

원자력발전소 게이트벨브의 스템 - 벨로우즈 접촉면에 관한 연구

A Study on the contact surface of Stem and Bellows of Gate Valve in Nuclear Power Plants

고석훈† · 심동혁* · 김대열** · 최명진***

Seok Hoon Ko, Dong Hyouk Shim, Dae Youl Kim, Myung Jin Choi

Key Words : Seismic Analysis(내진해석), Earthquake Resistant Design(내진설계), Stress(응력), Frictional wear(마찰마모), Contact distance(접촉거리), Natural Frequency (고유 진동수), FEM(Finite Element Method : 유한요소법)

ABSTRACT

Nuclear power generation is very dangerous in occasion that skirt of structure by earthquake although it is high effective generation that can make a lot of energies with few raw material. when design, it must consider a lot of problems caused by an earthquake. The seismic analysis of the structure has been great concern in the engineering society with an effort to reduce the severe damages from an earthquake. So the earthquake resistant design is one of the crucial design procedures of a gate valve used in nuclear power generation. The gate valve which has the contact area between stem and bellows. Because of the contact area, The gate valve should be given high stress and frictional wear. In this thesis, Considering the gate valve which has some contact distance between stem and bellows, The gate valve which has some contact distance is analyzed by a commercial FEM code of Ansys and Then compared to the gate valve behavior which doesn't have contact distance.

1. 서 론

원자력발전은 적은 원료를 이용 많은 에너지를 만들 수 있으며 에너지 효율성이 매우 높다. 또한 다른 발전에 비해 대기오염물질을 발생시키지 않기 때문에 비중이 늘어나고 있는 추세이며 현대 산업사회에서 없어서는 안 될 중요한 시설물이다. 최근 세계적인 지진피해 뿐 아니라 국내에서도 지진과 관련 피해가 속출하고 있는 실정이다. 지진에 의한 피해는 대단히 막대하며 특히 원자력 발전소와 같이 중요한 산업기반시설들은 지진에 의해 자칫 잘못하면 엄청난 인명

피해를 유발 할 수 있다. 따라서 원자력 발전소 및 산업기반 시설에 대한 내진설계가 강화되고 있다. 원자력발전소의 경우에는 지진발생 시 방사능의 외부노출을 방지해야 하므로 내진 안전성 확보가 더욱 더 중요한 실정이다. 원자력발전소의 내진설계와 관련된 국내 원자력법 및 원전 설계기준은 미국 연방법규(10CFR)에 명시된 것을 따르며 세부절차 및 방법은 한국원자력안전기술원의 "안전심사지침서"에 제시되어 있다. 근래에는 독자적인 기준을 수립하기 위하여 전력산업 기술기준(KEPIC)을 부분적으로 적용하고 있다.⁽¹⁾

원자력발전소에 사용되고 있는 게이트 벨브는 배관계통에서 판형의 디스크가 상하로 이동하며 유로를 직각방향으로 개폐하여 수량을 조절하는 역할을 한다. 지진 발생 시 작용하는 외력에 의해 게이트 벨브의 응력과 변형률의 변화를 일으키게 되고 발생하는 진동과 벨브의 고유진동수가 일치하게 되면 공진(resonance)현상이 발생하게 되어 게이트 벨브의 안정성에 치명적인 손상을 유발하게 된다. 게이트 벨브

† 경희대학교 대학원 기계공학과
E-mail : guywhy@hanmail.net
Tel : (031) 201-2883, HP : 011-9883-8994

* 경희대학교 대학원 기계공학과

** 경희대학교 기계공학과

*** 경희대학교 테크노공학대학

의 손상은 유량조절계통에 제어기능의 오작동을 유발하여 냉각시스템에 손상을 가하게 되고 나아가서는 원자력발전소 자체에도 큰 악영향을 유발하게 된다.

본 연구에서는 복잡한 게이트 밸브를 해석이 용이하게 단순화하여 유한요소법이 적용되는 상용패키지인 Ansys 를 이용 게이트 밸브의 설계 시 밸브의 안정성을 검증하기 위한 해석이 용이한 모델을 제시하고자 한다.

2. 게이트 밸브의 해석

2.1 게이트 밸브 모델

게이트 밸브는 두 개의 파이프가 체결된 형태로 수직으로 세워져 있으며 길이가 총 228.14mm 이고 질량이 4.1kg이다. 밸브는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 상단부에는 핸드휠(hand wheel), 본넷(bonnet)으로 구성되어 있고 하단부에는 바디피스(body piece), 바디(body)로 연결되어 있다. 중심부에 스템과 디스크가 체결되어서 벨로우즈와 접촉된 형태로 수직운동을 하며 수로를 개폐하게 된다. 밸브 해석 시 가장 바람직한 방법으로는 대상 구조물 전체를 완제품으로 만들어 실험을 하는 것이 바람직하지만 이러한 경우에는 미리 제품을 제작해야 하는 점과 문제점 발견 시 설계변경을 한 후 다시 완제품을 만들어 실험을 하여 하는 번거로운 점 때문에 대부분의 경우 유한요소법과 같은 상용프로그램을 이용하여 근사적인 구조물을 해석하는 것이 일반적인 방법이라 할 수 있다.

본 연구에서도 유한요소 상용프로그램을 이용하여 밸브의 구조해석을 수행하였다. 이때 밸브의 스템과 벨로우즈의 접촉부분 때문에 상용프로그램을 이용한 밸브 해석 시 비선형 해석이 되어 해석의 어려움과 긴 해석시간이 소요되므로 이를 보완하기 위하여 모델링 시 게이트 밸브를 스템과 벨로우즈의 접촉면에 미소간극을 두어 해석한 후 미소간극이 스템에 작용하는 응력과 게이트 밸브의 고유진동수에 미치는 영향을 비교, 분석하고자 한다.

게이트 밸브는 Catia V5를 이용하여 모델링한 후 유한요소 상용프로그램인 Ansys에서 해석을 수행하였다.⁽²⁾

2.2 스템 - 벨로우즈 접촉부 분석

게이트 밸브의 모델에서 스템에 작용하는 힘들은 스템에 작용하는 토크, 스템과 디스크의 중량, 스템을 바깥으로 밀어 내려는 힘, 유동에 의한 내부압력 등이 있다.

게이트 밸브의 스템은 벨로우즈와 접촉되어 스템이 수직운동을 하는 형태이며 스템과 벨로우즈가 접촉되는 부분은 스템의 총 길이에 절반정도에 해당한다. 스템은 상단부에서 모멘트를 받고 하단부에서 내부 압력만을 받는 것으로 가정한다. 스템과 벨로우즈는 스테인레스 스틸로 하고 사용된 설

계조건은 표1에서 보는 것과 같다. 모멘트와 내부압력의 영

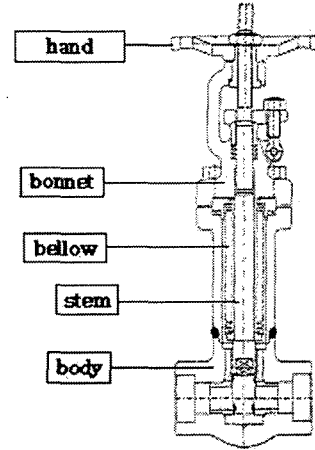


Fig. 1 Gatevalve in nuclear power generation

스 템	재료규격	SA-564, 630
	설계온도에서항복응력	98.3 ksi
	탄성계수	26500ksi
	설계온도	400 ° F

Table. 1 Material properties

향으로 스템과 벨로우즈 접촉면에서 전단 및 압축응력이 작용한다.⁽³⁾

2.3 게이트 밸브 고유진동수

원자력발전소내의 게이트 밸브는 지진 발생 시 안전성을 고려하기 위하여 고유진동수가 33Hz 이상이 되어야 한다. 지진력은 대부분 33Hz 미만을 가지는데 대상 구조물의 진동 해석 결과의 고유진동수가 33Hz 보다 낮은 범위에 존재한다면 구조물의 공진현상이 일어날 가능성이 있어 게이트 밸브의 안정성에 큰 영향을 미치기 때문이다.

만일 진동해석결과 주파수 값이 33Hz 이내에 존재한다면 공진에 의한 과대응력이 발생할 수 있다. 이 경우에는 식 (1)과 같은 SRSS(square roots of sums of square)법에 따라 구한 응력값이 허용응력값과 비교물의 안전성을 파악해야 한다.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{n=1}^N \sigma_n^2} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2} \quad (1)$$

이 때 하중조건으로는 장비의 무게, 게이트 밸브에 작용하는 내부압력, 운전정지지진(operating basis earthquake : OBE), 안전정지지진(safety shutdown earthquake : SSE) 등으로 구분된다.

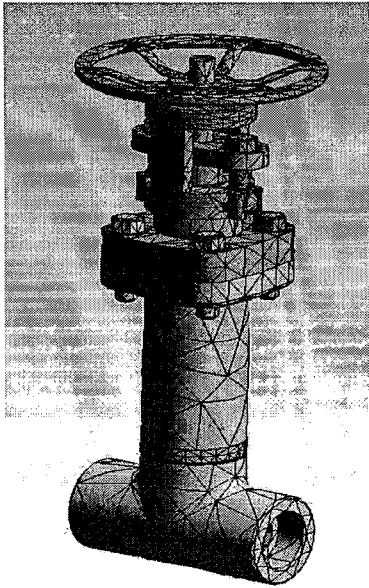


Fig. 2 Finite element model using ANSYS

2.3 유한요소 해석

스텝과 벨로우즈는 접촉을 하며 스텝의 수직운동을 동반한다. 접촉부분에 마찰에 따른 스텝에 마모와 변형을 일으킬 것으로 예상된다. 또한 상용프로그램을 이용한 해석과정에서 비선형 해석이 되므로 해석 시 많은 어려움과 긴 시간이 예상된다. 이러한 해석상의 모델을 개선하기 위해 스텝과 벨로우즈의 접촉부분을 0.5mm, 1mm, 1.5mm 씩 미소간극을 준 다음 접촉거리를 갖고 면 접촉을 하도록 모델링을 한 후 해석을 하였다. 이러한 절차는 간단하지만 수렴된 해를 얻기 위해서 반복적으로 비선형 해석 과정을 필요로 한다. 면 접촉은 미끄럼이 일어날 수 있는 절점과 절점 접촉보다 바람직하며 정확한 강성의 계산을 필요로 하지 않는다.⁽⁴⁾

밸브와 파이프의 이음새의 맞닿는 부분에 완전구속조건을 주었고 밸브 하단부 바디 내부에는 1775psi의 내부압력을 스텝의 맨 윗부분에 7.23 lbf·ft의 모멘트를 주었다.

Fig. 2는 Fig. 1의 도면을 기초로 하여 표1의 물성치를 사용하여 경계조건을 적용하여 수립하여 해석에 사용된 유한요소 모델이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 응력 해석

이 연구에 있어서는 스텝과 벨로우즈의 접촉거리에 따른 스텝에 작용하는 응력과 밸브의 고유진동수에 분석하는 것

이므로 응력해석에 있어서는 다른 부분에 작용하는 응력은 배제하고 스텝에 작용하는 응력에만 관심을 두기로 한다.

Fig 3은 스텝과 벨로우즈의 접촉면을 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm 씩 간극을 준 다음 간극이 스텝의 응력변화에 미치는 해석을 수행한 그림이다.

스텝에 작용하는 최대응력은 모멘트가 주어지는 최상단에서 작용하고 있으며 벨로우즈와의 접촉부분에 간극을 주어 스텝과 벨로우즈와의 마찰에 의한 응력의 발생이 생기지 않아 스텝의 다른 부분에 비해 상대적으로 작은 응력이 작용하며 간극의 크기가 커질수록 스텝에 작용하는 응력의 크기도 줄어드는 것을 알 수가 있다. 스텝에 작용하는 최대응력이 0.5mm 씩 간극이 늘어남에 따라 각각 46830psi, 42390psi, 39350psi로 크게 발생하지만 스텝의 재질인 SA-564, 630의 항복응력이 98300psi임을 고려할 때 스텝에 작용하는 응력은 안전한 응력범위에서 작용하는 것으로 판단된다.

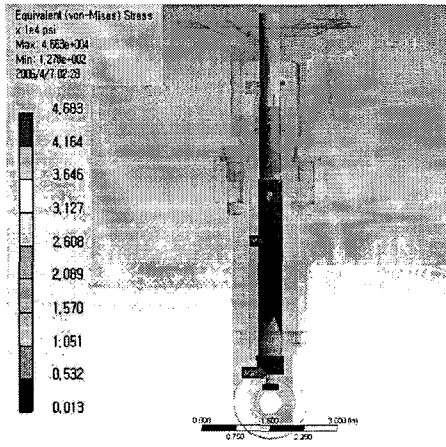
최대응력은 스텝과 디스크의 연결부에서 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 4을 보면 스텝과 디스크는 스텝의 연결부와 디스크의 T홈에 의해 체결된다. 밸브의 핸드휠을 돌려 발생된 토크에 의해 스텝이 회전을 하며 축 방향으로 힘을 받는다. 이때 스텝에는 인장력이 작용하게 되고 디스크와의 연결부와 디스크의 T홈 지역에 하중이 작용하게 된다. 디스크 T-홈의 안쪽 위의 접촉면에 위쪽으로 힘이 작용하여 접촉면에 직접적인 압축응력이 발생하게 되어 최대응력이 발생한다. 또한 스텝과 벨로우즈의 마찰로 인해 발생하는 접촉응력으로 인한 스텝의 접촉부분의 마모현상을 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 고유진동수 해석

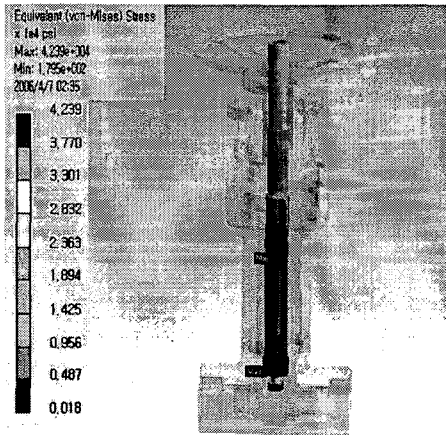
스텝과 벨로우즈의 진동해석을 통하여 접촉거리가 게이트 밸브의 고유진동수에 미치는 영향에 대하여 알아보았다. 정확한 수치를 얻기 위해서는 완제품을 만들어 직접 진동시험을 통해 측정된 고유진동수와 유한요소해석을 통해 얻은 고유진동수와 비교하여야 하지만 이번 연구에서는 스텝과 벨로우즈 사이의 접촉거리가 밸브의 고유진동수에 미치는 영향에 대해 분석한 후 접촉거리가 존재하는 밸브모델의 해석적용 가능여부를 판단하려 한다.

표2는 접촉거리가 존재하지 않을 때와 접촉거리가 0.5mm, 1mm, 1.5mm 일때의 게이트 밸브의 고유진동수를 유한요소 상용프로그램인 Ansys Workbench를 이용해 구한 값이다.

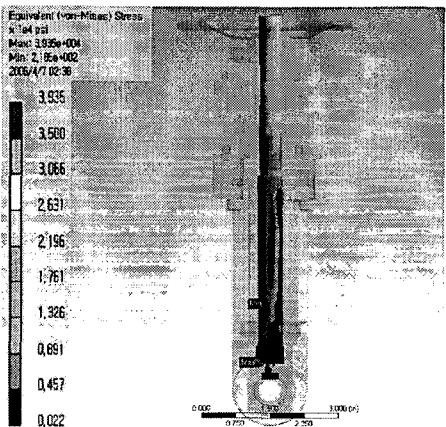
1차 모드를 제외한 각 모드에서는 접촉거리가 밸브의 고유진동수에 미치는 영향은 매우 미세하며 좋은 일치를 보이며 각 모드에 따른 고유진동수가 33Hz 이상이므로 접촉거리가 존재하는 밸브모델을 정적해석에 적용이 가능하다고 판단된다.



(a) contact distance (0.5mm)



(b) contact distance (1.0mm)



(c) contact distance (1.5mm)

Fig. 3 Stress of the stem with contact distance

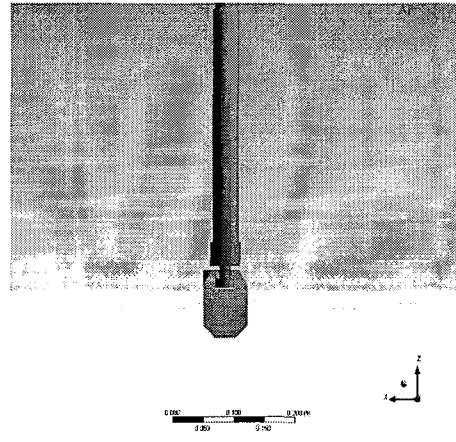


Fig. 4 Stem-disk model of the gate valve

	contact	0.5mm	1mm	1.5mm
1st	59.596	78.567	73.529	80.981
2nd	384.56	384.45	383	380.08
3rd	438.07	441.34	439.35	445.02
4th	609.19	608.89	609.06	598.42
5th	616.78	617.38	617.14	624.04

Table. 2 Comparison of natural frequency for contact distance

4. 결론

본 연구는 원자력 발전소에 사용되고 있는 게이트 밸브에 대하여 스템과 벨로우즈가 접촉하여 거동하는 모델에 접촉 거리를 주어 해석결과를 비교, 분석하였다.

1) 유한요소 상용프로그램을 이용한 게이트 밸브 해석 시스템과 벨로우즈의 접촉면에 접촉거리를 적용한 후 응력해석을 한 결과 각각의 접촉거리를 갖는 경우 발생한 최대응력이 0.5mm일 때 46830psi, 1.0mm일 때 42390psi, 1.5mm일 때 39350psi로서 재료의 항복응력인 98300psi 범위 내에서 존재하므로 안전성을 확인할 수 있다. 또한 접촉부분을 줄임으로 인해서 스템과 벨로우즈 접촉으로 인한 스템 접촉부분의 응력발생과 피로에 의한 마모현상을 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

2) 고유진동수 분석 결과 또한 1차 모드를 제외하고 각 모드에서 큰 차이를 보이지 않았고 33Hz 이상의 고유진동수를 나타내었다. 따라서 밸브는 정적인 해석이 가능하다고 판단된다.

3) 유한요소 상용프로그램을 이용한 게이트 밸브 해석 시스템과 벨로우즈의 접촉부분이 비선형 해석이 되므로 해석

이 까다로울 뿐 아니라 해석시간도 오래 걸리는 것을 알 수 있다. 이 접촉부분에 접촉거리를 주어 비선형 해석이 되는 부분을 감소시키므로 서 해석의 용이함과 해석시간을 단축시킬 수 있다고 판단된다.

이번 연구에 사용된 게이트 밸브는 원자력발전소에 쓰이는 것으로 내진해석이 수행되어야 하지만 접촉거리가 스템과 밸브의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위해 조건을 단순화 시켜서 해석을 하였다. 앞으로 지진 발생 시 생기는 지진가속도와 밸브의 자중 등의 조건을 부여하여 추가적인 연구가 요망된다.

참 고 문 헌

- (1) 한국원자력안전기술원, 1999, “국내 원전의 지진 안전 규제 현황 및 해설”
- (2) Robert D. Cook 등, Forth Edition, “CONCEPTS AND APPLICATIONS OF FINITE ELEMENT ANALYSIS”
- (3) 강성기 등, 1999, “유동장 하의 게이트 밸브 거동에 관한 연구”, 춘계학술대회논문집, 한국소음진동공학회
- (4) 배윤호 등, 2001, “모터 구동 게이트 밸브의 취약부 분석”, 춘계학술대회논문집, 대한기계학회.