

해양플랜트용 고압·고차압 제어밸브의 구조 안전성 평가

김재웅*

(논문접수일 2011. 04. 29, 수정일 2011. 08. 12, 심사완료일 2011. 08. 22)

Safety Estimation of High Pressure Drop Control Valve for Offshore Structures

Jae-Woong Kim*

Abstract

This study have goal with conceptual design for offshore structures of high pressure drop control valve for localization valve for development accomplished with flow analysis based on provision of ANSI B16.34, ANSI B16.10, ANSI B16.25 In order to localize the Offshore structures high pressure drop control valve. This study is numerical analysis for zambil offshore project of high pressure drop control valve. The solver which ANSYS workbench used for offshore structures analysis. The working fluids assumed the glycerin(C3H8O3). The structural analysis used ANSYS which is a commercial code. Stress analysis result of internal pressure in valve showed lower than yield strength. This is expect to need more detail design and verification for stem and disk structure. In this study a multi-disk of high pressure drop control valve is designed and manufactured. Then, the flow rate and high pressure dorp of fluids flowing in the high pressure drop control valve is CAE. So, this system can be easily substituted for the existing zambil offshore project system. Finally, safety estimation for trim design of high pressure drop control valve for offshore structures.

Key Words : Offshore Structures of High Pressure Drop Control Valve(해양플랜트용 고차압 컨트롤 밸브), Working Fluids(작동유체), Zambil Project(젠틸 프로젝트), Stress Analysis(응력해석)

1. 서론

前報⁽¹⁾에서는 수입에 의존하고 있는 고압 컨트롤 밸브의 국산화를 위해 볼밸브의 개폐각도에 따른 유량과 유량계수의 값을 분석하였고, 밸브 내압에 대한 응력해석을 수행하여 해양플랜트에 적용 가능한 기초 연구를 수행하였다.

고압·고차압 제어 밸브는 유전 지역에서의 드릴링을 위한 분선 장비의 고압의 Mud Pump에서 생성되는 350bar의 압력을 125bar로 감압 제어시켜 고압 유체(해수, 시멘트, 석회석성분, Lub Oil 성분 등)로 구성된 성분을 Barge선 하부에 분사 노즐

을 78개정도 설치하여 분출시키면, 드릴링시 바지선 하부와 해저의 머드를 분리시키고 선체를 부양 하고, 세척을 하기 위한 장치에 사용되는 파이프 라인상의 고압 제어 밸브이다.

해양플랜트 및 산업체에서 사용되는 밸브는 배관 내를 흐르는 유체의 유량이나 방향, 압력, 온도 등을 제어하는 유체기기의 핵심부품으로써 기본적으로는 개폐, 과압방지, 역지, 교축 등의 네 가지 기능을 수행한다.

고압·고차압 제어밸브는 전·후단에서의 큰 압력차로 인해 높은 운동에너지가 발생되어 밸브 교축점에서의 압력이 유체의 포화 증기압보다 낮아지게 되면 이 부분에서 유체는 다수의

* 한국폴리텍항공대학 항공메카트로닉스과(jwkim@kopo.ac.kr)
주소: 664-708 경남 사천시 이금동 438번지

기포를 발생시키게 된다. 이렇게 생성된 기포가 밸브 후단으로 이동하면서 유체내의 마찰로 인해 유속은 점차로 감소하고, 아울러 압력이 회복됨에 따라 기포가 연속적으로 붕괴된다.

Rahmeyer 등⁽²⁾은 트림 유로의 형태를 구불구불한 형태로 하여 공동현상이 감소하는 것을 발견하였다. 국외 제어밸브 제작 업체 CCI, FISHER, DRESSER 등의 경우, 유체의 운동에너지를 낮추기 위하여 MULTI-STAGE, MULTI-PATH 고차압 제어밸브 트림을 개발하여 밸브 주요부품들의 손상을 방지하고 있지만, 국내 실정은 최근에 고차압 제어밸브 연구에 관심을 갖기 시작하여 그 기술력이 국외와 상당 수준 차이가 있다^(3,4).

본 연구에서는 수입에 의존하고 있는 해양플랜트용 고압·고차압 컨트롤 밸브를 대우조선해양 잼빌 프로젝트의 요구에 의해 고압·고차압 밸브의 내부 트림에 대한 구조 안전성을 검토한 후 설계에 반영하고자 한다.

2. 이론적 배경

유한요소해석에 있어 선형구조해석은 정적하중 하에서 구조물의 응답을 계산하는 수치해석 방법이다. 일반적인 비선형-시간의존성 문제에 관한 운동방정식은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = F(t)$$

[M]=질량행렬, [C]=감쇠행렬, [K]=강성행렬, (1)
x=변위벡터, F(t)=하중벡터

정적해석에서는 관성효과가 무시되므로 식 (1)의 평형방정식은 다음 식과 같이 간략히 표현할 수 있다.

$$[K]x = F(t) \quad (2)$$

[K]는 강성행렬로서 구조물이 외력에 의해 소성변형을 유발할 수 있음을 의미한다. F는 정적인 작용하중으로서 시간 변동하중은 고려되지 않으며, 관성효과(질량, 댐핑)는 무시된다.

그리고 구조물의 온도분포도를 결정하기 위한 일반적인 열전달식은 다음 식과 같이 정의할 수 있다.

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

t=시간, [C]=비열행렬, [K]=전도행렬, (3)
T=온도, Q=열전달률벡터

식 (3)은 온도변화에 따라 재료의 열적 특성치들(열전도계수, 비열 등)과 경계조건 등이 변화할 수 있고, 또한 시간의존성 경계조건들을 고려하는 가장 일반적인 열전달식이다.

본 연구에서는 정상상태에 관한 문제를 다루기 때문에 온도와 경계조건 등이 시간에 의존하지 않는다. 따라서 식 (3)은 다음 식과 같이 간략히 표현된다.

$$[K(T)]T = QT \quad (4)$$

정상상태에서는 시간의 영향을 고려하지 않으며, [K]와 Q는 상수이거나 온도의 함수가 될 수 있다.

일반적으로 구조물은 온도가 증가하면 팽창하고, 감소하면 수축한다. 이러한 물리적 현상으로부터 열변형이 발생한다. 초기 온도 T_0 에서 T로 변화할 때 생기는 열변형률은 다음 식과 같이 정의 된다.

$$\epsilon_T = \alpha(T - T_0) \quad (5)$$

α = 선형열팽창계수

물체 내부의 온도가 변화하는 동안 물체 자체의 구속된 움직임 또는 강제 변위구속 등으로 인해 열응력이 발생한다. 심한 온도변화를 경험하거나 급격한 가열 또는 냉각으로 물체 내에 큰 온도차가 발생하는 경우에는 구조물 내에 열 저항력도 커지고 이로 인해 파손의 위험에 직면할 수 있다. 이러한 열응력은 다음 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_T = E \alpha \Delta T$$

E = 탄성계수 (6)

이와 같이 구조물의 온도분포에 따른 열응력을 식 (6)과 같이 계산할 수 있고, 외력에 의한 구조물의 응력을 식 (2)로부터 구할 수 있다. 이러한 열전달에 의한 온도차로 인한 열응력과 외부하중에 의한 응력 들을 함께 표시하면 다음 식과 같다.

$$\sigma = [E](\epsilon - \epsilon_T) \quad (7)$$

본 연구에서 수행하고자 하는 구조해석은 고차압 밸브에 작용하는 작동 유체의 내압에 의한 밸브의 변형거동을 분석하고, 내부 유체의 온도 50°C를 고려한 열전달 해석으로부터 온도분포를 결정하며, 내압에 의한 응력과 온도차에 따른 열응력을 동시에 고려한 연성해석을 통해 고차압 제어밸브가 구조적으로 안전한지를 평가한다.

3. 유한요소 모델링

Fig. 1은 ANSI Class 2,500 압력 제어밸브의 개략도를 나타낸 것이다. 구조해석에 활용된 유한요소모델은 실제 3차원 기

하형상에 기초하여 최대한 실물에 근접하도록 묘사하였으며, 상용유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 활용하여 구조 변형 해석과 열전달 해석 들을 수행하였다.

구조 변형해석을 위해 3차원 full integration SOLID186 요소를 활용하였고, 열전달해석을 위해 3차원 20-node thermal SOLID90 요소를 사용하였다. 이 요소들은 그 구조형태가 동일하여 단방향 및 양방향 구조-열 연성해석에 활용되는 요소들으로써 먼저 SOLID90 요소를 활용한 열전달 해석으로부터 제어밸브 내부와 외부 간 온도차이 구하고 그 결과를 구조해석 요소인 SOLID186으로 맵핑(mapping)시켜 구조-열 연성해석을 수행하였다. Fig. 2에 이들 요소들에 관한 구조형상을 나타내었다.

Fig. 3에 구조 변형해석과 열전달 해석을 수행하기 위한 유한

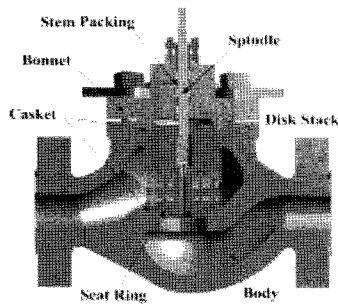


Fig. 1 3D modeling of ANSI Class 2,500 pressure control valve

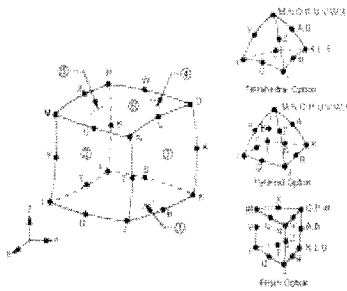


Fig. 2 Geometries of homogeneous structural SOLID186 element & 20-node thermal SOLID90 element

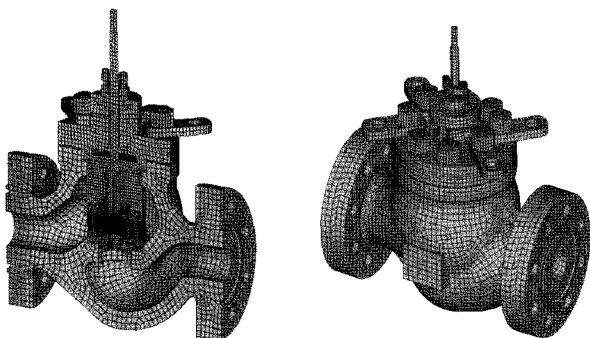


Fig. 3 Mesh generation shape of finite element model

요소모형을 나타내었다. 해석에서 묘사된 고차압 제어밸브는 body, bonnet, seat ring, spindle, disk stack, balance seal, stem packing, gasket 등으로 실제 3차원 모델과 동일하게 묘사하였다. 제어밸브 구성부품들 간 접촉조건을 고려하여 보다 정확한 해석이 되도록 하였다. 각 볼트와 너트와의 체결부는 서로 분리 될 수 없는 bonded 경계조건을 적용하였고, 그 외 부품들 간 접촉면들은 서로 상대 미끄럼은 발생할 수 있지만 침투할 수 없는 no separation 접촉경계조건을 설정하였다.

Fig. 4는 밸브의 변위구속 경계조건을 보여준다. 밸브 바디부의 볼트체결용 홀에 반경 방향과 축 방향으로의 병진 자유도(Ur, Uz)를 구속하였고, 또한 bonnet 부에 체결되는 고정장치의 볼트체결용 홀에 동일한 반경 방향과 축 방향으로의 병진 자유도(Ur, Uz)를 구속하였다. 또한 해석대상의 고차압 제어밸브는 대칭 형상이므로 그 대칭면에 대칭구속조건을 설정하였다. 밸브 내부의 고압차에 대한 변형거동을 평가하기위해 입구 쪽의 내부 벽면과 disk stick 벽면에 345bar를 인가하였고, 출구쪽 내부의 벽면과 disk stick 벽면에 112bar의 내압을 적용시켰다.

또한 disk stick 내부 MULTI-STAGE, MULTI-PATH 유로 벽면에는 입구쪽과 출구쪽의 내압 평균값 228.5bar의 압력을

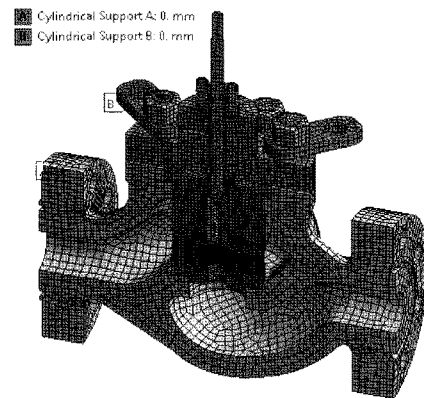


Fig. 4 Displacement boundary condition of pressure control valve

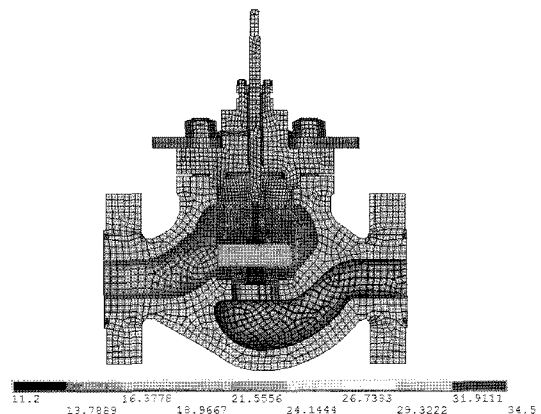


Fig. 5 Pressure distribution applied to pressure control valve

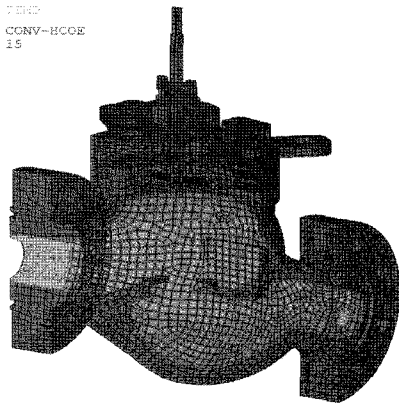


Fig. 6 Thermal boundary condition of pressure control valve

Table 1 Material property

Material	Young's Modulus [GPa]	Poisson's Ratio	Yield Strength [MPa]	Thermal Expansion [1/°C]
STS316/ GF8M	193	0.3	210	1.7e-5

작용하도록 설정하였다. Fig. 5에 고차압 밸브 내부에 적용된 압력 분포도를 나타내었다.

또한 밸브 내부의 유체온도 50°C와 밸브의 주변온도 간 온도차에 따른 열변형에 대한 안전성을 평가하기 위해 열전달 해석을 수행하였다. 고차압 제어밸브 주변의 외부공기의 온도를 10°C로 가정하였으며, 주변 공기와 제어밸브 외부표면간 열전달이 이루어지도록 대류열전달 경계조건을 설정하였다. 일반적으로 공기의 자연대류 열전달 값은 3~50W/m²°C 이다⁽⁵⁾. 본 논문에서는 열전달계수 값을 15W/m²°C로 가정하였다. Fig. 6에 이러한 온도 경계조건들을 도시하였다.

열전달 해석을 수행한 후 밸브의 온도분포를 구조해석 모델에 맵핑시켜 식 (7)에서와 같이 온도차에 따른 열변형과 내압에 의한 구조물의 변형거동을 함께 고려하기위해 연성해석을 수행하였다. 밸브해석에 사용된 기계적, 열적 재료특성치 값들은 Table 1과 같다. 일반적으로 온도변화에 따라 그 재료 특성치 값들이 변화하지만, 본 연구에서의 작동유체 온도가 50°C로서 외부 공기층과 온도차가 적은 관계로 비선형 재료거동에 관해 분석하지 않았다.

4. 구조 안전성 평가

4.1 등가응력

유한요소해석에 의한 그 결과 값들은 모두 Von Mises 항복 이론에 근거를 둔 등가응력으로 평가하였다. Von Mises 항복 이론(비틀림 변형에너지설)은 연성재료에 적합한 설이다. 물체

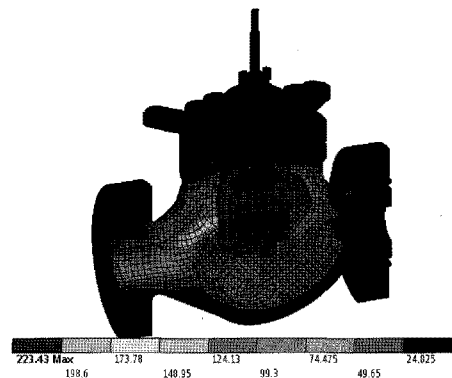
의 변형에너지는 체적의 변화를 일으키는 팽창 혹은 압축 변형 에너지와 체적의 변화가 없는 비틀림 변형에너지로 나눌 수 있다. 비틀림 변형에너지 설은 비틀림 변형에너지가 어떤 값(항복값)에 도달하면 재료가 소성변형을 일으킨다는 설이다. 본 연구에서의 응력고찰은 모두 Von Mises 등가응력 값으로 평가하였다.

4.2 내부 압력에 의한 변형해석

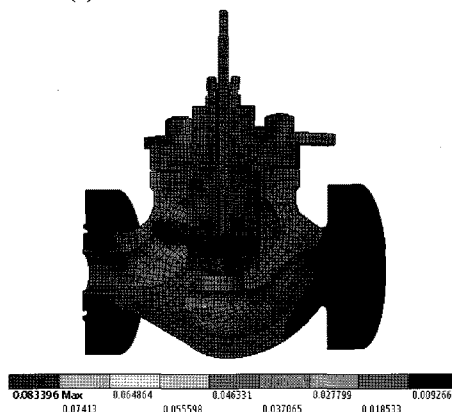
고차압 제어밸브에 작용하는 내압에 대한 구조 안전성 평가를 위해 구조 변형해석을 수행하였다. 변형해석에서 사용된 압력조건은 Fig. 5에 나타난 바와 같다. Fig. 7 (a)에 작용 내압에 관한 등가 응력분포도를 나타냈다.

고차압 제어 밸브의 body 부에서 최대 등가응력이 나타났으며, 그 수준은 약 223MPa 정도이다. ASME BOLIER & PRESSURE VESSEL CODE Part D⁽⁶⁾ 에서의 STS 316, CF8M 소재에 관한 상온에서의 항복강도는 약 250MPa 이다. 따라서 최대 등가응력의 수준이 영구변형을 유발시킬 수 있는 항복강도보다도 작은 값으로 나타나, 현재의 body부 설계에는 큰 문제가 없음을 확인할 수 있다.

그러나 수입제품 대비 내구품질을 확보하기 위해서는 반드시



(a) Von Mises stress distribution



(b) Total displacement distribution

Fig. 7 FE analysis results for valve applied to inner pressure

body 부에 관한 보강설계가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한 응력이 집중된 body 입구부의 내부 유로 형상을 완만하게 설계하여 유체저항을 감소시키는 구조이거나 케이싱 부분의 두께도 고려가 되어야 할 것으로 판단된다.

Fig 7 (b)는 변위분포도를 나타낸 것이다. 압력에 의한 내부 변형은 약 0.083mm 정도 발생할 것으로 예측되었다.

4.3 열전달 해석

고차압 제어 밸브에 작용하는 내·외부의 온도차에 대한 안전성 평가를 위해 열전달 해석을 수행한 후 열팽창에 의한 변형해석을 수행하였다.

Fig. 8은 열전달에 의한 온도분포도를 나타낸 것이다. body 내부에서는 50℃를 나타내며 외부대기는 10℃를 나타낸다. spindle 상부는 상온과 대류 열전달이 이루어져 외부 공기 온도를 유지하고 있음을 확인할 수 있다.

4.4 내부압력과 온도차에 의한 변형해석

고차압 제어 밸브에 작용하는 내압에 의한 변형과 내·외부의 온도차에 의한 열변형에 관한 안전성 평가를 검토하기 위하여 구조-열 연성해석을 수행하였다.

Fig. 9 (a)는 연성해석에 의한 등가응력 분포도를 나타낸 것이다. 내압에 의한 해석결과와 동일한 지점의 body 부에서 최

대 등가응력 값이 도출되었으며, 그 값은 내압에 의한 최대 등가응력 값보다 다소나마 작게 나타남을 볼 수 있다. 이러한 현상은 내압의 경우 body에 압축응력이 발생시키는 반면에 온도차에 의한 열변형의 경우는 인장응력이 작용하기 때문이라 판단된다. Fig. 9 (b)는 변위 분포도를 도시한 것이다. 최대 변위 값은 약 0.324mm로 나타났다.

이러한 구조-열 연성해석으로부터 관내와 관외의 온도차에 의한 열변형은 고차압 제어밸브에 영향을 거의 미치지 못함을 확인할 있다. 따라서 향후 설계 변경 모델에 관한 구조 안전성은 내압에 의한 변형해석만으로도 충분한 평가가 가능할 것으로 판단된다.

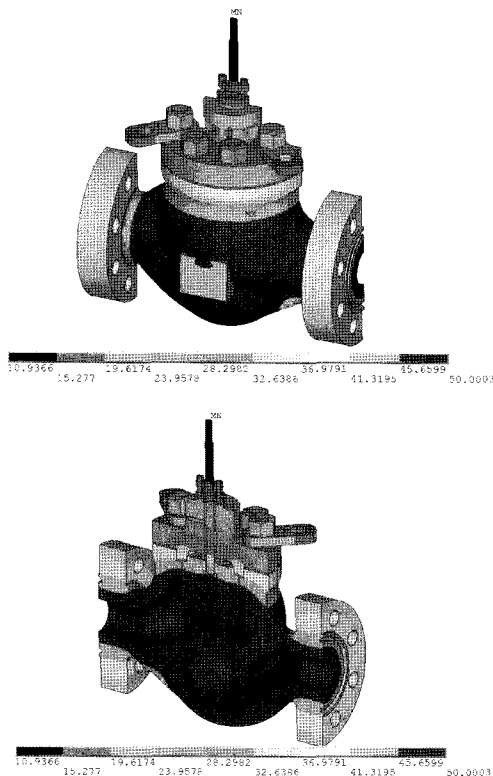
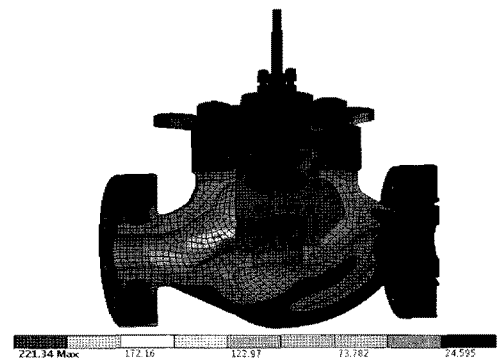
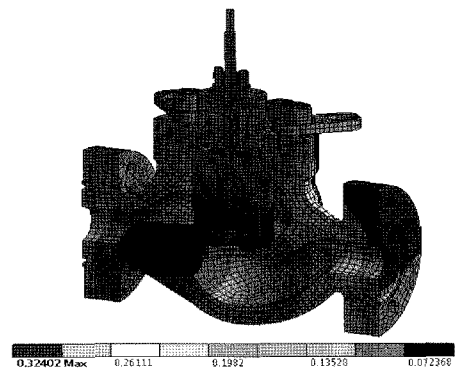


Fig. 8 FE analysis results for valve applied to heat transfer



(a) Von Mises stress distribution for close section



(b) Total displacement distribution for close section

Fig. 9 FE analysis results for valve applied to thermal expansion & inner pressure

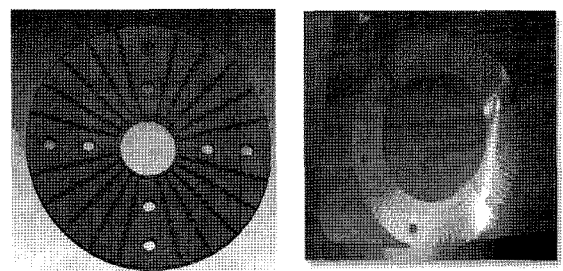


Fig. 10 Trim design of high pressure drop control valve

Fig. 10은 구조해석 결과를 토대로 설계 및 제작된 트림의 형상을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 캐비테이션, 햄머링 등을 최소화 시킬 수 있는 설계 및 제작기술을 정립하는 것이 본 연구의 목적이나, 추후 유동해석을 수행하여 캐비테이션 및 햄머링 등의 관련연구를 수행할 예정이다.

5. 결론

본 연구에서는 수입에 의존하고 있는 해양플랜트용 고압·고차압 컨트롤 밸브를 대우조선해양 Zambil Project의 요구에 의해 고압·고차압 밸브의 내부 트림에 대한 구조 안전성을 검토한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 내압에 의한 구조물의 변형해석으로부터 최대 등가 응력의 수준이 영구변형을 유발시킬 수 있는 항복강도보다도 작은 값으로 나타나 현재의 body부 설계에는 큰 문제가 없음을 확인할 수 있다.
- (2) 응력집중이 발생된 body 입구부의 내부 유로 형상을 완만하게 설계하여 유체저항을 감소시키는 구조이거나 body 부분 입구쪽의 두께도 고려가 되어야한다.
- (3) 구조-열 연성해석으로부터 관내와 관외의 온도차에 의한 열변형은 고차압 제어밸브에 영향을 거의 미치지 못함을 확인할 수 있다.
- (4) 고차압 밸브 내부의 Disk Stack은 안전한 것으로 평가되고, 추후 실험치와 결과치를 비교·분석하여 밸브 Body,

Disk Stack의 최적설계가 이루어져야 만이 캐비테이션, 후레싱 현상 등을 감소시킬 수 있다.

참고 문헌

- (1) Lee., C. W., and Jang, S. C., 2010, "A Fundamental Study on Offshore Structures of High Pressure Control Valve," *KSMTE*, Vol. 19, No. 6, pp. 883~888
- (2) Rameyer, W. J., Miller, H. L., and Sherikar, S. V., 1995, "Avitation Testing Result for a Tortuous Path Control Valve in Cavitation and Multiphase Flow," *American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 210, No. 2, pp. 62~66.
- (3) Seo J. H., Moon Y. J., and Shin B. R., 2008, "Prediction of Cavitating Flow Noise by Direct Numerical Simulation," *J. Comput. Phys.*, Vol. 227, No. 5, pp. 6511~6516.
- (4) Kim D. K., Shon C. H., 2010, "A Numerical Study on Anti-Cavitation of Globe-valve Trim With High Pressure Drop," *KSME*, Vol. 2, No. 3, pp. 3000~3003.
- (5) Mills, A. F., 1999, *Heat Transfer, Second Edition*, Prentice-Hall, New Jersey.
- (6) ASME, 2004, *ASME Boiler & Pressure Vessel Code Part D*.