

# 해수 여과장치의 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 약

본 논문에서는 유한요소모델을 사용하여 원자력 발전용 해수 여과장치에 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 2.5 mm 이고, SSE 조건에서 최대변위는 4.6 mm 이다. 최대응력은 OBE 조건에서 24 MPa, SSE 조건에서 44 MPa이며, 이 값은 재료의 항복강도의 각각 18%, 27% 수준이다. 이에 따라 지진하중조건에 따른 해수여과장치의 구조적 안전성이 제시되었다.

## 1. 서 론

최근 일본에서 발생한 지진에 의하여 후쿠시마 원자력 발전소의 방사능 유출 피해가 발생되었고, 이로 인하여 원자력 발전소를 포함한 중요산업 시설의 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 피해 정도가 결정된다.(정길호 등, 1998) 내진해석은 구조물이 강체기기와 유연체기기에 따라 정적 해석과 동적해석으로 구분되며, 동적 해석은 보수적 해석 적용의 유무에 따라 단순 동적 해석과 상세 동적 해석으로 나뉜다. 해석대상은 자유진동해석을 수행하여 고유진동수를 구한다. 구조물의 기본 고유진동수에 따라 해석 방법은 정적해석과 동적해석으로 나뉜다. 정적해석은 구조물의 기본 고유진동수가 33 Hz 보다 큰 경우 강체 운동으로 간주하여 내진해석을 수행하며, 동적해석은 기본 고유진동수가 33 Hz 이내 일때 구조물을 유연체로 간주하여 내진해석을 수행한다.(이준근 등, 2002), (이흥식 등, 2005)

본 논문에서 다루는 해수여과장치(Traveling Water Screen, TWS)는 원자력 발전소에 공급되는 해수에 대한 1차적인 이물질 제거하는 회전형 스크린 장치이다.(황석환 등, 2002) 따라서, 해수여과장치에 대한 내진 해석을 수행하여 구조물의 안전성 여부를 판단하였다. 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS 12.0을 사용하여 유한요소 모델링을 하였으며, 지진에 대한 하중은 층응답스펙트럼(Floor Response Spectrum; FRS)을 사용하여 적용하였다.

## 2. 해석조건

\* 학생회원 · 충남대학교 기계설계공학과 석사과정 kei0408@cnu.ac.kr

\*\* 정회원 · 충남대학교 기계설계공학과 교수 leeys@cnu.ac.kr

\*\*\* (주)무진기연 ympark@newmoojin.com

## 2.1 물성치

해석모델에 사용된 재질은 스테인리스강이며, 밀도는  $7917 \text{ kg/m}^3$  이며, 탄성계수는 193 GPa이다. 프아송 비는 0.27 이며, 재료의 항복응력은 170 MPa이다.

## 2.2 허용응력

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

## 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 51.3 kg, 감속기의 질량은 197 kg, 여과망의 무게는 7,031 kg 이다. 구동모터는 상부 좌측 전방의 6개의 지점에 8.5 kg의 하중이 수직으로 작용하도록 하였고, 여과망은 구동축의 노드 2개 지점에 집중하중이 각각 3515.5 kg 씩 작용하도록 하였다. 여과망장치의 중량을 보상하기 위해 여과장치 상부 양단에 스프링 서스펜션이 구축되어 있어 수직방향에 대한 위치보상이 이루어 진다. 스프링 서스펜션의 스프링상수는 다음과 같다.

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

## 2.4 층응답스펙트럼

지진에 의한 지반의 운동과 같은 동적 하중에 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. 각 모드별 최대거동을 응답스펙트럼으로 구할 수 있으며, 그 모드별 최대거동을 SRSS 방법을 사용하여 조합하면 구조물의 최대거동을 쉽게 예측 할 수 있다. 그림 1은 내진해석에 사용된 층응답스펙트럼 중 하나를 예로 나타내었다. 층응답스펙트럼은 북-남, 동-서, 수직 방향에 대한 고유진동수에 대한 응답 가속도로 나타낸다. 해석에 적용된 감쇠율은 OBE 하중조건하에서 4 %, SSE 하중조건하에서는 7 %를 사용하였다. (US NRC Regulatory Guide 1.61; 1973)

## 3. 내진해석 모델 및 경계조건

### 3.1. 해석 모델

상용 유한요소 해석프로그램인 ANSYS 12.0을 사용하여 해석을 위한 유한요소 모델링을 수행하였다. 모델

의 스프링 서스펜션은 유한요소의 Combin 14를 통해 Stiffness 와 Damping 효과를 나타내었고, 스프링 상수는 436.3 N/mm 을 적용하였다. 스프링-댐퍼요소를 사용함으로써, 외부구조물의 상부 양단에 설치되는 스프링 서스펜션의 위치보상을 고려하였다. 여과장치 구동모터와 감쇠기, 여과망 장치는 Mass 21의 유한요소를 통해 수직방향의 집중하중을 적용하였다.

### 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 작용을 하기 때문에 여과망 지지축의 양단을 X, Z축에 대하여 고정시키고 회전방향으로는 모든 자유도를 구속하였다.

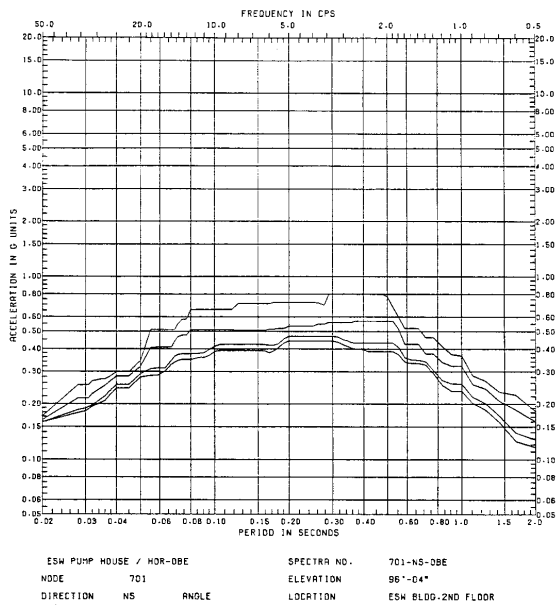


그림 1 층응답스펙트럼, OBE, North-South

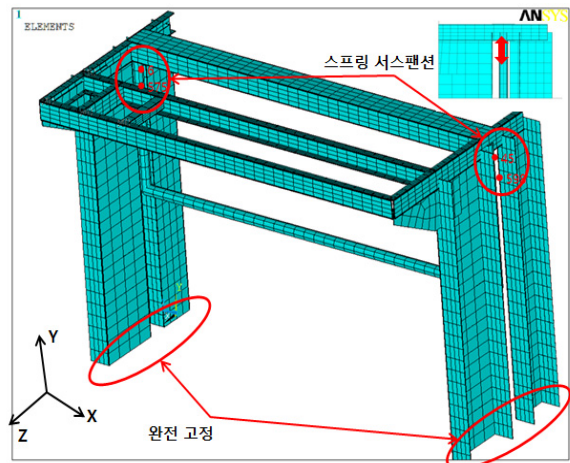


그림 2 해석모델 및 경계조건

## 4. 해석 결과

운전기준지진(OBE) 하중과 안전정지지진(SSE) 하중에서 최대응력은 여과기를 지상에 고정하는 ㄷ형강과 지상(Ground)과의 고정되는 부분에서 공통적으로 발생하였다. 그림 3은 운전기준지진(OBE) 하중에서의 응력 분포를 보여주고 있으며, 최대응력이 발생한 ㄷ형빔에는 24.0 MPa의 최대응력을 발생하였다. 그림 4는 안전정지지진(SSE) 하중에서의 응력분포를 나타낸 것이다. 최대응력이 발생하는 ㄷ형강의 최대응력은 44.4 MPa이다. 이 부분은 지상과 여과장치의 고정되는 부분으로써, 하중이 집중되었다.

## 5. 결론

연구에서는 해수여과장치에 대한 내진 및 구조해석을 수행하여 구조물의 안전성을 평가하였다.

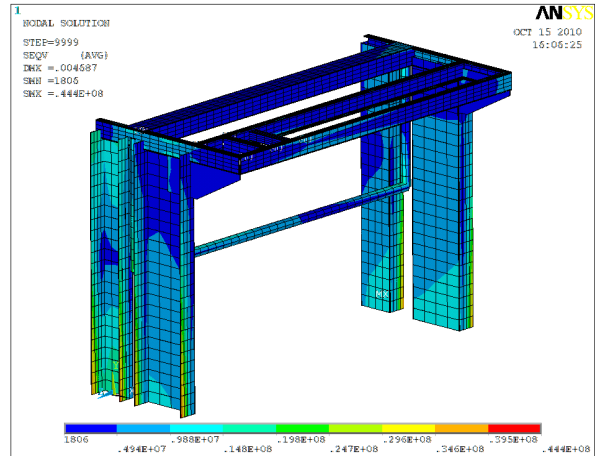
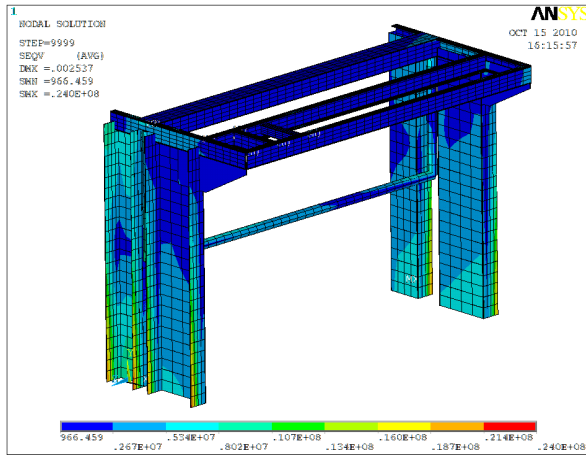


그림3 운전기준지진(OBE) 일 때 응력 해석 결과 (감쇠율 4 %)    그림4 안전정지지진(SSE) 일 때 응력 해석 결과 (감쇠율 7 %)

1) 해수여과장치에 대한 내진해석을 수행하였다. 층응답스펙트럼을 사용하여 지진에 대한 조건을 부여하였으며, 운전기준지진(OBE) 하중에서 24.0 MPa이고, 안전정지지진(SSE) 하중에서는 44.4 MPa이다. 최대응력이 발생한 위치는 두 하중조건에서 공통으로 지상과 여과장치를 고정하는 ㄷ형강에서 나타났다.

2) 허용응력은 운전기준지진(OBE) 하중에서 136 MPa 이고, 안전정지지진(SSE) 하중에서 162 MPa 이며, 안전계수는 운전기준지진(OBE)조건에서 5.6, 안전정지지진(SSE)조건에서 3.6로 나타났다. 따라서 장치에 대한 안전성을 확보한 것으로 평가하였다.

### 참고문헌

이준근, 김진영, 이희남 (2002) 울진 원자력발전소 5.6 호기용 공기정화기에 대한 내진검증, 대한기계학회 논문집 A, 26(7), pp.1376~1383.

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

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

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

ASME Section III Division 1 Subsection NF (1995) "Component Supports"

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

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.