

## 사용후 핵연료 취급장비의 내진해석

### A Seismic Analysis of Spent Fuel Handling Tool

김성종\* · 이영신\*\* · 김재훈\*\* · 김남균\*\*\*

Sung-Jong Kim, Young-Shin Lee, Jae-Hoon Kim and Nam-Kyoon Kim

**Key Words** : Seismic Analysis(내진해석), Floor Response Spectrum(층응답스펙트럼), Spent Fuel Handling Machine(사용후 핵연료 취급장비 : 물쇠 3호), Operating Basis Earthquake(운전기준지진), Safe Shutdown Earthquake(안전정지지진)

#### ABSTRACT

The spent fuel handling tool is used to handle the refuel bundle and treated by hoist rope on the bridge crane. The new developed handling tool of NPP(Nuclear Power Plant) should be conformed the structural stability under earthquake condition. In this study, the stress and seismic analysis of the handling tool are performed by finite element method. Using the Floor Response Spectrum(FRS) obtained through the time history analysis, the modal and seismic analysis under Operating Basis Earthquake(OBE) and Safe Shutdown Earthquake(SSE) load conditions are carried out. Total 4 cases of different locations of the trolley and the hook are investigated. With the spring-damper element, the tension analysis of hoist rope is conducted. The stability of handling tool under earthquake load condition is conformed with regulatory guide.

#### 기호설명

- A : 로프 단면적
- E : 로프 탄성계수
- K : 로프 강성
- L : 로프 길이

#### 1. 서론

사용후 핵연료 집합체는 사용후 핵연료 취급장비의 핑거 구동 연결 파이프(finger drive connection pipe)와 확관봉(expanding rod)에 의해 취급되고 물쇠 3호의 상부에 위치하고 있는 U형 인양 걸쇠(lifting lug)는 브릿지 크레인의 호이스트 로프(hoist rope)에 걸려서 취급된다. 물쇠 3호라고 불리는 사용후 핵연료 취급장비는 기존의 물쇠 1호[1] 물쇠 2호[2]를 수정·보완한 사용후 핵연료 취급장비이다.

원자력 구조물은 높은 안전성을 요구하는 구조물로서 구

조물의 설계변경 및 새로운 장비의 탈/부착시에 반드시 지진에 대한 안전성을 확보하기 위해서 내진해석을 수행하여야 한다. 내진해석은 원자력 구조물이 외부로부터 발생할 수 있는 지진에 대해서 인적·물적 자원에 대한 피해를 최대한 방지하기 위해서 필수적으로 수행되어야 하는 작업이다[3]. 그러나, 최근에는 지진발생 빈도가 낮은 지역의 구조물에서도 지진에 대한 위험을 고려해서 내진해석을 수행하여 지진에 의한 피해를 최소화하려는 노력이 활발하게 진행되고 있다[4].

만약 구조물이 수중에서 작동하게 된다면, 유체는 구조물의 자유진동에 중요한 역할을 하게 된다. 이러한 구조물에 대한 내진해석을 수행할 때에는 반드시 동적 유체 질량효과(hydrodynamic effect)를 고려해야 되지만[5], 물쇠 3호는 저장조 위에 설치되어 있는 브릿지 크레인의 호이스트 로프에 의해서 취급되기 때문에 수중에서의 추가질량 효과를 고려하지 않아도 된다. 물쇠 3호에 의해서 취급되는 사용후 핵연료 집합체는 수중에서 취급되지만 해석시에 질량(mass)으로 고려되어졌기 때문에 유체에 의한 질량효과보다는 부력이 작용하는 질량으로 고려되는 것이 타당하다.

본 논문은 비내진범주 I급에 상당하는 지진이 발생하였을 때에 저장조 위에 설치되어 있는 브릿지 크레인과 사용후 핵연료를 취급하기 위해서 새롭게 개발된 물쇠 3호의 내

\* 충남대학교 대학원

\*\* 충남대학교

\*\*\* 한전기공주식회사

진에 대한 안전성과 브릿지 크레인의 호이스트 로프에 의해 서 취급되는 물체 3호의 최대변위와 응력이 허용범위 안에서 발생되는지를 범용 유한요소 해석 코드인 ANSYS 5.6을 이용하여 해석적으로 검증하는데 그 목적이 있다.

## 2. 해석요구조건

### 2.1 허용응력

저장조 위에 설치되어 있는 브릿지 크레인과 사용후 핵연료 취급장비인 물체 3호의 재료는 ASTM A240으로 허용응력( $\sigma_y$ )은 207 MPa, 탄성계수(E)는 200 GPa, 밀도( $\rho$ )는 7850 kg/m<sup>3</sup>, 그리고 포와송비( $\nu$ ) 0.3 이다.

물체 3호의 상하운동을 보조해주는 호이스트 로프의 허용장력은 작용하는 하중조건에 따라 다르다. OBE(운전기준지진) 하중조건하에서의 최대 허용장력은 115.4 kN 으로 인장강도의 1/3 값을 사용하였고, SSE(안전정지지진) 하중조건하에서의 최대 허용장력은 173.1 kN 으로 인장강도의 1/2 값을 사용하였다[6,7]. 호이스트 로프의 인장강도( $\sigma_t$ )는 176 MPa이다.

### 2.2 하중조건

하중은 사하중(dead load), 권양하중(rated load) 그리고 지진하중(seismic load)의 세가지 하중을 고려하였다.

사하중으로 고려한 것은 트롤리(trolley)와 브릿지 프레임(frame)의 자중으로 해석시 집중질량 요소를 사용하여 표현하였다.

권양하중으로 고려한 것은 사용후 핵연료 집합체와 물체 3호의 자중이다. 사용후 핵연료 집합체는 항상 수중에서 다루어지지만 동적 유체 질량효과보다는 부력을 고려한 질량 효과로 구현하였으며, 유한요소 해석시에는 집중질량 요소를 사용하여 표현하였다.

지진하중은 OBE 하중조건과 SSE 하중조건으로 구분하여 적용하였으며 두 하중조건은 동시에 작용하지 않는다. 구조물의 동적 해석결과로 얻어진 핵연료 건물에서의 시간이력 해석을 통해서 사용후 핵연료 저장조 상부에서의 층응답스펙트럼(FRS)를 작성하게 된다. 여기서 계산된 각 위치에서의 층응답스펙트럼 중 해석 모델의 변위 고정점에서의 층응답스펙트럼을 사용하였다. 해석시에는 수직, 남-북, 동-서 방향의 층응답스펙트럼이 동시에 작용하는 것으로 가정하였다.

### 2.3 층응답스펙트럼

특정한 지진에 대해서 일정한 감쇠율을 가진 단자유도 구조물의 진동주기를 여러 가지로 변화시키면서 동적 해석을

수행하고 이때 발생하는 변위, 속도와 가속도의 최대응답을 구하여 이것을 진동주기의 변화에 따라서 나타내는 것을 응답스펙트럼이라고 한다.

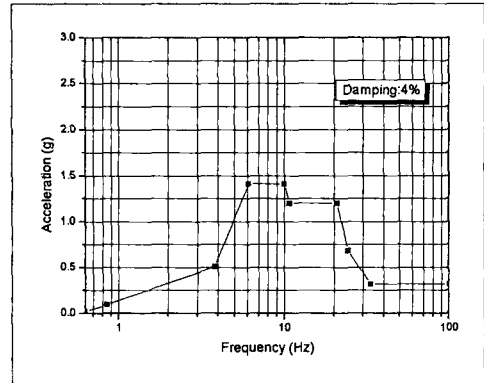


Fig. 1 Simplified floor response spectra, OBE, horizontal response

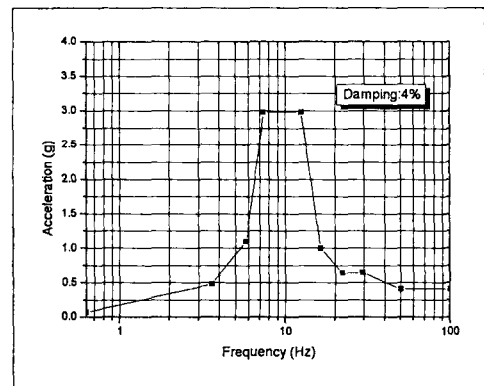


Fig. 2 Simplified floor response spectra, OBE, vertical response

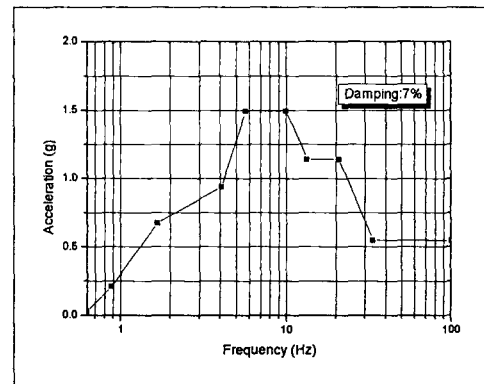


Fig. 3 Simplified floor response spectra, SSE, horizontal response

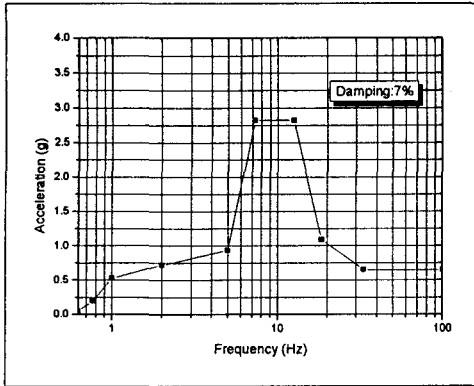


Fig. 4 Simplified floor response spectra, SSE, vertical response

층응답스펙트럼은 설비가 포함되지 않은 주 구조물의 지반 입력에 대한 지진해석으로부터 얻은 각 층의 동적 응답을 시간이력으로 표현한 후 이를 바탕으로 설비의 지지점이 위치하는 각각의 높이에서의 응답을 기록한 것이다.

본 논문에서는 Regulatory Guide 1.61[8]에서 규정하고 있는 댐핑(damping) 값 4%와 7%를 사용하였다. Fig. 1 - Fig. 4는 해석시에 입력값으로 사용하기 위하여 단순화한 층응답스펙트럼을 보여주고 있다.

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 유한요소모델

유한요소 해석모델은 범용 프로그램인 ANSYS 5.6을 사용하여 브릿지 크레인과 물쇠 3호를 3차원으로 모델링하였다. Fig. 5는 브릿지 크레인의 설계도면을 나타내고 있고, Fig. 6은 물쇠 3호의 CAD 도면을 나타내고 있다. 브릿지 크레인은 실제 형상과 유사하게 모델링을 수행하였다. 물쇠 3호는 질량요소로 고려하였고, 물쇠 3호를 취급하는 호이스트 로프의 장력은 스프링 요소를 사용해서 고려하였다.

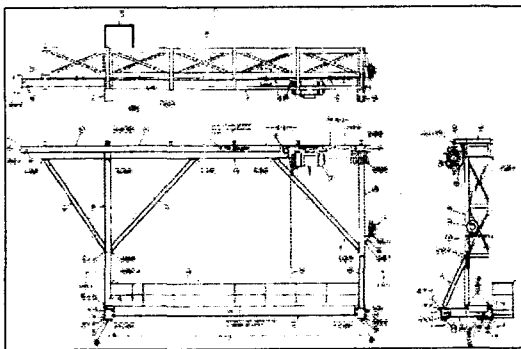


Fig. 5 Draft of bridge crane

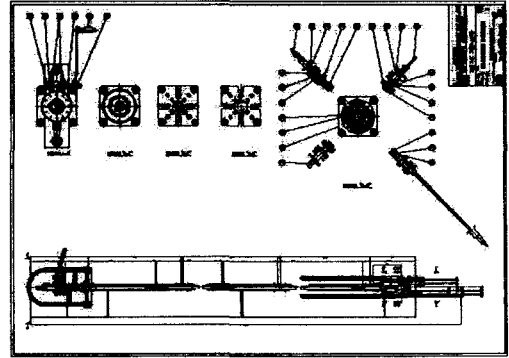
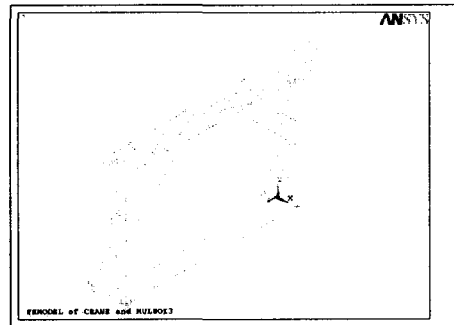


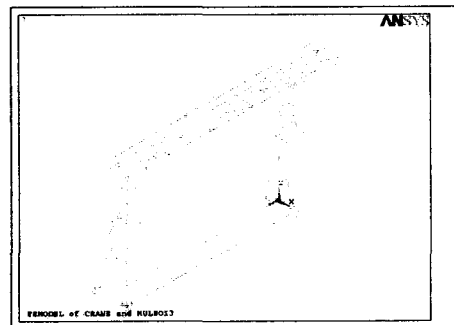
Fig. 6 Draft of spent fuel handling tool using CAD program

해석모델은 브릿지 크레인의 모노레일 상에서 좌우 운동을 하는 트롤리와 상하 운동을 하는 훅의 위치별로 총 4가지의 경우에 대해서 고려하였다. Fig. 5는 각각의 경우에 대한 유한요소 모델을 보여주고 있다.

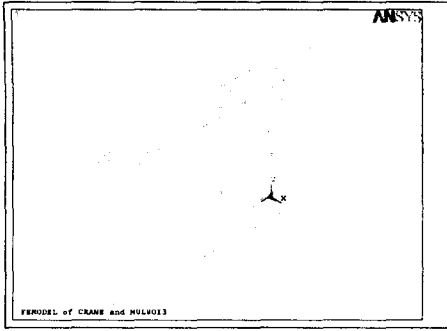
Fig. 7 (a)는 트롤리가 모노레일의 중앙에 위치하고, 물쇠 3호가 가장 아래부분까지 내려가 있는 로프의 훅에 걸려서 취급되는 것을 모델링한 것으로 호이스트 로프의 최장길이는 6.8 m이다.



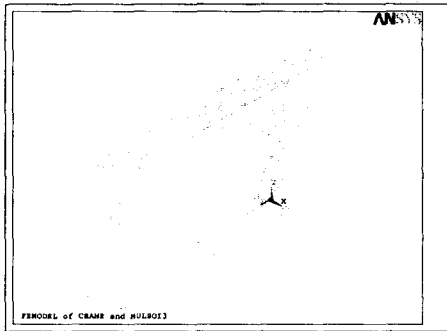
(a) Case I



(b) Case II



(c) Case III



(d) Case IV

Fig. 7 FE Model of spent fuel handling tool and bridge crane

Fig. 7 (b)는 트롤리의 위치가 중앙에 위치하고, 물쇠 3호가 가장 위부분까지 올라와 있는 로프의 폭에 걸려서 취급되는 것을 모델링한 것으로 호이스트 로프의 최단 길이는 2.4 m 이다.

Fig. 7 (c)는 트롤리의 위치가 모노레일의 1/4지점에 존재하고, 폭이 가장 하부에 위치했을 경우를 묘사하기 위한 유한요소 해석모델이다.

Fig. 7 (d)는 트롤리가 중앙에 위치하고, 폭이 가장 상부에 위치했을 때를 묘사한 유한요소 해석모델이다.

유한요소 해석모델은 빔요소(beam element), 질량요소(mass element) 그리고 물쇠 3호를 취급하는 로프를 표현하기 위해서 스프링-댐핑요소(spring-damping element)를 사용하였다. 빔요소는 브릿지 크레인의 각 부재를 실제의 형상과 유사하게 모델링하기 위해서 사용하였고, 질량요소는 질량 효과만을 고려할 수 있는 사하중과 권양하중을 구현하기 위해서 사용되었으며, 스프링-댐핑요소는 호이스트 로프에 작용하는 장력을 확인하기 위하여 사용하였다.

본 논문에서 경계조건은 동적 해석을 위한 유한요소 모델이 실제 구현되는 형상의 움직임과 유사하도록 하면서 고유치 해석 결과에서 강제 모드가 발생하지 않도록 적용하였다.

유한요소 해석모델에 적용된 경계조건은 Fig. 5에서 확인할 수 있다.

호이스트 로프의 장력을 계산하기 위해서는 로프의 강성을 알아야 한다. 로프가 최장길이인 6.8 m 일 때의 로프강성은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$K = EA/L = 16081.1kN/m \quad (1)$$

또한, 로프가 최단길이인 2.4 m 일 때의 로프강성은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$K = EA/L = 50.1kN/m \quad (2)$$

여기서, 로프의 길이(L)는 트롤리 샤프트 중심에서 물쇠 3호의 인양결쇠 상단까지의 길이를 의미한다.

## 3.2 내진해석

### 3.2.1 고유치해석 결과

구조물의 내진해석은 먼저 고유치 해석을 통하여 각각의 모드를 확인한 후에 계산된 모드의 조합과 층응답스펙트럼을 이용하여 수행하게 된다.

본 논문에서는 먼저 고유치 해석을 수행함으로써 내진해석시에 고려되어지는 각각의 모드를 계산하였다. 내진해석을 목적으로 수행되어지는 고유치 해석은 단순하게 고유진동수를 확인하기 위해서 수행되어지는 고유치 해석보다 많은 수의 모드를 고려해야한다. 그 이유는 내진해석을 수행할 때에 구조물의 국부모드(local mode)까지 포함하게 되는데, 이러한 국부모드는 모드기여계수(mode participation factor)가 낮은 경우가 많기 때문에 제외시켜야 한다. 또한 조합되는 모드의 수가 적으면 내진해석을 통하여 얻어진 부재의 변위와 응력에 대한 해석결과가 부정확할 수 있기 때문에 모드 조합에 대한 신뢰성과 해석 결과에 대한 정확성을 확보하기 위해서 더 많은 수의 모드를 고려하게 되는 것이다.

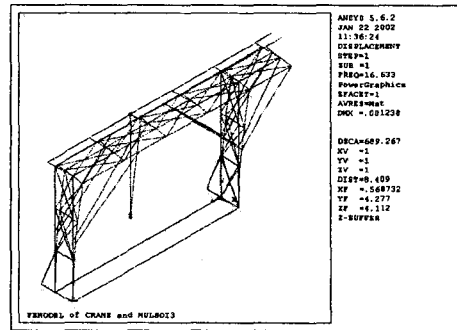


Fig. 8 1st mode shape for case I

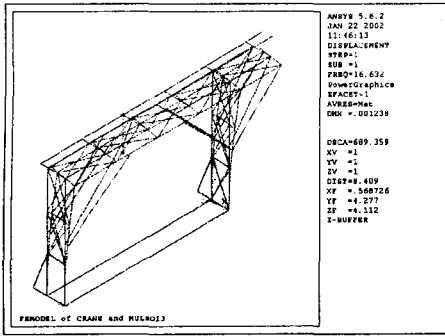


Fig. 9 1st mode shape for case II

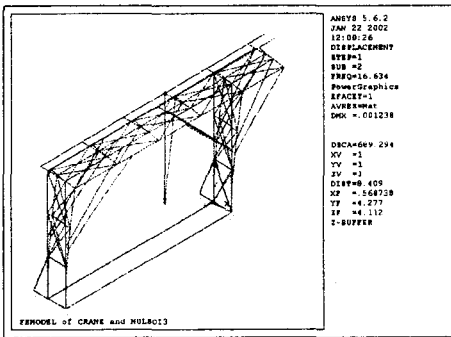


Fig. 10 1st mode shape for case III

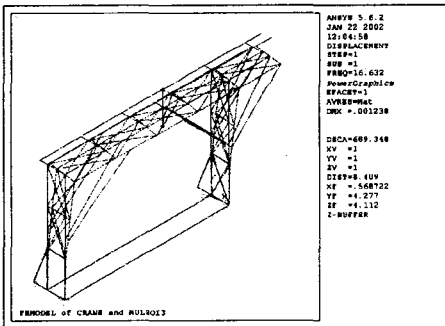


Fig. 11 1st mode shape for case IV

Table 1 Natural frequency of spent fuel handling tool and bridge crane

| Mode sequence number | Frequency |
|----------------------|-----------|
| 1                    | 16.63     |
| 2                    | 32.95     |
| 3                    | 42.95     |
| 4                    | 63.53     |
| 5                    | 64.85     |

Fig. 8 - Fig. 11은 고유치 해석결과로 얻은 각각의 경우에 대한 1차 모드형상을 보여주고 있다. 각각의 경우에 대한 1차 고유진동수가 모두 16.63 Hz로 나타나는 것을 Table 1에서 확인할 수 있다. 이는 호이스트 로프의 위치변화에 상관없이 거의 동일한 진동수와 모드형상이 나타난다는 것을 알 수 있다. 1차 모드 형상(mode shape)은 브릿지 크레인의 굽힘 형상으로 각각의 경우에 대해서 거의 유사한 모드 형상을 보여주고 있다.

### 3.2.2 변위 및 응력해석 결과

고유치 해석결과와 층응답스펙트럼을 이용하여 유한요소 해석모델에 대한 내진해석을 수행한 결과로 구조물의 변위와 응력을 얻었다. Table 2는 각각의 경우에 대한 최대 변위와 응력을 나타내고 있다.

최대 변위는 트롤리가 브릿지 크레인의 중앙에 위치해 있고 축이 가장 하부에 위치해 있을 때 발생하였다. OBE 하중조건하에서는 3.941 mm, SSE 하중조건하에서는 3.973 mm의 최대 변위값을 얻었다.

각각의 경우에 대해서 최대 응력이 발생한 경우를 살펴보면 트롤리가 중앙에 위치하고, OBE 하중조건하에서의 최대 응력은 2.98 MPa 로 축이 가장 하부에 위치했을 때이다. SSE 하중조건하에서의 최대 응력은 3.27 MPa 로 축이 가장 상부에 위치했을 때이다.

SSE 하중조건하에서 축이 가장 하부에 위치했을 때의 최대 응력은 3.26 MPa 로 축이 상부에 위치했을 때와 거의 유사한 값을 보여주고 있다. 그렇기 때문에 최대 응력값은 축이 상부에 있는 경우와 하부에 있는 경우가 동일하다고 인식할 수 있으며, 최대 변위와 응력이 발생한 경우의 트롤리와 축의 위치가 서로 동일하다는 것을 확인하였다.

Fig. 12 - Fig. 13은 최대 변위와 응력이 발생한 경우(case I)에 대한 응력분포를 보여주고 있다. 각 하중조건에 따른 응력분포를 보면, OBE 하중조건하에서의 최대응력은 브릿지 트럭과 기둥이 만나는 경계에서 발생되고, SSE 하중조건하에서의 최대응력은 주브레이싱과 기둥이 만나는 경계에서 발생한다는 것을 확인할 수 있다.

Table 2 Maximum displacements and stresses

| Location | Load condition | Displacements (Unit : mm) | Stresses (Unit : MPa) |
|----------|----------------|---------------------------|-----------------------|
| Case I   | OBE            | 3.941                     | 2.98                  |
|          | SSE            | 3.973                     | 3.26                  |
| Case II  | OBE            | 0.464                     | 2.97                  |
|          | SSE            | 0.614                     | 3.27                  |
| Case III | OBE            | 3.934                     | 2.98                  |
|          | SSE            | 3.967                     | 3.26                  |
| Case IV  | OBE            | 0.463                     | 2.97                  |
|          | SSE            | 0.613                     | 3.27                  |

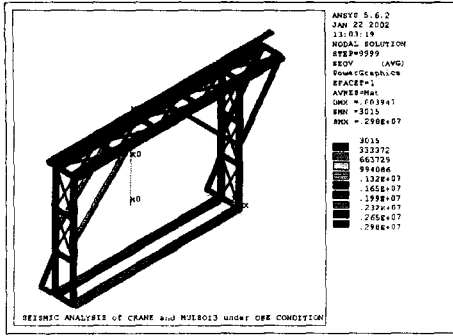


Fig. 12 Stresses contour for case I under OBE condition

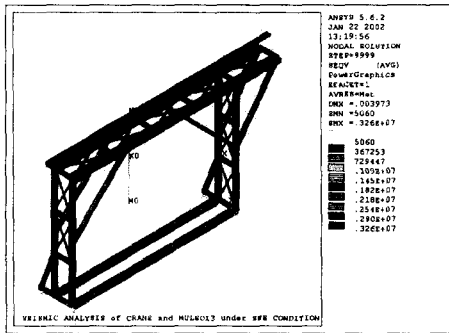


Fig. 13 Stresses contour case I under SSE condition

### 3.3 사용후 핵연료 취급장비의 응력해석 결과

본 논문에서는 내진해석을 수행한 결과로서 case I에서 최대 응력이 발생한다는 것을 확인하였기 때문에 동일조건에서의 호이스트 로프 장력만을 검토하였다. 일반적으로 구조해석에서의 케이블 부재는 인장력만으로 저항하는 선형탄성부재로 가정하고, 케이블의 휨강성은 무시한다[7].

호이스트 로프의 장력은 ANSYS에서 제공하는 스프링-댐핑요소를 사용해서 계산하였다. 해석결과로 호이스트 로프의 장력은 OBE 하중조건하에서 22.6 kN, SSE 하중조건하에서 22.8 kN을 얻었다.

물쇠 3호의 내부 안전성을 평가하기 위해서 각 부재에 대한 응력을 검토하였으며, 지진하중을 고려한 설계하중으로는 호이스트 로프의 장력을 사용하였다. 최대 응력은 물쇠 3호의 인양걸쇠에서 발생하였으며, OBE 하중조건하에서의 최대 전단응력은 59.2 MPa, SSE 하중조건하에서의 최대 전단응력은 59.7 MPa 인 것을 확인하였다.

## 4. 결론

본 논문에서는 브릿지 크레인과 물쇠 3호에 대하여 내진 해석을 수행한 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고유치 해석결과, 트롤리와 혹의 위치에 상관없이 동일한 1차 고유진동수 16.63 Hz 와 굽힘 형상의 모드가 나타나는 것을 확인하였다.

(2) 내진해석 결과, 최대 변위와 응력은 트롤리가 중앙에 위치하고 혹이 하부에 위치할 때에 나타났다. 최대 응력은 OBE와 SSE 하중조건하에서 각각 2.98MPa, 3.26 MPa 인데, 이는 4가지 경우에 대해서 유사한 값을 나타내고 있다. 최대 변위는 OBE와 SSE 하중조건하에서 각각 3.941mm, 3.973mm 인데, 이는 4가지 경우에 대해서 차이가 발생하는 것을 확인하였다.

(3) 물쇠 3호의 응력해석을 수행한 결과, 인양걸쇠에서 최대 전단응력 59.7 MPa 이 발생하였다. 전단응력이 허용 범위 이내에 존재하기 때문에 구조물의 지진에 대한 안전성을 확보할 수 있다는 것을 확인하였다.

## 후기

본 연구는 한전기공주식회사의 후원으로 이루어졌으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고 문헌

- (1) 한국전력기술주식회사, 1995, "고리 1, 3, 4호기 사용후 핵연료 취급 특수공구 물쇠 1호 내진 검증 보고서", 한전기공주식회사.
- (2) 이영신 외, 2000, "고리 2, 3, 4호기 연료취급장치에 대한 내진검증 보고서", 한전기공주식회사 위탁연구보고서.
- (3) 이영신 외, 2001, "고리 3호기 조밀저장대 Temporary Rack Paddle 1식 내진 및 구조해석", 원자력환경기술원 위탁연구보고서.
- (4) A.V.Krimotat and R.M.Mutobe, 1995, "Seismic analysis of complex structures", Computers and Structures Vol.56, No.2/3, pp.389-396.
- (5) 이영신, 김성중, 양계형, 정성환, 2001, "유체와 구조물의 연성을 고려한 rack 구조물의 내진해석", 추계학술대회 논문집 A, 대한기계학회, pp.465-470.
- (6) ASME NOG-1-1989, "Rules for Construction of Overhead Gantry Cranes (Top Running Bridge, Multiple Girder)".
- (7) 김승덕 외, 1997, "대공간 구조물의 해석 및 설계", 제 15회 전산구조공학회 기술강습회, 한국전산구조공학회.
- (8) USNRC Regulatory Guide 1.61, 1973, "Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants".