

해양 플랜트용 Hydrant Reducing Valve 의 화재 안전시험에 대한 해석 기법 연구

정 윤 상* · 강 정 호*†

* 동아대학교 기계공학과

Study on Analysis Method for Fire Safety Test of Hydrant Reducing Valve for Offshore Plant

Yun Sang Jeong * and Jung Ho Kang *†

* Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.

(Received September 23, 2013 ; Revised March 14, 2014 ; Accepted April 5, 2014)

Key Words: Hydrant Reducing Valve(소화용 감압 밸브), Fire Safety Test(화재 안전시험), Forced Convection(강제대류), FSI(Fluid Structure interaction; 유체-고체 연동해석)

초록: 해양플랜트는 고립된 환경 특성상 화재에 취약하다. 특히 해양플랜트의 주요 기자재인 소화용 감압 밸브가 피해를 입었을 때 해양플랜트의 피해는 증가한다. 본 논문에서는 해양플랜트에 사용되는 소화용 감압밸브에 대한 화재 안전시험을 수행하고 그 결과를 수치해석 결과와 비교, 분석하여 해석의 타당성을 증명하고 화재 안전시험에 대한 해석 기법을 제시하였다. 화재 안전시험의 화염을 구현하기 위해 FSI 를 이용하였으며 화재 안전시험의 온도 분포와 해석 결과 온도분포의 비교를 통해 해석 기법의 신뢰성을 확인하였다. 또한, 화재 안전시험에서 나타난 문제점을 구조해석을 통해 검증하였으며 그 결과 시트의 변형이 문제점으로 나타났다.

Abstract: An offshore plant is vulnerable to fire because of the isolated environment. In particular, the damage to an offshore plant is increased when a hydrant reducing valve, which is a main piece of equipment in an offshore plant, is damaged in a fire. In this study, we conducted a fire safety test for a hydrant reducing valve and proved the validity of our analysis by comparing the results of the test and analysis. Therefore, we here suggest an analysis method for a fire safety test. FSI(fluid structure interaction) was considered in the fire safety test. The reliability of the analysis method was verified by comparing the temperature distributions of the test and analysis. In addition, we verified the problems that were caused in the fire safety test by conducting a structure analysis. At a result, the main problem was found to be deformation of the valve seat.

- 기호설명 -

U : 속도벡터, $U_{x,y,z}$
 τ : 응력텐서
 S_M : 운동량 소스
 S_E : 에너지 소스
 λ : 열전도율
 h_{tot} : 비전엔탈피

h : 비엔탈피
 T : 정온도

1. 서론

최근 해양구조물의 규모가 점점 대형화 되는 추세로 특히 2000 년 이후부터 해양플랜트 중에서도 부가가치가 높은 FPSO(Floating Production Storage and Offloading)와 LNG 운반선과 같은 초대형 선박들이 주력건조선종으로 자리잡아가고 있다. 그러나 우리나라는 해양플랜트 건조에 사용되는 고부가가치 기자재의 국산화율이 극히 저조하며 대부분 노르웨이

† Corresponding Author, kangjh@dau.ac.kr
© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

와 미국, 영국 등에서의 수입에 의존하고 있는 실정이다. 따라서, 해양플랜트의 중요한 기자재 중의 하나인 소화용 감압밸브(Hydrant reducing valve)를 국산화 개발하게 된다면 밸브시장에서도 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.⁽¹⁾

해양플랜트의 주요 기자재 중의 하나인 소화용 감압 밸브(Hydrant reducing valve)는 해양플랜트에 설치되는 감압밸브이다. 소방시스템은 배관 내 자연낙차(Natural head) 압력을 극복하기 위해 방수 기구에서 허용되는 최고 한계 이상의 압력이 발생할 수 밖에 없어 급수배관 부분에는 감압 기능이 반드시 필요하다. 오리피스를 배관 속에 장착하는 방법으로 감압 효과를 얻을 수는 있으나, 유수정지 상태에서는 전혀 감압(Pressure reducing)이 일어나지 않고 고압용 배관 및 부속품 사용으로 시설비 상승 등의 문제점이 발생하게 되므로 소화용 감압 밸브를 설치하는 것이 현재의 추세이다.⁽²⁾

현재 소화용 감압 밸브의 경우 시트 부의 누설이 가장 큰 문제로 대두되고 있으나 화재 노출시 누설에 대한 문제를 국내뿐 아니라 국외에서도 근본적인 해결책을 제시하지 못하고 있는 실정이다.

또한, 해양플랜트의 경우 고립된 환경 특성상 화재사고에 의해 수많은 인명손실과 재산피해를 초래하며 특히 소화용 감압밸브가 화재에 노출되었을 시 열변형(Thermal strain) 및 열응력(Thermal stress)에 의한 손상으로 밸브의 주요기능을 할 수 없을 때 전소(Burn down)가 될 수 있으며 그로 인한 피해는 더욱 심각해진다. 이를 방지하기 위해 해양플랜트의 화재에 대한 위험도 평가(Risk assessment)의 신뢰성과 현실성이 더욱 중요하게 부각되고 있으며 밸브 화재 안전시험 규격을 만족하도록 요구되고 있다.

본 논문에서는 해양플랜트에 사용되는 소화용 감압 밸브에 대한 화재 안전시험을 수행하고 그 결과를 FSI(Fluid-Structure Interaction) 기법을 이용한 수치해석 결과와 비교 분석을 통해 해석의 타당성을 증명하고 화재 안전시험에 대한 해석 기법을 제시하고자 한다.

2. 화재 안전 시험

2.1 화재 안전 시험 규격

본 연구를 위한 화재 안전시험은 한국인정기구(Korea Laboratory Accreditation Scheme) 동아대학교 밸브센터를 통해 실시하고 규격은 API-6FA 규격에 따라 진행하였다. Fig. 1 은 화재 안전시험 장비이며 Table 1 은 시험장비의 주요재원을 나타낸다.

Table 1 Main specifications of fire safety test equipment

Use and Condition	Fire safety test for below 8" valve
	Checking leak of valve seat after burning valve under 750~1000°C for 30 minutes
Main specifications	Pump : 2HP Piston Pressure Pump
	Appearance : Castable Construction (CT1805)
	50L Pressure Tank
	3000mm(L)x1200mm(W)x2500(H)
	Test Pressure : 10bar

Table 2 Material properties of valve parts

	Bronze	Stainless Steel
Density	8400kg/m ³	8000kg/m ³
Specific Heat Capacity	385J/kg · K	500J/kg · K
Thermal Conductivity	96.3W/m · K	16.3W/m · K
Coefficient of thermal Expansion	1.77μm/m · °C	1.7μm/m · °C
Young's Modulus	112 MPa	193 MPa
Poisson's ratio	0.324	0.31
Tensile Yield Strength	290 MPa	250 MPa
Tensile Ultimate Strength	485 MPa	565 MPa



Fig. 1 Fire safety test equipment

해양플랜트의 소방 시스템은 처해진 환경 특성과 편의성을 위해 작동유체(Working fluid)로 해수(Sea water)를 사용하는 것이 일반적이다. 일반 금속은 해수에 의해 부식이 되기 쉽기 때문에 밸브를 구성하는 본넷(Bonnet), 캡(Cap), 바디(Body)와

Table 3 Main conditions of API-6FA standard

Conditions	Standard	
	Soft Type	Hard Type
Pressure of Inlet	2kgf/cm	14kgf/cm
Fire Temperature	761~980°C	761~980°C
Temperature of Valve Body	565~650°C	565~650°C
Test Time	30min.	30min.
Maximum Leak Rate(During Burn)	200ml/min	400ml/min
Maximum Leak Rate(Cool Down)	50ml/min	100ml/min

같은 외부의 재질은 청동(Bronze)이며 디스크(Disc), 스템(Stem), 부싱(Bushing)과 같은 내부 부품의 재질은 스테인리스 강(Stainless Steel)으로 화재 안전 시험은 디스크의 재질에 따라 Soft 와 Hard Type 으로 나뉘며 Type 에 따라 세부 조건들이 규정되어 있다. 본 시험에서 사용된 디스크의 재질은 Stainless Steel(316)로 Hard Type 을 적용하여 실시하였다. Hard Type 의 입구 압력은 설계압력의 75%인 14bar 를 설정하여 수행하였다. Table 3 은 API-6FA 규격의 주요 조건을 나타낸다. 규격에 명시되어 있는 밸브 바디 온도는 외부 표면에 부착된 센서를 통해 측정되는 온도 기준이다. 밸브 내부의 온도는 측정 할 수 없으며 API-6FA 규격에도 내부 온도 관련 사항은 언급되어 있지 않다.

2.2 화재 안전 시험 결과

화재 안전시험은 30 분 동안의 가열단계와 10 분간의 냉각단계로 진행이 된다. 시험이 진행되는 동안 밸브의 온도분포와 누수량(Leakage quantity)을 전용 측정 장비를 이용하여 실시간으로 모니터링(Monitoring) 된다. 밸브의 온도분포를 기준으로 화재 안전시험의 가열단계에 사용되는 화염의 세기를 조절한다.

Fig. 2 는 시험 진행 시 밸브 외부에 부착된 센서에 의해 실시간으로 기록된 밸브 바디의 온도 분포이다. API-6FA 규격에 명시되어 있는 바디의 온도 범위 565~650°C 사이의 온도를 약 7 분이 경과 했을 때 도달하였으며 화염에 노출되는 30 분의 시간 동안 평균 온도 750°C 를 유지하였다. 또한, 10 분간 Cool-Down 을 실시하였으며 규정 시간 안에 100°C 이하까지 도달하였다.

화재 안전시험 결과 시험 규격에 명시되어 있는 허용 누수량이 허용 기준을 초과하였다. 디스크와 시트에서 발생한 변형이 누수의 원인이었다. Fig. 3 은 시험 실시 후의 밸브 시트 형상이다. 디스크의

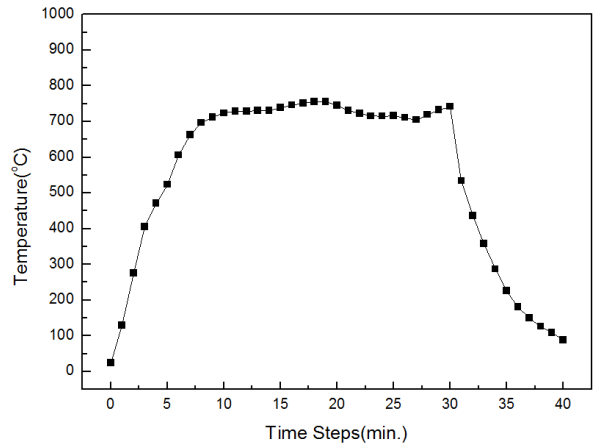


Fig. 2 The result of fire safety test



Fig. 3 Shape of valve seat after fire safety test

경우 심한 변형이 발생하지 않았으나 시트의 경우 변형이 심하게 발생했다. 누수의 주된 원인이 시트의 변형이라는 것을 알 수 있다.

3. 열전달 해석

3.1 강제대류 이론

화재 안전시험의 화염을 구현하는데 강제대류를 적용하기 위해 열에너지 방정식(Thermal energy equation)을 이용하였다.

$$K = \frac{1}{2} U^2 \tag{1}$$

열에너지 방정식은 낮은 유체속도에 적합한 에너지 방정식이다. 이 식을 정의하기 위해 식 (1)의 역학적 에너지(Mechanical energy) K 가 요구된다.⁽⁵⁾

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U K) = -U \cdot \nabla p + U \cdot (\nabla \cdot \tau) + U \cdot S_M \quad (3)$$

역학적 에너지 방정식(Mechanical energy equation)은 식 (2)의 운동량 방정식(Momentum equation)에 대한 U 의 벡터의 내적(Inner product)과 텐서곱(Tensor product)을 통해 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + U \cdot \nabla p + \tau : \nabla U + S_E \quad (5)$$

식 (4)의 전에너지 방정식(Total energy equation)에서 식 (3)을 소거하면 식 (5)와 같은 열에너지 방정식을 정의할 수 있다.

3.2.3 차원 형상 모델링

Fig. 4는 대상 밸브에 대한 개략도를 나타낸 그림이다. 본 논문에서 수행한 열전달 해석에 사용된 해석 모델은 상용 3D 모델링 소프트웨어인 SolidWorks를 이용하여 실제 3차원 기하형상에 기초한 최대한 실물에 근접하도록 묘사하였으며 나사산 부분과 본넷 내부에 장착되는 스프링(Spring)은 생략하였다. 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS-CFX를 이용하여 열전달 해석을 진행하였다.

3.3 유동장 및 격자 생성

본 논문에서는 화재 안전시험에 대한 해석을 수행하기 위해 ANSYS Workbench를 사용하여 유동장을 생성하였다. 화재 안전시험에서의 화염을 구현하기 위한 외부 유동장(External flow field)과 밸브의 입구로 유입되는 내부 유체를 구현하기 위한 내부 유동장(Internal flow field)을 각각 생성하였다. 유체의 유출입이 없는 밸브의 출구 측과 밸브를 구성하는 부품과 부품 사이와 같은 밸브 내부 공간도 유동장을 생성하여 열전달에 영향을 줄 수 있도록 하였다.

외부 유동장의 사이즈는 실제 화재시험에서 설치된 밸브와 화염의 거리를 고려하여 밸브로부터 150mm 간격의 직육면체 형상의 유동장을 생성하였으며 내부 유동장은 실제 화재시험에서 사용된 것과 동일한 사이즈의 파이프(Pipe)를 모델링하여 시험과 최대한 비슷한 환경 하에서 해석을 진행하

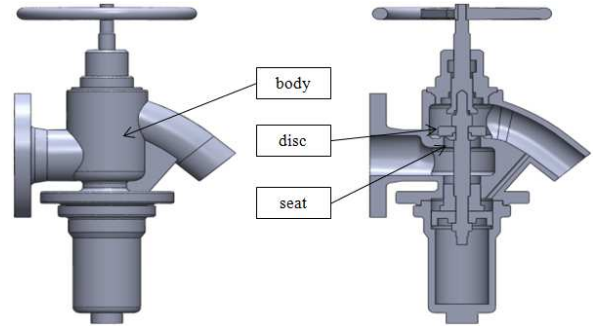


Fig. 4 Schematic illustration of the hydrant reducing valve for thermal analysis

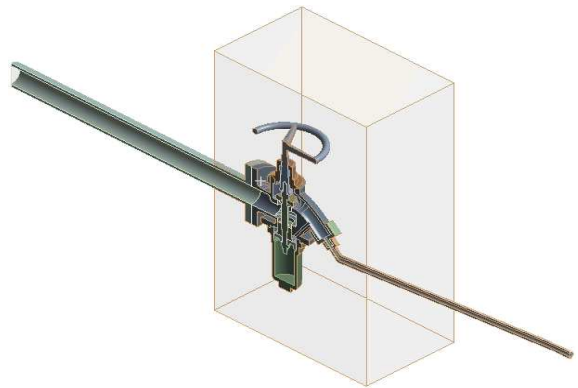


Fig. 5 Shape of external and internal flow field

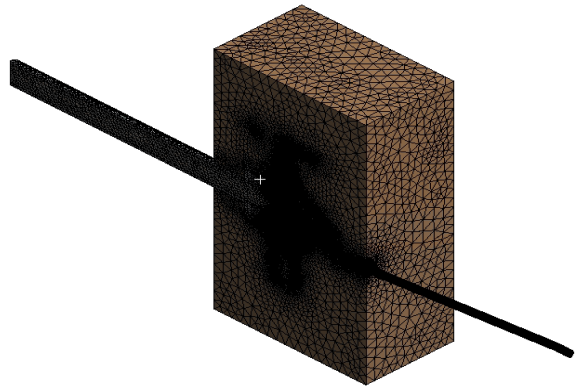


Fig. 6 Computational grids for thermal analysis

였다. 또한, 해석 시간을 단축하기 위해 Symmetry 조건을 적용했으며 Fig. 5는 외부 유동장 및 내부 유동장의 형상을 나타낸다.

열전달 해석을 위한 격자의 생성은 CFX Mesh를 사용하였고 격자계의 구성은 육면체(Hexahedron)와 사면체(Tetrahedron) 격자를 모두 사용하였다. 밸브 바디의 내외부 면과 내외부 유동장이 접촉하는 면인 유동영역(Flow regime)의 경계층은 프리즘(Prism) 격자를 생성하여 비정렬 격자(Unstructured mesh) 구조를 갖게하여 경계층의 형성 및 이탈에 따른 와류동

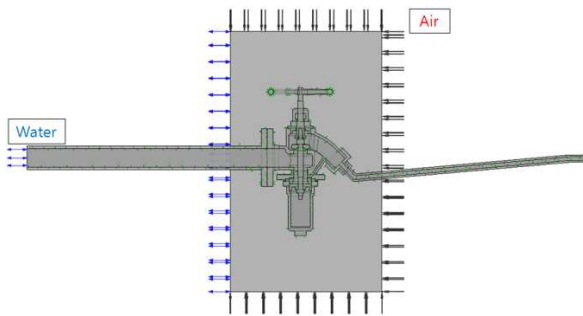


Fig. 7 Boundary condition for thermal analysis

의 생성을 충분히 모사 할 수 있도록 하였다.^(3,4)

본 논문의 열전달 해석에 사용된 격자의 질점(Node)의 수는 1,310,856 개, 요소(Element)의 수는 5,129,406 개이다. Fig. 6 은 열전달 해석 모델의 격자를 생성한 것이다.

3.4 경계조건 설정

본 논문에서는 Transient 기법을 이용하여 화재 안전시험에서 적용되는 조건과 같은 30 분 동안 화염에 노출된 밸브의 온도 변화를 측정하였다. 실제 화재 안전시험에서 진행되는 Cool-Down 단계는 해석단계에서 생략하였다.

Fig. 7 은 열전달 해석을 위한 경계조건을 부여한 그림을 나타낸다. 내부 유동장의 입구(Inlet) 경계조건은 22°C 의 Water 가 14bar 의 유압(Fluid pressure)으로 유입되고 외부 유동장은 세 곳의 입구(Inlet)에 750°C 의 Air 가 25m/s 의 유속(Fluid velocity)으로 유입되며 외부 유동장 좌측의 출구(Outlet)는 대기압 조건 1atm 을 설정하였다. 또한, 밸브 내부 공간에 형성된 유동장의 경우 1atm 의 Air 로 설정하였다.

초기 밸브 온도는 25°C, 유체의 초기 온도는 22°C 로 설정하였다. 외부 유동장의 입구 경계조건으로 유속 및 온도를 설정하여 자연대류가 아닌 강제대류를 적용하였으며 이를 통해 안전시험에서 밸브에 작용하는 화염을 구현하였다.

3.5 열전달 해석 결과

제시한 경계조건을 적용하여 화재 안전시험에서 가열단계의 시간인 30 분 동안 대상밸브에 대한 열전달 해석을 진행하였다. Table 4 는 열전달 해석 후의 온도 DATA 와 실제 화재 안전시험 후의 온도 DATA 를 Time Step 에 따라 1 분 간격의 온도를 각각 비교한 것이며 Fig. 8 은 Table 4 의 DATA 를 나타내는 그래프이다.

열해석 결과 Time Step 별 1 분 간격 평균 온도

Table 4 Temperature change of body according to time

Time(min.)	Temperature(°C)	
	Fire Safety Test	Analysis
1	130.06	200.20
2	275.21	328.15
3	405.89	422.60
4	471.03	494.30
5	523.79	549.88
6	606.20	592.19
7	663.28	625.23
8	696.77	651.02
9	712.87	672.03
10	723.76	687.98
11	728.65	700.80
12	728.42	711.06
13	730.71	719.14
14	730.40	725.56
15	738.85	730.5
16	745.94	734.54
17	752.18	737.68
18	755.85	740.11
19	755.08	742.05
20	745.59	743.59
21	731.32	744.81
22	722.17	745.76
23	715.95	746.51
24	715.12	747.10
25	716.81	747.58
26	711.05	747.97
27	705.11	748.27
28	718.20	748.52
29	732.67	748.71
30	742.29	748.84

차이는 약 25°C 로 화재 안전시험과 열전달 해석 결과가 거의 흡사하다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 본 논문에서 제시한 경계조건 하에서 진행된 열전달 해석의 결과 값이 신뢰성을 가진다고 판단되며 열전달 해석 기법이 타당하다는 것을 알 수 있다.

실제 화재 안전시험에서 화염이 닿지 않는 밸브 내부의 온도는 측정이 불가능하였으며 외부 온도 DATA 의 신뢰성을 바탕으로 열전달 해석을 통해 밸브의 내부 온도 분포를 예측할 수 있다. Fig. 9 는 Fig. 4 에 명시되어 있는 바디, 디스크, 시트 부의 시간에 따른 온도변화를 나타내는 그래프이다.

직접적으로 화염에 닿지 않는 디스크, 시트의

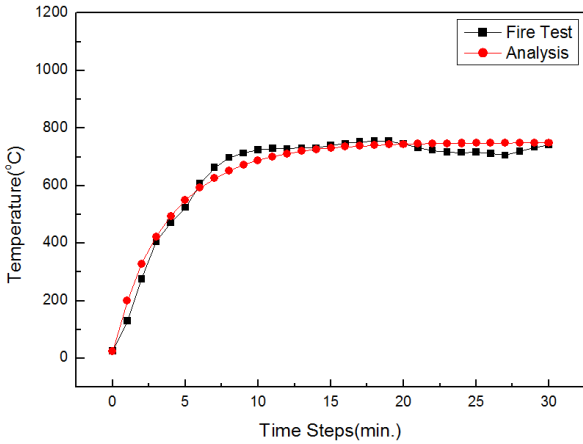


Fig. 8 Temperature change on the result of fire test and analysis

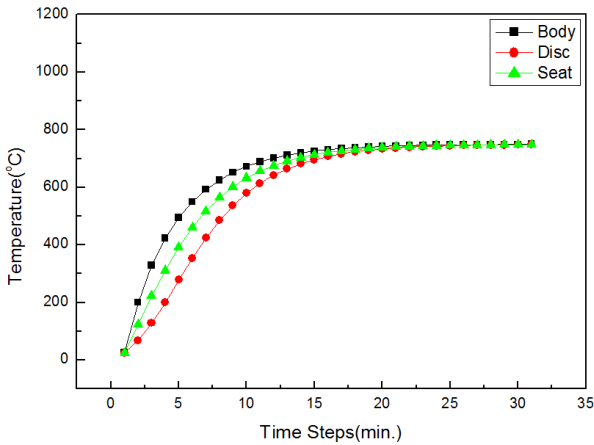


Fig. 9 Temperature change of valve parts on the result of analysis

온도상승 기울기가 바다 부분의 온도상승 기울기 보다 작게 나타났다. 시험 시작 후 20 분이 경과했을 때 거의 동일한 온도 분포를 나타내었으며 30 분이 경과했을 때 밸브 전체의 온도 분포가 모두 약 750°C 까지 도달하였다.

4. 구조 해석

4.1 격자 생성 및 경계 조건 설정

구조해석을 위한 해석 모델은 열전달 해석에 사용되었던 Fig. 4 와 동일한 모델을 사용하였다. 구조해석에 사용된 격자계의 구성은 육면체와 사면체 격자를 모두 사용하였으며 절점의 수는 718,777 개, 요소의 수는 474,118 개이다.

Fig. 10 은 해석 모델의 격자를 생성한 것이다. 밸브를 구성하고 있는 각 부품들 사이의 Contact 조건으로 나사 체결부의 경우 Bonded 조건을 적용하여 완전 구속을 시켰으며 단순 접촉부는 슬라이

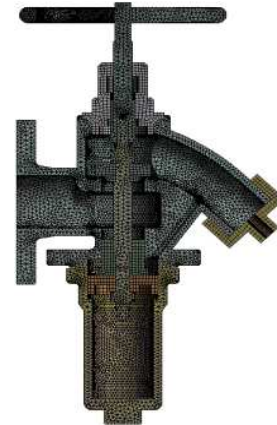


Fig. 10 Computational grids for structure analysis

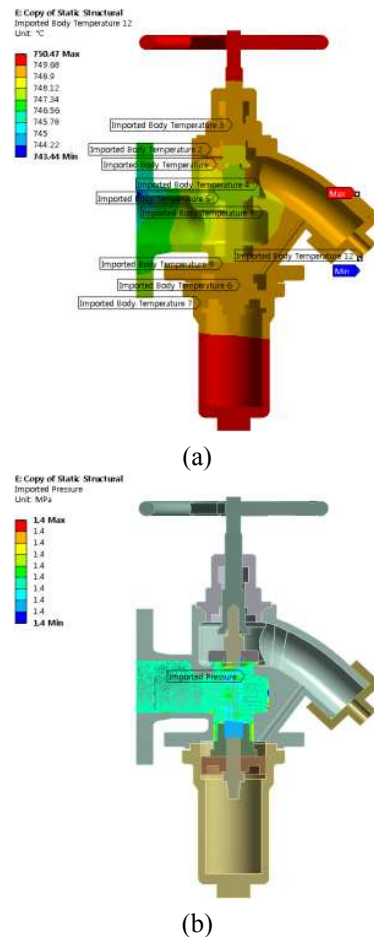


Fig. 11 (a) Temperature and (b) internal pressure applied to valve

딩이 가능한 No separation 조건을 설정하여 수치해석을 수행하였다. 열에 의한 구조해석을 수행하기 위해 밸브의 초기 온도는 25°C 로 설정하였으며 열응력과 열변형은 초기온도와의 온도차이에 의해 발생하기 때문에 열전달 해석에서 온도차이가 가장 큰 최종 온도인 30 분 후의 온도 Data 를 적용

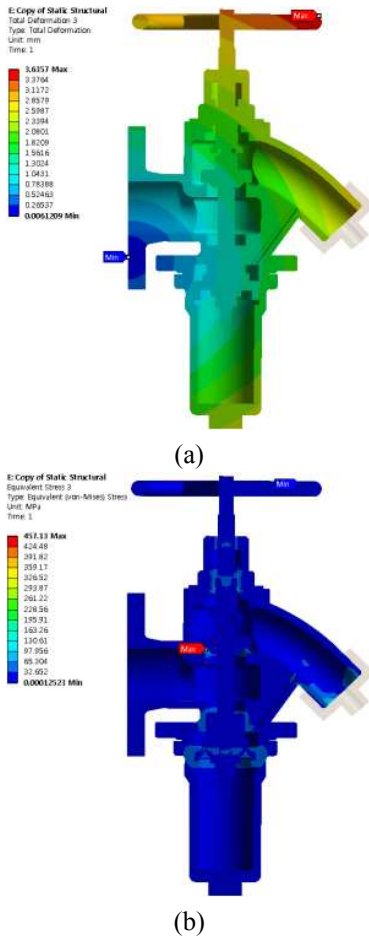


Fig. 12 The result of structure analysis : (a) Deformation (b) von mises stress

하였다. 밸브 내부에 작용하는 14bar 의 유압을 적용하였다.

Fig. 11 의 (a)는 열전달 해석을 통해 구한 온도를 적용한 그림이고 (b)는 유압을 적용한 그림이다. 온도 분포에서 최대온도는 750°C, 최저 온도는 743 °C로 밸브의 대부분이 750 °C 까지 도달하였다.

밸브 내압은 열전달 해석에서 적용한 입구 압력과 동일한 14bar 가 적용되었다. 구속조건으로는 좌측 플랜지 결합부에 Displacement 조건을 적용하여 X 축 구속조건을 부여하였으며 실제 안전시험에서 우측 플랜지 결합부는 X 축 방향으로 구속되지 않았으므로 Y 와 Z 축 구속 조건을 부여하였다. 구조해석에 필요한 밸브의 주요 물성치는 Table 2 에 나타냈다.

4.2 구조해석 결과

Fig. 12 의 (a)는 화재 시험에 대한 열전달 해석을 통해 구한 열과 내압에 의한 변형량을 나타내며 (b)는 von-Mises stress 분포를 나타낸다. 밸브의

좌측 플랜지 결합부를 시작으로 X 축 방향으로 아치(arch) 형태로 변형이 진행되는 것을 알 수 있다. 이는 우측 플랜지 결합부의 구조해석에서 적용된 경계조건이 X 축 방향으로 구속되지 않았기 때문으로 판단된다.

최대 변형량은 3.63mm 로 아치 형태의 끝 부분에 위치한 핸들(Handle) 부분에 나타났으며 디스크와 시트의 최대 변형량은 각각 1.77, 1.73mm 로 나타났다. 최대응력은 457.13MPa 로 디스크와 시트의 접촉부에 나타났으나 디스크의 응력은 65.66MPa 이며 시트에서 최대응력이 발생했다. 디스크의 재질인 Stainless Steel(316)은 허용응력이 250MPa 이며 시트의 재질인 Bronze 는 290MPa 이다. 따라서, 디스크는 허용응력을 만족하였으나 시트의 경우 허용응력을 초과하였다. 이를 통해 열과 내압에 의해 디스크와 시트 사이에 누수가 발생할 가능성이 높다는 것을 알 수 있으며 실제 화재 안전시험에서도 누수의 원인은 시트의 변형에 의한 것이었다.

5. 결론

본 논문에서는 해양플랜트에 사용되는 소화용 감압밸브의 화재 안전시험에 대한 해석 기법을 제시하기 위해 FSI 기법을 이용한 유한요소해석을 수행하였다. 안전시험 결과와 열전달 및 구조해석 결과의 비교를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 화재 안전시험의 화염을 구현하기 위해 외부 유동장을 생성하여 750°C 의 Air 를 25m/s 의 유속으로 밸브를 노출시켜 강제대류를 적용하였고 내부 유동장을 생성하여 22°C 의 Water 를 14bar 의 압력으로 적용하였다. 그 결과 안전시험의 온도 분포와 해석결과를 비교했을 Time Step 별 평균 온도차가 약 25°C 로 매우 흡사하게 나타났다.

(2) 화재 안전시험에서는 밸브의 내부온도를 측정할 수 없기 때문에 외부온도의 비교를 통해 얻은 신뢰성을 바탕으로 내부 온도를 해석 결과 값으로 예상할 수 있었다. 화재 안전시험에서 가장 중요한 부분인 디스크와 시트는 직접적으로 화염에 닿지 않아 시험 시작 후 약 20 분 까지 온도 상승 기울기가 외부 바디 온도의 상승 기울기에 비해 상대적으로 작게 나타났으나 20 분 후에는 거의 동일한 온도를 유지했다.

(3) 열전달 해석을 통해 구한 온도 분포와 내압을 이용하여 구조 해석을 수행한 결과 최대 변형량은 핸들 부분에서 발생하였으며 최대응력은 시

트에서 발생하였다. 최대응력의 값이 시트의 재질인 청동의 허용응력을 초과하여 누수에 원인이 될 수 있음을 알 수 있었다. 화재 안전시험에서도 시트의 변형에 의해 누수가 발생한 것을 확인하였다.

(4) 따라서, 화재에 대한 구조 안전성을 확보하기 위해 내열구조의 소화용 감압밸브 개발이 필요할 것으로 판단되며 본 논문에서 제시한 해석 기법이 소화용 감압밸브 개발에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2013년도 중소기업청 지정 산학협력 중점사업에 의하여 연구되었음.

참고문헌 (References)

- (1) Kim, D. K. and Kim, J. H., 2007, "A Study in Structural Analysis of Globe Valve for LNG Carrier," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 31, No. 8, pp. 1013~1019.
- (2) Park, Y. H., Kim, S. W. and Kim, B. K., 2013, "The Performance of a New Pressure Reducing Valve Automatically Preventing Pressure Equalization," *J. Kor. Inst. Sci. Eng.*, Vol. 27, No. 1, pp. 26~30.
- (3) Park, S. B., Kim, J. M., Lee, C. J. and Kang, J. H., 2012, "A Study on the Flow Characteristic of High Pressure 3/2-Way Valve for a Ship Engine," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 11, No. 3, pp. 35~40.
- (4) Lee, B. H., Jeon, B. H. and Kang S. M., 2009, "A Study on the Flow Characteristics Through Industrial Butterfly Valve," *The Spring Conference, KSME*, pp. 277~283.
- (5) ANSYS CFX, "Release 14.0 Theory Guide," SAS IP, 2011.
- (6) Kim, S. B., Lee, J. H., Lee, G. H., Jeon, R. W. and Do, T. W., 2011, "Thermal- Structural Coupled Field Analysis for Fire Safety Type Ball Valve," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 10, No. 3, pp. 28~32.
- (7) Lee, J. H., Kim, K. K., Ro, S. T., Chung, H. S. and Kim, S. G., 2003, "A Study on the Thermal Analysis of Spray Cooling for the Membrane Type LNGC During the Cool-Down Period," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 27, No. 1, pp. 125~134.
- (8) Lee, N. S. and Hong, S. D., 2013, "Evaluation of High-Temperature Structural Integrity Using Lab-Scale PCHE Prototype," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 9, pp. 1189~1194.
- (9) Choi, D. K. and Kim, 1998, "A Study on Relaxation of Thermal Stresses of Heat-Resistant Systems," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 22, No. 1, pp. 16~22.
- (10) Park, S. H., Kim, S. K. and Ha, M. Y., 2013, "Numerical Study on Flow and Heat Transfer Characteristics of Pipes with Various Shapes," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 11, pp. 999~1007.
- (11) Jung, T. S. and Hwan, H. K., 2013, "Investigation of Natural Convective Heat Flow Characteristics of Heat Sink," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 1, pp. 27~33.
- (12) Lee, G. H., Bang, Y. S. and Woo, S. W., 2012, "Performance Assessment of Turbulence Models for the Prediction of Moderator Thermal Flow Inside CANDU Calandria," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 36, No. 3, pp. 363~369.
- (13) Aydemir, N. U., Magapu, V. K., Sousa, A. C. M. and Venart, J. E. S., 1988, "Thermal Response Analysis of LPG Tanks Exposed to Fire," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 20, No. 1, pp. 239~262.
- (14) Michael Birk, A., Vandersteen, D. J., Cunningham, M. H., Davison, C. R. and Mirzazadeh, I., 2002, "Fire Tests to Study the Effect of Pressure Relief Blowdown on the Survivability of Propane Tanks in Fires," *Process Safety Progress*, Vol. 21, No. 3, pp. 227~236.
- (15) Yang Qi, 2002, "A Study on the Reliability of Fire Water Supply System in High-Rise Buildings," *Fire Technology*, Vol. 38, No. 1, pp. 71~79.