

# 유체와 구조물의 연성을 고려한 rack 구조물의 내진해석

김성중\* · 이영신\*\* · 류충현\* · 양계형\*\*\* · 정성환\*\*\*

## Seismic Analysis of Rack Structure with Fluid-Structure Interaction

S.J.Kim, Y.S.Lee, C.H.Ryu, K.H.Yang and S.H.Jung

**Key Words** : Fluid-Structure interaction(유체와 고체의 연성), Added mass(추가질량), Hydrodynamic mass(동적유체질량), Floor Response Spectrum(층응답스펙트럼), Operating Basis Earthquake(운전기준지진), Safe Shutdown Earthquake(안전정지지진)

### Abstract

In this study, the seismic analysis of rack structure with fluid-structure interaction is performed through use of the Finite Element Method(FEM) code ANSYS. Fluid-structure interaction can specify in terms of an hydrodynamic effect which is defined as the added mass per unit length divided by the area of the cross section. Using the Floor Response Spectrum(FRS) obtained through the time-history analysis, modal analysis and seismic analysis under Operating Basis Earthquake(OBE) and Safe Shutdown Earthquake(SSE) condition is carried out. The fluid-structure interaction effects on the rack structure are investigated.

#### 기호설명

- $\rho$  : Mass density of surrounding fluid
- $a$  : Radius of cross section
- $m$  : Added mass

### 1. 서론

내진해석은 구조물이 지진에 의해서 발생 할 수 있는 인적·물적 피해를 최소화하기 위해서 반드시 수행되어야 하는 작업이다. 현재 내진해석은 높은 안전성을 요하는 원자력 구조물 등에서 주로 수행되어 왔다. 그러나, 최근에는 지진발생 빈도가 낮은 지역의 구조물에서도 지진에 대한 위험을 고려해서 내진해석을 수행하여 지진에 의한 피해를 최소화하려고 노력하고 있다[1].

우리나라와 같이 지진의 발생 빈도가 적은 지역에서도 발생 가능한 지진의 피해를 줄이기 위해 구조물의 내진해석을 통한 안전성을 고려해야 할 필요성이 있다. 지진이 발생하는 동안 구조물은 수중에서 변형하는 과정 중 하중 방향을 따라 물 속에서 미끄러지고, 들리고, 그리고 비틀어질 수 있다[2]. 구조물이 지상에 설치되어 있을 때보다는 수중에 설치되어 있을 때 지진에 대한 위험성이 더 증가하게 되는데 그 이유는 유체와 구조물의 연성(fluid-structure interaction) 작용으로 인하여 유체가 고정되어 있는 구조물에 큰 힘을 가하게 되기 때문이다. 그리고, 구조물이 복잡해질수록 이러한 연성문제가 더 커질 수 있다.

본 논문에서는 유체와 구조물의 연성을 고려한 구조물의 내진해석을 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 수행하였고, 단순한 구조물인 rack 구조물에 대해서 유체역학적 영향을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때를 비교해 보았다. 결론적으로 유체가 구조물에 미치는 영향

\* 충남대 기계설계공학과 대학원  
 \*\* 충남대 기계설계공학과  
 \*\*\* 원자력환경기술원

에 대해서 논의하였고, 지진에 의한 안전성을 확인하였다.

## 2. 유체와 구조물의 연성

일반적으로 물과 rack 사이에서 작용하는 유체와 구조물의 연성문제는 매우 어려운 문제이다. 그래서 최근에는 이러한 연성 문제만을 다루는 유한요소 해석 프로그램이 사용되고 있다. 그러나, 본 논문에서는 해석 모델이 동적 거동 시 유발되는 동적유체질량(hydrodynamic mass)을 산정한 후 질량요소를 기초로 구조물의 각 절점에 분산시키는 추가질량(added mass) 계수를 사용하여 동일한 효과를 나타냈다. 해석 모델의 단면에 대한 단위 길이 당 추가질량은 다음의 식에 의해서 계산된다[3][4].

$$m = \alpha \rho \pi a^2 \quad (kg/m) \quad (1)$$

식 (1)은 단면적이 사각형인 빔에 사용되는 추가질량 계산식으로 rack의 사각 빔에 적용하였으며, 사각 빔의 규격은 150 mm×150 mm× 8.2 mm 이고, 440개의 절점에 부가하였다.

$$m = \rho \pi a^2 \quad (kg/m) \quad (2)$$

식 (2)는 단면적이 원형인 빔에 사용되는 식으로 볼트를 가늘고 긴 원형 빔으로 가정을 하여 이 부위에 적용하였으며, 볼트는 직경이 50mm이고, 80개의 절점에 부가하였다.

$$m = a \frac{\pi}{4} \rho a^2 b \quad (kg/m) \quad (3)$$

식 (3)은 단면적이 사각판인 경우에 사용되는 식으로 rack 구조물에서 빔 위에 설치되는 판에 적용하였으며, 판의 규격은 700 mm×600 mm×40 mm 이고, 512개의 절점에 부가하였다. 추가질량은 유한요소모델링 시에 각 방향별(x, y, z축 방향)로 구분해서 부가해야 된다. 왜냐하면, 추가질량 계수는 단위 길이 당 계산 값이기 때문에

단면적에 따라 유체와 구조물의 연성 작용이 차이가 생기기 때문이다.

## 3. 유한요소모델

유체와 구조물의 연성을 고려한 rack 구조물의 내진해석은 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용해서 수행하였다.

### 3.1 모델 설명

본 논문에서 사용한 유한요소 모델은 수조 안에 설치되는 rack 구조물로서 Fig. 1에서 보여주고 있다. 본 모델은 수중에서 rack 위에 두 개의 사각 탱크를 임시로 보관하는 구조물이다.

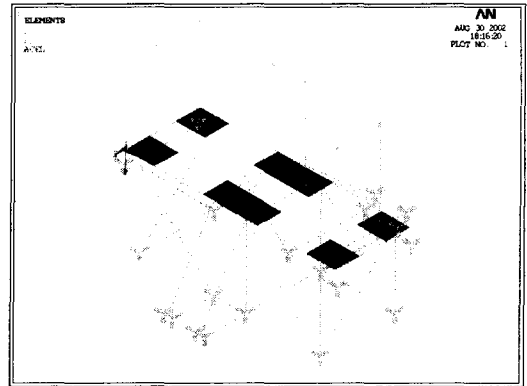


Fig. 1 FE model of rack structure

모델을 살펴보면, x축 방향으로서는 직경 50 mm인 볼트를 사용해서 상부에서 수조 벽면에 고정되어 있고, z축 방향으로서는 직경 50 mm인 볼트를 사용해서 하부에서 수조 벽면에 고정되어 있는 구조물이다. Rack 구조물은 절점 당 6개의 자유도를 갖는 beam, shell 요소를 사용해서 기둥과 판을 모델링하였고, 사각 탱크의 높이를 무시할 수 없기 때문에 높이를 고려할 수 있는 combin 요소를 사용하여 사각 탱크를 모델링하였다. 그리고, 사각 탱크의 무게가 11 ton 이상이므로 mass 요소를 사용해서 집중 질량으로 고려해서 모델링을 수행하였다. Rack 구조물 위에 놓이는 사각 탱크의 자중도 함께 고려하기 위해

서 유한요소 모델에 중력 가속도를 포함시켰다. 그리고, 유체와 구조물의 연성을 고려하기 위해 서 앞에서 계산된 각 부재에 대한 추가질량을 해석 모델에 포함시켰다.

본 논문에서 모델링 된 rack 구조물은 총 4866 개의 절점과 4928개의 요소를 가지고 있고, 사용한 재료는 스텐레스강 304이며, 탄성계수 ( $E$ )는 200 GPa, 허용응력 ( $\sigma_y$ )는 205 MPa, 밀도 ( $\rho$ )는 7850 kg/m<sup>3</sup>, 프와송비 ( $\nu$ )는 0.3이다.

### 3.2 하중 조건

하중은 자중(dead weight)과 지진하중(seismic load)으로 구분하여 적용하였다. 자중은 rack이 항상 수중에 존재하므로 실제 자중에서 부력을 뺀 값을 사용하였으며, 해석 시에는 집중하중으로 고려하였다. 지진하중은 운전기준지진(OBE : Operating Basis Earthquake) 하중과 안전정지지진(SSE : Safe Shutdown Earthquake) 하중으로 구분한다. 그러나, 두 하중은 동시에 작용하지 않는다.

본 논문에서는 두 지진하중에 대하여 시간이력 해석으로부터 구한 각 위치의 층응답스펙트럼(FRS : Floor Response Spectrum) 중에서 해석 모델의 변위 고정점인 수조 바닥 높이(100')에서의 층응답스펙트럼을 선택하였다.

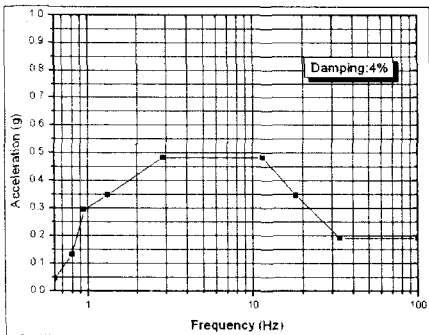


Fig. 2 Smooth Floor response spectra, OBE, Horizontal response

Regulatory Guide[5][6]에서는 구조물이나 복합 재료의 OBE와 SSE 하중하에서의 뎀핑값을 정의

하고 있다.

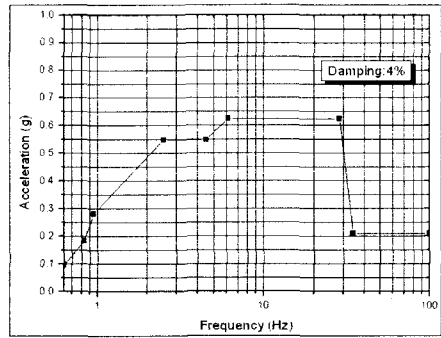


Fig. 3 Smooth Floor response spectra, OBE, Vertical response

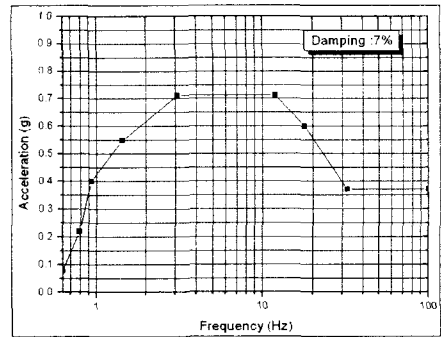


Fig. 4 Smooth Floor response spectra, SSE, Horizontal response

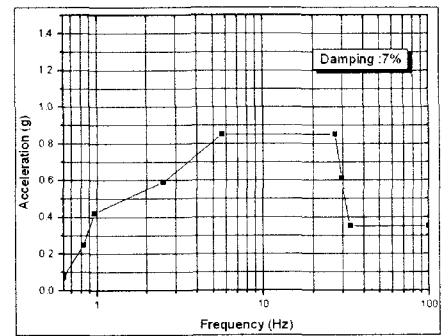


Fig. 5 Smooth Floor response spectra, SSE, Vertical response

OBE 하중조건인 경우, 기준 높이에서의 4% 뎀핑값에 해당되는 층응답스펙트럼을 선택해서 Fig. 2와 Fig. 3에서 보여주듯이 곡선을 단순화하

였다. SSE 하중조건인 경우도 마찬가지로 7% 뎀핑값에 해당되는 층응답스펙트럼을 선택해서 Fig. 4와 Fig. 5에서 보여주듯이 단순화하였다.

### 3.3 경계 조건

경계 조건은 해석모델이 실제 rack 구조물의 거동과 유사하도록 하면서 모달 해석결과에서 강제모드가 발생하지 않도록 구현하였다. 모달 해석결과 강제모드가 발생할 경우 강제모드의 모드 참여계수가 나머지 모드들의 모드 참여계수보다 상당히 크게 될 수 있다. 그래서 강제모드의 모드 참여계수가 지배적이게 되면 내진해석에서 모드조합을 할 때 지배적인 강제모드로 인하여 계산결과에 상당한 오차가 발생하게 된다. 따라서 오차 발생을 적게하기 위해서 되도록 강제모드가 발생하지 않도록 경계조건을 적용해야 한다[7].

경계 조건으로는 모델의 x축과 z축 방향 즉, 남-북, 동-서 방향으로 볼트에 의해서 구속되어 있으므로 완전 구속조건을 사용하였고, rack 구조물의 바닥은 높이 방향인 y축 방향 즉, 수직 방향으로 고정되어 있으므로 UY의 변위만을 고정시키고 UX, UZ의 변위와 ROTX, ROTY, ROTZ의 회전을 허용하는 것으로 보고 해석을 수행하였다.

## 4. 결과 및 고찰

본 논문에서는 두가지의 경우에 대해서 내진해석을 수행하였다. Case I은 유체와 구조물의 연성을 고려하지 않은 상태 즉, 추가질량을 부가하지 않은 상태에서의 내진해석이고, case II는 유체와 구조물의 연성을 고려한 상태 즉, 추가질량을 부가한 상태에서의 내진해석을 의미한다. 그리고, 두가지의 경우에 대해서 각각 모달해석, 스펙트럼해석을 수행하여 비교하였다.

해석은 OBE 하중조건 하에서와 SSE 하중조건 하에서의 내진해석을 모두 수행하였다. 결과는 OBE 하중조건 하에서의 변위와 응력보다는 SSE 하중조건하에서의 변위와 응력이 높게 평가되기 때문에 보수적인 설계를 위해 SSE 하중조건하에

서의 내진해석 결과만을 가지고 논의하였다.

### 4.1 모달 해석

내진해석을 수행하기에 앞서서 먼저 모달 해석을 수행해야 한다. 내진해석은 모달 해석에서 얻은 고유 진동수 값과 앞에서 언급한 층응답스펙트럼의 가속도 값을 입력값으로 하여 내진해석을 수행하게 된다. 그래서 case I 과 case II에 대해서 모달 해석을 수행하였다.

Table 1 Natural frequency of rack structure

Mode sequence number	Frequency of case I (Hz)	Frequency of case II (Hz)
1	40.82	38.32
2	42.08	39.29
3	48.09	42.83
4	48.16	42.87
5	48.22	42.90

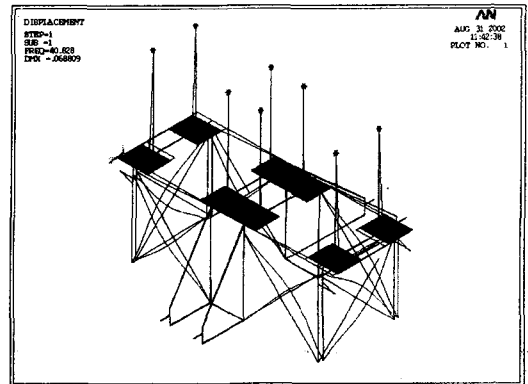


Fig. 6 1st mode shape of rack structure for case I

모달해석을 수행한 결과 Table 1의 결과를 얻었다. Case I 과 II를 비교해보면, case I의 고유진동수는 40.82 Hz이고, case II의 고유진동수는 38.32 Hz인 것을 확인 할 수 있다.

진동수에 변화가 생기는 것은 유체와 구조물의 연성작용이 구조물의 고유진동수에 영향을 주고 있기 때문이다. Fig. 6은 case I의 경우에 모달해

석 결과로 산출된 1차 모드 형상으로 40.82 Hz이다. 1차 모드 형상이 rack 구조물에서의 굽힘으로 나타나는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 7은 case II의 경우에 모달해석 결과 산출된 1차 모드 형상으로 38.32 Hz이다. 모드 형상은 case I의 경우와 동일하다.

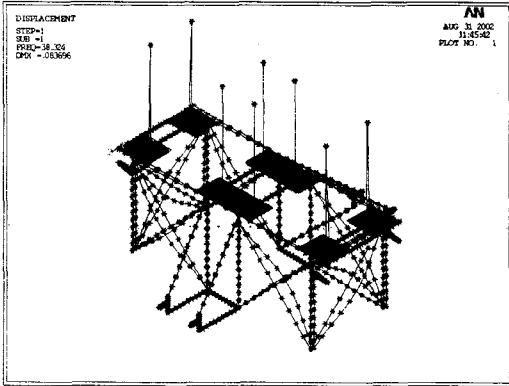


Fig. 7 1st mode shape of rack structure for case II

#### 4.2 내진 해석

모달해석을 바탕으로 추가질량을 고려한 모델과 고려하지 않은 모델에 대해서 OBE 하중조건 하에서와 SSE 하중조건 하에서의 내진해석을 수행하였다. 내진해석의 남-북, 동-서 그리고 수직 방향의 층응답스펙트럼을 모달 해석에서 구한 각각의 모드별 응답에 적용하여 가장 유용하게 사용하는 조합 방법인 SRSS(Square Root of Sum of Squares)법으로 그 결과를 조합하였다.

내진해석을 수행한 결과 각 부위에서의 변위와 응력을 구하였다. 먼저 OBE 하중조건 하에서 해석된 rack 구조물의 최대 변위는 추가질량이 고려되지 않았을 때에는 0.083 mm이고, 고려되었을 때에는 0.123 mm이다. 그리고, SSE 하중조건 하에서의 rack 구조물의 최대 변위는 각각의 경우에 대해서 Fig. 8과 Fig. 9에서 보여주고 있다. Case I의 경우에는 0.164 mm이고, case II의 경우에는 0.233 mm이다.

Rack 구조물 위에 놓인 두 개의 사각탱크 사이의 거리는 19 mm이고, 저장조 벽까지의 거리

는 50 mm이다. 변위 해석시 중요한 것은 사각탱크와 저장조 사이의 충돌이 발생하면 안된다. 해석결과 두 개의 사각탱크 사이의 변위는 0.022 mm로 서로 충돌이 일어나지 않는다는 것을 확인하였다. 내진해석 결과로 각 부재에 걸리는 응력도 확인할 수 있었다.

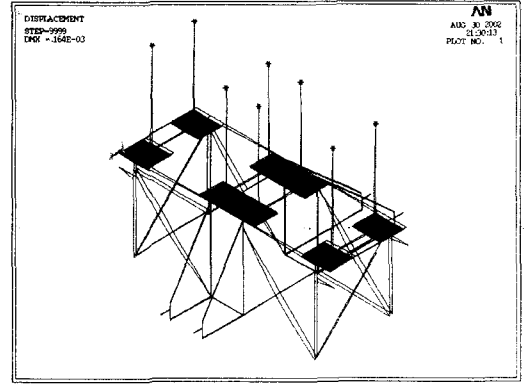


Fig. 8 Maximum displacement of rack structure for case I under SSE condition

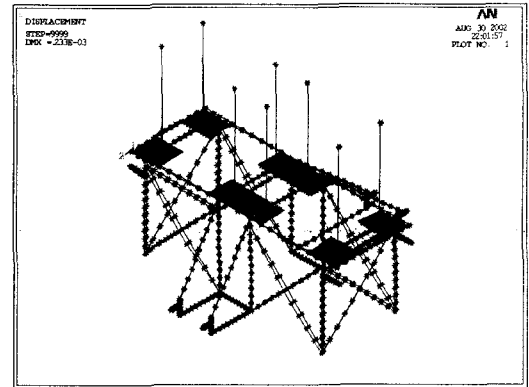


Fig. 9 Maximum displacement of rack structure for case II under SSE condition

OBE 하중조건 하에서 해석된 rack 구조물의 최대 응력은 추가질량이 고려되지 않았을 때에는 4.25 MPa이고, 고려되었을 때에는 4.32 MPa이다. 그리고, SSE 하중조건 하에서의 rack 구조물의 최대 응력은 case I과 case II에 대해서 Fig. 10과 Fig. 11에 나타나 있다. 응력 분포를 보면, 최대 응력은 rack 구조물을 지지하고 있는 볼트부

에서 발생하고 있는 것을 확인할 수 있다. 그 외에 rack 구조물의 기둥에서의 응력은 2.64 MPa 이고 rack 구조물 위에 있는 판에서의 응력은 0.91 MPa임을 확인하였다.

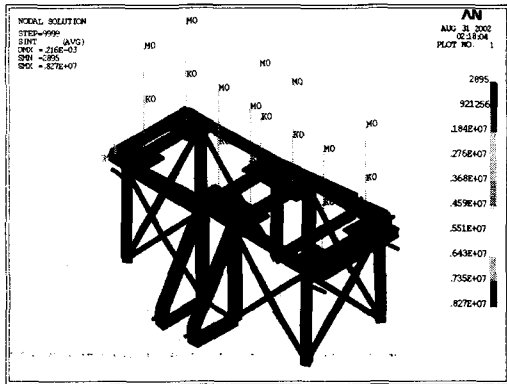


Fig. 10 Maximum stress of rack structure under for case I under SSE condition

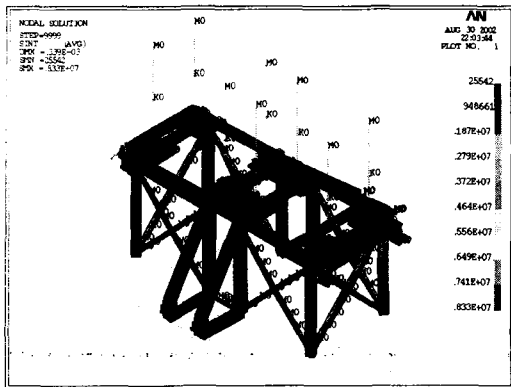


Fig. 11 Maximum stress of rack structure under for case II under SSE condition

## 5. 결론

본 논문에서 유체와 구조물의 연성을 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우의 rack 구조물에 대해 내진해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유체와 구조물의 연성 작용이 고유진동수에는 어느정도 기여하고 있지만, 모드 형상에는 기여하지 않는다는 것을 알았다.

(2) 저장조 안에 설치된 rack 구조물 위에 놓인 사각탱크는 지진이 발생하였을 시에 저장조 벽에 충돌하지 않는다는 것을 확인하였다.

(3) 허용응력보다 낮은 범위안에 응력 분포가 형성되어 있기 때문에 지진에 대해서 안전성을 확보할 수 있다는 것을 확인하였다.

(4) 마지막으로 유체와 구조물의 연성 작용이 rack 구조물의 고유진동수와 변위 계산시에는 고려해야 할 사항이지만 응력에 미치는 영향이 미소하다는 것을 알았다.

## 후기

본 연구는 한수원(주) 원자력환경기술원의 지원으로 이루어졌으며, 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] A.V.Krimotat and R.M.Mutobe, 1995, "Seismic analysis of complex structures", Computers and Structures Vol.56, No.2/3, pp.389-396.
- [2] J.Stabel, M.Ren, 2001, "Fluid-structure interaction for the analysis of the dynamics of fuel storage racks in the case of seismic loads", Nuclear Engineering and Design, pp.167-176.
- [3] R.D.Blevins, 1979, "Formula for natural frequency and mode shape", VNR Co.
- [4] 이재한 외, 1999, "하나로 침니내부지지대에 대한 지진응답해석", 한국원자력연구소.
- [5] USNRC Regulatory guide 1.60, 1973, "Design response spectra for seismic design of nuclear power plants".
- [6] USNRC Regulatory guide 1.61, 1973 "Damping values for seismic design of nuclear power plants".
- [7] 이영신 외, 2001, "고리#2,4 건식sipping 고정장치 내진해석 및 평가", 한전기공주식회사 위탁과제 연구보고서(충남대학교).