

CANDU 사용후연료 조밀건식저장시설의 구조설계개념설정 및 정적해석

Structural Design Concept and Static Analysis of CANDU Spent Fuel Compact Dry Storage System

최규섭, 양계형, 백창렬, 정진세, 이흥영
한국 수력원자력(주) 원자력환경기술원
대전광역시 유성우체국 사서함 149호

요약

본 논문에서는 CANDU 사용후연료 조밀건식저장시설인 MACSTOR/KN-400 모듈의 구조부재에 대한 최적의 설계개념을 설정하고, 각 구조부재의 설계단면부재력산정을 위한 기초작업으로 사하중, 활하중, 풍하중에 대한 정적해석을 수행하였다. 설계개념설정을 위한 항목으로 저장시설이 국내 월성부지에 위치한다는 가정하에서 단위설계하중크기와 설계하중조합, 구조안전기준 등을 도출하였다. 정적해석결과로부터 응력집중은 상부슬래브중양부의 실린더주변과 벽체주변에서 발생하고, 사하중으로 인한 최대응력은 활하중에 의한 최대응력보다 대략 2배정도크기로 발생함을 확인하였다. 풍하중의 영향은 그다지 크지 않고, 사하중과 활하중에 의해서 발생하는 응력과 반대방향으로 발생하여 응력상쇄효과가 있음 확인하였다. 본 해석결과는 추후 다른 하중에 의한 해석결과와 더불어 구조부재의 배근설계에 활용할 예정이다.

Abstract

In this study, an structural design concept on CANDU spent fuel compact dry storage system MACSTOR/KN-400 module has been established with a view to optimally design the structural members of the system. Design loads, loading combination and structural safety criteria of the module were reviewed assuming Wolsung Site. The static analysis of the module showed that compressive stress concentration due to dead load and live load occurred around the center of roof slab. Maximum stress resulted from dead load is about twice as much as the stress from live load, and structural behavior of module caused by wind load was not significant. The static analysis results will have influence on the reinforcement bar design of structural members with other structural analyses.

1. 서론

한국 원자력위원회 제249차 의결사항에 따라 중간저장시설운영시점인 2016년 이전까지는 사용후연료를 발전소부지내에 자체보관하여야 하기 때문에 습식저장조의 시설용량확장방안과 더불어

건식저장방식에 대한 다각적인 연구가 진행중이다. 특히 CANDU형 원자로는 PWR 원자로에 비하여 연간 사용후연료의 발생량이 많고, 습식저장조의 저장능력은 대략 10년 발생분의 용량으로 한계가 예상되기 때문에 별도의 저장시설은 필연적이며, 이와 더불어 조밀건식저장방식에 대한 관심이 고조되고 있다. 현재 월성 원자력본부에서 사용후연료의 건식저장을 위해서 적용하고 있는 방식은 콘크리트 사일로방식으로서, 원통형 콘크리트 구조체내에 실린더를 정착하고, 실린더내부에 사용후연료가 장입된 바스켓을 적재하는 방식이며, 사용후연료의 저장능력은 단위면적(1m²)당 30다발 정도이다. 이보다 효율적인 저장을 위해서 CANADA에서는 MACSTOR모듈을 개발하여 1995년부터 Gentilly2 발전소에서 적용하고 있다. MACSTOR모듈은 폭 8.1m, 길이 21.6m, 높이 7.5m인 콘크리트 구조체로서, 내부에는 사용후연료 저장실린더를 20개를 저장할 수 있는 방식으로 각각의 실린더에는 사용후연료 60다발을 적재한 바스켓을 10개 저장할 수 있는 용량을 가진다. MACSTOR모듈의 저장능력은 단위면적(1m²)당 68다발 정도이며, 콘크리트 사일로방식보다는 부지효율성이 대략 2.3배 증가한다. 현재 한수원(주) 환경기술원에서는 이보다 더 저장효율이 높은 MACSTOR/KN-400모듈을 개발중에 있다. MACSTOR/KN-400모듈은 높이 7.5m, 폭 12.7m, 길이 21.7m인 철근 콘크리트 구조물로서, 내부에는 사용후연료 저장실린더를 40개를 저장할 수 있는 방식으로 저장능력은 단위면적(1m²)당 88다발 정도이며, 콘크리트 사일로방식보다는 부지효율성이 대략 3.0배 증가한다.

본 논문에서는 CANDU 사용후연료 조밀건식저장시설인 MACSTOR/KN-400 모듈의 구조부재에 대한 최적의 설계개념을 설정하고, 정적해석을 수행하였다. 이를 위해서 우선적으로 방사선차폐해석과 열평가해석 및 개략구조해석을 통하여 형상, 크기 및 구조형식 등을 선정하였고, 미국, 캐나다 등 선진외국에서 적용하는 설계기준들을 토대로 설계개념을 설정하였다. 최종적으로 저장시설부지가 국내 월성부지에 위치한다는 가정하에서 시설운영계획, 구조물의 특성, 부지의 환경적인 영향 등을 종합적으로 고려하여 단위설계하중크기와 설계하중조합, 구조안전기준 등을 도출하였으며, 각 구조부재의 설계단면부재력산정을 위한 기초작업으로 사하중, 활하중, 풍하중에 대한 정적해석을 수행하였다. 단위설계하중은 정상운전중, 비정상운전중, 자연재해 및 인위적인 사고조건시 발생가능한 하중으로서 사하중, 활하중, 풍하중, 지진하중, 열하중, 플라스크 낙하하중, 이송차량 충돌하중을 선정하였고, 설계하중조합은 하중계수를 반영한 10개조건을 선정하였으며, 구조안전기준으로는 응력, 변위, 균열, 침하, 전도, 활동 등에 대한 기준을 설정하였다. 정적해석결과로부터 응력집중은 상부슬래브중양부의 실린더주변과 벽체주변에서 발생하고, 사하중으로 인한 최대응력은 활하중에 의한 최대응력보다 대략 2배정도크기로 발생함을 확인하였다. 또한, 풍하중의 영향은 그다지 크지 않고, 사하중과 활하중에 의해서 발생하는 응력과 반대방향으로 발생하여 응력상쇄효과가 있음을 확인하였다. 본 해석결과는 추후 다른 하중에 의한 해석결과와 더불어 구조부재의 배근설계에 활용할 예정이다.

2. MACSTOR/KN-400 모듈 개요

2.1 모듈제원 및 용량

MACSTOR/KN-400모듈은 높이 7.5m, 폭 12.7m, 길이 21.7m의 철근 콘크리트 구조물로서, 콘크리트 두께는 측벽 0.98m, 상부 슬래브 1.08m, 바닥 슬래브 0.46m이다. 상부슬래브에는 4열x10줄의 실린더가 상부에 고정된 형태로 설치되며, 각 실린더에는 60다발의 사용후연료가 적재된 바스

켓 10개가 수직채하방식으로 적재된다. 따라서, 모듈당 사용후연료 저장용량은 총 24,000다발의 용량을 가진다.

2.2 모듈의 구성

MACSTOR/KN-400모듈은 크게 구조부재와 비구조부재로 구성한다. 구조부재는 모듈내부 또는 외부에서 발생하는 하중을 지지하는 부재로서, 다른 구조부재로 하중을 전달 흡수시키는 기능을 가지며, 크게 상부슬래브, 벽체, 바닥슬래브 및 기초로 구성한다. 비구조부재는 자체의 중량은 지지하되, 외력은 지지하지 못하는 일종의 부속요소를 말하며, 실린더, 차폐플러그 및 기타 부속설비들로 구성한다. 기타 부속설비로는 모듈운영에 필요한 각종 배수파이프, Safety Guard용 파이프, 각종 방사선감시설비 등으로 구성한다.

2.3 상부슬래브의 구성

상부슬래브는 폭 12660mm, 길이 21670mm, 두께 1080mm인 연속체구조물로 사용후연료 저장바스켓을 수직방향으로 적재할 수 있는 실린더 부착공간을 제공한다. 실린더부착공간은 직경 1473mm인 원통형상이며, 사용후연료 적재작업이 종료된 이후에는 이공간은 차폐플러그로 밀봉시켜 실린더적납을 유지하도록 한다. 차폐플러그는 대략 9.5mm두께의 탄소강 Steel판 내부를 콘크리트로 구성된 일체형 구조로서, 하중전달기능을 갖지 않는 비구조체로 분류한다. 상부슬래브의 상부면은 사용후연료 바스켓 적재작업공간을 제공하며, 운영중 작업설비로는 플라스크, Loading Plug Assembly, Loading Platform, Guide Mechanism 등을 들 수 있다. 상부슬래브 표면에 유입된 강수는 자연배수되도록 중앙면에서 양면배수방식으로 1%의 경사를 가진다. 모듈상부슬래브의 단면도는 그림 1과 같다.

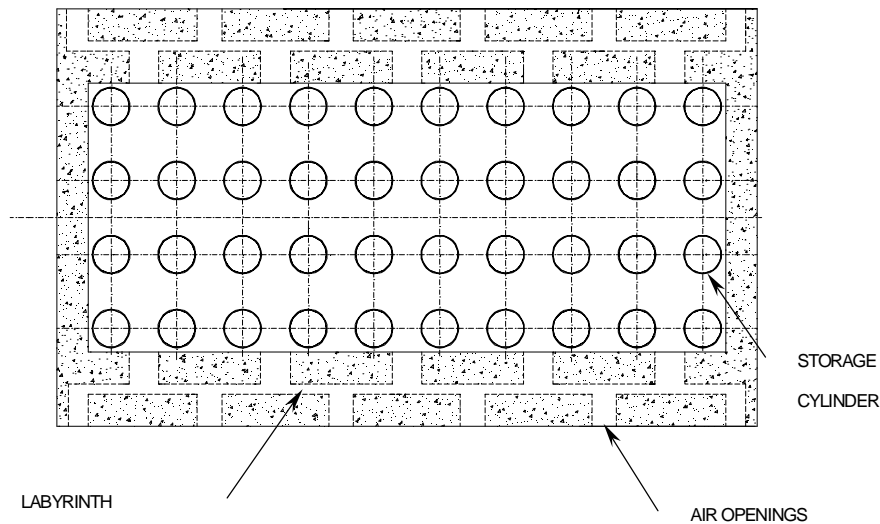


그림 1 Macstor/KN-400모듈 상부슬래브의 단면도

2.4 모듈 측벽의 구성

모듈측벽은 장변벽체와 단변벽체로 구성된다. 장변벽체내부에는 하부에 냉각공기의 유입이 가능하도록 공기입구가 한면당 5개씩 총 10개가 설치되며, 상부에는 공기출구가 한면당 6개씩 총 12개가 설치된다. 단변벽체는 폭 12.7m, 높이 7.5m, 두께 0.98m이며, 장변벽체는 폭 21.7m, 높이 7.5m,

두께 2.27m이다. 장변벽체하부의 공기입구는 바닥슬래브하부면으로부터 1.3m에 공기입구저면이 위치하고, 공기입구의 크기는 가로 0.91m, 세로 0.84m의 크기로서 입구간 간격은 3.2m이다. 장변벽체상부의 공기출구는 바닥슬래브하부면으로부터 5.2mm에 공기출구저면이 위치하며, 공기출구의 크기는 가로 0.76m, 세로 0.84m의 크기와 가로 0.61m, 세로 0.84m의 크기를 가진 두 형태가 존재한다. 가로 0.61m, 세로 0.84m의 크기의 공기출구는 단변벽체의 양방향에 인접한 두개의 공기출구가 해당되며, 출구간 간격은 3.38m이다. 공기출구의 상부면은 상부슬라브 하부면의 높이와 일치하며, 장변방향의 공기통로는 벽체내부에서 0.3m의 폭을 가지며 미로형태의 구조를 가진다. 공기입구를 통과한 외부공기는 모듈내부로 유입되며, 모듈내부에서는 자연대류현상에 따른 공기순환과정을 거쳐 상부면에서 공기출구를 통하여 방출된다. 장변벽체형상은 나비형구조로, 바닥면과 상부면의 두께가 대략 2.27m이며, 중간벽체부분에서는 두께가 대략 0.98m이다. 장변벽체상부에 존재하는 공기출구형상은 그림 1과 같고, 단면방향의 벽체구조개념은 그림 2와 같다.

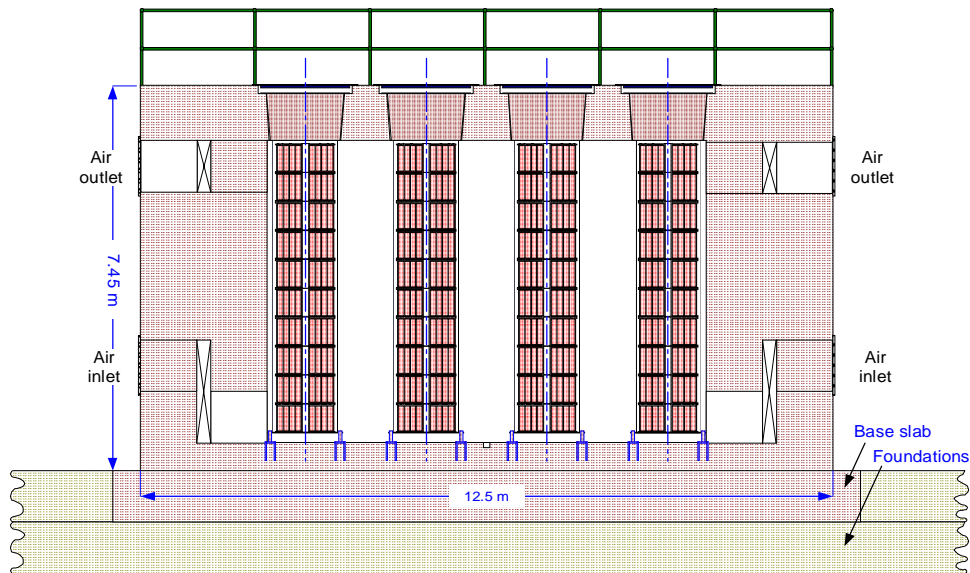


그림 2 모듈단면방향의 벽체구조개념도

2.5 바닥슬래브 및 기초

바닥슬래브는 모듈전체에 작용하는 수직하중을 기초로 전달하여 분산시키는 기능을 가지며, 수평하중성분에 대해서는 전단키를 설치하여 수평이동을 제한하되, 열팽창 및 콘크리트 크리이프, 건조수축은 구속하지 않고 변형을 허용할 수 있도록 기초구조와 분리된 형식을 가진다. 바닥슬래브와 기초면사이에는 PE(Polyethylene) Plate Sheet이 설치되며, 시공편의성을 위해서 PE판 하부에는 스틸로폼을 설치한다. 또한 모듈내부의 바닥슬라브 상부면은 지진시 실린더의 수평이동을 제한할 수 있도록 지진이동방지용설비(Seismic Restraint)가 고정부착되는 공간을 제공하며, 각종 방사선감시계통설비의 각종 파이프 및 모듈내부 침투수 집수 및 배관통로를 제공한다. 바닥슬라브의 두께는 0.46m이며, 길이와 폭은 상부슬래브의 제원과 동일하다. 기초는 단위모듈에 대한 자중과 외력의 수직성분을 지지하며, 지반에 하중을 전달하고 분배하는 기능을 가진다. 기초는 매트형식을 적용하며, 지반에 전달되는 하중이 기초저면지반의 허용지지력을 초과하지 않고, 과도침하, 부등침하, 회전이 발생하지 않는 범위에서 형식과 크기를 선정하되, 운영편의성을 고려하여 2개모듈당 1개의 기초를 적용한다.

2.6 실린더

실린더는 모듈상부슬래브에 고정장착되며, 외경 1.12m, 두께 9.5mm, 길이 5.8m인 원통형구조로서 상부플레이트, 실린더몸체, 바닥플레이트로 구성한다. 상부플레이트는 실린더상부면에 원주방향으로 콘크리트 상부슬라브에 설치되며, 두께 12.7mm인 원판형태의 구조로 최외곽의 직경은 1.4m이고, 중공판형태를 가진다. 상부플레이트 상부면에서 차폐플러그는 용접되며, 상부플레이트하부면에서 실린더몸체는 용접되어 일체형식으로 작용한다. 실린더내부에 적재되는 바스켓자중과 실린더자중은 상부플레이트에서 지지되며, 플레이트상부면과 하부면은 각각 보강판으로 지지된다. 실린더에는 사용후연료 600다발이 저장된 바스켓이 수직재하방식으로 10개가 적재되며, 적재가 완료된 이후에는 차폐플러그가 설치되어 밀봉된다. 실린더 바닥플레이트는 외경 1.2m, 두께 12.7mm인 중실형 원형플레이트이며, 실린더몸체와 용접되어, 바스켓자중과 낙하사고시 바스켓충격하중을 지지한다. 실린더는 아연도 강판으로 제작되며, 실린더몸체 하부면 외곽에는 두개의 앵커를 부착시켜, 실린더에 작용하는 수평하중에 대한 변위를 제어한다.

2.7 모듈 주요부재의 기능

모듈을 구성하는 주요 구조부재의 구성 및 주요기능은 표1과 같다.

표 1 모듈구조부재의 구성 및 주요기능

구조부재	시설구성	주요기능
상부슬래브	<ul style="list-style-type: none"> ○ Con' 상부슬래브 ○ Con' 차폐플러그 ○ 실린더 (바스켓포함) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 바스켓을 포함한 실린더자중, 슬래브자중, 이송설비자중 등 슬래브에 작용하는 하중의 지지 및 벽체로 분산전달기능 ○ 바스켓적재를 위한 작업공간제공 ○ 운영작업자들의 방사선 차폐기능 ○ 슬래브상부면에 유입된 강수의 배수기능
벽체	<ul style="list-style-type: none"> ○ 공기입구 ○ 공기출구 ○ 장방향연속벽체 ○ 단방향연속벽체 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 상부슬래브의 작용하중과 벽체에 작용 하중지지 및 바닥슬래브로의 전달분산기능 ○ 자연상태의 공기를 모듈내부로 유입, 냉각순환시킨후, 순환공기를 외부로 방출시키는 기능 ○ 모듈측벽작업자들에 대한 방사선 차폐기능
바닥슬라브	<ul style="list-style-type: none"> ○ 콘크리트 바닥슬라브 ○ 전단키 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 벽체로부터의 수직하중을 기초로 전달분산시키는 기능 ○ 모듈내부고정설비의 공간제공 ○ 수평하중에 대한 제어기능 ○ 모듈내부침출수의 유도배수기능
기초	<ul style="list-style-type: none"> ○ 콘크리트 매트기초 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 콘크리트모듈전체 수직하중지지 및 기초지반으로의 분산 ○ 지반침하로 인한 구조물의 변형방지
실린더	<ul style="list-style-type: none"> ○ 상부플레이트 ○ 실린더몸체 ○ 하부플레이트 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 사용후연료바스켓의 저장 및 보관공간제공 ○ 바스켓적재로 인한 하중지지 및 상부슬래브의 하중전달 ○ 사용후연료의 2차격납기능

3. 콘크리트모듈 구조설계요건

3.1 설계방법

콘크리트 모듈의 설계방법은 각 구조부재의 파괴를 발생시키는 극한강도를 기준으로 강도설계법에 의하여 수행한다. 각 구조부재는 콘크리트파괴 혹은 철근항복에 의하여 발생하며, 철근항복 이후에도 변형율경화 등으로 추가적인 강도를 지니지만, 본 설계에는 보수적인 설계를 위하여 변형경화로 인한 추가적인 강도는 해석에 고려하지 않는 것으로 가정하였다. 극한설계하중은 하중조합중 구조부재에 가장 불리한 거동을 발생하는 하중조합에 대한 해석으로부터 파악된 구조부재의 내력보다 강도감소계수를 고려한 철근콘크리트 구조부재의 공칭강도가 크도록 단면설계를 수행하였다. 설계에 적용된 하중계수와 구조부재의 강도감소계수는 ACI349규정에서 명시한 안전계수를 적용하였으며, 구조부재의 내력은 휨, 축력, 전단, 비틀림 등에 대하여 구조부재별 지배적인 거동을 중심으로 검토하였다.

3.2 단위설계하중

모듈의 단위설계하중은 설계수명기간동안 정상운전과 비정상운전중에 발생가능한 하중, 인위적인 사고 및 자연재해로 인한 사고조건을 고려하여 도출하였으며, 단위하중크기는 월성지역의 부지특성과 환경특성 및 운영방안 등을 토대로 산정하였다. 최종적으로 도출한 단위설계하중은 표 2에 나타낸 바와 같다.

표 2 단위 설계하중의 크기

분류	하중종류	크기	분류	하중종류	크기	
사 하 중	콘크리트자중	2.5ton/m ³	열 하 중	정상	외기40℃ 외기5℃	예) 상부슬래브 29~7℃, 벽체 14~34℃, 5~6℃
	저장실린더	2.5ton/EA		사 고	외기40℃	상부슬래브 65~42℃, 벽체 51~77℃, 40~41℃
	바스켓(사용후 연료포함)	1.9ton/EA			외기 -20℃	
	Shielding Plug	4.45ton/EA				
활 하 중	플라스크	26ton/EA	지 진 하 중	지역 1	OBE	PGA: 0.1g(h), 0.067g(v)
	Loading Plug Assembly	7.1ton/EA		SSE	PGA: 0.2g(h), 0.133g(v)	
	Loading Platform	1.4ton/EA		지역 2	OBE	PGA: 0.1g(h), 0.067g(v)
	Guide Mechanism	2.2ton/EA		SSE	PGA: 0.2g(h), 0.133g(v)	
	적설하중	40.3kg/m ²	지 속 하 중	크리이프	온도하중으로 변환 적용	
	시공하중	0.5t/m ³		건조수축		
풍 하 중	100년 재현기대풍속	40m/sec	낙 하 중	플라스크자중	26ton	
	설계속도압	57.2m/sec		낙하높이	38cm	
	수평설계풍력	292kg/m ²	충 돌 하 중	충돌차량무게	40ton	
	수직설계풍력	157kg/m ²		충돌속도	20km/h, 40km/h	

3.3 설계하중조합

모듈 설계하중조합은 ACI349에서 명시된 하중조합을 근거로 표 3과 같이 선정하였다.

표 3 설계하중조합 및 하중계수

운영조건	해석의 종류	하중조합	비고
정상운영	정적해석	1.4D+1.7L	D: 사하중 L: 활하중 W: 풍하중 T_o : 운전중열하중 T_a : 과도열하중 E_o : 운전지진하중 E_s : 안전정지지진 A: 낙하사고하중
	운전지진하중해석	1.4D+1.7L+1.7 E_o	
	풍하중해석	1.4D+1.7L+1.7W	
	운전중 열하중해석	1.05D+1.3L+1.2 T_o	
	운전중 열 및 지진하중해석	1.05D+1.3L+1.3 E_o +1.2 T_o	
비정상 운영	과도열하중해석	1.0D+1.0L+1.0 T_a	
	운전지진시 과도열하중해석	1.0D+1.0L+1.0 T_a +1.15 E_o	
	충격하중해석	1.0D+1.0L+1.0 T_o +1.0A	
자연재해 사고조건	안전정지지진시 과도열하중해석	1.0D+1.0L+1.0 T_a +1.15 E_s	
	안전정지지진시 운전중 열하중해석	1.0D+1.0L+1.0 T_o +1.15 E_s	
인위적 사고조건	플라스크 낙하해석		상부슬래브설계시 반영
	운송차량 모듈충돌해석		모듈측벽설계시 반영
	바스켓 낙하사고해석		실린더설계시 반영

3.4 재료특성

모듈설계시 적용한 재료특성은 표 4에 나타난 바와 같다.

표 4 모듈설계 재료특성

분류	재료특성	크기	분류	재료특성	크기
콘크리트	단위중량	2.5ton _f /m ³	지반	단위중량	2.0~2.2ton _f /m ³
	압축강도	300kg _f /cm ²		P파속도	1000~2300m/s
	탄성계수	2.6x10 ⁵ ton _f /cm ²		S파속도	400~1200m/s
	전단탄성계수	1.11E+05ton _f /cm ²		포아송비	0.31~0.41
	포아송비	0.17		전단탄성계수	0.3~3.0E+04kg/cm ²
	열팽창계수	1.0E-05/°C/m/m		탄성계수	1.0~8.0E+04kg/cm ²
	철근항복강도	4000kg _f /cm ²	실린더	탄성계수	28x10 ⁶ psi
Damping	OBE	4%		포아송비	0.28
	SSE	7%		항복강도	36ksi

3.5 안전기준

모듈은 표 3에 나타난 모든 하중조합중에서 가장 위험한 내력을 발생시키는 하중조합에 의하여 발생하는 휨, 축력, 전단, 비틀림 등에 대하여 다음 조건을 만족하도록 설계한다.

$$\phi M_n \geq M_U, \phi P_n \geq P_U, \phi S_n \geq S_U, \phi T_n \geq T_U \quad (1)$$

여기서, ϕ 는 강도감소계수, M_n, P_n, S_n, T_n 은 각각 공칭 휨, 압축, 전단, 전단, 비틀림 강도이고, M_U, P_U, S_U, T_U 는 각각 극한 휨, 압축, 전단, 전단, 비틀림 응력이다. 강도감소계수는 모멘트와 축인장력부재에 대해서는 0.9를, 축압축력과 모멘트 및 축압축력을 받는 부재에 대해서는 0.7을, 전단력과 비틀림부재에 대해서는 0.85를 각각 적용하였다.

모듈의 각 구조부재에서 발생하는 처짐은 설계하중에 의하여 발생하는 탄성처짐과 장기처짐의 합이 허용처짐이내가 되도록 선정하였으며, 허용처짐은 ACI349규정에 따라 슬라브장변방향으로는 45.2mm, 단변방향으로는 26.4mm로 선정하였다.

균열폭은 한계균열폭이 허용균열폭이하가 되도록 배근설계를 수행하였으며, 한계균열폭은 다음 식을 적용하였다.

$$w=0.076R\sigma_s(Ad_c)^{2/3} \times 10^{-6} \quad (2)$$

여기서, R은 구조부재단면 중립축에서 인장면까지의 거리와 중립축에서 철근중심까지의 거리의 비, A는 철근중심과 같은 중심을 갖는 콘크리트의 유효인장면적을 철근의 수로 나눈 값으로 표현되는 주변 콘크리트의 면적(cm^2), σ_s 는 철근의 응력(kg/cm^2), d_c 는 인장축 연단으로부터 가장 가까운 철근중심까지 측정된 콘크리트 덮개두께로부터 구한다. 또한, 허용균열폭은 ACI224규정에 명시된 항목중에서 해수 및 해풍을 반복적으로 받는 상태를 적용하여 0.15mm로 선정하였다.

침하안전규정으로 모듈의 허용 각뒤틀림은 균열이 발생하지 않는 기준으로 1/500으로 선정하였으며, 총침하량은 배수시설에 대한 안전과 매트기초를 사용함을 고려하여 150mm로, 허용기울음은 크레인 레일의 안전성을 고려하여 0.003로 선정하였다.

모듈의 전도 및 활동에 대한 안전율은 적용하중에 따라 사하중과 활하중에 대해서는 1.5를 적용하고, 풍하중과 안전정지지진하중 조합의 경우에는 1.1을 적용한다.

4. 콘크리트모듈 정적해석

4.1 해석개요

정적해석은 하중의 크기 및 형태가 시간에 따라 변화하지 않는 정적상태의 해석으로 사하중해석, 활하중해석, 풍하중해석이 포함된다. 사하중은 콘크리트모듈의 자중, 바스켓을 포함한 실린더 자중, 차폐플러그자중을 고려하였으며, 콘크리트자중은 체적력으로, 실린더와 차폐플러그자중은 상부슬래브재하위치에서의 등분포압력하중으로 환산적용하였다. 활하중은 사용후연료의 건식저장적업시 임시적으로 발생하는 플라스크, Loading Plug Assembly, Loading Platform, Guide Mechanism등 운영설비로 인한 하중과 적설하중 및 시공하중을 고려하였다. 운영설비로 인한 하중은 응력과 변위가 가장 크게 발생할 것으로 예상되는 위치에서의 재하면적당 등분포하중으로 적용하였으며, 적설하중은 상부슬래브면에서의 균일 등분포하중으로, 시공하중은 요소의 체적력으로 반영하였다. 모듈의 정적해석시 콘크리트모듈재료는 선형탄성재료로 가정하였으며, 해석은 범용유한요소해석코드인 SAP2000프로그램을 사용하였다.

4.2 해석모델링

MACSTOR/KN-400모듈의 정적해석을 위해서 해석모델은 기하형상, 하중조건, 경계 및 구속조건의 대칭성을 고려하여 1/4만을 모형화하였다. 1/4모델에 대하여 콘크리트모듈은 총 6160개의 절점을 갖는 3797개의 8절점 3차원 SOLID 요소로 모형화하였으며, 유한요소를 구성하는 각 절점은 두개의 수평방향과 수직방향에 대한 변위와 회전이 고려될 수 있는 6자유도(Degree of Freedom)를 가진다. 해석모델링 작업시 각 요소의 간격비는 해석의 정밀도를 위하여 과도하게 변화하지 않도록 모델링하고, 사각형과 원형이 만나는 곳은 셀 구성시 요소수렴 검증작업을 통하여 요소분할에 대한 타당성을 확인하여 모델링작업에 반영하였다. 최종적으로 해석에 고려된 1/4모듈의 유한요소해석모델은 그림 3과 같다.

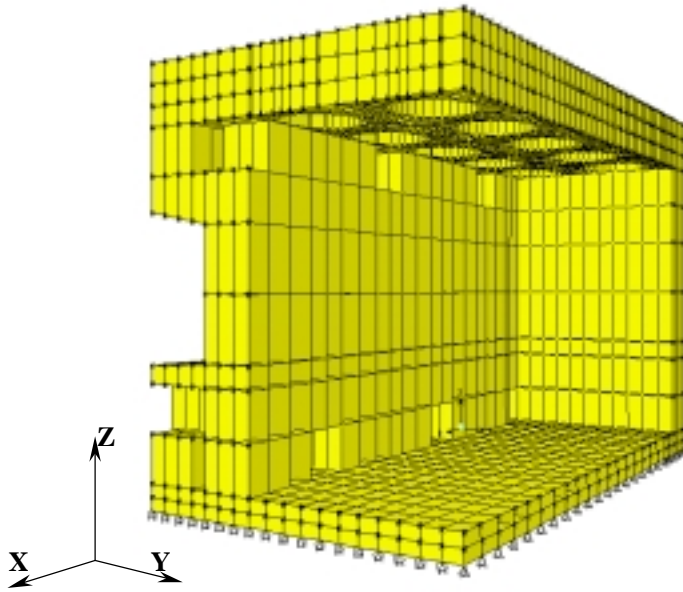


그림 3 정적해석을 위한 Macstor구조물의 유한요소해석모델

그림 3의 해석모델에서 대칭면에서의 경계조건으로 수평변위는 구속하고, 수직변위만을 허용하였다. 또한 경계면에서의 회전은 수평방향에 대해서는 허용하되, 수직방향에 대해서는 구속하였다. 대칭면을 제외한 나머지 모듈 경계면에서는 수평 및 수직방향의 변위와 회전을 허용하였다. 모듈 바닥슬래브는 기초와 분리된 구조로서, 모듈에 작용하는 인장력은 저항하지 못하고 압축력만 지지한다. 모듈에 작용하는 수평력은 바닥슬래브하부에 설치된 전단키(Shear Key)구조로 인하여 지지하되, 내력으로 인한 수평성분은 변위를 허용할 수 있도록 미끄럼 방지판(PE Plate Sheet)이 설치된다. 따라서, 모듈 바닥면에서의 경계조건으로는 수직방향성분에 대해서 고정조건을, 수평방향성분에 대해서는 외력에 대해서는 변위를 구속하고, 내력에 대해서는 변위를 허용하도록 경계조건을 부여하였다.

4.3 응력분석

모듈에 대한 정적해석결과는 변위와 응력에 대하여 응력의 집중영역과 최대 변위와 응력발생위치 등을 위주로 검토하였다. 정적해석으로부터 구한 모듈의 최대응력발생위치와 응력크기는 표 5에 나타낸 바와 같다. 표 5에서 응력발생위치는 그림 4에 나타낸 바와 같다.

표 5의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 모듈에 작용하는 사하중은 활하중과 풍하중에 비하여 크기 때문에 대체적으로 모든 부재에서 응력이 크게 발생하였다. 또한 풍하중은 사하중과 활하중

표 5 정적해석으로부터 구한 모듈의 최대응력발생위치와 크기

구조 부재	응력 형태	사하중해석(kg_f/cm^2)			활하중해석(kg_f/cm^2)			풍하중해석(kg_f/cm^2)		
		크기	위치	절점번호	크기	위치	절점번호	크기	위치	절점번호
벽체	압축	-29.35	5xL	8191	-12.36	5xL	8191	-0.37	6xL	5119
	인장	7.35	1xA	7433	1.32	6xJ	8093	0.62	5xL	8191
	전단	-7.51	5xL	8191	-3.63	5xL	8191	0.30	6xK	4094
상부 슬래브	압축	-56.02	5xL	8188	-28.36	2xJ	15679	-1.43	2xL	12679
	인장	47.19	2xJ	12679	-25.41	2xJ	12679	0.64	2xL	15679
	전단	-17.21	4xF	13133	-8.60	4xJ	13147	0.31	4xF	13133
바닥 슬래브	압축	-0.20	3xA	289	-0.06	4xH	265	-0.62	5xK	1190
	인장	3.63	6xJ	1116	1.12	6xJ	1116	0.00	7xA	1325
	전단	-1.69	6xK	1094	-0.49	6xK	1094	0.16	6xK	1118

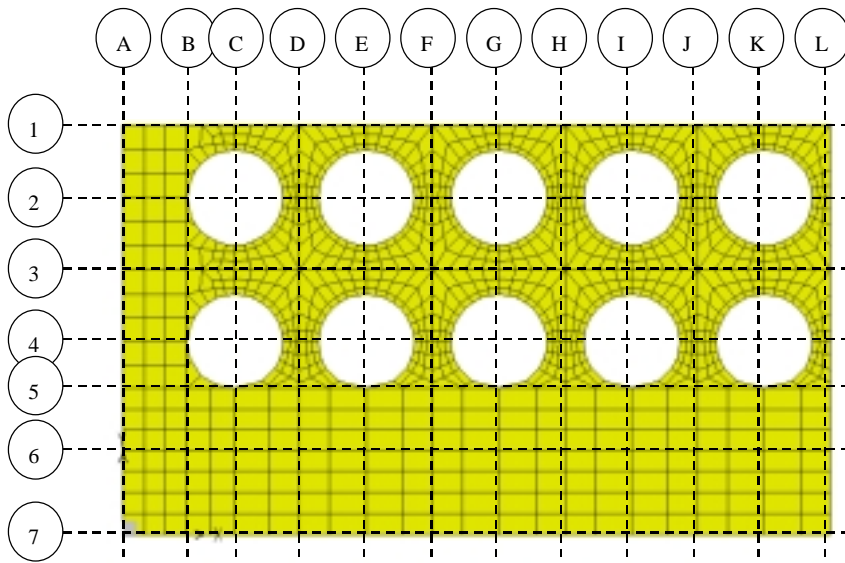
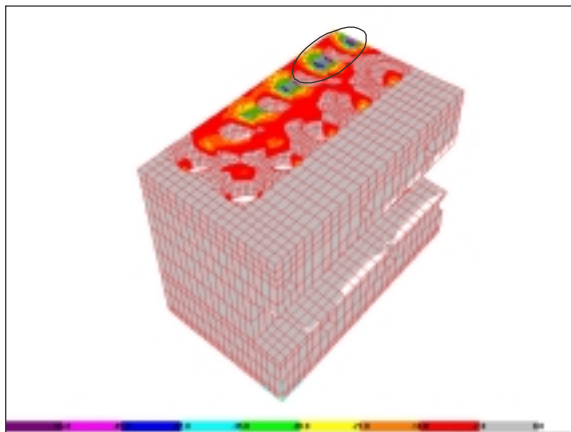


그림 4 해석결과의 검토위치

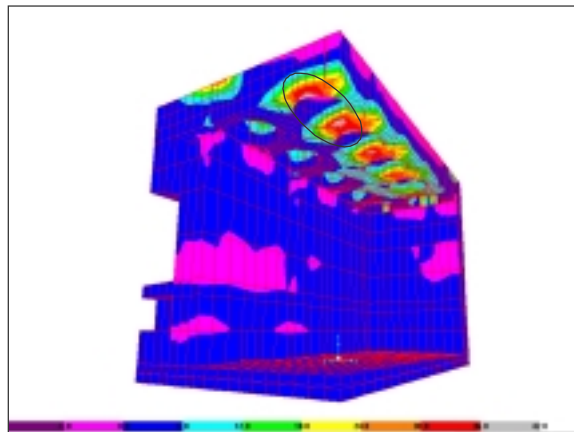
의 작용위치와 반대방향으로 작용되기 때문에 발생응력은 활하중과 사중으로 인하여 발생한 응력과 대체적으로 상쇄효과를 보여주었다. 모듈에 작용하는 사하중과 활하중은 상부에서 하부방향으로 작용하는 수직하중형태로서 압축응력이 지배적이며, 인장거동은 주로 재료의 포아송비와 구속조건에 따라 발생한다. 상부슬래브에 작용하는 수직하중은 벽체를 통하여 하부슬래브로 전달되기 때문에 휨압축과 휨인장이 주요거동인자이며, 벽체에서는 자중과 상부슬래브에 작용하는 수직하중분력으로 인한 압축과 하중작용점의 위치차이로 인한 편심모멘트가 주요거동인자이다. 또한 바닥슬래브에서는 벽체를 통하여 전달된 하중을 지지하고, 기초로 하중을 분산전달시킨다. 풍하중은 수평방향으로 벽체외곽에서 모듈내부방향으로, 수직방향으로는 상부슬래브의 외곽하부면에서 상부방향으로 작용한다. 풍하중 작용시 상부슬래브에 작용하는 수직방향력은 상부슬래브와 벽체가 만

나는 면에서 지지되기 때문에 상부슬래브와 벽체에는 풍하중의 수평력과 수직력이 조합된 효과가 주로 발생하며, 바닥슬래브에는 수평력에 의한 효과가 주로 발생하게 된다.

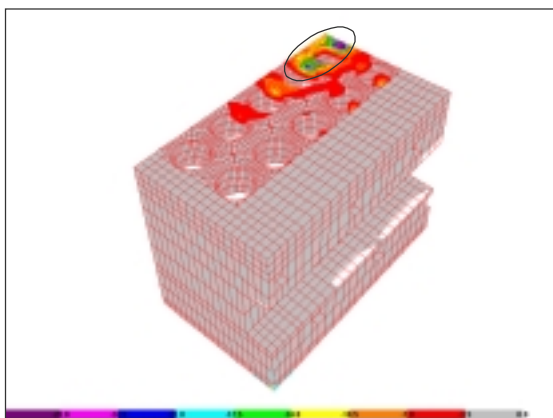
정적해석으로부터 구한 모듈의 최대응력은 사하중작용시 상부슬래브중양과 벽체연결부위(5xL)에서 압축형태로 발생하였으며, 이때 응력은 활하중작용시 발생한 최대응력보다 대략 2.0배정도 크기이다. 모듈에 발생하는 응력은 사하중과 활하중의 경우 대체적으로 상부슬래브중양실린더주변과 벽체연결부위에서 집중현상을 보여주었고, 풍하중의 경우, 휨압축응력은 상부슬래브의 중양 하부와 벽체와 연결부 상부에서, 휨인장응력은 상부슬래브의 중양상부와 외부 벽체 하부에서 집중현상을 보여주었다. 사하중작용시 벽체에서 발생한 최대압축응력은 상부슬래브에서 발생한 최대휨압축응력크기의 대략 52%정도이며, 이 값은 벽체에서 발생한 최대인장응력크기보다 대략 4배 정도 큰 값이다. 바닥슬래브에서는 수평방향으로 변위발생을 허용함으로써 응력은 거의 발생하지 않는 경향을 보여준다. 활하중작용시 벽체에서 발생한 최대압축응력은 상부슬래브에서 발생한 최대휨압축응력크기의 대략 51%정도이며, 이 값은 벽체에서 발생한 최대압축응력크기보다 대략 2.3배 정도 큰 값이다. 풍하중해석으로부터 상부슬래브에서 발생한 최대응력은 활하중에 의해 동일 위치에서 발생한 응력과 작용방향이 반대이며, 크기는 활하중에 의해 발생한 응력의 대략 6%, 사하중에 의해 발생한 응력의 대략 3%정도이다. 정적해석으로부터 구한 모듈의 응력분포도는 그림 5에 나타내었다.



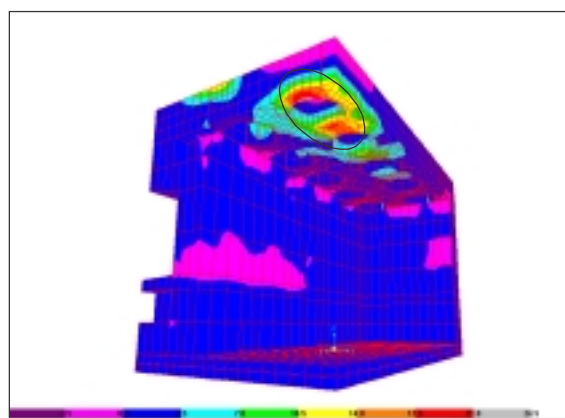
(a) 사하중해석으로부터 구한 휨압축



(b) 사하중해석으로부터 구한 휨인장

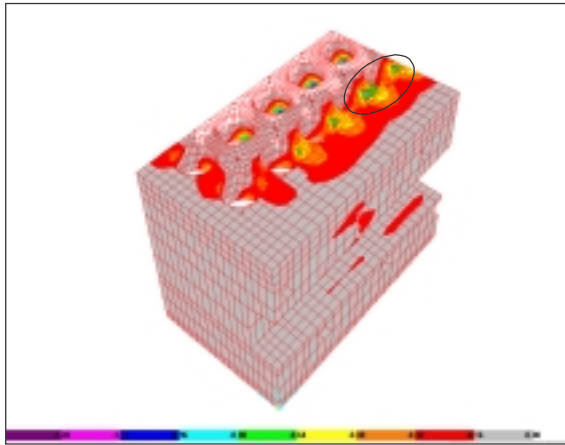


(c) 활하중해석으로부터 구한 휨압축

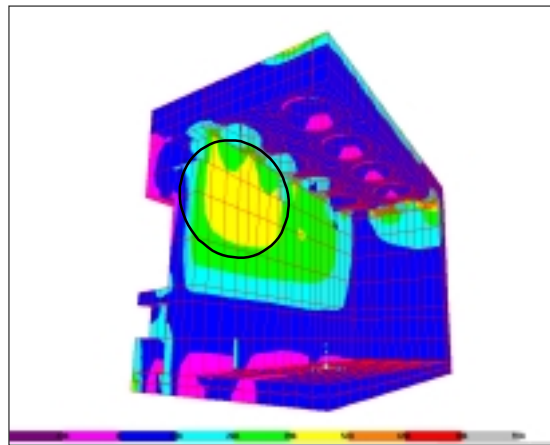


(d) 활하중해석으로부터 구한 휨인장

그림 5 모듈의 정적해석으로부터 구한 응력분포도(계속)



(e) 활하중해석으로부터 구한 휨압축



f) 활하중해석으로부터 구한 휨인장

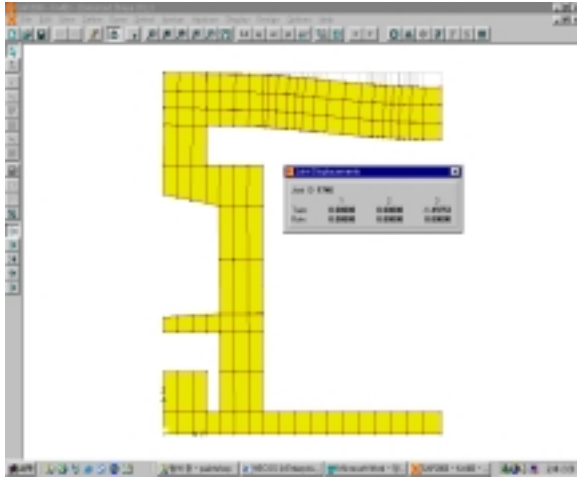
그림 5 모듈의 정적해석으로부터 구한 응력분포도

4.4 변위분석

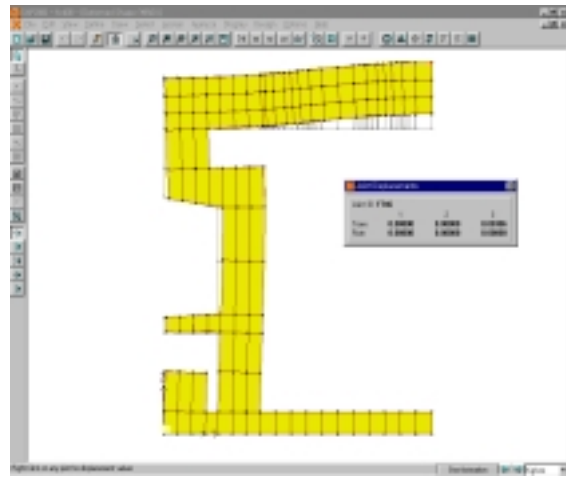
정적해석시 상부슬래브에는 하중작용방향으로 처짐이 발생한다. 처짐발생량은 작용하중크기와 위치에 따라서 달라지지만 대체적으로 모듈중앙부에서 가장 크고, 벽체와 만나는 단부에서는 구속조건의 영향으로 변위가 그다지 크게 발생하지 않음을 알 수 있다. 또한, 벽체에서는 사하중과 활하중작용시 수직압축력과 편심을 갖는 모멘트가 작용하기 때문에 외곽방향으로 수평변위가 발생하며, 벽체와 상부슬래브가 만나는 점과 벽체와 바닥슬래브가 만나는 점에서는 구속조건의 영향으로 수평변위가 그다지 크게 발생하지 않는다. 바닥슬래브하부는 미끄럼을 허용하도록 PE (Polyethylene) Plate Sheet을 설치하기 때문에 포아송비로 인한 수평변위가 발생하며, 바닥슬래브 상부면은 벽체와 일체형으로 구속되기 때문에 수평변위는 구속된다. 따라서, 바닥판슬래브의 단부면에서는 상부면과 하부면의 다른 경계조건으로 인하여 휨응력이 발생하며, 수평변위는 그다지 크게 발생하지 않는다. 풍하중해석시 벽체에 작용하는 수평력은 모듈의 바닥슬래브하부에 설치된 전단키에 의해 지지된다. 실제적으로는 모듈바닥판하부에 PE판을 설치하더라도 마찰이 존재하며, 이 경우 모듈자중과 마찰계수를 곱한 저항력이 수평력을 제어하게 된다. 따라서, 풍하중작용용시 수평변위는 벽체중앙부에서만 존재하며, 상부슬래브에는 인장하중으로 인하여 상부방향으로의 수직변위만이 존재한다. 정적해석으로부터 구한 최대변위와 변형형상은 각각 표 6과 그림 6에 나타낸 바와 같다. 표에서 부호는 상향과 모듈외부방향의 경우에 양의 값을 의미한다. 표에서 정적해석시 최대변위는 수직변위가 대체적으로 수평변위보다 크게 발생하였다. 최대수직변위는 사하중이 작용할 경우 상부슬래브중앙부에서 발생하였으며, 이 점에서의 처짐은 활하중으로 인하여 발생하는 처짐에 비하여 대략 2.1배이다.

표 6 정적해석으로부터 구한 최대변위

변위방향	위치	크기(mm)		
		사하중	활하중	풍하중
수직방향	1xL(EL+7531mm)	-1.50	-0.71	0.03
수평방향	7xL(EL+7531mm)	0.063	0.026	0.002



(a) 사하중과 활하중작용시



(b) 풍하중작용시

그림 6 정적해석시 모듈의 변형형상

5. 결론

본 논문에서는 CANDU 사용후연료 조밀건식저장시설의 구조설계개념을 제시하고, 콘크리트모듈설계를 위한 정적해석을 수행하였다. 본 논문에서 제시한 설계개념과 정적해석결과는 모듈구조부재에 대한 배근설계와 더불어 구조안전성평가에 반영할 예정이다. 본 논문의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 구조설계개념

- 모듈의 단위설계하중은 설계수명기간동안 정상운전과 비정상운전중에 발생가능한 하중, 인위적인 사고 및 자연재해로 인한 사고조건을 고려하여 월성지역의 부지특성과 환경특성 및 운영방안 등을 토대로 사하중, 활하중, 열하중, 지진하중, 사고하중의 크기를 표 2와 같이 산정하였다.
- 모듈 설계하중조합은 ACI349에서 명시된 하중조합을 근거로 10개의 하중조합을 선정하였다.
- 모듈 설계안전기준은 응력, 변위, 처짐, 균열, 침하, 전도, 활동 등에 대하여 3.5절에서 서술한 내용을 적용한다.

2) 정적해석결과

- 모듈에 발생하는 응력은 사하중과 활하중의 경우 대체적으로 상부슬래브중양실린더주변과 벽체연결부위에서 집중현상을 보여주었고, 풍하중의 경우, 상부슬래브와 벽체연결부와 상부슬래브중양부에서 집중현상을 보여주었다.
- 정적해석으로부터 구한 최대응력은 사하중작용시 상부슬래브중양과 벽체연결부위에서 압축형태로 발생하였으며, 이때 응력은 활하중작용시 발생한 최대응력보다 대략 2.0배정도 크다.
- 최대변위는 상부슬래브 중양에서 발생하였으며, 사하중으로 인하여 발생한 변위가 활하중으로 인하여 발생한 변위보다 대략 2.1배정도 크다.
- 풍하중으로 인하여 모듈에 발생한 응력은 활하중과 사하중으로 인하여 발생한 응력과 대체적으로 상쇄효과를 보여주었다.

참고문헌

1. ACI 349-97. and ACI 349R-97, Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures and Commentary, American Concrete Institute, 1997
2. ACI 318-99. and ACI 318R-99, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, 1999
3. ANSI/ANS 57.9, Design Criteria for an Independent Spent Fuel Storage Installation (Dry Storage Type), 1992
4. ANSI/ASCE 7-95, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures and Commentary, American Society of Civil Engineers, 1995
5. IAEA Safety Series No. 116, Design of Spent Fuel Storage Facilities, 1994
6. US NRC Regulatory Guide 1.13, Spent Fuel Storage Facility Design Basis, 1975
7. US NRC Regulatory Guide 1.29, Seismic Design Classification, 1978
8. US NRC Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, 1973
9. US NRC Regulatory Guide 1.61, Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants, 1973
10. US NRC Regulatory Guide 1.142, Safety-Related Concrete Structures for Nuclear Power Plants (other than Reactor Vessels and Containments), 2001
11. 10 CFR Part 72, Licensing Requirements for the Independent Storage of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste
12. 콘크리트 표준시방서, 건설교통부, 1995