 열-구조 연성해석을 수행한 결과 바디는 디스크가 접하는 바디의 내벽 부분에서, 디스크는 바디와 접하는 하단부 끝부분에서, 스템은 디스크 연결부위에서, 보닛은 내부의 열조건을 받는 끝부분에서 최대응력이 발생한다.
3. 해석결과에서 각 주요부품의 안전율이 3.0이상으로 각 주요부품에 사용된 재료가 안전하다는 것을 알 수 있으나, 스템과 보닛의 안전율이 6을 초과한 것에서 과도 설계된 것을 알 수 있다. 향후 밸브의 경제성과 경량화를 위한 재설계가 요구되고 디스크의 안전율을 높이기 위한 보강 및 유동에서의 구조적 변경이 필요할 것이다.

후기

본 연구는 건설교통기술평가원 교통체계효율화사업의 지원금에 의해 수행되었음.

참고문헌

1. Kimura, T., tanaka, T., Fujimoto, K. and Orawa, K., "Hydrodynamic characterisrics of a butterfly valve-Prediction of pressure loss characteristics," ISA Transactions, Vol. 34, pp.319~326, 1995
2. Sacks, J., Welch, W. J., Mitchell, T. J. and Wynn, H. P., "Design and Analysis of Computer Experiments," Statistical Science, Vol. 4, No. 4, pp.409~435, 1989
3. Park, Y. C., Choi, J. S., Kang, J., "A Optimization of Butterfly Valve using the Characteristic Function," The Korea Society of ocean Engineering, 99, 149~150, 1999