

원자력 발전소 공사용 임시받침대의 내진 및 구조해석[§]

김 흥 태* · 이 영 신*[†]

* 충남대학교 기계설계공학과

Seismic and Structure Analysis of a Temporary Rack Construction in a Nuclear Power Plant

Heung Tae Kim* and Young Shin Lee*[†]

* Dept. of Mechanical Design Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received April 13, 2011 ; Revised July 31, 2011 ; Accepted August 1, 2011)

Key Words : Seismic Analysis (내진해석), Temporary Rack Paddle (임시받침대), Operating Basis Earthquake (OBE: 운전기준지진), Safe Shutdown Earthquake (SSE: 안전정지지진)

초록: 본 논문에서는 유한요소 모델을 사용한 유체-구조 해석을 통하여 원자력 발전소 임시 받침대의 내진에 대한 안전성을 평가하였다. 임시받침대는 수중에 존재하기 때문에 유체-구조 연성을 통하여 유체의 영향을 고려하였다. 유체의 영향은 구조물의 단위길이당 추가질량으로 정의하여 적용하였다. 각각의 운전기준지진(OBE)과 안전정지지진(SSE)의 설계조건을 층응답스펙트럼(Floor Response Spectrum: FRS)으로 적용하여 진동해석과 내진해석을 수행하였다. 해석된 임시받침대의 최대변위는 운전기준지진에서 0.29 mm 이고, 안전정지지진에서 최대변위는 0.36 mm 이다. 최대응력은 운전 기준지진에서 17.9 MPa, 안전정지지진에서 19.6 MPa 이며, 이 값은 재료의 항복강도의 23 %, 14 % 수준이다.

Abstract: In this study, the safety of a rack structure was evaluated through seismic analysis considering fluid-structure interactions using a finite-element model. The rack structure was immersed under water, so it was influenced by the water. The fluid-structure interaction can be specified in terms of the hydrodynamic effect, which is defined as the added mass per unit length. Modal analysis and seismic analysis using the Floor Response Spectrum (FRS) were carried out under Operating Basis Earthquake (OBE) and Safe Shutdown Earthquake (SSE) conditions. The analytical maximum displacements of the rack structure were 0.29 and 0.36 mm under OBE and SSE conditions, respectively. The maximum stresses were 17.9 MPa under OBE conditions and 19.6 MPa under SSE conditions; these results corresponded to 23 % and 14% of the yield strength of the applied material, respectively.

1. 서 론

최근 일본에서 발생한 후쿠시마 원자력 발전소 방사능 유출 사고는 인접 지역에 심각한 피해를 초래하였고, 이로 인하여 원자력 발전소를 포함한 중요산업 시설의 지진에 대한 안전성 여부가 관심의 초점이 되고 있다. 지진에 대한 피해는 사회 전체의 준비태세, 내진설계 기술의 수준 및 시공의 정밀도에 따라 결정되며, 특히 원자력 발전소

의 경우, 만약의 사고시 방사능 물질의 유출은 막대한 피해를 입히므로 다른 산업 시설에 비하여 보다 엄격하고도 정밀한 내진 설계를 적용하도록 되어있다.⁽¹⁾ 특히 원자력 발전소의 기기는 IEEE Std.^(2,3)와 ASME code^(4,5) 의하여 설계, 검증과정을 거쳐 제작된다. 내진해석은 구조물이 강체 기기와 유연체 기기에 따라 정적 해석과 동적 해석으로 구분되며, 동적 해석은 보수적 해석 적용의 유무에 따라 단순 동적 해석과 상세 동적 해석으로 나뉘며, 해석대상의 고유진동수에 따라 해석방법은 정적 해석과 동적 해석으로 나뉜다.⁽⁶⁾ 이러한 원전 구조물에 대한 내진해석 및 방법에 대해서는 활발한 연구가 진행되었다.⁽⁷⁻¹⁰⁾

본 연구의 대상은 원자력 발전소의 사용후연료

[§] 이 논문은 2011년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회(2011. 4. 14.-15., SETEC) 발표논문임

[†] Corresponding Author, leeys@cnu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

를 일시적으로 CLP(Cask Loading Pit) 안에서 보관할 목적으로 제작되는 임시지지대에 대한 것으로서 사용후 연료는 임시받침대 위에 설치되는 조밀저장대 안에 보관되며, 구조물은 항상 수중에 존재하게 된다.

지진이 발생하는 동안 구조물이 수중에 존재할 경우, 구조물은 수중에서 변형하는 과정 중 하중 방향을 따라 물 속에서 미끄러지고, 들리고, 비틀어 질 수 있다.⁽¹¹⁾ 유체와 구조물의 연성(fluid-structure interaction) 작용으로 인하여 유체가 고정되어 있는 구조물에 큰 힘을 가하게 되며, 구조물이 복잡해질수록 연성작용이 증가한다. 따라서, 수중에 존재하는 원전구조물에 대하여 추가 질량을 고려한 내진해석방법을 제시함으로써, 수중에 존재하는 구조물의 내진 설계에 적용할 수 있다. 내진 해석은 ANSYS 12.0을 사용하여 유한요소 모델링을 하였으며, 운전기준지진조건(OBE)과 안전정지 지진(SSE) 하중조건에 대해 층응답스펙트럼을 사용하여 적용하였다.

2. 해석 조건

2.1 허용응력

공사용 임시받침대의 재질은 Stainless steel 304이며, 항복응력은 215 MPa 이다. 탄성계수는 200 GPa 이고, 프아송 비는 0.29 이다. 일반적으로 지진하중을 받는 구조물의 부재 응력검토에 적용되는 허용응력은 설계지진 준위에 따라 다르다. AISC 에서 규정한 강 구조물의 허용응력 설계에서 구조물의 사하중만을 고려하였을 때, 항복응력의 60 % 를 허용응력이라고 규정한다. 공사용 임시받침대의 허용응력은 129 MPa 이며, 사하중과 운전기준지진(OBE)가 고려되었을 경우, 사하중이 작용하는 경우의 허용응력에 1.3 배인 167.7 MPa 이다. 사하중과 안전정지지진(SSE)가 고려되었을 때 사하중이 작용하는 경우의 허용응력에 1.6 배를 고려하며, 이때 허용응력은 206.4 MPa 이지만 항복응력의 95 %를 초과할 수 없기 때문에 허용응력은 204.0 MPa 이다.

2.2 하중조건

Fig. 1 은 실제 임시받침대의 모습을 나타내었다. 하중조건은 사하중(dead weight) 및 지진하중으로 구분하여 적용하였다. 각 하중 조건은 ASME SEC III Subsection NF⁽⁴⁾와 ASME Section III Division

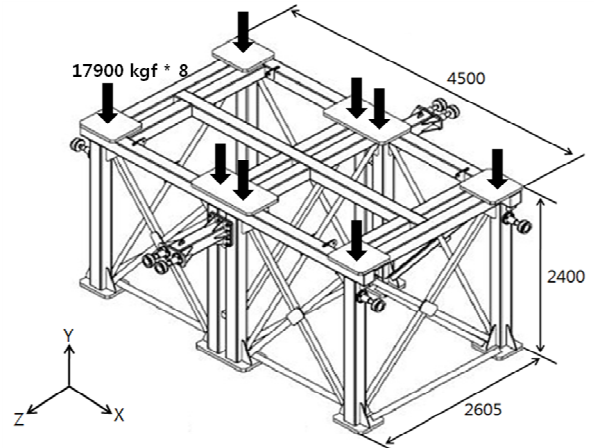


Fig. 1 Model of temporary rack paddle

1 Appendix F⁽⁵⁾를 적용하였다. 임시받침대 위에 설치되는 사용후 연료는 권양하중(winding load)으로 고려하여 적용하였다. 임시받침대에 걸리는 무게는 임시 받침대에 올라가는 조밀저장대가 14500 kgf, 조밀저장대에 들어가는 연료의 총 무게가 128700 kgf 이다. 총 자중 143200 kgf 이 받침대 상부에 수직으로 작용하므로, 해석에서는 임시 받침대에 집중하중을 받는 조건을 적용하였으며 총 8 개의 지점으로 각각 17900 kgf가 수직으로 작용하도록 하였다. 지진하중은 운전기준지진하중(OBE)과 안전정지지진하중(SSE)으로 구분하며, 구조물 동적해석 결과로 얻은 사용후연료 저장조 하부의 층응답스펙트럼을 입력 지진하중으로 사용하였다. 운전기준지진은 발전소 수명기간중 1~2 회 정도 발생할 가능성이 있는 상대적으로 작은 크기의 지진이므로, 이 지진 시에도 발전소의 안전관련 시설물들은 계속적으로 정상운전이 가능하도록 설계되어야 한다. 이에 반하여 안전정지지진이란 발전소 부지에서 발생 가능한 최대 잠재 지진으로서, 그 발생 확률이 1,000 년 ~ 10,000 년 에 한번 정도로 발생 확률이 지극히 낮은 지진이다. 이 때 발전소의 안전관련 시설물들은 안전정지지진의 발생 시에도 원자로의 안전한 가동 정지를 위하여 구조 및 기능적인 건전성을 유지할 수 있도록 설계되어야 한다.⁽¹²⁾

지진에 의한 지반의 운동과 같은 동적 하중에 대해 단자유도(1 자유도) 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, 그 모드별 최대거동을 Square root of sum of squares(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 높이 마다 각각 다른 층 응답스펙트럼이 주어진다. Fig. 2 는 OBE 조건에 따른 수직방향의 층응답스펙트럼이며, Fig. 3 은 SSE 조건에 따른 수직방향 층응답스펙트럼을 나타낸다.

임시저장대의 x 축은 동-서 방향이고, z 축은 남-북 방향이며, y 축은 수직 방향으로 정의하였다. 층응답스펙트럼은 북-남, 동-서, 수직 방향에 대한 고유진동수에 대한 응답 가속도로 나타낸다. 층응답스펙트럼은 남-북, 동-서, 수직방향이 동시에 작용하도록 하였다. Table 1 은 구조물이나 복합재료의 OBE, SSE 하중조건하에서 적용할 수 있는 감쇠율을 나타내고 있다. Table 1 의 “Bolted Steel Structure”에 적용하는 감쇠율을 사용하였다. Bolted Steel Structure 의 감쇠율은 OBE 하중조건하에서 4%, SSE 하중조건하에서는 7%를 사용하였다.⁽¹³⁾

Table 1 Damping value according to Earthquake load conditions(%)⁽¹²⁾

Structure or component	OBE or 1/2 SSE	SSE
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

2.3 유체와 구조물의 연성

본 연구에서의 공사용 임시받침대는 항상 수중에 놓여 있게 되며, 지진이 발생하였을 때 응답스펙트럼에 의한 가진 외에 유체와 구조물의 상호작용을 고려해야 한다. 유체 속에 존재하는 구조물은 주변을 감싸고 있는 유체의 밀도에 따라서 고유진동수 및 진동모드가 영향을 받게 된다. 구조물을 감싸는 유체의 밀도가 구조물의 밀도보다 매우 작을 경우에는 고유진동수와 진동모드는 거의 영향을 받지 않지만, 수중에 존재하는 구조물은 유체의 질량을 무시할 수 없기 때문에 상호작용에 의하여 자유진동 현상이 확연하게 변하게 된다. 추가질량의 적용은 수중구조물을 감싸는 유체 작용을 나타내기 위해서 정적인 상태의 구조물에 질량을 추가하여 자유진동을 파악함에 있다. 하지만 구조물의 형상이 매우 복잡해지면 추가질량계수는 그 유용성 및 정확도가 매우 떨어지게 됨에 유의해야 한다. 본 연구에서는 유체 해석 모델이 동

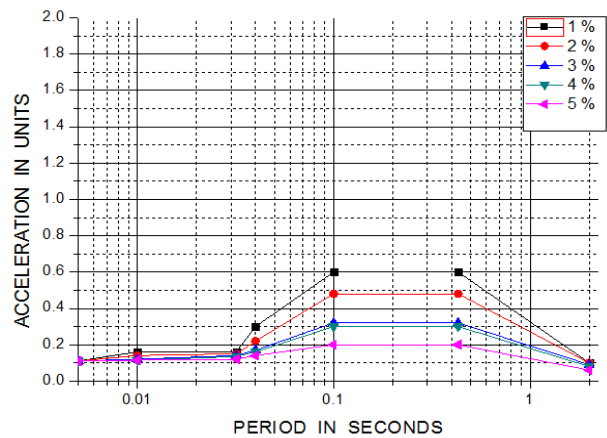


Fig. 2 Floor spectra of OBE for vertical response

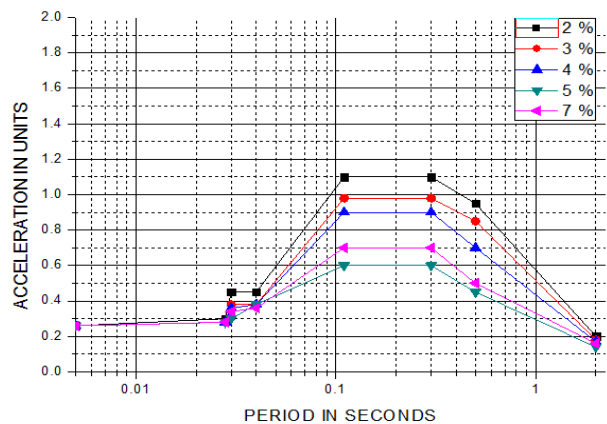


Fig. 3 Floor spectra of SSE for vertical response

Table 2 Added mass coefficients of rectangular beam

a/b	Added mass coefficients
0.1	2.23
0.5	1.70
1.0	1.51
2.0	1.36

Table 3 Added mass coefficients of rectangular beam

b/a	Added mass coefficients
1.0	0.5790
1.25	0.6419
1.59	0.7038
2.0	0.7568
2.5	0.8008

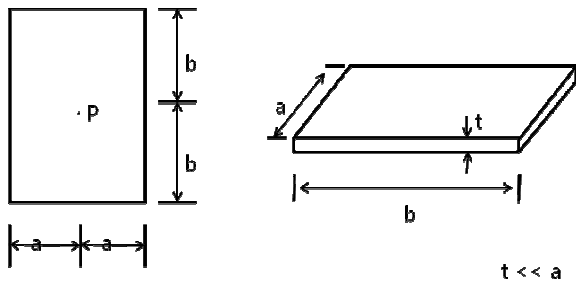


Fig.4 Description of body

적 거동시 유발되는 동적 유체 질량(hydro-dynamic mass)을 산정한 후 질량요소를 기초로 구조물의 각 절점에 분산시키는 추가질량계수(added mass coefficient)를 사용하여 동일한 효과를 나타냈다. 추가질량계수는 사각빔의 경우 단면의 높이 a 와 너비 b 의 비에 따라 그 값이 결정되며 a/b 가 1 일 때, 1.51 의 추가질량 계수를 갖는다. 사각판의 경우에는 두께 t 가 매우 작을 경우, b/a 의 비에 따라 그 값이 결정된다. a 와 b 의 비에 따른 추가질량계수는 Table 2 와 Table 3 와 같다. 유체와 구조물의 상호작용에 대한 길이당 추가질량은 다음 식과 같다.⁽¹⁴⁾

Column (175 mm × 175 mm × 8 mm)

$$m = \alpha \rho \pi a^2 = 1.51 \times 1000 \times \pi \times 0.0875^2 = 36.32 \text{ kg/m}$$

L Beam (75 mm × 75 mm × 6 mm)

$$m = \rho \pi a^2 = 1000 \times \pi \times 0.0375^2 = 4.42 \text{ kg/m}$$

Round bar (Diameter 50 mm)

$$m = \rho \pi a^2 = 1.51 \times 1000 \times \pi \times 0.025^2 = 1.96 \text{ kg/m}$$

Rectangular plate (760 mm × 500 mm × 40 mm)

$$m = \alpha \rho \frac{\pi}{4} a^2 b = 0.6625 \times 1000 \times \frac{\pi}{4} \times 0.5^2 \times 0.96 = 126.89 \text{ kg/m}$$

여기서, α 는 추가질량계수, ρ 는 구조물을 둘러싼 유체의 밀도를 나타낸다. 계산한 결과값을 토대로 x, y, z 방향에 대하여 추가질량을 고려하였다. Fig. 5 에는 임시저장대에 적용되는 주요 구조부분에 대한 추가질량을 나타내었다.

3. 유한요소해석

3.1 내진해석모델

상용 유한요소 해석프로그램인 ANSYS 12.0 을 사용하여 해석을 위한 유한요소 모델링을 수행하였다. 본 해석 모델에 사용된 유한요소는 Beam 188, Shell 63, Mass 21, Combin 14 이다. Beam 188 요소는 2D 로 모델링을 한 후 post-processing 을 통해서 3D 형상으로 표현되는 요소이다. 이 요소는 적절하게 폭이 넓고 두꺼운 빔구조물의 해석에 적합하고, Timoshenko beam 이론에 바탕을 두고 있으며, 각 절점에서 6 자유도를 가지고 있다. 또한, x, y, z 방향으로의 병진운동과 x, y, z 축에 대한 회전운동을 가지며 받침대의 상부와 기둥부분을 모델링하는데 사용하였다. Shell 63 요소는 Beam 188 요소와 마찬가지로 x, y, z 방향으로의 병진운동과 x, y, z 축에 대한 회전운동 및 6 개의 자유도를 가지고 있으며 받침대 상부에 놓인 판을 모델링 하기 위해서 사용하였다. Mass 21 요소는 점요소로써 하나의 절점에 의해 정의되며 받침대 위에 놓이는 저장대를 하나의 집중하중으로 고려하여 적용하였다. 받침대의 수중에 존재하므로 앞서 2.4 절에서 계산된 추가질량을 사용하여 추가하중을 고려하였다. Combin 14 요소는 스프링-댐퍼 요소로써 모듈의 높이를 고려하기 위해서 사용되었으며, 굽힘과 비

틀림은 고려되지 않았다. 사용후 연료는 Mass21 요소를 사용해서 집중하중으로 고려하였으며, 유체에 의한 영향을 무시할 수 없기 때문에 추가질량을 사용하여, 유체에 의한 동특성을 고려하였다.

3.2 경계조건

해석모델에서 x 축은 동-서 방향이고, z 축은 남-북 방향이며, y 축은 수직 방향으로 정의하였다. 해석모델의 경계조건은 Cask Loading Pit(CLP) 바닥에서는 y 방향의 변위만을 고정시키고 회전방향으로는 모든 자유도를 구속하였다. 또한 임시 받침대는 남-북 방향과 동-서 방향으로 길이가 300 mm, 320 mm 이며, 직경이 50 mm 인 원형봉으로 고정되고 있으며, 원형봉의 끝단의 모든 자유도를 구속하였다. 위의 경계조건에 대해서는 Fig. 5 에 나타내었다.

3.3 고유치해석결과

임시 받침대에 대한 내진해석을 수행하기 전에 고유치 해석을 수행하였다. 고유치 해석 결과들과 응답스펙트럼 해석을 통해서 얻어지는 가속도 값을 입력값으로 하여 스펙트럼 해석을 한다.

스펙트럼 해석을 수행하기 위한 고유치 해석을 하는 경우에 일반적인 고유치 해석을 하는 경우보다 많은 모드 수를 고려하게 되는데, 이렇게 함으로써 스펙트럼 해석을 할 때 수계산에 의하지 않고 모드 계수가 기준 값 이상이 되는 모드들에 대해서 모드 조합이 이루어지도록 할 수 있게 된다. 복잡한 구조물에 대한 고유치 해석 결과들은 구조물의 국부모드까지 포함하고, 이들 국부모드의 모드 계수는 기준 값 이하가 되는 경우, 국부모드들

은 모드 조합에서 제외된다. 따라서, 조합되는 모드들의 수가 작을 경우에는 조합된 모드들의 전체 모드 기여 계수가 크지 않게 되므로 스펙트럼 해석을 통하여 얻어진 부재 응력이나 변위와 같은 해석 결과들의 정확성을 확보할 수 없게 된다. 따라서, 고유치 해석을 통하여 계산된 고유진동수 중에서 모드 계수가 기준 값 이상이 되는 고유진동수를 제외한 나머지 모드의 모드조합에 대해서 신뢰성을 확보하기 위해 일반적인 고유치 해석을 수행할 때보다 더 많은 모드를 고려할 필요가 있다. 여기서, 모드계수(mode coefficient)는 고유치 해석을 통하여 얻어진 모드들 중 최대 모드 기여 계수로 각 모드들의 모드 기여 계수를 나눈 값을 의미한다. 본 연구에서는 모드계수를 0.01 로 설정하였으며, 이는 최대 모드 기여계수의 크기에 대해서 1% 크기의 모드 기여계수 값을 갖는 모드에 한해서 모드 조합을 수행함을 뜻한다.

Table 4 Natural frequency of temporary rack paddle

Mode sequence number	Frequency (Hz)
1	33.311
2	35.711
3	39.050
4	39.204

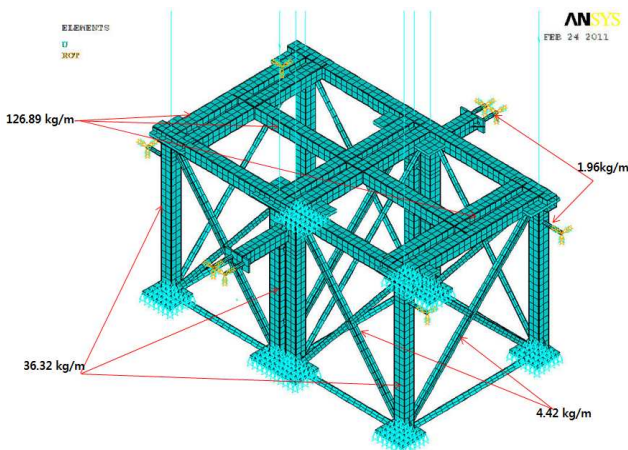


Fig. 5 Analysis model and boundary conditions

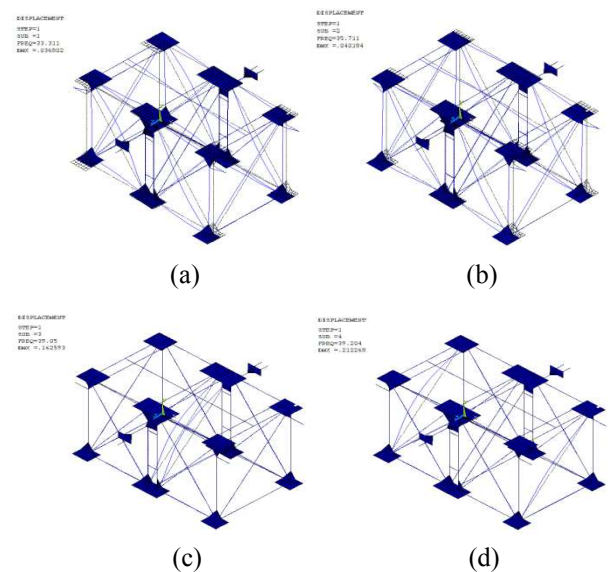


Fig. 6 Mode shape of temporary rack paddle; (a) 1st mode shape, (b) 2nd mode shape, (c) 3rd mode shape, (d) 4th mode shape

Table 4 는 임시받침대의 고유진동수를 1 차부터 4 차까지 본 결과이고, 각각의 모드에 대한 그림은 Fig. 6 에 나타내었다.

4. 내진 해석 결과 및 고찰

4.1 변위해석결과

Fig. 7 과 Fig. 8 은 변위에 대한 해석을 내진해석 조건인 운전기준지진(OBE)와 안전정지지진(SSE) 를 기준으로 하여 최대변위를 나타내었다. 최대변위는 두 하중조건 모두에서 사각빔을 보강하는 L 형빔에서 발생하였다. 운전기준지진(OBE) 하중조건에서 0.289 mm 의 최대변위가 발생하였고, 안전정지지진 하중조건에서는 최대변위가 0.355 mm 발생하였다. 운전기준지진(OBE)과 안전정지지진(SSE) 조건에서의 최대변위는 L 형빔의 길이와 최대변위의 비에 대하여 1/1000 미만이었다. 따라서, 변위에 대한 영향은 매우 작다고 할 수 있다.

4.2 응력해석결과

운전기준지진(OBE) 조건과 안전정지지진(SSE) 조건에서 최대응력은 임시받침대의 측면에 위치하는 원형봉에서 공통적으로 발생하였다. Fig. 9 과 Fig. 10 은 지진하중조건에 따른 응력분포를 나타내었다. OBE 하중조건에서 최대응력은 17.9 MPa 이며, SSE 하중조건에서는 19.6 MPa 이 발생하였다. 수직으로 작용하는 하중은 사각빔이 지지하지만 수평방향으로 작용하는 하중은 원형빔이 지지하기 때문에 원형빔으로 하중이 집중되었다. 따라서 이 부분에 최대응력이 발생하였다.

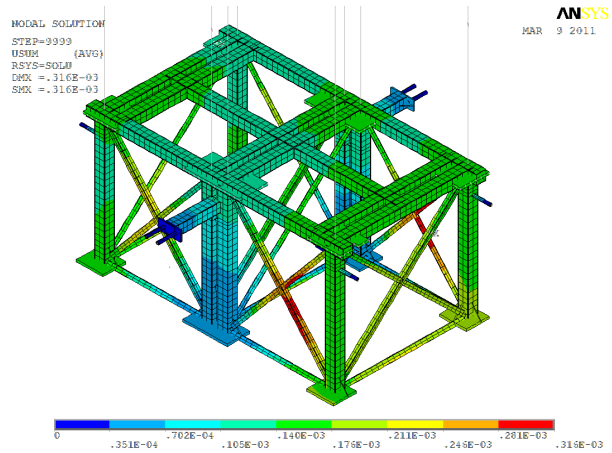


Fig. 8 Maximum displacement of rack paddle under SSE condition; $\delta_{max} = 0.355$ mm

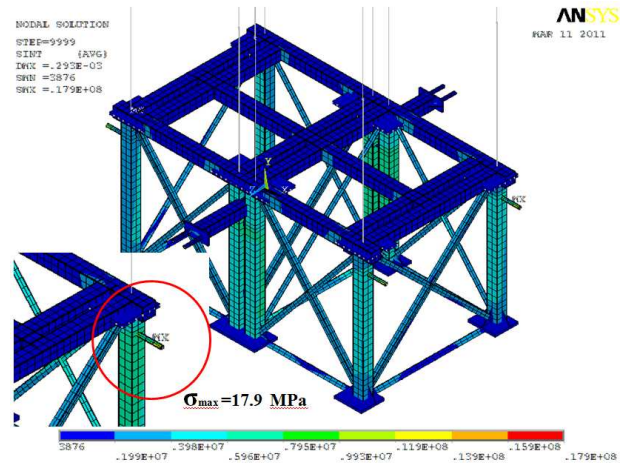


Fig. 9 Distributions of stress under OBE condition; Maximum von Mises stress $\sigma_{max} = 17.9$ MPa

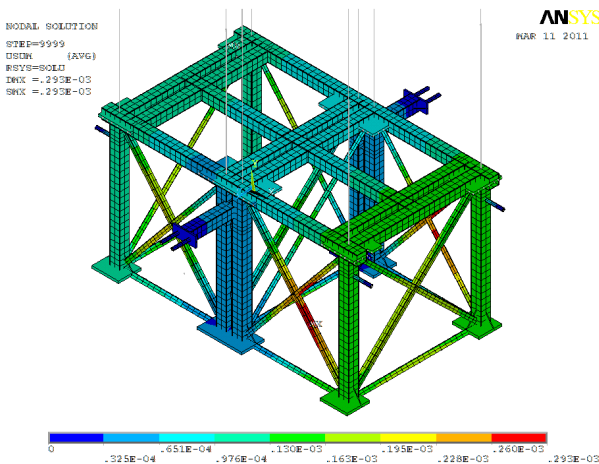


Fig. 7 Maximum displacement of rack paddle under OBE condition; $\delta_{max} = 0.289$ mm

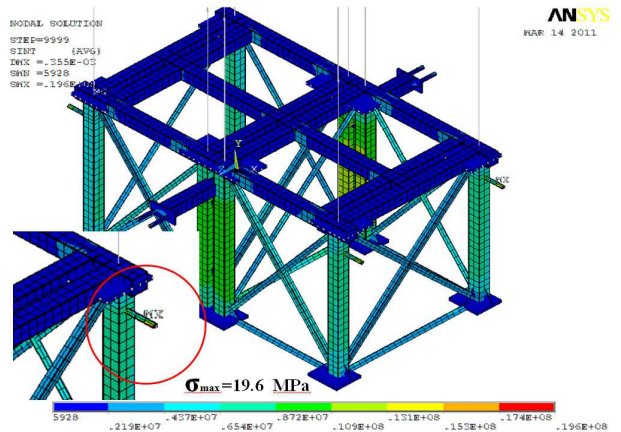


Fig. 10 Distributions of stress under SSE condition; Maximum von Mises stress $\sigma_{max} = 19.6$ MPa

5. 결 론

본 연구에서는 사용후연료 조밀저장대 교체를 위한 임시받침대의 내진해석을 수행하여 안전성을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 임시받침대에 대한 고유치 해석을 수행하여 고유진동수를 확인하였으며, 해석모델의 상부구조물의 범형상에 대한 굽힘모드를 확인하였다.

(2) 고유치 해석결과인 모드를 조합하여 내진해석을 수행하였으며, 운전기준지진(OBE) 하중에서의 최대 변위는 0.289 mm 이며, 안전정지지진(SSE)에서는 0.355 mm 의 최대변위가 발생하였다.

(3) 최대응력은 운전기준지진(OBE) 하중에서의 최대응력은 17.9 MPa 이고, 안전정지지진(SSE) 하중에서는 19.6 MPa 이다. 이 값은 재료의 항복강도의 23 %, 14 % 수준이다.

참고문헌

- (1) Jung, G. H., Park, B. C., Choi, J. Y. and Kang, Y. J., 1998, "Consideration for Korea Seismic Design System and Standard," *Journal of the Computational Structural Engineering Institute*, Vol. 11, No. 1, pp. 7~16.
- (2) IEEE, 1974, "Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations," *IEEE Std. 323*
- (3) IEEE, 1987, "Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations," *IEEE Std. 344*
- (4) ASME, 1995, "Component Supports," *ASME Section III Division 1 Subsection NF*
- (5) ASME, 1995, "Rules for Evaluation of Service Loadings with Level D Service Limits," *ASME Section III Division 1 Appendix F*
- (6) Lee, J. K., Kim, J. Y. and Chung, P. J., 2002, "Seismic Qualification of the Air Cleaning Units for Nuclear Power Plant Ulchin 5&6," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 26, No.7, pp. 1376~1383.
- (7) Frano, R. L. and Forasassi, G., 2009, "Conceptual Evaluation of Fluid- Structure Interaction Effects Coupled to a Seismic Event in an Innovative Liquid Metal Nuclear Reactor," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 239, pp.2333 ~ 2342
- (8) Nakamura, N., Akita, S., Suzuki, T., Koba, M., Nakamura, S. and Nakano, T., 2010, " Study of Ultimate Seismic Response and Fragility Evaluation of Nuclear Power Building using Nonlinear Three-dimensional Finite Element Model," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, pp.166 ~ 180
- (9) Kim, S. J., Lee, Y. S., Ryu, C. H., Yang, K. H. and Jung, S. H., 2001, "Seismic Analysis of Rack Structure with Fluid-Structure Interaction," *Proceedings of 2001 Fall Annual Meeting of the KSME*, Vol. A, pp. 465~470.
- (10) Lee, W. H., Cho, J. R., Roh, M. D. and Ryu, J. H., 2011, " Seismic Analysis of Nuclear Power Equipment Related to Design," *Transactions of the KSME A*, Vol. 35, No.3, pp. 317~323.
- (11) Stabel, J. and Ren, M., 2001, "Fluid-structure Interaction for the Analysis of the Dynamics of Fuel Storage Racks in the Case of Seismic Loads," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 206, pp.167-176.
- (12) Hwang, S. H., Choi, J. S., 2002, " Seismic Analysis of the Traveling Water Screen," *Proceedings of 2002 Spring Annual Meeting of the KSME*, Vol. A, pp. 627~632
- (13) USNRC, 1973, "Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants," *USNRC Regulatory Guide 1.61*
- (14) Blevins, R.D., 1990, "Flow-Induced Vibration," VNR Co.