

특집

원자력발전소 설계 및 기술 동향

차세대 원전 개발 프로젝트의 현황 및 구조 설계 간개 - The Status Quo of Korean Next Generation Reactor Project and Features in Structural Analysis -



박병진*



이상명 **

1. 차세대 원전 개발 프로젝트의 필요성

차세대 원전은 영문으로는 "Korean Next Generation Reactor"로 표기되며 통상 KNGR로 전문가들 사이에서 통용되고 있다. 차세대 원전은 단일 호기로는 국내 최대인 140만 KW(1,400MWe)로 일반적으로 널리 알려져 있는 한국표준형원전(KSNP : Korean Standard Nuclear Power Plant)의 100만 kw(1,000 MWe)에 비해 1.4배 정도 격상된 발전 설비 개발을 목표로 하고 있다. 차세대 원전은 짧게는 1987년에 착수하여 15년여에 걸쳐 국내외 원전 기술 역량을 집결시킨 원전 기술 자립 노력의 결정체인 한국표준형원전의 개발·건설·운영 경험을 바탕으로 길게는 30여 년에 걸친 각종 국내 원전의 운영·유지 경험을 피드백(feed back)하여 개발 중이다. 이 사업은 1992년 12월에 시작되어 2001년 12월이면 기본 설계 개발 사업이 완료되며 정부의 장기 전원 개발 계획

에 따라 2010년에 차세대 원전 1호기가 준공될 예정이다.

우리의 차세대 원전은 국제원자력기구(IAEA)에서 규정한 개량경수로형(ALWR : Advanced Light Water Reactor)의 범주에 드는 노형이다. 미국의 TMI(Three Mile Island) 원전 사고 이후 미국원자력규제위원회(USNRC : Nuclear Regulatory Commission)에서는 더욱 안전성을 보장하는 차원에서 운전 중이거나 건설 중인 기존의 원전에 대해 사고 가능성을 더욱 낮추는 설비를 추가로 설치할 것을 요구하게 되었고 이에 따라 기존 원자력발전소의 안전성은 설비 보완 후 향상될 수 있었으나 경제성은 상대적으로 낮아지게 되었다. 그래서 차세대 원전은 규모의 경제(economy of scale) 측면이 고려되어야 했다. 아울러 한 세대(30년) 이상의 원전 운영 경험을 체계적으로 정리·반영하고, 눈부신 발전을 이룩한 전자제어 분야의 기술을 도입한 첨단 원전 설계에 대한 필요성이 대두되게 되었다.

지금까지 많은 원전이 설계되었으나, 주로 원자로 제작자나 플랜트 종합 설계자(A/E) 위주의 설계로 일

* 한국전력공사 원자력건설처 부처장

** 한국전력공사 원자력건설처 건축팀 과장

관되어 왔다. 이에 따라 설비의 최적화가 이루어지지 못했으며 그 결과 운전 편의성 및 보수성이 결여되어 있었다. 이는 발전소 설계자와 발전소 운영자(utility, 즉 발전소 owner)가 서로 다름으로 인하여 운전 및 보수 경험이 설계 단계에서부터 체계적으로 반영되지 못했기 때문이다. 이에 정부는 이러한 배경에 따른 필요성을 절감하고 지금까지 축적된 운전 및 보수 경험에 의한 운전 편의성 및 보수성을 체계적으로 반영하고 한국인의 체형 및 행동 습관을 고려한 인간공학의 분석 성과까지 반영한 첨단원전의 차세대 원전 설계 개발을 국가 과학 기술 선진화 과제(G7)로 선정하게 되었다. 한편은 개발의 주체로 선정된 후 전력연구원(KEPRI)과 한국전력기술(주) 내에 별도의 전담팀을 구성하여 모든 역량을 집결시켜 개발에 매진하였다. 원전 설계 기술 후발 주자(follower)로서의 여러 핸디캡을 성공적으로 극복하면서 그동안 많은 성과를 이룩하게 되었다.

2. 차세대 원전 시스템 설계 상의 주요 특징

첫째, 기존 원자력발전소의 주 제어실은 수 천 개의 지시계, 경보기, 조작 스위치 등으로 가득 채워져 있어 발전소의 과도 상태시 운전원이 처리해야 하는 정보가 너무 많고 그 중요도를 즉시 인지할 수 없었다. 차세대 원전의 MCR(Main Control Room)은 소형 워크스테이션으로 필요한 모든 정보를 지시하고 제어할 수 있게 설계되었으며 여러 개의 독립된 워크스테이션을 호환 사용케 하여 한 대가 고장나도 운전이 영향을 없도록 하였다. 또한 대형 정보 표시판을 설치하여 발전소 운영 상황을 한눈에 보며 상황에 대처할 수 있어 운전 편의성이 크게 향상되었다.

둘째, 원자로에서 핵연료가 용융하는 중대 사고에 대한 설비가 보장되었다. 원자로에서 핵연료가 용융하면 핵연료 피복재의 산화 반응으로 수소가 발생하게 되고 용융물이 원자로 용기 하부로 모이게 되어 격납 건물을 손상시킬 수가 있다. 차세대 원전에서는 이런 중대 사고시의 문제점을 해결하기 위하여 격납 용기

표 1. 차세대 원전의 주요 성능 목표

항 목	세부 목표	목 표 값
일반 요건	용량	4,000 MWt (1,400MWe급 전기 출력)
	부지 요건	0.3g (Safe Shutdown Earthquake 기준값)
	발전소 설계 수명	60년
안전성 목표	노심 손상 빈도	1.0E-5/RY 이하
	격납 건물 건전성 상실 빈도	1.0E-6/RY 이하
안전 성능 요건	안전 여유도	열적 여유도 10% 이상
	운전원 조치 여유 시간	30분 이상
중대 사고 대처 요건	중대 사고 및 완화 설비	수소 제어, 격납 건물 직접 가열 현상 방지 및 노심 용융물 냉각
	격납 건물 성능 기준	사고 발생 후 최소 24시간 동안 Factored Load Category 이하 유지
건설 공기 목표		N번째 호기: 48개월
경제성 향상		건축 면적, 제적, 시공성 KSNP 대비 획기적 향상

내의 수소를 피동적으로 재결합시킬 수 있는 PAR (Passive Auto-catalytic Recombiner)를 설치하여 발생된 수소를 효과적으로 제거할 수 있도록 하였으며, 노심이 녹았을 경우 노심 용융물을 격납 건물 내에 가두어두고 냉각할 수 있도록 원자로 공동(reactor cavity)을 침수시켜 냉각하는 설계 개념을 도입하여 안전성을 더욱 향상시켰다. 그리고 중대 사고시 대처 능력을 향상시키기 위하여 수소 연소, 격납 건물 직접 가열, 증기 폭발 등으로 인한 하중을 격납 건물 설계에 반영하여 격납 건물의 성능을 향상시켰다.

셋째, 발전소 건물(site layout) 및 기기 배치 설계(general arrangement)를 최적화하였다. 발전소 건물 및 기기 배치는 발전소의 안전성은 물론 이용률 향상을 위한 운전성, 보수성 및 접근성, 경제성, 시공성 등과 밀접한 관련이 있을 뿐만 아니라 운전 및 보수 요원의 방사선 피폭 저감 등 발전소 전반에 걸쳐 그 미치는 영향이 지대하다고 할 수 있다. 차세대 원전의 계통 구성 및 설비 형식은 울진 3, 4호기 등 국내 원전과 ABB-CE 모델인 System 80+ 및 EPRI-URD 설계 개념을 참조하고 국내 건설 및 운전 경험을 반영하여 최적의 기기 및 건물 배치가 되도록 하였다. 이 밖에도 그간의 복제 기술이 아닌 독자적 설계 기술로 기존 KSNP의 2,825 MWt급 용량에서 4,000 MWt급으로 격상하였으며 설계 목표 수명을 기존의 40년에서 60년으로 연장하였다.

3. 차세대 원전 건물 구성 및 내진 설계 기준

차세대 원전은 크게 보아 세 구역으로 나눌 수 있다. 원자력 관리 지역(Nuclear Island), 터빈 지역(Turbine Island), 및 기타 야드 지역으로 삼분된다. NI 지역의 복합 건물은 2개 호기를 공용으로 지원하는 건물로서 한국표준형원전의 제2차 보조 건물, 출입 통제 건물, 방사성 폐기물 건물 등이 통합(compound)된 건물이다(건물 구성에 대한 체계도는

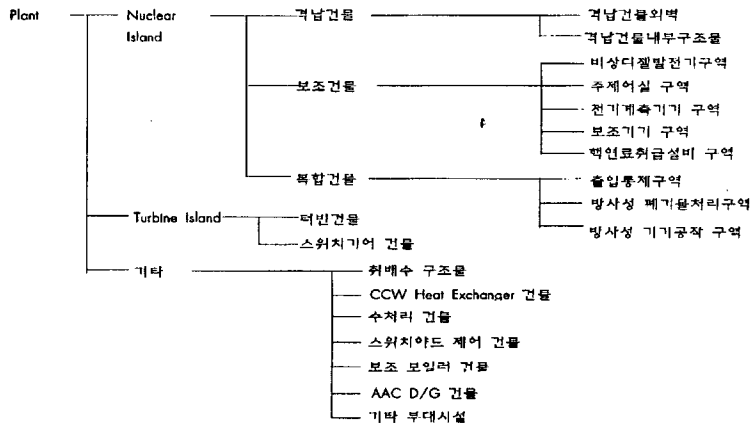


그림 1. 차세대 원전의 건물 구성

<그림 1>을, 구조 해석 및 내진 해석에 적용되는 기준, 코드 및 설계 지진력은 <표 2>를 참고하기 바람.

크게 보아 원자로 격납 건물 기초, 외벽 및 돔은 ASME Section III, Division 2 'Concrete Reactor Containment'의 코드 기준에 따라 설계된다. 격납 건물 내부 구조물을 포함한 원자력 안전에 관련되는 시설물로서 품질 관리 등급 Q에 해당하는 보조 건물, ESWIS(Essential Service Water Intake Structure) 등은 내진 범주 1급(Seismic Category I) 구조물로서 ACI 349 코드의 적용을 받아 설계되며 철골 구조물의 경우 AISC N690 코드의 적용을 받는다. 터빈 건물, 복합 건물 등 Seismic Category II, III의 기타 구조물은 ACI 318, AISC ASD 및 건축법의 적용을 받아 설계된다.

4. 차세대 원전의 내진 해석

기존 원전은 경암 지반을 기준으로 설계 지진력을 0.2g를 기준으로

표 2 구조물의 내진 설계 기준

내진 등급	건물명	대상 설비	관련 법규	설계 지진력	구조 설계 적용 코드	해석 방법
내진 범주 I 급 (Nuclear Safety Related Structures)	원자로 격납 건물	· 매트 기초(basemat) · 내부 구조물 · 격납 외벽 · 주 기기, 보조 기기 · 계측 제어 장치류	· 원자력법 · USNRC 10 CFR 100, APP.A · R.G 1.142	· 0.3 g	· ACI 349 · ASME Section III, Div. 2 · AISC N690	· 동적 해석
	보조 건물	· 주 제어실 구역 · 전기 계측 기기 구역 · 보조 기기 구역 · 핵연료 취급 설비 구역 · 비상 디젤 발전기 구역 · 필수 냉각수 취수 구조물 · 기기 냉각수 구조물	· 원자력법 · USNRC 10 CFR 100, APP.A · R.G. 1.142	· 0.3 g	· ACI 349 · AISC N690	· 동적 해석
내진 범주 II 급	복합 건물	· 방사성 폐기물 구역 · 출입 통제 구역 · 내진 범주 I급 구조물 내의 비내진 범주 I급 기기	· R.G. 1.143 · USNRC 10 CFR 100, APP.A	· 0.3 g	· ACI 318 · AISC ASD · ACI 318 · AISC ASD	· 동적 해석 (경우에 따라 등가정적 해석)
	터빈 건물	· 터빈 건물 · 스위치 기어 건물	· R.G. 1.143	· 0.3 g	· ACI 318 · AISC ASD	· 동적 해석 (경우에 따라 등가정적 해석)
내진 범주 III 급		· 염소 주입 건물 · 물처리실 건물 · 냉각수 계통 구조물 · 보조 보일러 건물 · 스위치 야드 · 기타 설비 · 내진 범주 II급 구조물 내의 기기	· UBC 2312	· 0.3 g · 건축법 지진 구역 2: · UBC Z-2A · 건축법 지진 구역 1: · UBC Z-1	· ACI 318 · AISC ASD	· 등가정적 해석

로 한 고정 기초 해석(Fixed Base Analysis)법으로 설계하였다. 차세대 원전은 포괄 부지 특성치를 고려한 설계를 추진하여 상대적으로 입지 조건이 나쁜 부지에도 원전 건설이 가능하게 되었다. 설계 지진력을 상향 조정하여 0.3g로 하고 지반 조건은 암반 및 토질 지반을 포괄할 수 있도록 9개의 포괄 부지 조건에 대한 지반-구조물 상호 작용 해석(Soil-Structure Interaction Analysis)으로 설계 해석을 수행하였으며, 해석 프로그램으로 SASSI를 사용하였다.

표준형 원전에서 수행하였던 OBE(운전기준지진 : Operational Basis Earthquake) 해석 절차 수행 요건은 NRC의 승인 아래 설계 요건에서 배제되었다. 차세대 원전은 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에 의하여 개발된 ALWR 표준 발전소에 적용되는 URD(Utility Requirement Document) 요건을 대부분 만족토록 설계가 추진되고 있다. <그림 2>를 보면 원전의 지반-구조물 상호 작용 해석을 포함한 내진 해석 및 설계 절차를 일목 요연하

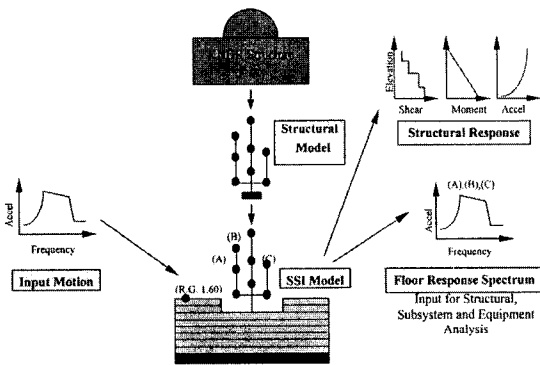


그림 2 지반-구조물 상호 작용(SSI) 해석 절차

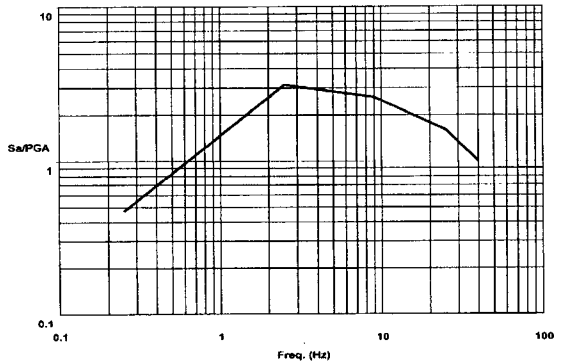


그림 3 차세대 원전 응답 스펙트럼

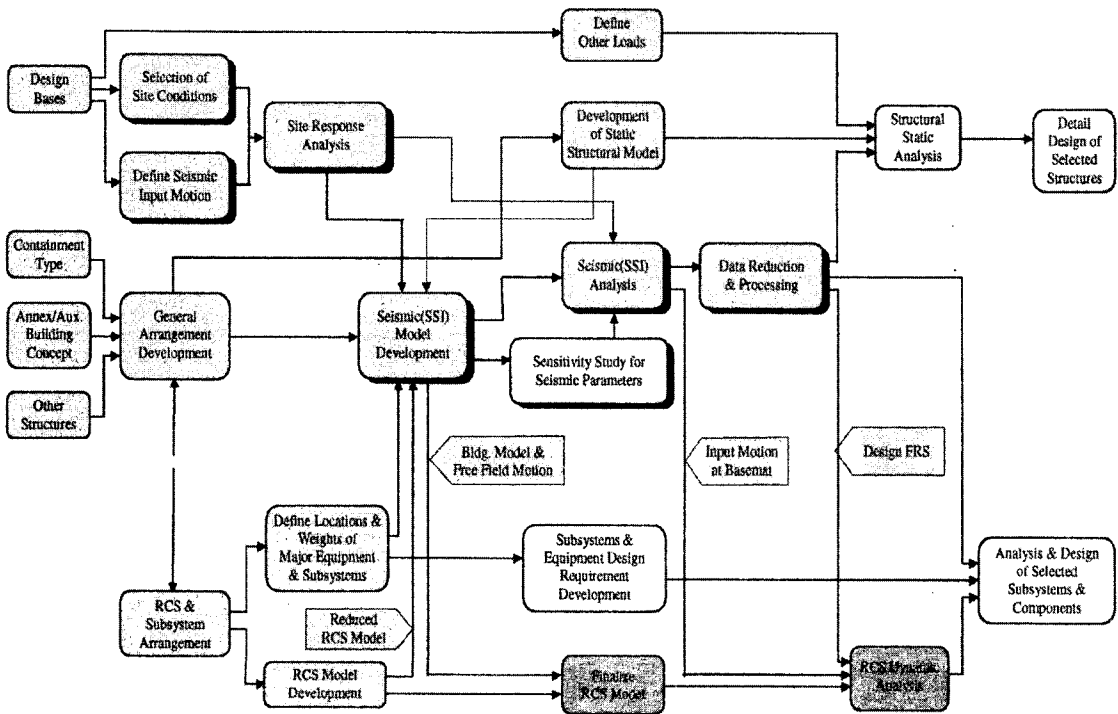


그림 4 내진 해석 및 설계 업무 흐름도

게 알 수 있다. 내진 해석 입력 운동은 최대 지반 가속도를 0.3g으로 하여 R.G 1.60의 Site Independent Standard Spectrum을 근간으로 하고 고진동수 영역을 보강하여 적용한다(차세대 원전에 적용되는 응답 스펙트럼의 주파수대별 가속도는 <그림 3>을 참고하기 바람).

상부 구조물 모델링 작업은 3차원 유한 요소 모델을 활용하여 수행한다. 한편 이와 별도로 각 구역의 단면 특성을 이용하여 스틱(stick) 모델을 구성한다. 격납 건물은 외벽, 내부 구조물, IRWST(핵연료 재장전 수조), RCS(원자로 냉각 시스템) 등의 4개의 스틱으로 보조 건물은 4개의 구역으로 구분하여 해석한다. 이 때 각 스틱의 모델을 연결하여 전체 스틱 모델을 구성한다. 이후 3차원 유한 요소 모델과 스틱 모델을 튜닝시킨 후 해석 작업을 수행한다. 차세대 원전의 종합적인 내진 해석 및 설계 업무 흐름에 대해서는 <그림 4>의 흐름도(flow chart)에 정리하였다.

5. 격납 건물 구조 설계의 특성

5.1 적용 코드 기준

격납 건물은 크게 보아 격납 외벽(Exterior Wall & Dome)과 1차 차폐벽과 2차 차폐벽으로 이루어진 내부 구조물(Internal Structures), 그리고 매트 기초(Basemat)로 나누어진다. 외벽(Post-Tensioning System 적용 단일 원통 형식 채택) 및 매트 기초(Basemat)는 ASME Section III Division 2, CC-3000 및 4000 코드의 적용을 받으며 내부 구조물은 ACI-349 'Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures'의 적용을 받는다. 이 코드는 현재 개정판 초안이 나와 올해 2월 말까지 Public Comments(Chairman, Dr. Richard Orr)를 수렴하고 있는 중이며 3월의 San Diego ACI Spring Convention을 통해 토의를 한 후 4월 중 TAC에 상정된 후 최종안을 확정, 향후 원전 건설의 새로운 기준으로 적용될 것으로 예상되고 있다.

5.2 주요 설계 하중

구조 해석시 고려되는 주 하중 요소는 사하중, 활하중, 프리스트레스하중, 온도하중, 압력하중, 지진하중, 천장크레인하중과 기기반력하중 등이 있다.

5.3 격납 건물 격납 외벽 및 매트 기초

격납 건물은 원통형 벽체와 반구형 돔으로 이루어진 PS 콘크리트 구조이다. 외벽의 두께는 4ft, 돔의 두께는 3.5ft이다. 기초, 외벽, 돔의 내부는 원자로 건물 내부 방사능 물질의 누출 방지를 위해 1/4 inch 두께의 Containment Steel Liner Plate로 내면이 완전히 밀봉되어 있으며 표면은 Inorganic Zinc Primer에 Epoxy Coating이 되어 오염(decontamination) 성능이 확보된 설계로 이루어져 있다. 냉각재 유출 사고(loss of coolant accident) 발생시 고압(설계 압력 : 60 psig, 중대 사고 압력 : 102 psig)과 지진 하중에 견디도록 수직 텐던과 원환 방향 수평 텐던으로 PS 시스템을 도입하며 원통형 벽체에는 수평 텐던(hoop tendon)을 정착시키기 위해 3개의 부벽(butress)이 120° 방향으로 설치되어 있다.

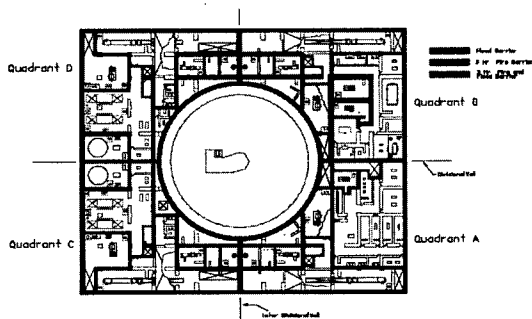
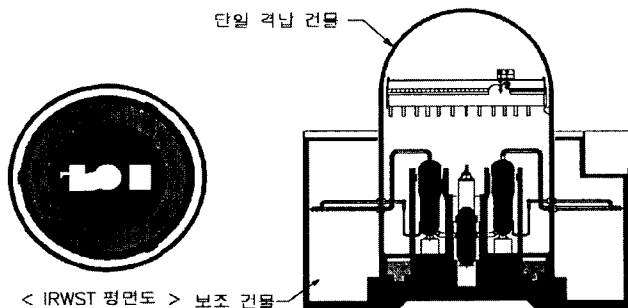


그림 5. 격납 건물 해석 모델

내부 자유 체적은 $3.13 \times 10^6 \text{ ft}^3$ ($91,200 \text{ m}^3$)이다.

격납 건물의 원통형 벽체와 기초 슬래브(basemat)는 고정 연결되어 있으며 기초 슬래브는 주위를 둘러싼(4-quadrants) 보조 건물 기초와도 일체화시켜 공동 매트 기초로 설계되어 있다. 기초 슬래브는 운전 및 사고시 원자로 냉각재 계통으로부터 방사능 누출에 대한 차폐 역할을 함과 동시에 내외부 격납 건물 및 내부 구조물을 지지한다. RC 구조이며 상부는 라이너 플레이트로 피복되고 다시 그 위에는 라이너 플레이트의 부식 방지를 위한 채움 슬래브(fill slab) 또는 IRWST(In-Containment Refueling Water Storage Tank)가 있다. 기초 슬래브 하단에는 수직텐던의 정착과 검사를 위한 텐던 갤러리가 있다.

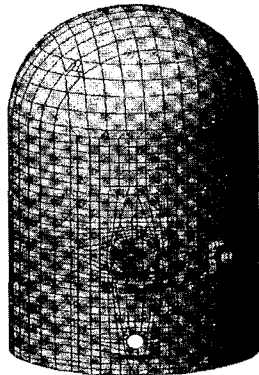
5.4 격납 건물 내부 구조물

철근 콘크리트 구조이며 핵증기 공급 계통(Nuclear Steam Supply System)의 지지 및 보호와 운전 보수 공간을 제공한다. 내부 구조물은 다음의 구조물로 구성된다.

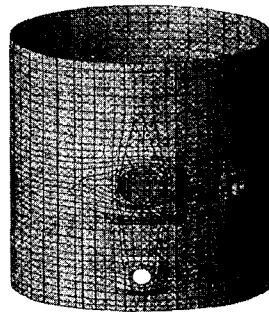
- 1차 차폐벽 및 원자로 공동부
- 2차 차폐벽
- 핵연료 재장전 수조(refueling pool)
- 증기 발생기(steam generator) 차폐벽
- 가압기(pressurizer) 차폐벽
- 원자로 냉각재 펌프(reactor coolant pump) 횡방향 지지대
- 운전층 및 중간층(operating & intermediate floors)
- IRWST(In-Containment Refueling Water Storage Tank)

5.5 구조 해석 및 설계

격납 건물 외벽은 셸 요소와 트리스 요소를 사용한 3차원 유한 요소 모델을 사용하여 사하중, 프리스트레스하중, 내압하중, 지진하중, 온도하중에 대한 해석을 수행한다. 이 때 각종 Main Steam Pipe등을 위한 관통부에 대한 모델이 포괄된다. 외벽의 스프링 라인



격납건물 외벽, 돔 해석모델



격납건물 외벽해석모델

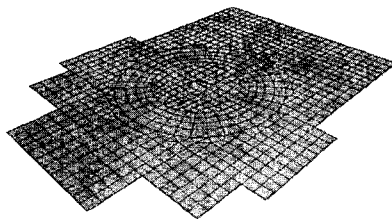
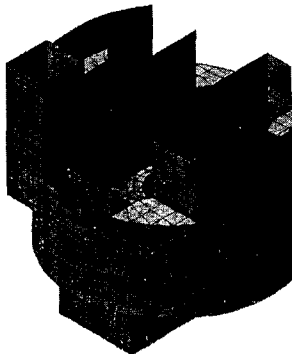


그림 6. 차세대 원전 격납 건물 및 보조 건물 배치도

(돔이 시작되는 지점)까지만 모델링한 3차원 유한 요소 모델은 건설 과정시 스프링 라인에 설치되는 Polar Crane(위치는 <그림 6>을 참조)을 활용한 증기 발생기 인양에 대한 구조적 건전성을 검증하기 위해 사용한다. 내부 구조물은 쉘 요소와 Solid 요소를 사용한 3차원 유한 요소 모델을 사용한다. 슬래브 기초는 평판 요소를 사용한 3차원 유한 요소 해석 모델을 사용하는 데 이 때 보조 건물 기초까지 포함하며 기초의 들림 효과도 해석에 고려된다. SAP 2000 프로그램을 사용하여 구조 해석을 실시하여 부재 설계 및 철근량을 계산한다.

5.6 포스트텐서닝 시스템 설계

포스트텐서닝 시스템은 울진 3, 4호기에서 채택한 미국 VSL사의 E5-55 시스템으로 설계되며 텐드의 재질은 ASTM A-416 Grade 270 자재로 60년으로 증가된 설계 수명으로 인하여 6% 릴랙세이션(relaxation)을 허용한다. 미국기계학회(ASME)의 Section III, Division 2 CC-3000(3135, 3423, 3433, 3540)이 적용 코드이다. 주요 고려 하중을 사하중, 프리스트레스하중, 압력하중, 지진하중이며 격납 건물 외벽의 해석 결과를 사용하여 포스트텐서닝 시스템을 설계하게 된다.

6. 보조 건물 구조 설계의 특성

6.1 적용 코드 기준

URD 및 내진 범주 I급 구조물 설계 요건에 따라 설계한다. ACI 349가 적용되며 지반 가속도는 0.3g를, 설계 풍속은 100 mph를 적용한다. 콘크리트 강도는 91일 압축 강도로 5,000 psi를 적용한다.

6.2 보조 건물의 배치 특성

격납 건물의 주위를 감싸는 quadrant 형태(4 Train의 완전 분리)이며 지하 2개 층(45ft 높이)과 지상 6개 층(111.5ft 높이)의 철근 콘크리트 구조물로 설계된다. 보조 건물 상부 구조는 격납 건물과 구조적으로 분리되어 있으며, 실내의 칸막이 벽

(partition wall)을 전단 벽(shear wall)에 연결시켜 시공성을 향상시키고 응력을 분담시켜 구조적 효율성을 높일 수 있게 설계되고 있다. 표준형 원전과 다른 점은 원자로 연료 건물(fuel handling building)을 보조 건물 내에 통합 배치하여 구조물 상호 성능을 보완하였다. 격납 건물과의 공동 매트 기초 두께를 10ft로 설계하여 Recess의 수용 및 응력 집중 해소를 통한 안전성 및 시공성 증대 효과를 도모하였다. 보조 건물 내 방사선 구역과 비방사선 구역을 완전 분리하였고 안전 등급 보조 급수 탱크를 건물 내에 수용하였다. 비상 디젤 발전기를 보조 건물 내부로 수용하였고 신형 주 제어실(advanced control room)을 채택하였다. 고에너지 구역을 집중화하였으며 바닥 배수 및 기기 배수의 분리 수집이 이루어지게 하였다. 또 원전에 대한 국민 이해도를 증진시키고 투명한 원전 운영 홍보를 위해 방문자 관람 구역을 설치(핵연료 취급 구역, 주 제어실, 터빈 운전층)하여 일반 시민이 항시 원전 운전 현황을 직접 확인할 수 있게 하였다(격납 건물 및 보조 건물의 평면 및 단면은 <그림 6>의 배치도를 참고하기 바람).

6.3 보조 건물의 구조 해석

보조 건물 구조 해석을 위하여 매트 기초를 포함하는 통합 3차원 구조 해석 모델을 구축하여 설계하며 지반의 강성을 고려한 FEM 해석법을 활용한다.

복합 건물과 터빈 건물 및 기타 건물의 설계는 개선행 한국표준형원전과 대동소이하다.

7. 맺음말

차세대 원전은 1994년 5월 기기 및 구조물 배치도(Generation Arrangement) 개발에 착수한 이래 금년 2월 말 현재 최종 단계의 GA 표준도면 초안이 발행되었다. 2010년 12월 표준설계인가(DC) 취득을 목표로 하고 있으며 이의 달성시 첫째, 안전성과 경제성을 겸비한 해외 사업 진출 기반의 확보, 둘째 안전성 증진을 통한 원전의 국민 신뢰 기반의 조성, 셋째 최적 설계로 다른 에너지원에 대한 경제성 우위 확보의 효과를 기대할 수 있다. □