해수여과장치의 내진해석

Seismic Analysis of Traveling Sea Water Screen

김 흥 태* 이 영 신† 박 영 문**
Kim, Heung-Tae Lee, Young-Shin Park, Young-Moon

요 지

본 논문에서는 유한요소모델을 사용하여 원자력 발전용 해수여과장치에 대한 동적 내진해석을 수행하였다. 장치의 검증을 위해서 운전기준지진(Operating Basis Earthquake, OBE)과 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake, SSE)이 설계하중으로 작용하였을 때 부재에 미치는 영향을 평가하였다. 해석대상은 유한요소법을 사용하여 수학적 모델링을 완성하였고, 층응답스펙트럼(Floor Response Spectrum, FRS)에 따른 지진하중과 사하중 등을 적용하여 해석을 수행하였다. 해석된 해수여과장치의 최대변위는 OBE 조건에서 2.5mm이고, SSE 조건에서 최대변위는 4.6mm이다. 최대응력은 OBE 조건에서 24MPa, SSE 조건에서 44MPa이며, 이 값은 재료의 항복강도의 각각 18%, 27% 수준이다. 이에 따라 지진하중 조건에 따른 해수여과장치의 구조적 안전성이 제시되었다.

핵심용어 : 내진해석, 해수여과장치, 운전기준지진, 안전정지지진, 층응답스펙트럼

Abstract

In this study, the seismic analysis of traveling sea water screen for nuclear power plant was performed using finite element model. For qualification of traveling sea water screen, the response spectrum analysis was performed using the given operating basis earthquake(OBE) and safe shutdown earthquake(SSE) floor response spectrum. Dynamic analysis of water sea traveling screen was performed using finite element method. The analytical maximum displacements of traveling sea water screen were 2.5 mm under OBE condition and 4.6 mm under SSE condition. The maximum stresses of traveling sea water screen were 24 MPa under OBE condition and 44 MPa under SSE condition, that this results were 18 %, 27% of yield strength of material. Thus, it can shown that the structural integrity of traveling sea water screen has a stable structure for seismic load conditions.

Keywords *: seismic analysis, traveling water screen, operating basis earthquake, safe shutdown earthquake, floor response spectrum*

1. 서 론

최근 세계의 여러 지역에서 발생한 지진에 의한 피해가 발생되고 있으며, 이로 인하여 원자력 발전소를 포함한 중요산업시설의 지진에 대한 안전성 여부가 관심의 초점이 되고 있다. 지진에 대하여 구조물 및 각종 국가기반 시설물들이 안전 하도록 하기 위해서는 내진설계 기술이 절대적으로 필요하다. 지진발생시 지진에 대한 사회 전체의 준비태세, 내진설계 기술의 수준 및 시공의 정밀도에 따라 피해정도가 결정된다(정길호 등, 1998). 따라서, 현재 우리나라를 포함한 세계 각국에서는 중요 안전관련 시설물에 대한 내진 설계규정을 제정하여 시설물의 설계 및 시공에 이를 적용하고 있다. 특히 원자력 발전소의 경우, 만약의 사고시 방사능 물질의 유출로 인해 인근 주민과 환경에 심각한 피해를 입힐 수 있으므로 다른 산업 시설에 비하여 보다 엄격하고도 정밀한 내진해석 및 설계 요건을 적용하고 있다(이용일, 1995). 내진해석은 구조물이 강체기기와 유연체기기에 따라 정적해석과 동적해석으로 구분되며, 동적해석은 보수적 해석 적용의 유무에 따라 단순 동적해석과 상세

† 책임저자, 종신회원 · 충남대학교 기계설계공학과 교수
Tel: 042-821-6644 ; Fax: 042-821-8906
E-mail: leeys@cnu.ac.kr
* 충남대학교 기계설계공학과 석사과정
** (주)무진기연

• 이 논문에 대한 토론을 2011년 8월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2011년 10월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

동적해석으로 나뉜다. 해석대상은 자유진동해석(free modal analysis)을 수행하여 고유진동수를 구한다. 구조물의 기본 고유진동수(fundamental natural frequency)에 따라 해석방법은 정적해석과 동적해석으로 나뉜다. 정적해석은 구조물의 기본 고유진동수가 33Hz보다 큰 경우 강체 운동으로 간주하여 내진해석을 수행하며, 동적해석은 기본 고유진동수가 33Hz이내 일때 구조물을 유연체로 간주하여 내진해석을 수행한다(이준근 등, 2002; 이홍식 등, 2005).

Fragiacomo(2004)는 반복적인 지진하중이 작용할 때의 강재 구조물의 내진응답에 대하여 연구하였고, Gao(2007)는 RFM(Random Factor Method)을 이용한 트러스 구조의 임의 내진응답 해석에 대하여 연구하였다. 이는 불확실한 파라미터를 이용한 내진응답 해석으로써, 임의 트러스 구조 내진응답에 대한 진동해석을 말한다. Vasilopoulos(2009) 등은 강재 구조물의 두 수직방향 사이에 실제 지진가속도를 Eurocode 8 스펙트럼의 형태로 나타낸 내진설계에 대해 연구하였다. 국내에서도 원자력 발전소 구조물에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이준근(2002) 등이 울진 원자력 발전소 5,6호기용 공기정화기에 대한 내진검증을 연구를 수행하였고, 황석환(2002) 등은 원자력 발전소 여과장치에 대해 내진연구를 수행하였다. 이홍식(2005) 등은 발전소 주 제어실 제어패널의 내진해석을 수행하였고 정철섭(2010)은 응답스펙트럼법을 이용한 지진하중을 받는 원전용 주냉각수펌프의 내진해석을 연구하였다.

본 논문에서 다루는 해수여과장치(Traveling Water Screen, TWS)는 원자력 발전소에 공급되는 해수에 대한 1차적인 이물질을 제거하는 회전형 스크린 장치이다. 따라서, 해수여과장치에 대한 내진해석을 수행하여 구조물의 안전성 여부를 판단하였다. 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS 12.0을 사용하여 유한요소모델링을 하였으며, 지진에 대한 하중은 층응답스펙트럼(Floor Response Spectrum; FRS)을 사용하여 적용하였다.

2. 해석조건

2.1 물성치

해석모델에 사용된 재질은 스테인리스강 타입의 A240TP316L과 A276TP316의 두 종류를 사용하였다. A276-TP316은 여과장치의 축요소에 적용하였고, A240 TP316L은 여과장치의 형강류(ㄷ 형강, 사각빔, 원형봉)의 빔요소와 쉘요소에 사용되었다. 두 재료의 물성치는 표 1과 같다.

표 1 재료의 물성치

물성치	A240TP316L	A276TP316
밀도(kg/m^3)	7,917	7,917
프아송비	0.27	0.27
탄성계수(MPa)	193	205
항복강도(MPa)	170	205
인장강도(MPa)	485	520

2.2 허용응력

해수여과장치 재료의 항복응력이 170MPa이고, AISC에서 규정한 강 구조물의 허용응력 설계에서 구조물의 사하중만을 고려하였을 때, 항복응력의 60%를 허용응력이라고 규정한다. 따라서, 해수여과장치의 허용응력은 102MPa이며, 사하중과 운전기준지진(OBE)가 고려되었을 경우, 사하중이 작용하는 경우의 허용응력에 1.3배인 136MPa이다. 사하중과 안전정지지진(SSE)가 고려되었을 때 사하중이 작용하는 경우의 허용응력에 1.6배를 고려하며, 이 때 허용응력은 163MPa이지만 항복응력의 95%를 초과할 수 없기 때문에 허용응력은 162 MPa이다.

2.3 하중조건

하중조건은 사하중 및 지진하중으로 구분하여 적용하였다. 각 하중 조건은 ASME SEC Ⅲ Subsection NF(1995)와 ASME Section Ⅲ Division 1 Appendix F(1995)를 적용하였다. 해수여과장치의 좌측상부에는 구동모터가 위치하고 있으며, 여과망을 회전하는 구동축의 좌측 끝에 감속기가 부착되어 있다. 여과장치의 구동모터의 질량은 51.3kg, 감속기의 질량은 197kg, 여과망의 무게는 7,031kg이다. 구동모터는 상부 좌측 전방의 6개의 지점에 8.5kg의 하중이 수직으로 작용하도록 하였고, 여과망은 구동축의 노드 2개 지점에 집중하중이 각각 3515.5kg씩 작용하도록 하였다. 여과망장치의 중량을 보상하기 위해 여과장치 상부 양단에 스프링 서스펜션이 구축되어 있어 수직방향에 대한 위치보상이 이루어 진다. 스프링 서스펜션의 스프링상수는 다음과 같다.

$$k = \frac{Gd^4}{8NaD^3} = \frac{78000 \times 48^4}{8 \times 9.5 \times 232^3} = 436.3\,N/mm \quad (1)$$

G(횡탄성계수) : 78,000N/mm^2
d(소선경) : 48mm
Na(유효권수) : 9.5
D(중심경) : 232mm

2.4 층응답스펙트럼

지진에 의한 지반의 운동과 같은 동적하중에 대해 단자유도

(1자유도) 구조물이 가지는 응답(변위, 속도, 가속도)은 감쇠율이 일정한 경우에 고유진동주기가 변하게 된다. 서로 다른 고유진동주기를 갖는 단자유도 구조물의 최대 응답을 고유진동주기와 관련하여 그린 그림을 응답스펙트럼(Response spectrum)이라 한다. 따라서 하나의 주어진 지진 가속도 기록에 대해서 응답스펙트럼이 얻어지면 그것을 이용하여 단자유도 구조물이 아닌 다자유도 구조물의 최대거동도 예측할 수 있다. 각 모드별 최대거동을 응답스펙트럼으로 구할 수 있으며, 모드별 최대거동을 SRSS 방법을 사용하여 조합하면 구조물의 최대거동을 쉽게 예측할 수 있다. 층응답스펙트럼은 통상 설비가 포함되지 않은 주 구조물의 지반 입력에 대한 지진해석으로부터 각 층의 동적 응답을 구한 후 이를 바탕으로 작성하며, 설비의 지지점이 위치하는 높이마다 각각 다른 층응답스펙트럼이 주어진다. 그림 1은 내진해석에 사용된 층응답스펙트럼 중 하나를 예로 나타내었다. 층응답스펙트럼은 북-남, 동-서, 수직 방향에 대한 고유진동수에 대한 응답 가속도로 나타낸다. 해석에 사용된 최대지진하중은 운전기준지진조건에서 약 0.45g, 안전정지지진에서는 약 0.8g의 가속도를 적용하였다.

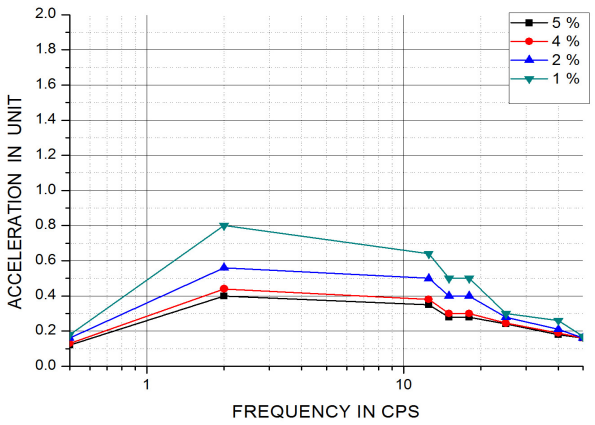

그림 1 층응답스펙트럼, OBE, North-South

표 2 지진하중조건에 따른 구조물 및 복합재료의 감쇠율(%)

Structure or component	Operating basis earthquake or 1/2 safe shutdown earthquake	Safe shutdown earthquake
Equipment and large diameter piping systems, pipe diameter greater than 12 in. ..	2	3
Small-diameter piping systems, diameter equal to or less than 12 in..	1	2
Welded steel structures	2	4
Bolted concrete structures	4	7
Prestressed concrete structures	2	5

표 2는 구조물이나 복합재료의 OBE, SSE 하중조건하에서 적용할 수 있는 감쇠율을 나타내고 있다. 해석 대상인 해수여과장치는 철판류와 형강류(ㄷ형강, 사각빔, 원형봉)로 구성되어 있다. 따라서 표 2의 "Bolted Steel Structure"에 적용하는 감쇠율을 사용하였다. Bolted Steel Structure의 감쇠율은 OBE 하중조건하에서 4%, SSE 하중조건하에서는 7%를 사용하였다(US NRC Regulatory Guide 1.61; 1973).

3. 내진해석 모델 및 경계조건

3.1 내진해석 모델

상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 12.0을 사용하여 해석을 위한 유한요소모델링을 수행하였다. 해수여과장치의 도면은 그림 2와 같으며, 유한요소의 특성 및 하중의 작용조건에 따라 단순화를 수행하였고, 해석모델은 그림 3과 같다. 모델의 스프링 서스펜션은 유한요소의 Combin 14를 통해 Stiffness와 Damping 효과를 나타내었고, 스프링 상수는 436.3N/mm을 적용하였다. 구동모터와 감쇠기, 여과망 장치는 Mass 21의 유한요소를 통해 수직방향의 집중하중을 적용하였다. 본 해석 모델에 사용된 유한요소는 Beam 188, Shell 63, Mass 21, Combin 14 요소이다. Beam 188은 각 절점에서 6 자유도를 가지고 있고 X, Y, Z 방향으로의 병진운동과 X, Y, Z 축에 대한 회전운동을 가진다. Beam 188요소는 해석모델에서 형강류(ㄷ 형강, 사각빔, 원형봉)를 모델링하는데 사용하였다. Shell 63 요소는 Beam 188 요소와 마찬가지로 X, Y, Z 방향으로의 병진운동과 X, Y, Z

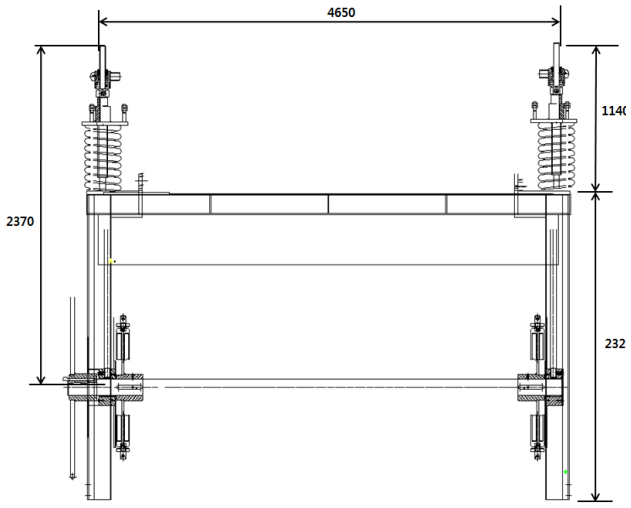

그림 2 해수여과장치

축에 대한 회전운동 및 6개의 자유도를 가지고 있으며 브래킷을 모델링하는데 사용하였다. Mass 21 요소는 구동모터의 중량과 감속기, 여과망의 중량을 집중하중으로 고려하는데 사용하였다. Combin 14 요소는 스프링-댐퍼 요소로써 여과장치 외부구조물의 상부 양단에 설치되는 스프링 서스펜션의 위치보상을 고려하는데 사용되었으며, 굽힘과 비틀림은 고려되지 않았다.

3.2 경계조건

해석모델에서 X축은 동-서 방향이고, Z축은 남-북 방향이며, Y축은 수직방향으로 정의하였다. 해석모델의 경계조건은 지상에 대하여 X, Y, Z방향과 회전의 모든 자유도에 대해서 구속하였다. 또한 여과망과 여과장치에 대한 위치보상을 위해 스프링-댐핑 작용하기 때문에 여과망 지지축의 양단을 X, Z축에 대하여 고정시키고 회전방향으로는 모든 자유도를 구속하였다. 그림 3은 해석모델과 경계조건을 나타내었다.

3.3 고유치 해석

해수여과장치에 대한 고유치 해석을 수행하였다. 고유치해석은 내진해석이 수행될 때 고려되어야 하는 모드를 계산하기 위해 우선적으로 수행되어야 한다. 고유치 해석 결과들과 응답스펙트럼 해석을 통해서 얻어지는 가속도 값을 입력값으로 하여 스펙트럼 해석을 한다. 고유치 해석은 일반적인 고유치 해석의 경우보다 더 많은 모드 수를 고려하며, 모드계수가 기준값 이상이 되는 모드들에 대해 모드 조합이 이루어지게 한다. 이를 통해 해석의 신뢰성을 확보할 수 있다. 본 연구에서는 모드 계수를 0.01로 설정하였으며, 이는 최대 모드 기여계수의 크기에 대해서 1%의 크기의 모드 기여 계수 값을 갖는 모드에 대해 모드조합을 수행함을 뜻한다. 총 50개의 모드에 대한 고유치 해석을 수행하였으며, 1차~4차까지의 모드형상과 고유진동수를 그림 4에 나타내었다.

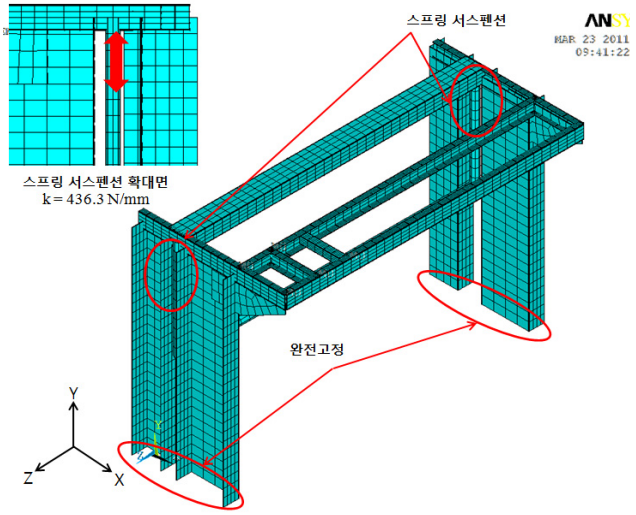

그림 3 해석모델 및 경계조건

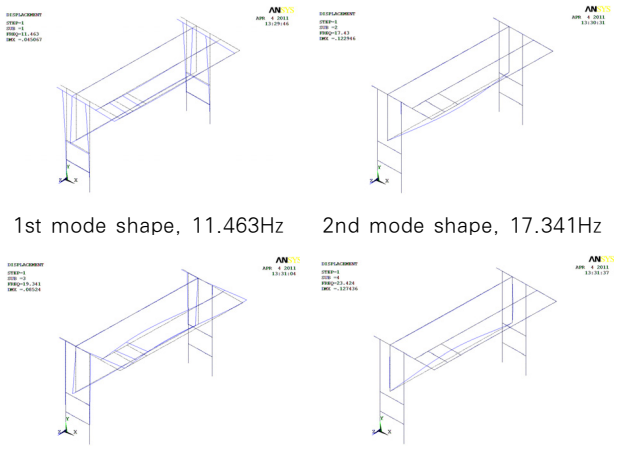

그림 4 고유치 해석결과

4. 내진해석 결과 및 고찰

4.1 변위 해석결과

변위에 대한 해석은 ANSYS 12.0을 사용하였고, 그림 5와 그림 6은 각각 운전기준지진(OBE)와 안전정지지진(SSE)에서 응력 해석결과를 나타내었다. 두 경우 모두 해수여과기를 지상에 고정하는 ㄷ형강에서 최대응력이 발생하였다. 표 3은 지진하중에 따른 구조에서의 최대변위와 최대변형률을 나타내었다. 운전기준지진(OBE)에서 최대 변위는 2.53mm로써 ㄷ

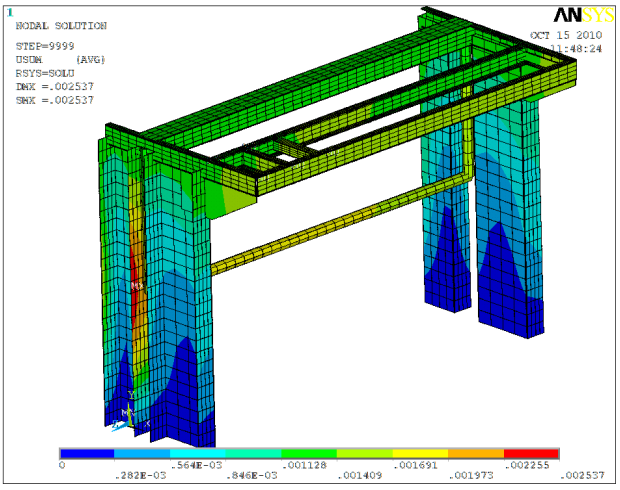

그림 5 운전기준지진(OBE)일 때 변위 해석결과(감쇠율 4%), δ_{max} = 2.53mm

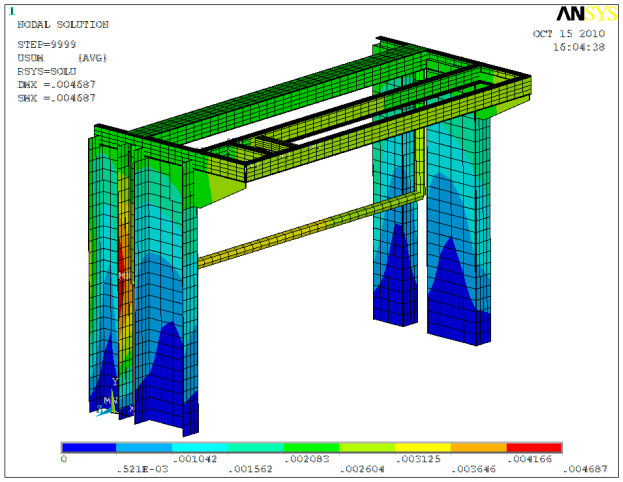

그림 6 안전정지지진(SSE)일 때 변위 해석 결과(감쇠율 7%), δ_{max}=2.53mm

표 3 지진하중에 따른 최대변위와 최대변형률

지진하중	X 방향 (mm)	Y 방향 (mm)	Z 방향 (mm)	최대변위 (mm)	최대변형률 ($\times 10^{-6}$)
OBE	1.41	0.64	2.14	2.53	115
SSE	2.70	1.33	3.82	4.68	212

형강에서 발생하였고 ㄷ형강의 높이(2,330mm) 와의 비가 1/1000 수준이였다. 안전정지지진(SSE)의 경우 최대변위는 4.68mm로서 ㄷ형강 높이와 변위의 비가 약 1/500이므로 변위에 대한 영향은 매우 작다고 할 수 있다.

4.2 응력 해석결과

운전기준지진(OBE) 하중과 안전정지지진(SSE) 하중에서 최대응력은 여과기를 지상에 고정하는 ㄷ형강과 지상(Ground)

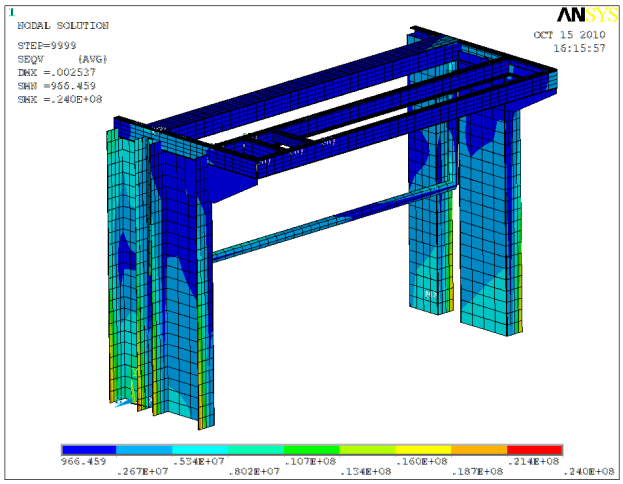

그림 7 운전기준지진(OBE)일 때 응력 해석 결과(감쇠율 4%), Maxmum von Mises stress=24.0MPa

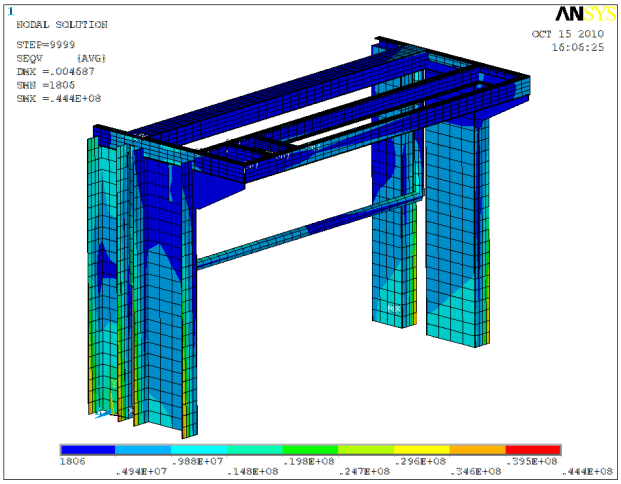

그림 8 안전정지지진(SSE)일 때 응력 해석 결과(감쇠율 7%), Maximum von Mises stress=44.4MPa

과의 고정되는 부분에서 공통적으로 발생하였다. 그림 7은 운전기준지진(OBE) 하중에서의 응력분포를 보여주고 있으며, 최대응력이 발생한 ㄷ형빔에는 24.0MPa의 최대응력을 발생하였다. 그림 8은 안전정지지진(SSE) 하중에서의 응력분포를 나타낸 것이다. 최대응력이 발생하는 ㄷ형강의 최대응력은 44.4MPa이다. 이 부분은 지상과 여과장치의 고정되는 부분으로써, 하중이 집중되었다. 해석결과를 토대로 운전기준지진일 때 안전계수는 5.67이며, 안전정지지진 인 경우 안전계수는 3.68로 나타났다.

4.3 수렴도 연구

본 논문의 내진해석 결과의 정확도를 검증하기 위하여 수렴도 연구를 수행하였다. 수렴도 연구는 해석 모델의 요소의 개수를 증가시켜 응력값이 수렴함을 확인하였다. 그림 9는 각 지진하중조건에서 요소의 개수를 증가시킴에 따라 해의

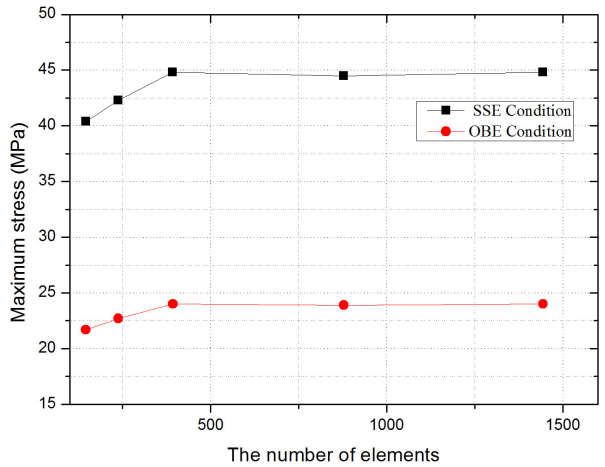

그림 9 요소 갯수에 의한 수렴도 연구

수렴을 나타내었고, 운전기준지진과 안전정지지진에서 각각 약 24MPa, 45MPa에 수렴하였다.

4.4 고 찰

기존의 해수여과장치의 내진해석(황석환 등, 2002)은 층응답스펙트럼을 사용한 동적해석 연구를 수행하였다는 점에서 본 연구와 동일하지만, 해석모델에 대한 적절한 요소의 적용 및 실제 지상과 해수여과망을 지지하는 구조물에 대한 연구내용은 미비하였다. 본 연구의 내진해석 결과와 기존의 내진해석 결과 동일한 위치에서 최대응력이 발생하였지만 최대응력 결과는 본 연구에서 더 낮은 최대응력을 갖음을 확인하였다. 이는 기존 연구에 비해 본 연구에서 실제 지상과 해수여과망을 지지하는 구조물에 대해 도면을 바탕으로 해석모델을 생성하였다는 점에서 차이를 보인다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 해수여과장치에 대한 내진 및 구조해석을 수행하여 구조물의 안전성을 평가하였다.

(1) 해수여과장치에 대한 내진해석을 수행하였다. 층응답스펙트럼을 사용하여 지진에 대한 조건을 부여하였으며, 운전기준지진(OBE) 하중에서의 최대 변위는 2.5mm이고, 안전정지지진(SSE) 하중에서의 최대 변위는 4.6mm가 발생하였다.

(2) 내진해석 결과, 최대응력은 운전기준지진(OBE) 하중에서 24.0MPa이고, 안전정지지진(SSE) 하중에서는 44.4MPa이다. 최대응력이 발생한 위치는 두 하중조건에서 공통으로 지상과 여과장치를 고정하는 ㄷ형강에서 나타났다.

(3) 허용응력은 운전기준지진(OBE) 하중에서 136MPa이고, 안전정지지진(SSE) 하중에서 162MPa이며, 안전계수는 운전기준지진(OBE)조건에서 5.6, 안전정지지진(SSE)조건에서 3.6으로 나타났다. 따라서 장치에 대한 안전성을 확보한 것으로 평가하였다.

참 고 문 헌

고우식, 김진, 허익구, 최병원 (2000) 원자력발전소 안전 등급 대형유도전동기의 기기검증, 대한기계학회 추계학술대회 논문집A, pp.498~503.

이용일 (1995) 원전구조물의 내진해석 및 설계, 한국전산구조공학회 논문집, 8(1), pp.19~25.

이준근, 김진영, 이희남 (2002) 울진 원자력발전소 5,6 호기용 공기정화기에 대한 내진검증, 대한기계학회 논문집A, 26(7), pp.1376~1383.

이홍식, 김명구, 조종두 (2005) 발전소 주 제어실 제어패널의 내진해석, 한국소음진동공학회 논문집, 15(6), pp.652~659.

정길호, 박병철, 최진유, 강영종 (1998) 국내 내진설계 제도 및 기준에 대한 고찰, 한국전산구조공학회 논문집, 11(1), pp.7~16.

정철섭 (2010) 응답스펙트럼법을 이용한 지진하중을 받는 원전용 주냉각수펌프의 내진 건전성 평가, 대한기계학회 논문집A, 34(11), pp.1773~1778.

황석환, 최재승 (2002) Traveling Water Screen의 내진해석, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp.627~632,

ASME Section Ⅲ Division 1 Appendix F (1995) Rules for Evaluaion of Service Loadings with Level D Service Limits.

ASME Section Ⅲ Division 1 Subsection NF (1995) Component Surpports.

Fragiacomo, M., Amadio, C., Macorini, L. (2004) Seismic Response of Steel Frames under Repeated Earthquake Ground Motions, *Engineering Structures*, 26, pp.2021~2035.

IEEE Std. 323 (1974) Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations.

IEEE Std. 344 (1987) Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations.

US NRC Regulatory Guide 1.61 (1973) Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants, October.

Vasilopoulos, A.A., Beskos, D.E. (2009) Seismic Design of Space Steel Frames using Advanced Method of Analysis, *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 29, pp.194~218.

Wei Gao (2007) Random Seismic Response Analysis of Truss Structures with Uncertain Parameters, *Engineering Structures*, 29, pp.1487~1498.

● 논문접수일 2011년 1월 21일
● 논문심사일
1차 2011년 1월 27일
2차 2011년 4월 6일
● 게재확정일 2011년 5월 17일