

## 원전 콘크리트 구조물의 설계특성 및 내구성 확보

Design and Durability of Concrete Structure in Nuclear Power Plant

문일환\*  
Il-Hwan Moon김태영\*\*  
Tae-Young Kim정제안\*\*\*  
Jea-An Jeong

## 1. 머리말

1978년 고리 1호기 원자력발전소(이하 원전)가 국내 최초로 상업운전을 시작한 이래 30여년이 지나는 동안 원전 구조물의 설계 기술은 비약적인 발전을 거듭하여 왔으며 이제는 기술자립 단계를 넘어 설계기술을 해외에 수출하는 단계에 이르렀다. 이와 같은 비약적인 발전의 결과는 미국의 신형원전인 AP1000 원전 설계기술 지원 사업 및 아랍에미리트(이하 UAE) 원전 수주로 이어지면서 명실상부한 원전 수출국의 대열에 참여하는 계기가 되었다.

미국내의 25기 원전 추가 건설계획을 포함하여 전 세계적으로 약 400기의 원전 건설이 계획된 상황에서 앞선 설계기술의 확보와 해외 원전의 수출경험은 원전 수주의 잠재적인 경쟁력이라 할 수 있으며 국가의 백년대계를 내다보고 원전 설계기술의 자립이라는 국가적인 차원의 목표를 설정하여 추진해 왔던 원전분야 원로들의 노력의 결실이라 할 수 있다.

원전 구조물은 원자력 안전관련 구조물과 원자력 비안전관련 구조물로 구분하여 설계를 수행하고 있다는 점이 일반 플랜트 구조설계와의 차이점이다. 그리고 원전 내에 건설되는 모든 원자력 안전관련 구조물은 콘크리트 구조를 채택하고 있다는 것이 또 하나의 특성이라 할 수 있다. 이것은 원자력 안전관련 구조물의 경우 내압발생 사고나 지진과 같은 원전 특유의 극심한 하중 조건에 대하여 구조적 안전성을 유지해야 하는 특성에 기인하는 것으로 판단된다.

대표적인 안전관련 콘크리트 구조물로는 원자로건물, 보조건물, 열교환기건물 및 필수냉각수건물 등이 해당된다. 이런 구조물들의 설계를 위해서는 일반 플랜트 구조물의 설계와는 차별화된 별도의 설계기준이 적용되며, 내압발생 사고를 포함한 발생 가능한 모든 사고에 대하여 안전성이 확보될 수 있도록 사고해

석 및 보강설계가 이루어지고 있다. 또한 장기 내구성의 확보를 위한 재료 및 구조물의 성능 점검, 그리고 공사기간의 단축을 위한 다양한 연구와 적용이 이루어지고 있다.

여기서는 UAE 원전 수출 노형인 APR1400 원전의 원자로 건물과 보조건물의 기능, 구조적인 특성, 그리고 콘크리트 구조의 설계특성을 중심으로 안전성 확보, 내구성 설계 및 공기단축 등의 내용을 요약하여 소개하고자 한다.

## 2. 원자로건물 설계

원자로건물은 주기기(NSSS)를 포함하고 있는 구조물로 내·외부 사고에 의해 발생할 수 있는 방사성물질의 방호를 위한 최후의 보루로서 역할을 수행하게 된다. 정상가동 중에는 냉각재 상실사고(LOCA) 및 지진 등의 설계기준사고(DBA) 발생에 대해 구조물 자체의 건전성 확보는 물론 주기기를 포함하여 안전관련 계통 및 기기를 안전하게 보호하는 역할을 수행한다. 그리고 중대사고(severe accident) 및 항공기 충돌과 같은 설계기준 초과사고에 대해서도 충분한 안전성을 확보할 수 있도록 보강설계가 이루어지고 있으므로 모든 예상할 수 있는 사고에 대해 내부 시스템의 안전성이 유지될 수 있도록 설계되고 있다. 원자로건물의 주요 기능을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 다중방호개념에 의한 방사성물질의 외부 누출차단
- (2) 내압발생사고로 인한 고압 및 고온에서의 구조적 건전성 확보
- (3) 지진(SSE & OBE) 발생에 대한 구조적 건전성 확보
- (4) 내·외부의 비산물(missiles)로부터 안전관련 기기 및 계통의 보호
- (5) Polar Crane 지지
- (6) 원자로, 증기발생기, 원자로냉각재펌프, 가압기 등 주기기의 지지
- (7) 전기, 계측, 공기조화 설비, 배관 등의 지지

\* 정회원, 한국전력기술(주) (원)토목건축기술그룹 책임기술원  
youmoon@kepco-enc.com

\*\* 한국전력기술(주) 상무

\*\*\* 한국전력기술(주) 부장

<그림 1>에 나타난 것과 같이 원자로건물의 외벽은 원통형 벽체, 반구형 돔(dome) 및 기초 슬래브로 구성된 압력경계 콘크리트 구조 부분과 그 내부 표면에 설치되는 라이너 플레이트로 구성된다. 그리고 압력경계에 속하지 않는 건물 내부는 주기의 지지 및 차폐를 위한 1, 2차 콘크리트 차폐벽과 슬래브로 구성된다. 압력경계에 속하는 외벽 및 기초슬래브의 설계는 안전관련 설계기준이면서 동시에 압력경계에만 적용될 수 있는 KEPIC SNB(혹은 ASME Section III, Division 2, Subsection CC) 설계기준에 따라 설계가 이루어지며, 압력경계에 속하지 않는 내부 콘크리트 구조물은 KEPIC SNC(혹은 ACI 349)에 따라 설계가 이루어진다. 이와 같은 설계기준들은 일반 산업시설에 적용되는 설계기준과는 달리 하중의 분류를 정상하중, 심한 환경하중, 극심한 환경하중 및 비정상하중으로 분류하여 하중조합에 반영하고 있는 것이 큰 특징이다. 따라서 원자로건물의 설계를 위해서는 다양한 하중을 아우를 수 있는 구조해석 모델의 작성 및 해석이 필요하게 된다.

원자로건물의 형태는 원통형 강재 격납용기, 구형 강재 격납용기, 원통형 철근콘크리트 원자로건물 및 프리스트레스트 콘크리트 원자로건물 등으로 분류할 수 있다. 특히 원전이 최초 건설되기 시작할 무렵의 콘크리트 원자로건물은 철근콘크리트 구조로 외벽을 구성하고 내부 표면의 두께가 6~13mm에 이르는 강재 라이너 플레이트를 설치하는 형식으로 건설되었다. 그러나 자오선방향, 원주방향, 대각선방향으로 주철근을 복잡하게 배근해야 하는 문제와 동일한 용량의 프리스트레스트 콘크리트 원자로건물에 비해 외벽의 두께가 300~600mm까지 두꺼워져야 하는 문제점이 나타났다. 무엇보다도 설계내압에 의한 콘크리트 균열 발생을 방지할 수 있는 방안이 존재하지 않는 문제점으로 인하여 이후에 건설된 모든 원자로건물은 프리스트레스트 콘크리트로 대체되어 있는 상황이다. 국내 원전의 경우에도 압력경계를 갖는 모든 콘크리트 원자로건물은 프리스트레스트 콘크리트로 건설되었다.

일반 구조물과는 달리 실린더 벽과 반구형 돔의 형상을 갖는 원자로건물은 대표적인 막(membrane) 응력 발생 구조이다. 비록 실린더 벽의 두께가 4ft에 이르는 비교적 두꺼운 구조물이

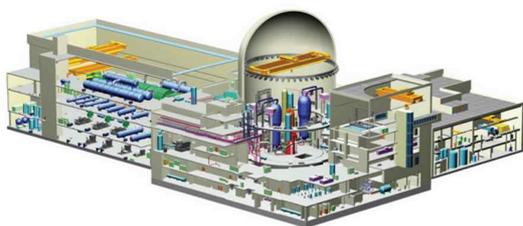


그림 1. APR1400 원전 원자로건물 및 보조건물

기는 하나 전반적으로 막 거동 특성을 나타내며 기초슬래브-실린더 벽 접합부와 같은 부분적으로 응력흐름이 단절되는 부위에서는 휨과 막응력이 동시에 발생하는 특성을 나타낸다.

원자로건물은 축대칭 거동을 하는 대표적인 구조물로 풍하중과 프리스트레스 응력을 제외한 대부분의 하중이 축대칭 하중으로 작용하기 때문에 탄성범위 내에서의 일반 단면에 대한 구조해석은 <그림 2-(a)>에 나타난 축대칭해석모델을 이용하여 수행할 수 있다. 풍하중의 경우에도 푸리에(Fourier) 식에 따라 축하중으로 변환할 경우 축대칭모델을 이용한 해석이 가능하게 된다. 그러나 프리스트레스 긴장력 도입에 따른 부재력 산정을 위해서는 텐션의 배치를 반영한 3차원 1/4모델이나 전체모델로 구성하여 해석을 수행한다. 그리고 온도하중, 지진하중, 배관 파단하중과 개구부 주변의 국부해석을 위해서는 3차원 전체모델이 이용된다.

원자로건물의 중요한 기능은 안전관련 기기 등의 시스템을 보호하는 것으로 지진이나 외부 충격하중이 작용하게 되면 구조물에 부착된 기기도 동적 거동의 영향을 받게 된다. 따라서 원자로건물의 지진해석 결과로 나타나는 원자로건물 내부 중요 부위에서의 동적 응답은 기기의 내진 검증이나 내진설계에 직접 활용된다. 따라서 원전 구조물의 내진설계시에는 <그림 3>과 같은 집중질량모델을 작성하여 해석을 수행하고 그 결과를 기기설계나

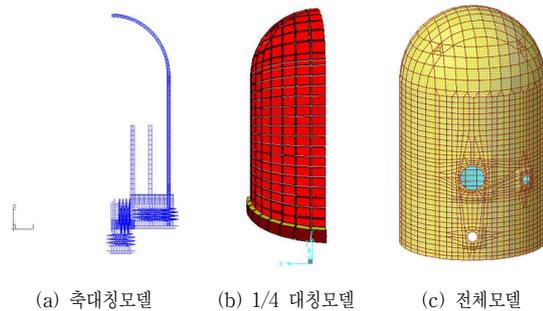


그림 2. 원자로건물 설계용 구조해석 모델

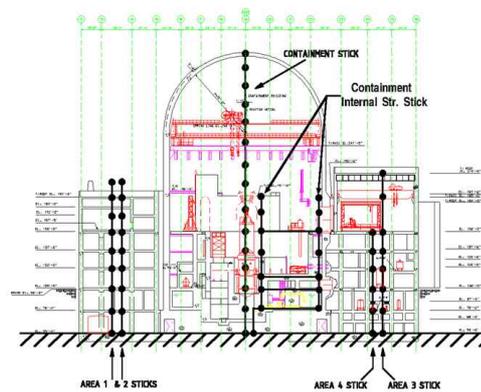


그림 3. Beam-Stick 지진해석모델

배관설계를 위한 입력으로 제공하게 된다. 이때 사용되는 입력은 Regulatory Guide 1.60의 표준응답스펙트럼을 적용하는 것이 일반적이나 APRI400 원전의 경우 표준응답스펙트럼보다 고진동수 영역을 보강한 <그림 4>와 같은 보수적인 표준응답스펙트럼(CMS+1)이 적용되었다. 그리고 시간이력해석을 위하여 2개의 수평방향과 1개의 수직방향 인공진진시간이력을 생성하여 사용하게 되는데 이것은 한국전력기술(주)의 자체기술로 개발된 'Optime' 프로그램을 이용하여 파워스펙트럼밀도함수(PSDF) 및 각 방향별 통계적 독립성 유지 등의 기준에 맞춰 작성된다.

<그림 5>는 시간이력해석을 통하여 생성된 응답스펙트럼을 Regulatory Guide 1.122 혹은 ASME Code Case N411-1에 따라 가공한 결과물을 나타낸 것이다. 일반적으로 응답스펙트럼은 기기나 구조물의 내진설계에 적용되며, PVRC Damping 스펙트럼은 배관계통의 설계에 활용된다. 그 밖에 '포괄응답스펙트럼'을 작성하여 구조물의 여러 곳에 동시에 놓이는 부계통의 내진설계에 적용된다.

원자로건물은 위에서 기술한 탄성해석 및 설계 이외에도 설계기준초과사고에 대한 안전성이 확보되어야 한다. 원자로건물에서 발생할 수 있는 설계기준 초과사고에 대해서는 검증된 비선형해석기술을 적용하여 안전성을 평가하고, 그 결과가 안전기준

을 만족시키지 못할 경우 구조물을 보강하도록 하는 조치가 이루어진다. 대표적인 설계기준 초과사고는 내압과 동시에 온도가 증가하는 중대사고를 들 수 있다.

중대사고에 대한 안전성 평가를 위하여 원자로건물은 <그림 6>과 같은 비교적 정밀한 해석모델로 구축되며 검증된 재료모델이 해석에 적용된다. 일반적으로 해석모델이나 재료특성 등에는 불확실성이 존재하며, 그 불확실성이 구조물의 안전성 평가 결과에 영향을 미치게 된다. 따라서 국내 기술진은 불확실성을 최소화하기 위하여 해외에서 수행되는 원자로건물 관련 시험 및 시뮬레이션 프로젝트에 공동연구자로 적극 참여하고 있으며, 연구결과로 검증된 기술을 평가에 활용하는 방법으로 평가의 정밀도를 높이고 있다.

<그림 7>은 경수로형(PWR) 원자로건물의 내압파괴시험 전 해석결과와 시험결과를 비교하여 나타낸 것으로 한국전력기술(주)의 해석결과가 실험과 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 내압 시험 이외에도 실험 크기의 대형 전단벽 해석기술 표준화를 위한 국제공동연구, 중수로형(PHWR) 원자로건물의 내압파괴시험 및 해석 국제공동연구 등에도 참여하여 국내의 우수한 기술력을 대외에 알리고 있다.

### 3. 보조건물 설계

APRI400 원전에서는 원자로건물과 보조건물이 하나의 공동기초 위에 건설된다. 두 구조물의 상부구조 사이에는 2 inch의 갭(gap)을 가지면서 보조건물이 원자로건물을 감싸는 'Wrap Around' 형태로 배치된다. 보조건물은 지하 2개층과 지상 7개층으로 구성되는 철근콘크리트 구조물로서 수직하중을 지지하기 위한 뼈대구조와 횡하중을 지지하기 위한 전단벽-슬래브구조로 구성되어 있다. 또한 칸막이벽을 전단벽과 연결하여 시공성의 향상과 응력분배를 통해 구조적인 안전성을 확보하도록 고려하고 있다. 특히 APRI400 보조건물에서는 1, 2차 보조건물을 하나로 통합하고, 핵연료저장조와 비상디젤발전기실을 보조건물

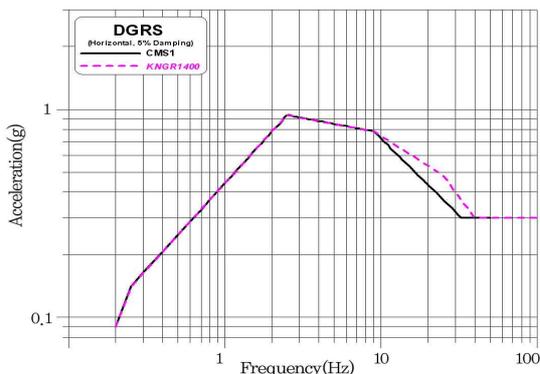
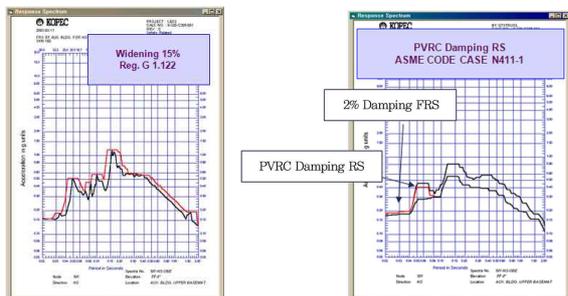


그림 4. APRI400 설계응답 스펙트럼



(a) 응답스펙트럼 (b) PVRC 응답스펙트럼

그림 5. 시간이력해석결과로 나타난 응답스펙트럼

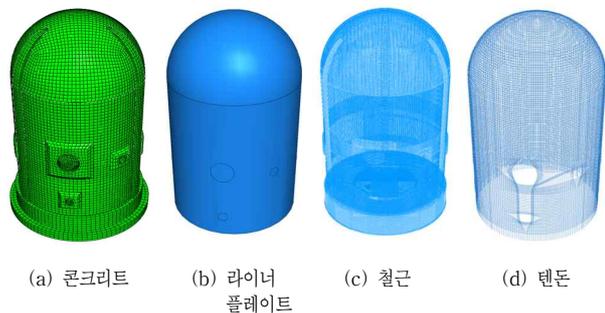


그림 6. 원자로건물의 안전성 평가용 구조해석모델

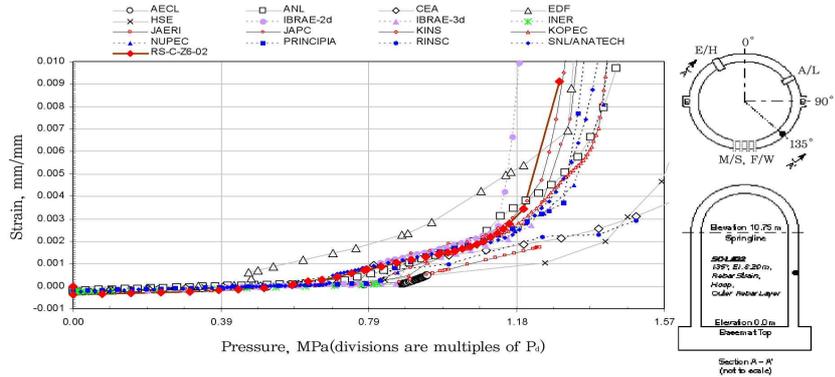


그림 7. 원자로건물 1/4 축소모형 및 해석결과 비교

내에 위치시키는 배치상의 개선을 이루었다.

<그림 8>에 나타난 것과 같이 보조건물은 원자로건물과 연계하여 원자로의 안전정지나 코어의 냉각기능을 유지할 수 있도록 보조하는 많은 안전관련 시스템이 건물 내에 존재한다. 따라서 발전소의 운전을 전반적으로 제어하는 각종 시스템 및 설비들이 배치되어 있으므로 이러한 설비들의 충분한 안전성이 유지되도록 설계된다.

위와 같은 이유로 보조건물의 설계에서는 원자로건물과 더불어 원자력 안전관련 철근콘크리트 구조물의 내진범주 1급 설계기준이 적용된다. APR1400 보조건물의 경우에는 원자로건물과 마찬가지로 0.3g의 지반가속도가 지진하중으로 고려되며, 127.5mph의 설계풍속이 하중으로 적용되고 있다. 이와 같은 횡하중에 대해서는 전단벽-슬래브의 격막작용(diaphragm action)에 의하여 지지되도록 설계한다. 층 슬래브는 횡방향 하중을 내·외부 전단벽에 전달시키기 위한 견고한 격막으로 거동하도록 설계되며 전단벽을 통해 건물기초에 전달된다. 그리고 구조물의 설계는 KEPIC SNC(혹은 ACI 349)를 적용하여 수행하고 있으며, <그림 9>와 같은 3차원 전체모델을 이용하여 구조해석을 수행한다. 그리고 지진해석은 <그림 3>에 나타난 'Beam-Stick 모델'을 이용하여 수행하며, 수직방향의 해석모델과 수평방향의 모델을 별도로 구성하여 해석을 수행한다.



그림 8. 원자로건물과 보조건물 시스템

#### 4. 내구성 및 구조성능 확보

원전 구조물의 설계수명 증가에 따른 콘크리트 구조물의 장기 내구성을 확보하기 위하여 콘크리트의 설계기준코드 KEPIC SNC(ACI 349-06)에 제시된 노출환경조건에서의 콘크리트강도보다 큰 강도로 설계가 이루어 졌다. 이것은 UAE 원전의 경우와 같이 심한 노출환경을 반영하기 위해서도 필요한 조치라 할 수 있으며, 안전관련 콘크리트 구조물은 기본적으로 5,000 psi(원자로건물 6,000 psi) 이상을 적용하고 있다. 또한 콘크리트의 설계강도 재령일을 28일에서 91일로 변경시켜 단위시멘트량 감소에 따른 수화 발열량을 감소시키는 방법으로 초기균열을 억제하도록 하였다. 그리고 플라이 애쉬를 적용하여 콘크리트 타설 후 초기의 강도발현을 지연시켜 균열을 억제시킴과 동시에 염화물 및 황산염 등의 외부노출환경에서 장기 내구성이 확보되도록 하였다. 그리고 플라이 애쉬 혼합량은 설계기준재령인 91일에 설계강도가 발현되도록 함으로써 결정되었다. 특히 고온 다습한 대기환경, 염화물 및 황산염의 농도가 국내 환경보다 월등히 높은 UAE 원전의 경우에는 플라이 애쉬 대신에 고로 슬래그와 실리카 폼을 사용하여 내구성을 확보하도록 설계에 반영하고 있다.

APR14000 원전의 장기 내구성을 확보하기 위하여 다양한

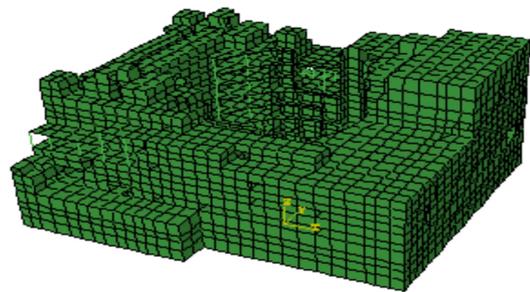


그림 9. 보조건물 구조해석모델

재료측면의 검토 및 반영이 이루어졌다. 재료적인 측면에서 주요 고려사항은 수화열 기준치 저감, 시멘트 종류 변경 및 혼화제 등의 활용이며, 그것을 구체적으로 정리하면 다음과 같다.

매스 콘크리트 등의 구조물에 발생하는 수화열에 의한 균열을 저감시키기 위하여 원전 콘크리트 구조물에 적용하는 시멘트 규격인 ASTM C150의 물리, 화학적 요건들을 만족시킴은 물론 수화열량 감소를 위해 수화열 기준치<표 1>를 강화하여 아래와 같이 반영하고 있다.

기존의 원전 안전관련 구조물의 콘크리트 배합에는 5종(V종) 시멘트를 사용하였으나 내염해성, 내부식성, 내투수성 등의 내구성 증대 및 수화열 감소를 위하여 플라이 애쉬, 고로 슬래그 및 실리카 폼이 적용된 1종(I종) 시멘트로 변경하였다. 이와 같은 혼화제는 실험 및 이론적 연구결과를 바탕으로 사용량이 결정되었으며, 결과적으로 콘크리트의 품질향상과 콘크리트 타설 초기에 발생하는 균열의 억제효과가 나타났다. 또한 고성능 감수제와 유동화 콘크리트를 활용하여 단위시멘트량 저감을 통한 수화열 감소 및 단위수량의 감소를 통한 건조수축의 감소를 꾀하고 있다.

상기와 같이 원전 구조물의 경우 장기 내구성 확보를 위한 다양한 방안의 적용결과로 해수와 접하는 취배수 콘크리트 구조물을 제외한 안전관련 구조물에서의 열화현상은 발견되지 않고 있다. 이것은 국내뿐만 아니라 해외의 원전에서도 동일하게 나타나는 특성이다.

특히 원자로건물은 돔 부분의 타설이 완료된 후 설계강도가 발현된 시점에서 프리스트레스를 도입하고, KEPIC SNB 6000에 따라 가동 전에 설계내압 60 psig의 115%인 시험내압을 가압하여 구조물의 구조성능을 평가한다. 또한 가동 중에는 정기적으로 사용중 검사를 수행하여 구조물의 열화는 물론 비부착 텐돈의 긴장력 손실을 관리한다. 가동전 검사나 가동중 검사는 설계기준에 따라 수행될 뿐만 아니라 절차서 및 시방서에 따라 철저히 관리된다.

### 5. 건설공기 단축기술 및 적용

원전 수출의 경쟁시대를 맞아 원전 설계 및 건설기술 보유국들은 경쟁적으로 건설공기 단축방안을 제시하고 있다. 국내 원자력산업계에서도 원전 건설과정에서 획득한 경험과 지식을 바탕으로 건설공기의 점진적인 단축을 이루어 왔다. 그러나 이런 노력만으로는 획기적인 건설공기의 단축을 기대하기 어려울 것으로 판단되며, 속

표 1. 시멘트 수화열 기준치

항목	ASTM C150 기준	APR1400
최대 수화열량	없음	7일 : 70 cal/g
적용 근거	-	중용열 시멘트인 2종시멘트의 규정

려된 건설인력이 부족한 해외 원전의 건설 등에서는 현장중심의 작업을 통한 건설공기 단축에 한계가 나타날 것으로 판단된다.

현장중심의 작업에서 건설공기 단축의 대표적인 시도는 원자로건물 텐돈의 긴장작업 순서변경이라 할 수 있다. 이것은 해외 기술진에 의하여 결정된 순서에 따라 관념적으로 수행해 오던 기존의 텐돈 긴장작업을 상세한 기술검토 및 해석적인 평가를 통해 변경하여 적용하고자 하는 것으로 단일 공정인 텐돈의 긴장작업 기간을 획기적으로 줄일 수 있는 결과를 가져왔다.

국내 원자력산업계는 현장중심의 작업의 한계를 벗어나 구조물을 모듈화하거나 더 발전시켜 배관 및 기기를 동시에 구조모듈에 부착 설치하는 복합 모듈화공법을 개발하였으며, 이미 원전에 적용하는 단계에 도달해 있다. 이것은 국내 원자력산업계가 건설공기 단축을 통한 경제성 향상을 위하여 오래 전부터 준비해 온 결실이라 할 수 있다. 그 인식의 출발은 2002년 구조물과 계통설비의 모듈화공법에 대한 타당성 연구를 통해 구체화 되었다. 이 연구를 통해 원전 복합모듈화 공법의 유효성을 확인하였으며, 선행연구로써 SC(steel plate concrete)구조를 이용한 원전 구조물 모듈화공법(SC구조) 기술개발을 수행하여 SC구조에 관한 독자적인 기술기준 KEPIC SNG를 개발하였다. KEPIC SNG의 개발을 위하여 내진성능 및 구조성능이 실험적으로 검증되었을 뿐만 아니라 설계기준을 작성하기 위한 다양한 구조실험과 이론적 검토가 이루어 졌다. 또한 SC구조를 이용한 구조모듈 기술을 복합모듈 기술로 발전시키는 연구를 수행하여 원전 구조물 적용을 위한 철저한 준비를 하였다. 모듈화 기술의 원전 적용성을 검증하기 위하여 원전 현장에 실물크기 시험체를 제작하여 시공하였다. 이 시험을 통해 제작, 설치 및 시공기술을 검증하였으며, 검증된 기술과 개발한 설계기준에 기초하여 원전 내의 일반 콘크리트 구조물인 AAC DG 건물을 SC구조로 설계하고 있다. 그리고 이 기술은 차기 건설되는 원전의 원자로건물 내부구조물, 보조건물 및 복합건물 등으로 확대 적용될 계획이다.

### 6. 설계개선 및 검토항목

극심한 환경하중 등을 포함하여 원전 고유의 특수하중들이 반영되어 설계된 원전 콘크리트 구조물은 많은 철근보강과 상대적으로 긴 공사기간을 필요로 하게 된다. 그리고 일반 산업시설과는 달리 원전 구조물에는 다수의 대형 관통부 및 문힘 배관이 존재하기 때문에 복잡하게 철근이 배근되는 부위에서 상호 간섭되는 문제가 발생하고 있다. 따라서 공사기간의 단축과 간섭문제를 해결하기 위하여 철근량을 저감시키는 구체적인 검토가 필요할 것으로 판단된다. 원전 콘크리트 구조물에 요구되는 성능 기준을 만족시키는 고강도 혹은 고성능의 콘크리트 및 철근을 도입하는 것이 하나의 방안이 될 수 있다.

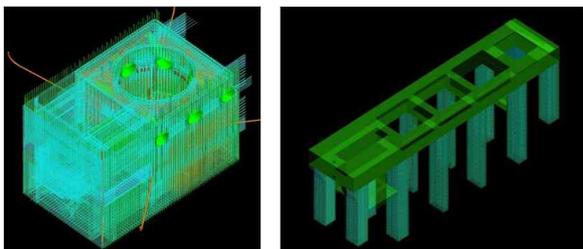
일부 구역에서의 철근 밀집 및 철근-배관의 간섭, 혹은 돔 부분과 같은 곡률부위에서의 철근 배근 시의 간섭문제를 해결하기 위해서는 3차원 모델의 구축을 통해 시공 시뮬레이션을 수행할 필요가 있는 것으로 판단된다. <그림 10>은 한국전력기술(주)가 개발하여 적용한 3차원 철근모델 및 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

세계무역센터 항공기 충돌사고 이후에 외부 비산물의 범위에 대형 민항기가 포함되었으며, 관련 기준이 UAE 원전 설계에 영향을 미치고 있다. 항공기 충돌 평가 기준은 10CFR50.150에 제시되었으며, 평가방법은 NEI 07-13에 제시되어 있다. NEI 07-13에 따를 경우 항공기가 충돌할 때에 강구조물은 역할을 못하는 것으로 규정하고 있으며, 철근콘크리트 구조물에 대한 평가방법 및 대비설계 방법을 제시하고 있다.

앞에서 기술한 것과 같이 항공기 충돌로 인한 구조물의 파괴와 내부 시스템 손상의 영향이 문제가 되는 구조물은 안전관련 내진 1등급 구조물들이다. 그리고 그 중심에는 사용 후 핵연료 저장조, 주조정실 및 다수의 안전관련 계통이 설치되어 있는 보조건물과 주기가 설치된 원자로건물이 있다.

원자로건물은 항공기 충돌로부터 주기를 보호하여야 하므로 직접 타격되는 외벽은 관통(perforation)이 발생하지 않도록 보강할 필요가 있다. 그러나 원자로건물은 내부표면에 설치된 라이너 플레이트 및 프리스트레스, 그리고 원통형의 구조형상으로 인하여 약간의 두께 보강만으로도 충분한 안전성을 확보할 수 있는 것으로 평가된다. 그러나 보조건물의 경우에는 편평한 철근콘크리트 벽으로 구성되어 있으므로 상대적으로 항공기 충돌에 취약할 수 있다. 즉, 항공기 엔진의 충돌로 인한 편칭전단 파괴나 항공기 동체충돌로 인한 면의 휨에 의한 손상의 범위가 클 수 있으므로 관통이나 손상이 발생하지 않도록 철근콘크리트 외벽을 강화하거나 내부 시스템의 보강을 통하여 안전정지와 냉각 기능의 유지가 가능하도록 시스템 보강 설계가 필요하다.

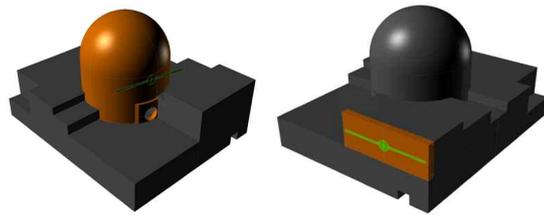
<그림 11>은 원자로건물의 항공기 충돌위치와 보조건물의 항공기 충돌위치를 각각 나타낸 것으로 한국전력기술(주)에서는 대형 민항기의 충돌에 대한 콘크리트 구조물의 평가 및 보강설계를 수행 중에 있다. 현재 단일벽(single shell) 방호설계 개념



(a) 원자로건물 1차 차폐벽

(b) 터빈 페데스탈

그림 10. 3차원 철근모델 및 시공 시뮬레이션



(a) 원자로건물

(b) 보조건물 사용후 핵연료저장조 벽

그림 11. 항공기 충돌 해석모델 및 충돌 위치

을 도입하여 외벽의 강화를 통한 내부시스템 보호가 가능하도록 항공기 충돌 대비설계를 수행하고 있다.

## 7. 맺음말

원전에서 안전관련 내진 1등급 구조물은 전량 콘크리트구조를 채택하고 있으며, 원전 고유의 하중특성을 반영하여 설계를 수행함으로써 충분한 안전성을 확보하고 있다. 더불어 검증된 안전성 평가기술을 적용하여 발생가능한 모든 내·외부 사고에 대하여 정밀평가 및 대비설계를 수행함으로써 안전성을 더욱 증진시키고 있다. 또한 국내 원전설계분야에서는 새롭게 추가되는 신규의 요건에 대해서도 신속한 대응을 통하여 해결하고 있다. 대표적인 예가 항공기 충돌 평가 및 대비설계라 할 수 있다.

또한 원전 콘크리트 구조물의 장기 내구성을 확보하기 위한 배합상의 고려와 원전 운영기간 중의 열화관리가 철차에 따라 철저히 이루어지고 있다. 그리고 상기의 안전성 확보와 더불어 경제성을 향상시키고자 하는 다양한 연구와 설계기술 개발이 이루어져 왔다. 구조적인 안전성의 확보가 원전 구조물의 필수사항이라고 한다면 공사기간의 단축은 경제성을 향상시키는 개발 필요항목이다. 국내의 원전산업계에서는 공기단축을 위한 다양한 노력을 하고 있으며, SC(steel plate concrete) 구조의 설계기술 개발과 포스트텐셔닝 텐돈의 긴장순서 변경 등의 연구가 그 대표적인 예라 할 수 있다. 그러나 다양한 연구에도 불구하고 구조물의 건설 경제성의 향상은 지속적으로 검토되어야 할 분야이며, 이것이 해외원전 수주를 위한 중요한 경쟁력이 되어야 한다고 판단된다.

국내 원전 구조물 설계분야의 콘크리트 설계기술은 이미 독자적인 기술로 완성단계에 이르렀다. 이제부터는 경제성을 향상시키는 다양한 연구와 검토가 수행되어야 할 것으로 판단되며, 이것은 원자력산업계와 학연이 함께 노력하여 이루어야 할 기술 분야라고 판단된다. 한국전력기술(주)는 개발된 기술을 검증하고 실 설계에 적용하는 분야에서 역할을 수행하여 보다 구체적이고 실용적인 기술개발이 이루어질 수 있도록 노력과 역할을 수행하고자 한다. □

담당 편집위원 :

권기주(한국전력공사) kyeunkjoo@kepco.co.kr