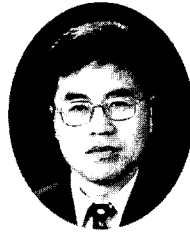


특집

원자력발전소 설계 및 기술 동향

원자력발전소 구조물의 안전성 확보를 위한 설계 기술

- Structural Considerations of Safety in Nuclear Power Facilities -



이남호*



최기원*

1. 서론

원자력발전소(이하 '원전') 구조물은 사고시 방사능 물질의 누출 차단 기능을 하거나 혹은 기기 및 기기들을 연결하는 각종 계통을 지지하고 보호하는 역할을 담당하며 실질적으로 기기와 계통을 제외한 모든 부분이 구조물에 속한다고 할 수 있다. 원전 플랜트 설계에서 구조물 설계 부문은 다른 부문과 달리 원전 건설의 초기 작업인 지반 설계에서 최종 시운전 단계까지 참여해야 하며, 설계 및 시공상의 오류 발생시 외형상 드러나기 쉬운 물리적 부문이다.

또한, 대부분의 경우 형상이 거대하여 일단 시공이 되면 설계 변경을 통한 수정이 어려우며 육안으로는 설계 요건에 따른 시공 여부의 평가가 용이하지 않다. 따라서, 원전 구조물은 설계 단계에서부터 운전성·보수성, 신뢰성·유용성, 안전성 및 경제성·건설성 등이 심도 있게 고려되어야 하며, 특히 설계 단계별로

각종 특수 구조 해석을 수행하여 원전 구조물의 설계에 대한 안전성 확보가 최우선적으로 고려되고 있다.

원자로 격납 건물에 포함한 안전 관련 구조물의 경우에는 개념 설계 단계에서부터 상기의 각 사항별로 전문 기술진에 의해 심도 있는 연구·분석 과정을 통하여 결정된다. 예를 들어, 안전성 확보를 위해 설계시 다중 방어 개념, 심층 방어 개념, 방사선 방어 개념 등을 적용하고 있으며 특히 원자로 격납 건물의 경우 설계 기준 사고 및 온도의 결정, 내진 안전성, 수소 연소 등을 고려한 충분한 자유 체적의 결정 및 이를 위한 예비 구조 해석 등 다양한 변수 연구를 선행하고 있다.

한편, 설계시 안전성을 제도적으로 확보하기 위해 일반 산업 기준보다 엄격한 원전기술기준을 적용하도록 요구하고 있으며 완료된 설계 결과물은 안전 규제의 일환인 인허가 심사를 통해 검증된다. 원전기술기준은 국내의 경우 원자력법 및 시행령, 시행규칙, 과기처 장관 고시, 기타 원자력 사업 관련 법령 등으로 구성되어 있으며, 구조물의 상세 설계와 관련된 사항은 전력기술기준(KEPIC) 및 미국의 기준을 참조토록

* 한국전력기술(주) 토목건축기술처 부장

하고 있다. 미국의 경우에는 미연방규정(CFR), 규제 지침서(Reg. Guide), 안전심사지침(SRP), ANSI, ASME, ASTM, ACI 등 각 전문 분야에서 개발된 기준을 확장, 보완하여 적용하고 있다.

본고에서는 원전 구조물의 특성을 설계 측면에서 소개하고 설계 단계별 개괄적인 고찰 및 원전 설계시 적용하고 있는 원전기술기준과 원전의 안전성 확보를 위한 주요 설계 기술을 소개함으로써 향후 국내 혹은 해외에서 건설될 원전 구조물의 설계 방향을 제시하고자 한다.

2. 원전 구조물 설계 절차

원전 구조물 설계는 다음 3단계로 대별되는 개념 설계, 기본 설계 및 상세 설계 과정을 통해 다양한 설계 요건을 만족시킨다.

개념 설계

발전소 부지 선정에서 주 기기 공급자 선정시까지 수행되는 설계 업무로서, 설계 기준, 발주자의 요구 사항, 각종 규제 지침 및 규격 기준에 따른 설계 기준서 작성, 원전기술기준 요건을 만족하면서 최적의 설계를 위한 주요 구조물의 배치, 형상 및 크기 등이 결정된다. 특히 격납 건물은 개념 설계 단계에서부터 안전성 확보를 위해 다중 방어 개념, 다원성 개념, 심층 방어 개념, 독립적 개념, 방사선 방호 개념 등을 적용하고 있으며 설계 기준 사고 및 설계 사고 압력 결정, 내진 안전성 및 수소 연소 등을 고려한 자유 체적의 결정 및 이를 위한 예비 구조 해석 및 설계가 수행된다.

기본 설계

기본 설계는 주 기기 공급자 선정 후부터 기기 구매 및 건설에 착수하기 전까지 수행되는 설계 업무로서, 예비 안전성 분석 보고서 및 환경 영향 평가 보고서와 관련한 각 계통, 기기 및 안전 관련 구조물의 설계 등을 포함한다. 특히 구조 설계 분야의 경우 이 단계에서 내진 해석 및 사고 해석과 같은 안전성에 관련된 구조물의 정밀 해석을 수행하여 기기 설계의 입력 자료인 층 응답 스펙트럼을 생산하고, 설계 요건에 적합한 기자재 구매를 위한 기술 사양서 등을 확정하여 발주자에게 제공한다.

상세 설계

상세 설계는 기본 설계 후 발전소 건설 준공시까지 수행되는 설계 업무로서 구조물 및 계통의 상세 설계, 기기 구매, 건설 관리 및 시운전 등이 있다. 특히 시공 자료로 현장에 제공하게 될 구조물의 상세 도면 작성, 기술 사양서 적용, 지지 구조물과 같은 세부 항목의 설계 등이 상세 설계에 포함된다. 이 단계에서 현장설계요청서(FCR), 불일치보고서(NCR) 및 시운전 설계개선요구서(SFR) 형태의 현장 설계 변경안이 검토되며 각종 설계 요건 및 현장 요건 등을 고려한 가장 적합한 최종 설계 방안이 결정된다.

3. 원전 구조물 특성

안전성, 운전성, 보수성, 방사선 피폭 저감 등의 개념을 개선 적용한 한국표준형원전을 기준한 원전의 주요 구조물의 특성을 소개하면 다음과 같다.

원자로 격납 건물

반구형 돔과 원통형 벽체로 구성된 P.S 콘크리트 구조물로 벽체 내면에는 밀폐 기능을 수행할 수 있도록 강제 라이너로 피복되어 있으며 가상 사고시 내압 및 열 하중에 저항할 수 있도록 설계된다. 격납 건물의 반경은 약 22m, 벽 두께는 1.2m, 원통형 벽체 높이는 약 45m, 강제 라이너 두께는 6mm, 돔 두께는 1.1m이다. 원활한 운전 보수 유지를 위해 1개의 기기 반입구 및 2개의 운전원 출입구가 설치되어 있다.

보조 건물

격납 건물을 반경도 에워싼 형태로서 전형적인 콘크리트 전단벽 구조로 1차 보조 건물과 2차 보조 건물로 분리시켜 안전 관련 기기는 1차 보조 건물에, 비 안전 관련 기기는 2차 보조 건물에 배치하도록 설계되어 있으며 특히 운전·보수 공간 확보에 주안점을 두고 있다.

터빈 건물

터빈 건물은 터빈 비산물 사고를 고려하여 격납 건물에 대해 방사형으로 배치하였으며 지층은 콘크리트 구조물로 지상층은 철골로 구성되어 있다. 또한 운전 보수성 향상을 위해 건물 측면에 히터베이를 설치하였다.

핵연료 건물

핵연료 건물은 사용 후 핵연료 및 신연료의 이송 및 취급이 용이하도록 원자로 격납 건물에 인접되게 배치되어 있다.

4. 원전 구조물 설계 적용 기준

원전 구조물은 일반 구조와 마찬가지로 사용된 구조 재료에 따라 크게 콘크리트 구조와 강 구조로 분류되며, 원전 구조물 설계 기준도 이에 따라 개발되어 왔다. 국내에서 원전 구조물 설계시 적용하고 있는 기준으로는 미국의 관련 기준(ASME, ACI 및 AISC)을 근간으로 해서 만들어진 전력산업기술기준(KEPIC)이 있으며, 현재 국내 원전의 경우 구조물 설계 및 시공시 KEPIC과 미국의 기준을 병행하여 적용하고 있다.

국내 최초의 원전인 고리 1호기 설계 당시에는 미국도 ASME 코드에 원자로 압력 용기에 대한 기준이 정립되지 않아 일반 압력 용기에 대한 기준을 적용하여 설계된 바 있으며, 콘크리트 구조 설계 기준도 원전 구조물에 대한 기준이 정립되지 않아 일반 콘크리트 기준을 적용하여 설계되었다. 그 이후 1966년에 원자로 격납 건물에 대한 설계 기준을 미국기계학회와 콘크리트학회가 개발하기 시작하여 1971년에 콘크리트 원자로 격납 건물 설계 기준인 ASME-CC 코드를 최초로 제정하였고 지금까지 지속적인 개정을 거쳐 현재의 코드에 이르고 있다. 한편, 보조 건물과 같은 원전 안전 관련 콘크리트 구조물은 일반 콘크리트 구조 설계 기준인 ACI-318 대신 원전 구조물의 특수성을 고려한 ACI-349를 적용하고 있으며, 안전 관련 강구조의 경우도 AISC-ASD 대신 AISC-N690을 적용하여 설계되고 있다. 원전 구조물의 특성별로 적용되고 있는 국내 및 외국의 기술기준을 정리하면 <표 1>과 같다.

표 1. 국내 원전 설계에 적용된 주요 기술 기준

구분		한국	미국	캐나다	프랑스
내진범주 I급	격납구조	KEPIC SNB	ASME Sec III Subsec CC	CSA N287	RCC-G
	콘크리트구조	KEPIC SNC	ACI 349	CSA A23.3	RCC-G
	강 구조	KEPIC SND	AISC N-690	CSA S16.1	RCC-G
내진범주 II급	콘크리트구조	KEPIC SGB	ACI 318	CSA A23.3	CCBA 68
	강 구조	KEPIC SGC	AISC-ASD	CSA S16.1	CM 66

5. 원전 구조물 안전성 확보를 위한 설계 기술

원전 구조물은 일반 구조물과 달리 안전성 확보가 보다 중요한 구조물이므로 지반-구조물 상호 작용(SSl)을 고려한 내진 해석, 격납 건물의 극한 저항 능력 분석을 위한 비선형 해석, 내진 안전성 평가 및 원전 구조물 수명 관리 등을 포함한 특수 해석 및 설계 검증 과정 중 원전 구조에서 대표적인 설계 기술을 소개하면 다음과 같다.

5.1 내진 해석

원전 구조물의 내진 해석은 구조물이 건설될 부지 조건 및 중요도에 따라 해석 방법을 구분한다. 우선 부지 조건이 결정되면 대상 부지의 지진 위험도를 고려한 설계 지진 규모와 해석 방법을 결정한다. 우리나라 원전의 경우 0.2g의 설계 지진 입력에 대비한 내진 해석 및 설계를 수행하고 있다. 지진 입력의 정의는 해석 목적에 따라 설계 응답 스펙트럼과 설계 가속도 시간 이력으로 구분할 수 있으며, 일반적으로는 원자력 규정에 명시된 감쇠별 설계 응답 스펙트럼을 이용한 해석을 통해 설계 하중을 구한다.

설계 가속도 시간 이력은 설계 응답 스펙트럼과 관련 규정을 만족하도록 작성하며, 이 하중은 구조물에 설치된 주요 기기 및 2차 계통의 지진 입력을 정의하기 위한 시간 이력 해석 또는 특정 구조물의 정밀한 해석을 위한 비선형 해석 등에 이용된다. 그리고 지반-구조물 상호 작용을 고려한 내진 해석의 입력으로도 사용된다. 설계 가속도 시간 이력은 응답 스펙트럼과 달리 원전 설계 규정에 구체적으로 명시되어 있지 않기 때문에 설계회사에서 자체적으로 설계 응답 스펙트럼과 기존의 관련 규정을 최적 조건으로 부합하는 설계 가속도 시간 이력을 작성하여 해석에 활용하고 있다.

구조물 해석 단계에서 복잡한 형태의 원전 구조물은 일반적으로 집중 질량으로 이상화해서 모델링하지만 해석 목적상 정밀한 해석이 필요하다고 판단되는 경우는 구조물 특성을 보다 정확히 반영할 수 있는 상세 모델링과 비선형 해석 기법을 적용하기도 한다.

원전 구조물이 건설될 지반의 조건이 암반으로서 양호한 경우는 고경 지반으로 가정한 구조물 해석만으로 내진 해석이 완료될 수 있다. 그러나, 고경 지반으로 가정하기 어려운 연약 지반에 원전 구조물이 건설되는 경우는 지반 효과를 고려한 내진 해석이 요구되며, 현재 전문적인 해석 프로그램을 이용하여 이를 처리하고 있다. 설계회사에서는 다양한 지반-구조물 상호 작용 해석 프로그램을 보유하고 관련 기술의 개발을 통해 독자적인 기술 축적을 이루었으며, 그 중에서 지반 및 구조물 특성을 가장 정확히 고려할 수 있는 것으로 판단되는 SASSI를 지반-구조물 상호 작용을 고려한 해석 업무에 활용하고 있다.

원전 내진 해석 분야에서는 장기간에 걸친 기술 축적을 통해 획득한 다양한 내진 해석 기술을 바탕으로 강화되고 있는 국내의 관련 규정과 새로운 설계 상황에 보다 능동적으로 대처하기 위해 사면, 지하 구조물, 및 유체 저장 탱크와 같은 특수 구조물에 대한 내진 해석 및 설계 기술 개발에 박차를 가하고 있다.

5.2 구조물의 극한 응력 상태를 고려한 안전성 평가

원자로 격납 건물은 방사능 차폐의 최후 보루로서의 역할을 수행하고 있어 상시 하중뿐만 아니라 각종 사고시 하중에 대해서도 충분한 건전성을 유지하도록 설계 및 시공되고 있다. 사고시 대표적인 하중으로는 격납 건물 내부 압력, 온도 하중 및 지진 하중으로 구분할 수 있다. 그리고 이와 같은 하중에 대해서 구조물은 충분한 안전성을 갖도록 설계되어야 하며 예비 안전성 분석 보고서를 통해 안전성을 입증하여야 한다.

격납 건물의 내부 압력 및 온도 증가에 대한 구조적 안전성을 입증하는 방법으로서 현재 사용하고 있는 것은 축소 모형을 이용한 입증 시험 방법과 비선형 해석을 통한 해석적 방법이 있다. 그런데 축소 모형 제작 및 시험에 소요되는 비용 문제로 인하여 시험에 의한 입증보다 비선형 해석에 의해 안전성을 입증하는 방법이 일반적으로 채택되고 있다.

원자로 격납 건물의 극한 내압 평가에는 축 대칭 유한 요소 모델을 이용한 비선형 해석이 일반적으로 이용되어 왔으나 최근에 국부적인 거동 파악을 포함하는 보다 상세한 해석을 통한 극한 내압 평가의 필요성이 대두되면서 3차원 비대칭 모델을 이용한 비선형 해

석 방법이 이용되고 있다.

최근 미국 SANDIA 국립연구소의 주관 아래 국제 공동 연구로서 수행되고 있는 격납 건물 1/4 축소 모형의 시험 및 해석 프로젝트는 해석 방법의 검증을 위한 국제 공동 연구로서 수행되고 있으며, 국내에서는 한전기술(주)이 참여하여 극한 내압 평가 기술을 재검증하고 있다.

원자력발전소 콘크리트 구조물에서는 지진에 대한 저항 시스템으로서 전단벽을 채택하고 있다. 전단벽을 포함하는 전체 구조물의 내진 설계시에는 동적 선형 해석을 수행하여 탄성 설계를 하고 있으나 안전성 판단을 위해서는 전단벽의 내진 응답 및 극한 응력의 산정이 가능한 비선형 동적 해석을 수행하여 극한 응력을 산정할 필요가 있다. 이와 같은 취지에서 일본 원자력발전기술기구(NUPEC)에서는 원자로 격납 건물 내에 설치되어 있는 전단벽을 실물 크기로 모델화하여 대형 진동대를 이용한 극한 내진 응답 시험을 수행하고 해석 모델의 검증을 위한 국제 공동 연구로서 수행한 바 있으며 국내 관련 기관에서도 참여하여 성공적인 결과를 도출한 바 있다.

이와 같이 원전 관련 분야에서는 원전의 충분한 안전성을 확보하기 위해 국제 공동 연구 참여등을 통한 지속적인 기술 개발을 수행하여 왔으며, 독자적인 기술력을 바탕으로 각 종 세미나를 통해 관련 산업 분야로의 기술력 전수에 노력하고 있다. 또한 원전 운영 기관과 규제 기관 등에서는 정기 검사, 수시 검사 및 특별 검사 등을 통해 원전의 안전성 확보에 최선의 노력을 하고 있다.

5.3 내진 안전성 평가

설계에 필요한 강진(強震) 자료가 부족한 우리나라는 원전 구조물에 대한 내진 해석시 RG 1.60에 주어진 표준 지반 응답 스펙트럼에 근거한 응답 스펙트럼 해석을 수행하고 있다. 그러나, 지진은 그 특성상 정확한 정량화가 불가능하므로 내진 안전성 평가 분야에서는 설계 지진(SSE)을 초과하는 가상의 지진(Postulated Earthquake, RLE)을 설정하여 이에 대한 별도의 안전성 평가를 수행한다.

지진동이 발생하면 모든 질량체들은 가속도를 받아 관성력을 유발하게 되므로 콘크리트 슬래브 및 벽체의 질량, 그리고 슬래브에 지지된 기기 및 설비들이 유발

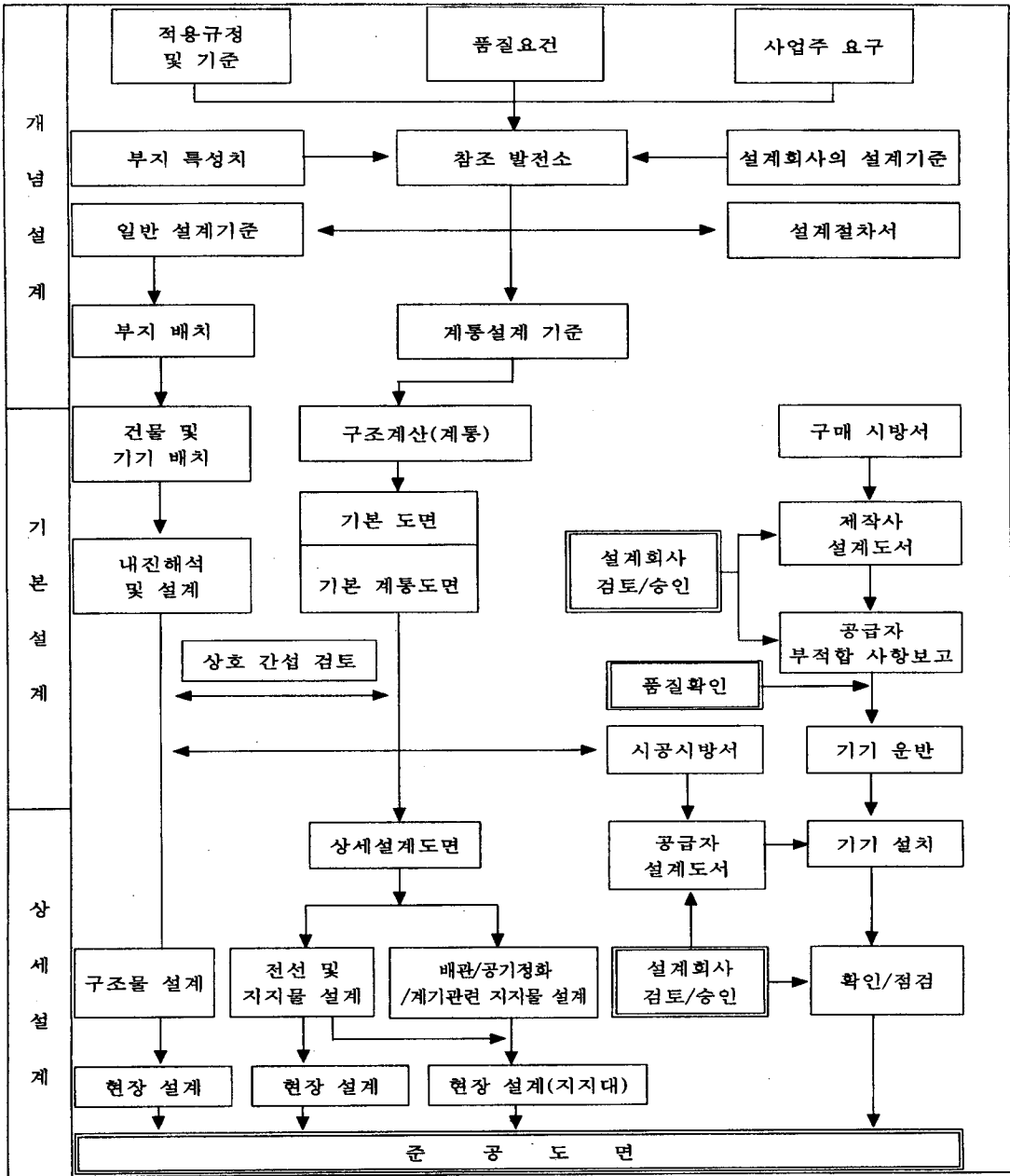


그림 1. 설계 업무 흐름도

하는 관성력은 횡력에 저항하는 구조 시스템을 타고 안전하게 지반에 도달하여 소산되도록 설계시에 배려되어야 한다. 내진 안전성 평가는 우선 질량체로부터 지반까지의 최적 하중 경로를 검토하는 작업으로 시작된다. 이 하중 경로에 존재하는 모든 구조 부재를 검

토하여 하중 경로에 존재하는 구조 부재 중에서 단면이 감소하거나 철근이 부족하여 충분한 내력을 발휘하지 못하는 부재가 발견되면, 이 부재는 상세 평가가 요구되는 대상 부재가 된다.

평가 대상 부재가 결정되면 설계 자료를 수집하여

잠재적인 파손 모드를 결정한다. 파손 모드는 부재의 구조적 역할과 밀접한 관계가 있다. 예를 들어 전단벽의 경우는 주로 전단력에 의한 사인장 파괴가 중요한 파손 모드가 된다. 공학적인 고려로 설계된 대부분의 구조물들은 연성 파괴를 유발하도록 설계되지만 강구조의 경우 사재의 좌굴이나 사재 연결부의 취성 파괴가 주요한 파손 모드가 된다. 이 경우 연성 거동에 의한 에너지 소산이 불충분하므로 결과적으로 부재의 내진 능력은 매우 낮아지게 된다. 평가 결과 특정 구조 부재의 내진 능력이 일정 요건을 만족시키지 못하면 내진 안전 평가자는 설계 담당자에게 통보하고 협의를 통해 보강 방안을 마련해야 한다.

이러한 절차는 안전과 밀접한 관련이 있는 모든 구조물과 설비에 적용되며 이렇게 함으로써 내진 측면에서 보다 높은 안전성을 확보하고 있다.

5.4 원전 구조물 수명 관리 설계 기술

원전 구조물의 수명 관리를 위해 각 구성 요소에 대한 안전성, 손상 가능성, 경제성 등을 고려하여 구조물 상태를 조사하고 발전소 가동 및 노화로 인한 성능 저하 정도를 평가하며, 특히 구조물이 놓여 있는 내·외부 환경 요인에 기인되는 원전 구조물 기능 및 재료 특성치에 영향을 미치는 많은 손상 기구에 대한 평가 기술이 중요하다. 원전 구조물의 수명에 영향을 미치는 내부 환경 요인으로는 습윤에 따른 부식, 주기적 하중에 따른 피로 및 온도 영향 등이 있으며, 외부 환경 요인은 기상 상태 또는 건설 중 발생한 결함 등이 고려된다.

구조물의 수명 관리 기술이 단편적이고 문제 발생 후 대처하는 기술에서 종합적이고 사전 예방 및 예측 기술 위주로 전환되고 있으며, 특히 원전 구조물의 사용 수명 연장을 위한 잔존 수명 예측 및 보수 보강 기술, 구조물 열화 평가 기술 등이 신규 구조물 설계 기술과 병행하여 개발되고 있다. 특히 신규 원전 건설이 중단된 미국의 경우 가동 원전에 대한 유지 보수 기술이 활발히 진행되고 있으며 관련 코드의 개발 및 배경 기술 연구가 활발히 진행 중이다.

국내에서도 원전 구조물 중 격납 구조물은 기기나 부속 기구 등에 비해 상대적으로 손상 가능성은 적으나, 손상 발생시 안전성에 미치는 영향과 유지 보수 비용의 과다 소요 등 경제성의 영향으로 인하여 원전 수명 관리 연구에 있어서 원자로 압력 용기(reactor pressure vessel) 다음으로 중요한 대상으로 고려되고 있으며 이에 대한 안전 진단 기술이 정립되고 있다.

6. 향후 설계 방향 및 결론

일반적으로 설계시 기본 요건으로 경제성을 고려하나 원전의 경우 그 특수성으로 인하여 안전성이 최우선으로 고려된다. 특히, 근자에는 원전의 안전성 확보를 위하여 미해결 안전성 항목(USI : Unresolved Safety Issues), 일반 안전성 항목(GSI : General Safety Issues), 중대 사고 개념 등의 적용이 요구되며, 사용 중 검사 요건 강화 등 설계시 안전성 확보 관련 요건이 엄격화됨에 따라, 안전성과 경제성 사이에 존재하는 이면성의 효율적 조절이 요구되고 있다.

원전의 경우 구조적 측면 이외의 사항으로 구조물의 제원이 결정되는 경우가 많으므로 개념 설계시 경제성 설계를 위한 많은 노력이 요구된다. 특히 기본 설계 단계에서 기존의 결정론적 및 보수적 관점에서 확률론적 및 최적 평가 방법 등으로 확대 적용하고 있으며, 상세 설계 단계에서 구조물 상세의 표준화, 설계의 전산화, 요소 기술의 개발을 통한 국제적인 경쟁력 향상을 기하고 있다.

이러한 기술을 바탕으로 현재 시공 중인 한국 표준 원전들과 연구 개발 중인 개선 원전, 차세대 원전 등을 통해 개발, 정립된 설계 기술은 기술 선진국 수준으로 판단된다. 그러나, 21세기에 들어선 시점에서 이제는 미국 기준 혹은 이를 준용한 설계 기준의 단순 적용을 뛰어넘어 독자적으로 설계 기준을 정립하고 설계 기준의 기술적인 배경 축적을 위한 실증 시험 혹은 정밀 분석 등의 연구를 활발히 수행하여 보다 고도화된 설계 기술을 지향해야 할 것이다. □