

## 하나로 활용증가를 위한 수조덮개에 대한 내진해석

### Seismic Analysis of Pool Cover for Increasing HANARO Application

류정수, 조영갑, 이상익, 우종섭, 전병진

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

하나로 활용증가를 위하여 운전중에 노심, 노외 및 반사체 수직 조사공에 시료를 삽입, 인출하고 회전시킬 수 있는 구동 장치의 지지구조물인 수조덮개에 대한 기본 설계를 수행하고 내진해석으로 구조건전성을 입증하였다. 수조덮개는 안전관련 구조물인 원자로 상부에 설치되므로 지진하중을 포함한 모든 하중하에서도 구조건전성이 유지되어야 한다. 이를 위하여 ANSYS를 사용하여 수조덮개에 대한 구조해석 유한요소모델을 작성한 후, 정적해석을 수행하고 동특성을 분석한 뒤에 설계기준 지진하중, SSE와 OBE에 대한 내진해석을 수행하였다. 내진해석 결과들을 ASME NF 코드에 따라 평가한 결과는 최대 응력들이 모두 허용응력 이내에 있었으며, 피로 제한값을 만족하였다. 따라서 수조덮개가 원자로 수조상부에 설치되어도 구조적으로 건전하다고 판단된다.

#### Abstract

The basic design of HANARO pool cover for increasing HANARO applications has been carried out for supporting the driving devices which can load, unload and rotate the irradiation targets in the in-core, out-core and reflector vertical irradiation holes for NTD, fission moly and radioisotope production under HANARO on-power operation. The structural integrity of the pool cover under seismic load was verified by the seismic analysis. For performing the seismic analysis and evaluating the structural integrity of the pool cover, the finite element analysis model using ANSYS was developed and the dynamic characteristics were analyzed. The seismic response spectrum analyses of the pool cover under the design floor response spectrum loads of OBE and SSE were performed. The analysis results show that the stress values for the service levels are within the ASME NF Code limits. It is also confirmed that the fatigue usage factor is less than 1.0. Therefore any damage on structural integrity is not expected when the HANARO Pool Cover is installed at the top of the reactor pool.

## 1. 서론

하나로의 노심에는 조사시험용으로 CT, IR1 및 IR2에 육각형 조사공 3 곳과 OR3~OR6 등 원통형 조사공 4곳이 확보되어 있다. 또한 반사체에는 반도체 도핑, 핵연료시험, 동위원소 생산등을 위한 NTD 및 IP 등의 조사공들이 있다. 이들 조사 시험공들은 핵연료나 재료의 노내 조사시험과 방사선 동위원소 생산에 활용되고 있다.

시험용 시료의 노내 조사시험에는 계측기가 부착되어 있지 않는 무계장 조사시험과 중성자계측기, 열전대 등 각종 계측기가 부착되고 이를 노심 상부의 계측계통과 연결시켜주는 복잡한 계측선 문치와 이를 보호해주기 위한 안내관이 조사시험물의 상부에 연결되어 있는 계장 조사시험이 있다. 이들 계장 및 무계장 조사시험들은 원자료를 정지한 상태에서 캡슐을 장전하고 인출하고 있다.

하나로 활용증가를 위하여 운전중에도 원자로 수조 상부에서 NTD, fission moly 및 방사선 동위원소를 생산하기 위해서는 원자로 수조 상부에서 시료나 용기를 삽입, 인출하고 회전시킬 수 있는 구동 장치가 필요하게 된다. 이러한 방안으로 원자로 수조덮개의 기본 개념을 제안한 바 있다[1]. 이 제안을 시발점으로 하여 운전중에도 원자로 수조 상부에서 조사시험을 수행할 수 있는 방안을 연구하여 왔으며, 최종적으로 맨브릿지와외의 간섭을 고려하여 수조덮개에 대한 기본설계[2,3] 및 상세설계[4]를 수행하였다.

수조덮개는 원자로 냉각계통이나 원자로 정지에 주는 영향이 전혀 없으므로 설계등급상 안전등급 NNS, 내진범주 II급 및 품질등급 T급으로 분류하였다[3]. 보수적인 평가를 수행하기 위하여 내진범주 I급에 적용하는 SSE와 OBE 지진하중에 대한 내진해석을 수행하여 구조건전성을 평가한다. 이를 위하여 수조덮개에 대한 유한요소모델을 작성하고 이에 대한 동특성을 분석한 뒤에 SSE와 OBE 설계기준 지진하중에 대한 지진응답해석을 수행하였다.[5,6] 자중 및 OBE와 SSE 지진하중에 대한 지진응답해석 결과로부터 수조덮개에서 발생하는 응력을 ASME NF 설계기준[7,8]에 따라 평가한 결과, 최대 발생응력들이 모두 허용응력 이내에 있어 구조적으로 건전함을 알 수 있었다.

## 2. 수조덮개의 기본 설계

수조덮개는 하나로의 활용 증가를 위하여 운영 및 이용이 편리하도록 의견을 수렴하여 기본 설계를 수행하였다.[2,3] 수조덮개는 원자로 수조 상부에서 시료를 삽입, 인출 및 회전하게 되므로 핵연료 작업이나 수조내 제어봉 장치 등과의 간섭을 최소화하여야 한다. 또한 조사시험을 수행하는 하나로 이용자들의 의견을 최적화하여 설계에 반영할 수 있었다. 기본적으로 원자로 유지보수를 위하여 장탈착이 가능하여야 하며, 어떠한 경우에도 원자로 수조안으로 비산물의 낙하를 방지할 수 있도록 한다. 운전중 조사시험 구동장치의 수직 접근을 위하여 NTD 조사공 뿐만 아니라 노심 CT/IR 및 노외 OR4/OR5 조사공을 위한 공간이 확보되어야 한다. 수조덮개는 안전관련 구조물인 원자로 상부에 설치되므로 지진하중을 포함한 모든 하중하에서도 구조건전성이 유지되어야 한다.

수조덮개의 구조는 **그림 1**과 같이 원자로 수조 동쪽 반달모양의 수조덮개 A (PCA-A)와 서쪽 반달모양의 수조덮개 B (PCA-B)가 설치되며, 이들 사이를 이동할 수 있는 슬라이딩 판넬(SP) 구조물과 북쪽의 연장 레일이 설치되어 있다. 슬라이딩 판넬은 다시 3부분으로 구

성되며 가운데(SP-A), 남쪽(SP-B)과 북쪽(SP-C)로 구성된다. 그림 1은 운전중 조사시험을 위한 NTD 구동장치를 조사공 수직 위로 접근하였을 때의 형상이며, 그림 2는 조사 시료 이동, 계장캡슐 설치, 핵연료 장전과 인출시 간섭을 최소화하기 위하여 슬라이딩 판넬이 북쪽으로 이동되었을 때의 형상이다.

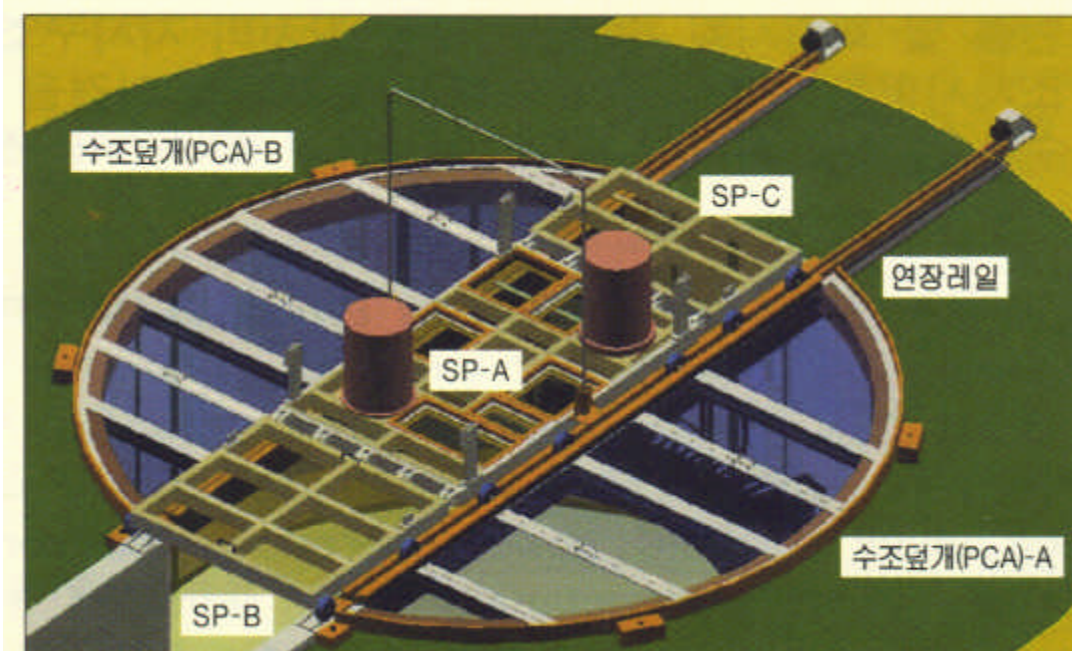


그림 1 원자로 수조 상부에 설치된 운전중 수조덮개의 형상



그림 2 슬라이딩 판넬이 북쪽으로 이동한 수조덮개의 형상

수조덮개는 수조 라이너 상부 턱의 윗면과 맨브릿지 아래 바닥사이 여유공간이 약 10 cm 이므로 수조덮개 A와 B의 위로 현재의 맨브릿지가 지나갈 수 있어야 한다. 따라서 주프레임을 중심으로 보조 프레임을 라이너 턱 위에 걸쳐놓은 후 흔들리는 것을 방지하기 위하여 수조 라이너 밖의 콘크리트 바닥에 각각 3개씩의 앵커볼트로 고정하였다. 또한 가운데 슬라이딩 판넬은 수조덮개 A와 B의 주프레임에 고정식 및 마찰식 스톱퍼와 함께 북쪽에 2개의 앵커볼트로 고정하여 운전중에 NTD 구동장치가 NTD 조사공에 수직으로 접근할 수 있으면서 흔들림이 방지되도록 하였다.

수조덮개 A와 B의 보조 프레임들 사이에는 원자로를 볼 수 있도록 창문들이 설치되는데, 특별한 곳이 아니면 모두 투명 창으로 한다. 여단이 형태로 열고 닫을 수 있도록 하고 열린 상태에서는 고정시킬 수 있어야 한다. 이들 창문들은 지진하중에서도 구조적으로 건전하여야 한다.

수조덮개 A와 B의 각각 주프레임의 아래 플랜지를 이용하여 시료 및 용기 등의 물체를 매달고 남북방향으로 이동할 수 있도록 이동용 후크를 설치한다. 또한 노심에서 핵연료 취급에 필요한 긴 취급 기구 등과 조사시험용 시료 이송 장치를 임시로 걸어 둘 수 있는 고정용 후크를 주프레임의 남쪽에 각각 설치하여야 한다. 주프레임의 상부에는 슬라이딩 판넬 바퀴의 레일을 설치하며 창문의 평면보다 약간 높게 하여 가운데의 슬라이딩 판넬을 열었을 때 양쪽 수조덮개의 옆 창위로 떨어진 작은 물건이 굴러서 수조로 들어가는 것을 예방한다. 또한 슬라이딩 판넬과 주프레임의 수평방향 틈 사이도 수평방지판을 부착하여 이물질의 낙하 가능성을 원천적으로 방지하였다.

### 3. 수조덮개에 대한 설계 규격 요건

#### 3.1 설계등급 분류

수조덮개는 원자로 냉각계통이나 원자로 정지에 주는 영향이 전혀 없으므로 설계등급상 안전등급 NNS, 내진범주 II급 및 품질등급 T급으로 분류하였다. 보수적인 평가를 수행하기 위하여 내진범주 I급에 적용하는 SSE와 OBE 지진하중에 대한 내진해석을 수행하여 구조건전성을 평가한다.

#### 3.2 설계 하중

##### 1) 정하중(Dead Load)

수조덮개를 구성하는 모든 구성품의 중량을 고려한 하중을 총칭한다. 정적해석에 사용된 하중은 구조물의 자중을 비롯하여, 후크 작용하중, 각종 윈도우에 놓여지는 장비들의 자중, 활하중 등으로 구별되며 내진해석에서도 고려될 수 있도록 집중질량으로 치환하여 적용하였다. 여기서 그레이팅(32mm)의 단위면적당 질량은  $50\text{kg/m}^2$  이며 폴리카보네이트(9.2mm)의 단위면적당 질량은  $11.4\text{kg/m}^2$  이다. 특히 NTD 1과 NTD 2에 설치될 구동장치의 중량은 각각 100 kg이 되며, CT/IR 구동장치가 100 kg, OR4 및 OR5에 설치될 구동장치의 중량도 각각 100 kg이다. 또한 수조덮개 A와 B의 각각 주프레임에는 2개의 후크가 달린 이동용 Hook 장치에 걸리는 하중으로 각각 100 kg (50kg씩 2개)이 되며, 고정용 Lug가 양쪽 주프레임 남쪽에 2개씩 있으며 각각 100 kg 하중이 걸리도록 설계되어 있다. 그리고 고정용 후크 1개에 걸리는 하중은 100 kg이 된다. 따라서 적용된 집중하중은 총 1200 kg이 된다.

### 2) 활하중(Live Load)

수조덮개는 플랫폼의 설계와 유사하므로 활하중으로 500 kg/m<sup>2</sup> 이 작용하는 것으로 가정한다. 수조덮개를 접어 북쪽으로 이동된 상태에서는 활하중이 슬라이딩 판넬 SP-B와 SP-C에는 작용하지 않으므로 적용하지 않았다.

### 3) 지진하중(Seismic Load)

수조덮개는 원자로 수조 상부에 고정되므로 원자로 수조 상부(EL.85.55)에서의 층응답스펙트럼을 설계 지진하중으로 사용한다. 수조덮개의 경계조건이 앵커 볼트로 콘크리트 위에 고정되므로 이들 층응답스펙트럼중에서 감쇠값이 OBE는 4%, SSE는 7%에 해당되는 수평 및 수직 층응답스펙트럼 곡선을 사용하였으며 그림 3와 그림 4에 나타내었다. 보수적인 평가를 수행하기 위하여 자중(DWT)으로는 사하중, 집중하중 및 활하중(500kg/m<sup>2</sup>)을 합하여 사용하였다.[6]

## 3.3 하중 조합

- 1) 수조덮개에 대한 강도계산을 포함한 응력해석을 ASME NF 기준에 따라 수행한다.
- 2) 응력해석시 고려해야할 하중조건은 다음과 같다.

	Load Combination	Service Limit
Pool Cover Assembly	Dead/Live	Level A
	Dead + OBE	Level B
	Dead + SSE	Level D

## 3.4 규격 및 평가기준

수조덮개에 대하여 ASME, Section III, NF 코드[7,8]를 적용하여 구조건전성을 평가한다. 내진해석은 수조덮개가 내진범주 II급으로 분류되어 있으나, 보수적인 평가를 수행하기 위해서 내진범주 I급에 적용하는 지진하중 SSE와 OBE에 대하여 수행되었다. 이를 위하여 수조덮개에 대한 구조해석 모델을 보(beam) 요소로 작성하고 이에 대한 동특성을 분석한 뒤에 SSE와 OBE 설계 지진하중에 대한 내진해석을 수행하였다.

수조덮개와 관련된 보 구조물에 대해서는 ASME Section III, NF-3322 기준에 따라 구조물의 응력을 계산하고 허용응력과 비교하여 구조건전성을 평가한다. 수조덮개는 구조적으로 주변구조물과의 간섭사항이 없으므로 정적 및 동적 변위에 대한 제한 조건은 요구되지 않는다. 허용응력에 관련된 식은 다음과 같다.

- (a) 인장응력 (핀 및 나사조건 제외)

$$F_t = 0.60 S_y$$

- (b) 전단응력(핀조건 제외)

$$F_v = 0.4 S_y$$

- (c) 압축응력(austenitic stainless steel)

$$F_a = S_y (0.47 - kl/r/444), \quad kl/r < 120$$

- (d) 굽힘응력 (compact sections)

$$F_{b,major} = F_{b,minor} = 0.66 S_y,$$

- (e) 응력조합

$f_a/F_a < 0.15$  일 때 다음식을 사용한다.

$$(f_a/F_a) + (f_{bx}/F_{bx}) + (f_{by}/F_{by}) < 1.0$$

운전조건 B와 D에 대한 허용응력으로는 운전조건 A의 허용응력에 해당되는 운전조건의 응력지수를 곱한 값을 사용한다. 운전조건 B, C와 D에 대한 응력지수들은 다음과 같다.

	Level A	Level B	Level C	Level D
$K_s$	1.0	1.33	1.5	Appendix F
$K_m$	1.0	1.33	1.5	Appendix F

수조덮개를 원자로 수조의 상부에 고정시키기 위한 지지 볼트의 구조건전성을 평가하기 위하여 ASME Section III, NF-3324.6 기준을 따랐으며, 지지 볼트의 응력을 계산하고 허용응력과 비교하였다. 허용응력에 관련된 식은 다음과 같다.

(a) 인장응력(Austenitic Stainless Steel)

$$F_{tb} = S_u/3.33$$

(b) 전단응력(Austenitic Stainless Steel)

$$F_{vb} = 0.62 S_u/5$$

(c) 인장응력과 전단응력의 조합

$$(f_t^2/F_{tb}^2) + (f_v^2/F_{vb}^2) < 1.0$$

운전조건 B와 D에 대한 허용응력으로는 운전조건 A의 허용응력에 해당되는 운전조건의 응력지수를 곱한 값을 사용한다. 운전조건 B, C와 D에 대한 응력지수들은 다음과 같다.

	Level A	Level B	Level C	Level D
$K_s$	1.0	1.15	1.25	Appendix F
$K_m$	1.0	1.15	1.25	Appendix F

### 3.5 재료

새로이 설치되는 수조덮개의 재료는 대부분 S.S. 304 재료를 사용하고 있다. 그러나 고정식 및 마찰식 스톱퍼(stopper)는 고강도 스테인레스강, ASTM A564 Type 630이며, 앵커볼트의 재료는 A193이다. 이들의 기계적 물성치와 기준 설계온도는 표 1과 같다.

표 1. 재료의 기계적 물성치와 기준 설계값

Material	S.S. 304	A564 Type 630	A193(볼트)
Reference Temperature(°C)	20	20	20
Modulus of Elasticity(GPa)	187.8	187.8	187.8
Mass Density(kg/m <sup>3</sup> )	8030	8030	8030
Poisson's Ratio	0.28	0.3	0.3
Ultimate Strength, $S_u$ (MPa)	517	965	689
Yield Strength, $S_y$ (MPa)	207	792	345



## 4. 내진해석 모델링 및 지진응답해석

### 4.1 내진해석 모델링

하나로 수조덮개에 대한 유한요소 모델을 작성하기 위하여 상용 구조해석 프로그램인 ANSYS[9]를 사용하여 모델링을 수행하였다. 수조덮개를 구성하는 모든 부재를 보요소(beam element)와 집중질량으로 유한요소 모델링하였다. 내진해석할 모델은 슬라이딩 판넬이 접혀 있을 때와 접혀있지 않을 때의 2 가지 경우로서 펴진 상태, Case I 모델은 **그림 5**에 나타나 있고 접힌 상태, Case II 모델은 **그림 6**에 나타나 있다. 여기서 전체 좌표계는 수평 X 방향(동서)과 Y 방향(남북)과 Z 방향(수직)을 보여 준다.

수조덮개 모델의 경우 34개의 서로 다른 보(beam) 요소 단면을 정의하여 사용하였다. ANSYS에서 제공하는 보 요소는 여러 가지가 있지만 수조덮개 모델과 같이 생성될 보 요소의 절점 위치와 보 요소 단면의 무게중심 위치가 일치하지 않는 경우 real property로 고려할 수 있는 BEAM44 요소를 사용하였다.

해석에 적용된 기본적인 경계조건으로는 수조덮개가 원자로 수조상부의 콘크리트에 앵커로 고정되는 부위의 구속조건과 수조덮개와 슬라이딩 판넬 사이에 작용하는 구속조건으로 구분할 수 있다. 먼저, 앵커볼트가 위치한 1) 수조덮개 A와 B의 호부재의 6 절점, 2) 펴진 경우의 SP-C 2절점, 및 3) 연장 레일의 12절점의 자유도는 모두 구속시킨다. 또한 수조상부의 라이너에 올려져 있는 수조덮개 A와 B의 호부재는 수직 Z 방향으로 구속시킨다. 그러나 호부재의 수직 Z방향 구속은 정적해석일 경우에는 타당하나, 내진해석시에는 상하방향의 운동을 방해하는 요소로 작용되므로 보수적인 평가를 수행하기 위하여 고유진동수 해석과 이에 따른 내진해석시에는 **그림 5와 그림 6과 같이** 수직 Z방향을 구속하지 않았다.

그리고 수조덮개와 슬라이딩 판넬 사이에 작용하는 구속조건은 해당 자유도의 관계식을 Coupling 명령으로 표현할 수 있다. 하나로 수조덮개의 슬라이딩 판넬 위치에 따른 Couple 경계조건을 **표 2와 표 3**에 나타내었다.

보 자체의 질량은 주어진 단면형상과 물성치로부터 자동으로 계산되나, 부재 위에 얹혀지는 상판이나 그레이팅(grating) 및 집중하중은 보(beam)를 구성하는 절점에 집중질량으로 분포시켜 처리하였다. 모델에 사용된 물성치는 탄성계수가 187.8 GPa, 포아송 비는 0.28이며, 밀도는 8.03 kg/m<sup>3</sup> 이다. 슬라이딩 판넬의 바퀴와 같이 강성이 높은 몇몇 부위에는 탄성계수가 높은 물성치를 사용하였다.

**표 2.** 펴진 상태(Case I)의 Couple 조건

[○ : Fixed, - : Free]

Couple 위 치	Ux	Uy	Uz	ROTx	ROTy	ROTz
바퀴	○(서)	-	○(동/서)	-	-	-
고정식 스톱퍼	○	○	-	○	○	-
마찰식 스톱퍼	○	-	○	○	○	-
SP-A / SP-B / SP-C 사이 힌지	○	○	○	-	○	○
SP-B / SP-C Locking Pin	○	○	○	-	-	-

표 3. 접힌 상태(Case II)의 Couple 조건

[○ : Fixed, - : Free]

Couple 위 치	Ux	Uy	Uz	ROTx	ROTy	ROTz
바 퀴	○(서)	-	○(동/서)	-	-	-
마찰식 스톱퍼	○	-	○	-	-	-
SP-A / SP-B / SP-C 사이 힌지	○	○	○	-	○	○
Locking Bolt	○	○	○	○	○	○

#### 4.2 고유진동수 해석

하나로 수조덮개의 동특성을 파악하기 위하여 ANSYS 5.7 구조해석 프로그램을 이용하여 고유진동수 해석을 수행하였다. 하나로 수조덮개가 펴진 상태(Case I)의 초기 3개 모우드 형상이 그림 7에 나타나 있고, 슬라이딩 판넬이 접힌 상태(Case II)의 초기 3개 모우드 형상을 그림 8에 나타내었다. 펴진 상태(Case I)의 1차 고유진동수가 17.4 Hz에서 발생되었고, 접힌 상태(Case II)의 1차 고유진동수가 각각 17.6 Hz에서 발생되었다. 이는 반달 구조인 수조덮개 A 및 B의 동적 거동이 지배적임을 알 수 있으며, 슬라이딩 판넬을 접어서 북쪽으로 이동한 상태(Case II)의 경우에 3번째 고유진동수, 21.76 Hz에서 SP-B의 지배적인 모우드 형상을 보여주고 있다.

#### 4.3 내진 해석

하나로 수조덮개에 대한 ANSYS 구조해석 모델을 작성하고 이에 대한 동특성을 분석한 뒤에 OBE와 SSE 지진하중에 대한 내진해석을 수행하였다. 수조덮개에 대한 모델링과 모델에 대한 보다 상세한 내진해석 결과는 참고문헌 [6]에 기술되어 있다. 슬라이딩 판넬이 수조 상부에 덮혀서 펴진 상태(Case I)와 슬라이딩 판넬이 접혀 북쪽으로 이동한 상태(Case II)로 크게 2가지의 유한요소모델로 나누어 구조해석을 수행하였다.

수조덮개의 동특성을 분석한 뒤에 SSE와 OBE 층응답스펙트럼에 대하여 ANSYS 구조해석 프로그램을 사용하여 내진해석을 수행하였다. 고차모드의 영향을 충분히 고려하기 위하여 모드 100개를 사용하였으며, 모드와 방향간에는 SRSS법으로 지진응답을 구하였다. 수조 상부에 설치되는 수조덮개에서 발생하는 최대 응력을 자중, OBE 및 SSE 지진하중에 대하여 각각의 보요소에 대한 힘과 모멘트로부터 각 단면에 대한 응력을 계산하였다. 이들 응력 결과를 사용하여 각 하중조건에 대한 조합응력비를 산정하고 1 보다 작은 지 비교하였다. 수조덮개는 구조적으로 주변 구조물과의 간섭이 없으므로 변위 제한조건은 없다.

펴진 상태(Case I)와 접힌 상태(Case II)의 지진응답해석 결과들은 ASME NF[7]에 따라 수조덮개의 주요 부재에 대하여 응력과 응력비를 구하였다. 각 운전조건에 대한 응력과 응력비의 최대값을 허용응력과 비교하였으며, 참고문헌 [6]의 표 7에서 표 21까지에 자세히 제시되어 있다. 수조덮개 주요 부재중에서 최대 응력은 주프레임의 남쪽 단부에서 발생하였으며, Case I과 Case II에 대한 최대 응력비가 운전조건 A에서 각각 0.701과 0.392, 운전조건 B에서 각각 0.638과 0.333, 운전조건 D에서 각각 0.423과 0.212를 보여주고 있다. 여기서 운전조건 A에서의 조합응력비가 가장 큰 것은 활하중을 포함한 자중의 영향이 크기 때문이며, 운



전조건 B와 D에서는 허용응력 값이 커짐에 따라 응력비가 상대적으로 작아지는 것을 알 수 있었다. 따라서, 내진해석 결과로부터 최대 응력과 허용응력 결과에 따르면 수조덮개의 모든 부재에서 조합응력비가 모두 1.0 보다 작아 구조적으로 건전함을 알 수 있었다.

주요 부재뿐만 아니라 앵커볼트와 콘크리트, 슬라이딩 판넬 힌지, 수조덮개 창문의 볼트와 힌지, 고정식 및 마찰식 스톱퍼, 고정 패드핀, 고정식 및 이동식 후크, 연장레일 스톱퍼, 슬라이딩 판넬 고정 볼트, 및 슬라이딩 판넬 SP-C 앵커 볼트, 등의 구조건전성 평가[6]를 수행하였으며, 그 결과들은 ASME의 요건을 만족하므로 구조적으로 건전한 것으로 판단된다. 따라서 위의 결과로부터 수조덮개가 하나로 원자로 수조상부에 설치되어도 구조적으로 건전하다고 판단된다.

## 5. 피로손상 평가

하나로 설계수명 동안 OBE 지진하중이 5회 발생하는 것을 고려하였다. OBE 지진하중에 대하여 피로 평가를 위한 반복 응력횟수는 OBE에서 200회로 하였다. 이에 대한 피로손상평가를 수행하기 위하여 ASME, Sec. III, Appendix Fig. I-9.2.1 에서 정의한 피로설계곡선을 사용하였다. 운전조건 B에 대한 수조덮개 주요부재에서 발생된 최대 응력은 슬라이딩 판넬이 펴진 상태(Case I)의 경우, PCA-A/B 주프레임 남단부에서 114.6 MPa이며 응력집중계수 4를 곱하여 얻은 최대교변응력,  $S_{max,obe}$ 는 458.4 MPa (66.5 ksi)가 된다.

위의 최대교변응력, 458.4 MPa (66.5 ksi)에 해당되는 허용횟수(N)는 9000이고, OBE 지진하중에 대하여 피로 평가를 위한 반복 응력횟수는 200회 이므로, 피로누적계수는 0.022 (=200/9000)로 계산되는데, 이 값은 1.0 보다 매우 작아 피로로 인한 구조적 손상은 없을 것으로 판단된다.

## 6. 결론

하나로 수조덮개 구조물을 ANSYS 5.7 프로그램을 이용한 3차원 보(beam) 요소로 모델링하여 정적해석, 고유진동수해석 및 지진응답해석을 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 고유진동수해석 결과를 보면 수조덮개가 펴진 상태(Case I)의 1차 고유진동수가 17.4 Hz에서 발생되었고, 접힌 상태(Case II)의 1차 고유진동수가 각각 17.6 Hz에서 발생되었다. 이는 반달 구조인 수조덮개 A 및 B의 동적 거동이 지배적임을 알 수 있으며, 슬라이딩 판넬을 접어서 북쪽으로 이동한 상태(Case II)의 경우에 3번째 고유진동수인 21.76 Hz에서 SP-B의 지배적인 모우드 형상을 보여주고 있다.
- 2) 수조덮개의 운전조건 A, B와 D에 대한 구조건전성을 ASME NF에 따라 평가하였으며, 평가결과 모든 부재에서 발생한 최대 응력들이 허용응력보다 작으므로 구조적으로 건전함을 알 수 있었다.
- 3) 주요 부재중에서 최대 응력은 주프레임의 남쪽 단부에서 발생하였으며, Case I과 Case II의 경우에 대한 최대 응력비가 운전조건 A에서 각각 0.701과 0.392, 운전조건 B에서 각각 0.638과 0.333, 운전조건 D에서 각각 0.423과 0.212를 보여주고 있다. 여기서 운전조건 A에서의 조합응력비가 가장 큰 것은 활하중을 포함한 자중의 영향이 크기 때문이며, 운전조건 B와 D에서는 허용응력 값이 커짐에 따라 응력비가 상대적으로 작아지는 것을 알 수 있었다.

- 4) 최대응력이 발생된 하나로 수조덮개에 대하여 계산한 피로누적계수가 0.022로 산정되었으며 1.0보다 작아 피로로 인한 구조적 손상은 없는 것으로 나타났다.
- 5) 주요 부재뿐만아니라 앵커볼트와 콘크리트, 슬라이딩 판넬 힌지, 수조덮개 창문의 볼트와 힌지, 고정식 및 마찰식 스톱퍼, 고정 패드핀, 고정식 및 이동식 후크, 연장레일 스톱퍼, 슬라이딩 판넬 고정 볼트, 및 슬라이딩 판넬 SP-C 앵커 볼트의 구조건전성 평가들이 ASME의 요건을 만족하므로 구조적으로 건전한 것으로 판단된다.
- 6) 따라서 운전중에도 원자로 수조 상부에서 노심, 노외 및 반사체 수직 조사공을 이용하여 조사시험을 수행할 수 있는 구동 장치의 구조적 지지대 역할을 하면서, 운전중 원자로 수조안으로 비산물 낙하를 방지할 수 있는 수조덮개가 하나로 원자로 수조상부에 설치되어도 구조적으로 건전하다고 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 정부의 출연금에 의한 한국원자력연구소의 기관고유사업으로 수행되었다.

#### 5. 참고 문헌

- [1] 전병진, "수조 뚜껑 설치 제안", 내부통신문 HAN-RO-CR-97-049, 하나로센터, 1997.12.16.
- [2] 류정수, 김상원, 이상익, 우종섭, 전병진, "하나로 활용 증가를 위한 수조덮개의 설계", 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집, 2001.
- [3] 류정수, "하나로 수조덮개에 대한 제작 기술시방서", HAN-RS-DD-SP-402-01-001, Rev.0, 하나로이용연구단, 2001.3.14.
- [4] 도면 HAN-RS-DW-402-01-001~037, "하나로 수조덮개", 한국원자력연구소/일진정공(주), 2001.8.6.
- [5] 류정수, "하나로 수조덮개의 내진해석 기술시방서", HAN-RS-DD-SP-402-01-002, Rev.0, 하나로이용연구단, 2001.2.21.
- [6] 류정수, "하나로 수조덮개에 대한 구조건전성 평가", 기술보고서 KAERI/TR-1954/2001, 한국원자력연구소, 2001.
- [7] ASME Code Section III, Division 1, Subsection NF, Component Supports, 1989.
- [8] ASME Code Section III, Div. 1, Appendix F, Rules for Evaluation of Service Loadings with Level D Service Limits, 1989.
- [9] ANSYS 5.7, User's Manual, 2000, ANSYS Inc.

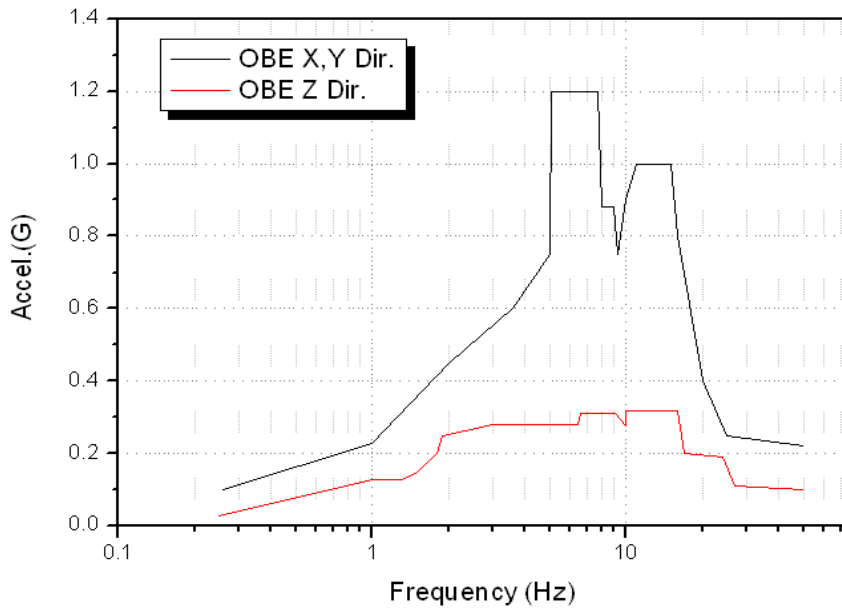


그림 3 수조덮개 지진해석의 입력응답스펙트럼 - OBE, 4% 감쇠

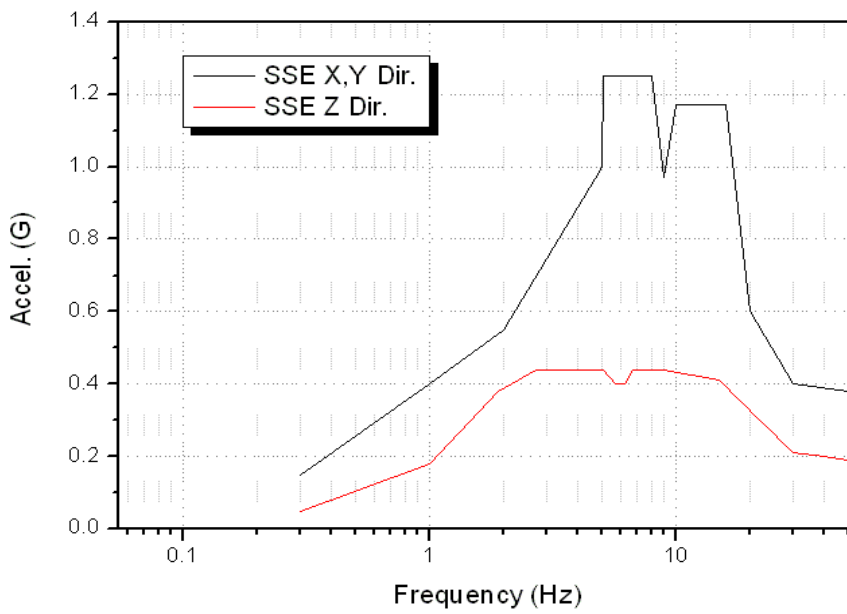


그림 4 수조덮개 지진해석의 입력응답스펙트럼 - SSE, 7% 감쇠

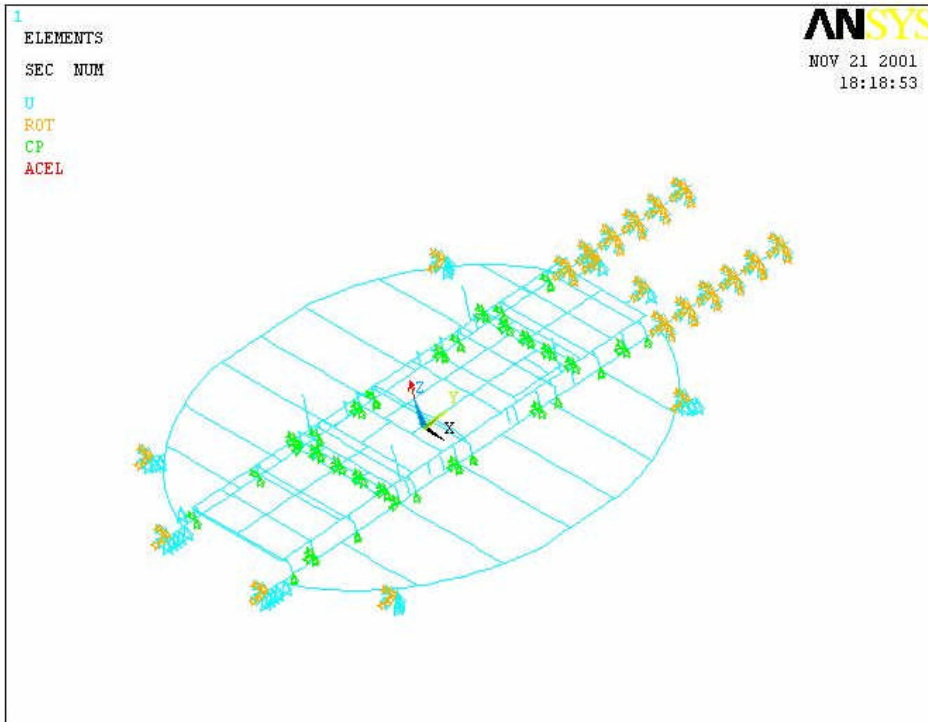


그림 5 퍼진 상태(Case I)의 고유진동수해석 및 지진해석을 위한 경계조건

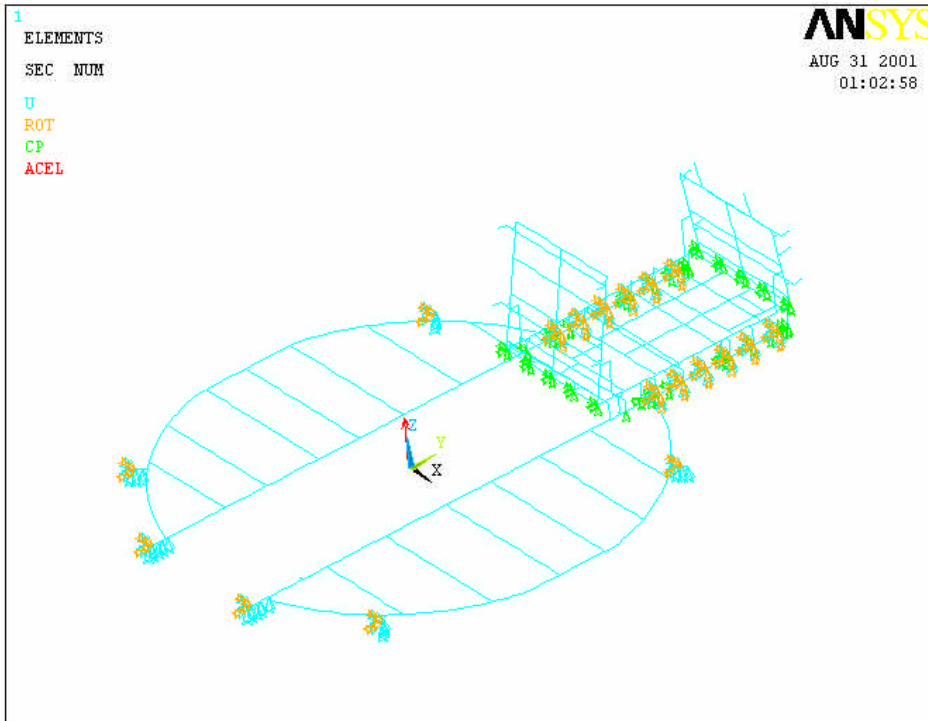
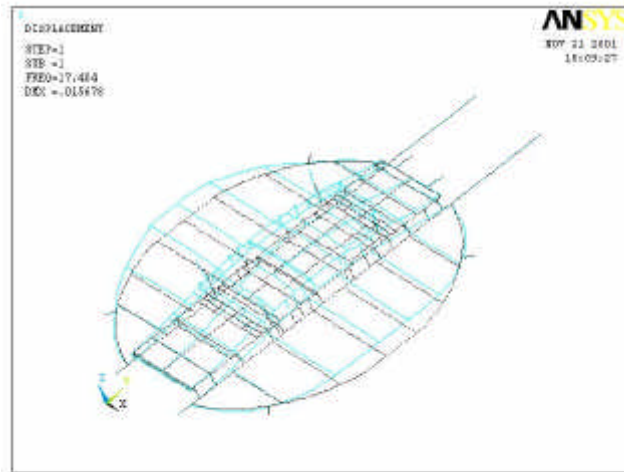
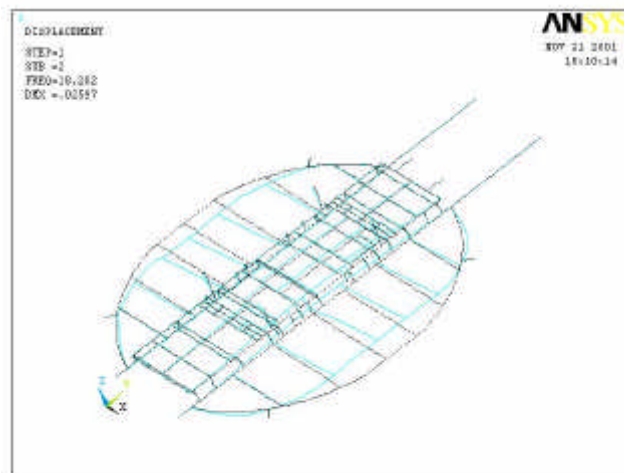


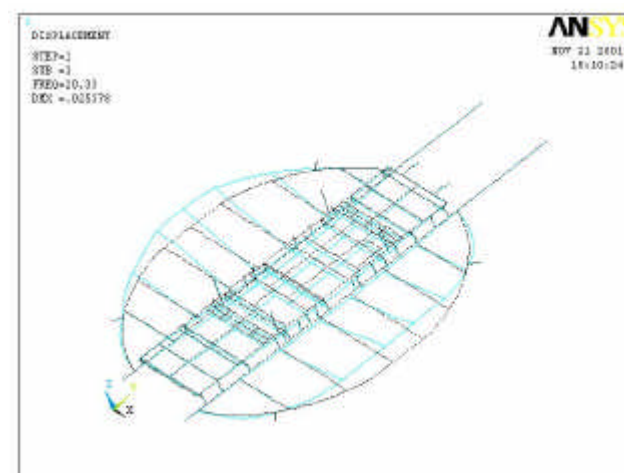
그림 6 접힌 상태(Case II)의 고유진동수해석 및 지진해석을 위한 경계조건



(a) 펴진 상태(Case I) 수조덮개의 1차 모드

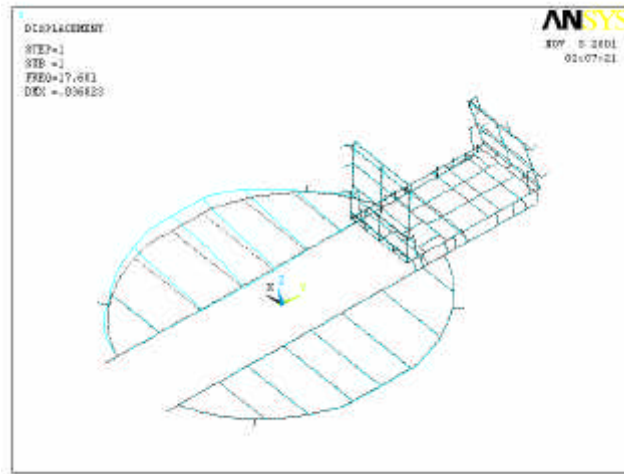


(b) 펴진 상태(Case I) 수조덮개의 2차 모드

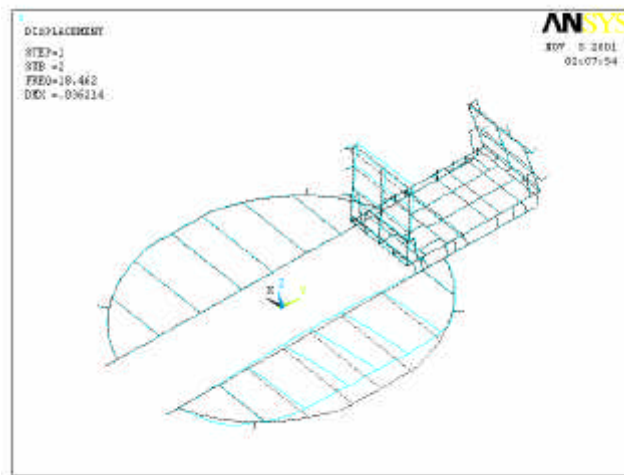


(c) 펴진 상태(Case I) 수조덮개의 3차 모드

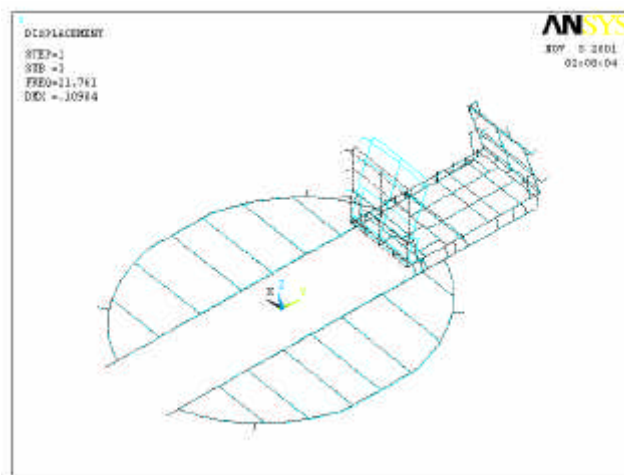
그림 7 펴진 상태(Case I) 수조덮개의 모우드 형상



(a) 접힌 상태(Case II) 수조덮개의 1차 모드



(b) 접힌 상태(Case II) 수조덮개의 2차 모드



(c) 접힌 상태(Case II) 수조덮개의 3차 모드

그림 8 접힌 상태(Case II) 수조덮개의 모우드 형상