

'2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

가동중 원전 콘크리트 구조물의 주기적안전성평가 방안 연구

Development of Periodic Safety Review Plan for Concrete Structure in Operating Nuclear Power Plants

최 현, 장진용, 조홍석
한전기공(주) 기술연구소
경기도 성남시 분당구 금곡동 196

주광호, 김병섭, 김주택
한국수력원자력(주) 원자력환경기술원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원전 콘크리트 구조물의 건전성 평가를 위하여 지금까지 많은 학자 및 기술자들의 연구와 노력이 있었으나 대부분 특정 구조물이나 현상에 국한되어 원전 콘크리트 구조물에 대한 전반적인 평가에 있어서 부족한 점이 없지 않았다. 본 논고에서는 가동중 원전 콘크리트 구조물의 주기적안전성평가 방안 및 절차를 수립하여 원전 콘크리트 구조물의 안전성 확보에 기여하고자 한다

Abstract

There were studies and efforts of many scholars and engineers so far for integrity evaluation of concrete structure in nuclear power plants but it was insufficient in integrated evaluation for concrete structure in nuclear power plants because was limited at most specific structure or phenomenon. In this study, I wish to contribute on safety of concrete structure in nuclear power plants establishing periodic safety review plan and procedure of operating nuclear power plants concrete structure.

1. 서론

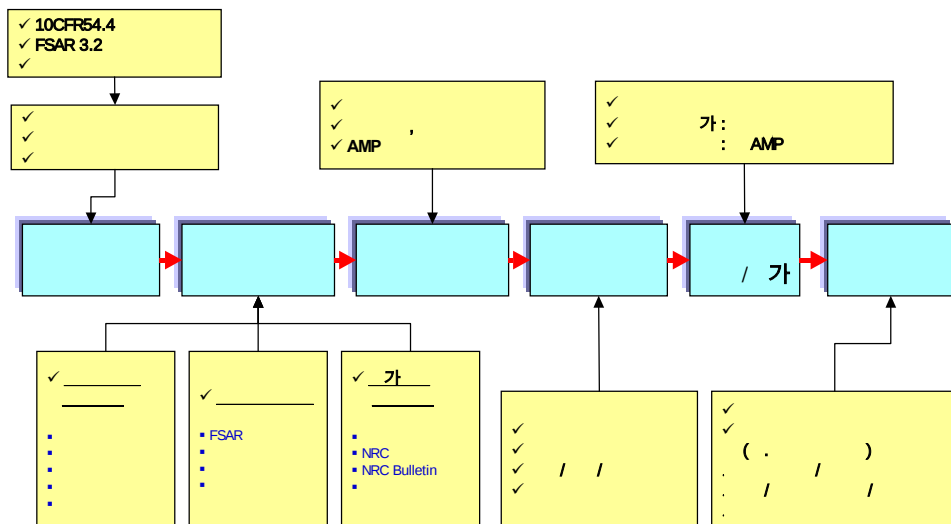
지난 20여 년간 국제사회는 TMI-2 사고(1979) 및 체르노빌 사고(1986)를 겪으면서 원전 안전성 문제는 해당 국가만의 문제가 아니라 그 피해의 정도가 국경을 넘어서는 국제적인 문제라는 인식이 확립되었다. 또한 원전 운영 경험 및 기술의 발달로 운영 개시 당시에는 파악되지 못한 사항에 대하여 보완조치가 필요함을 인지하게 되었다. 그리하여 각 국은 원전 운영의 안전성에 관한 전반적인 점검을 통하여 원전 안전에 대한 신뢰를 구축해야 된다는 공감대가 형성되었으며 1996년 IAEA는 원자력안전협약(Nuclear Safety Convention)을 통해 가동중 원전에 대한 주기적안전성평가의 수행을 결의하게 되었다. 이에 주요 원전 운영국중의 하나인 우리나라도 관련 법령의 개정을 통하여 2000년 5월 고리 1호기에 대해서 주기적안전성평가 시범수행을 착수하였다. 본 논고에서는 이러한 국내외의 환경에 근거하여 원전 주요 구조물의 대부분을 차지하고 있는 콘크리트 구조물에 대한 주기적안전성평가 방법 및 절차를 수립하고 기술적 해결 방안을 제시하고자 한다.

2. 원자력발전소와 콘크리트

국내의 원자력발전소는 미국의 경우와 같이 일반적으로 40년의 인허가 수명을 가지고 있으며 이러한 원자력발전소가 상업 운전을 개시한 이래 약 20여년이 경과하고 있다. 따라서 사용 연수의 증가에 따른 효율적인 주기적안전성평가 기법의 개발은 원전 안전성에 대한 국민적 신뢰감의 제고는 물론 국가 경제발전의 원동력이라 할 수 있는 에너지원의 확보 및 경제성 측면에서 매우 중요한 과제라 할 수 있다. 특히 대부분의 원전 주요 구조물은 콘크리트로 이루어져 있으며, 이러한 재료의 특성상 기타 기계 설비와는 달리 안전성에 영향이 있을 경우 교체 등의 근원적 해결 방법의 적용이 매우 어려운 실정이다. 더군다나 원자력발전소 콘크리트 구조물은 일반 구조물과는 달리 방사능 물질의 외부누출 차단과 안전관련 기기 및 기기들을 연결하는 각종 계통을 수용, 지지하고 보호하는 역할을 담당하여 그 설계단계부터 안전성 확보를 위해 다중 방어 개념, 심층 방어 개념, 방사선 방어 개념 등을 적용하고 있고, 특히 원자로 격납건물의 경우 설계 기준 사고 및 온도의 결정, 내진 안전성, 수소 연소 등을 고려한 충분한 자유 체적의 결정 및 예비 구조 해석 등 다양한 변수 연구를 진행하고 있다. 이렇게 건설시에는 수많은 검토와 절차를 거쳐 안전성을 확보하고 있으나 가동중인 원전에 대한 안전성 확보에 있어서는 미흡한 실정이다.

3. 주기적안전성평가 수행절차

원전 콘크리트 구조물은 일반 콘크리트 구조물과 달리 안전성 확보가 보다 중요한 구조물로서 주기적안전성평가에 있어서도 일반 콘크리트 구조물과는 다르게 안전성 개념에서 접근을 해야 바람직하다. 원전 콘크리트 구조물에 대한 건전성 평가 방법에 있어서 그동안 가동중검사, 누설율시험, 원전 콘크리트 구조물 수명관리연구, 원전 콘크리트 구조물 열화현상 연구 등 많은 점검 방법과 연구 보고서가 시행되고 발표되었으나 정작 이를 통합하고 보다 체계적으로 정리된 안전성평가 방법 및 절차가 부재한 실정이다. 이러한 이유로 무엇보다도 안전성 확보가 중요한 구조물이라고 할 수 있는 원전 콘크리트 구조물에 대하여 가동중 원전 콘크리트 구조물의 주기적안전성평가 방안 및 절차를 연구하게 되었으며 그 수행절차는 다음 그림과 같다.



<그림 1. 가동중 원전 구조물 주기적안전성평가 흐름도>

그림 1.에서 보는 바와 같이 원전 콘크리트 구조물에 대한 주기적안전성평가를 위해서는 대상구조물을 적절한 기준에 근거하여 선정하여야 한다. 선정된 구조물에 대해서는 관련 자료 및 기술기준을 검토한 후 과거 이력 및 운전경험 또는 연구결과 반영여부를 조사한다. 이러한 검토 결과를 토대로 현재 물리적 상태를 판단하고, 향후 구조물에 영향을 미칠 수 있는 경년열화기구를 분석하여 분석된 경년열화기구에 대해서 평가를 수행하게 된다. 경년열화평가에 있어서는 현재 발전소에서 운영하고 있는 경년열화관리 프로그램과 해외에서 요구하고 있는 경년열화관리 프로그램과의 비교 및 검토를 통하여 현재 시행되고 있는 경년열화관리 프로그램의 적절성을 판단하고 최종적으로 안전성개선 방안을 수립하는 일련의 절차를 통하여 콘크리트 구조물에 대한 주기적안전성평가를 수행하게 된다. 이러한 각각의 일련의 평가 절차에 대한 세부 내용은 다음과 같다.

가. 대상설비 분류 및 선정

가동중 원전 콘크리트 구조물의 주기적안전성평가를 위하여 평가 대상 구조물을 선정하기 위해서는 10CFR54.4, 최종안전성분석보고서(FSAR), 품질보증절차서 등을 검토하여 안전성관련 계통, 기기, 구조물과 안전에 영향을 주는 비안전 계통, 기기, 구조물을 선정하게 되며 이러한 선정절차에 근거하여 선정된 원전 주요 콘크리트 구조물 및 설계특성은 일반적으로 다음과 같다.

원자로 격납건물

원자로 격납건물은 일반적으로 반구형 돔과 원통형 벽체로 구성된 PC 콘크리트 구조물로 벽체 내면에는 밀폐기능을 수행할 수 있도록 강재 라이너로 피복되어 있으며 가상 사고시 내압 및 열 하중에 저항할 수 있도록 설계된다. 격납건물의 반경은 약 22m, 벽 두께는 1.2m, 원통형 벽체 높이는 약 45m, 강재 라이너 두께는 6mm, 돔 두께는 1.1m이다. 원활한 운전 보수 유지를 위하여 1개의 장비반입구 및 2개의 운전원 출입구, 그리고 다수의 기계 및 전기배관 관통부가 있다.

보조 및 제어건물

보조 및 제어건물은 격납건물을 반정도 에워싼 직사각형 형태의 전형적인 콘크리트 전단벽 구조로 안전주입계통, 잔열제거계통, 화학 및 체적제어계통, 보조급수펌프, 증기와 급수 격리 및 안전밸브, 열교환기 등 주요계통을 포함하고 있으며 사고시 이를 보호하고 격리하는 역할을 하고 있다.

핵연료취급건물

핵연료취급건물은 사용후연료 및 신연료의 저장 및 이송을 위한 구조물로서 사용후연료 저장조, 이송통로, 캐스크 장착 및 캐스크 정화조, 신연료저장대 등을 포함하고 있는 안전성관련 구조물이다.

비상디젤발전기건물

비상디젤발전기건물은 비상디젤발전기, 연료유일일탱크, 배기관관련 기기 등을 보호하고 격리하는 안전성관련 구조물로서 발전설비의 고장시 안전시스템의 운전을 위해 필요한 비상전원의 공급을 위한 설비들을 포함하고 있다.

기기냉각수건물

기기냉각수건물은 보조제어건물과 인접하여 기기냉각수 열교환기 및 관련 계통, 기기를 격리하고 보호하는 안전성관련 구조물이다.

기기냉각해수 취수구조물

기기냉각해수 취수구조물은 1차측 기기 냉각을 위한 구조물로서 펌프하우스와 취수구로 구성된 안전성관련 구조물이다.

나. 기술기준 검토

앞서 선정된 구조물에 대해서 평가를 수행하기 위해서는 먼저 선정된 구조물의 설계 및 시공에 적용된 각종 기술기준의 검토가 선행되어야 하는데 이러한 기술기준의 검토 사항으로는 법령체계내의 기술기준으로서 원자력법, 원자력법 시행령, 원자력법 시행규칙, 과기부령, 과기부 고시 등이 있으며 상세기술기준으로는 최종안전성분석보고서(FSAR), 행정 및 규제조치, 사업자 약속사항 등이 있다, 또한 추가반영 기술기준으로 미국 연방법, NRC 규제지침서, 산업계 기술기준 등이 있다.

다. 운전경험 및 연구결과 활용

기술기준에 대한 검토가 완료된 후 대상 구조물에 대한 운전경험 및 연구결과의 활용에 대한 검토 사항으로서 국내외 타 발전소의 손상사례가 조사되어야 하며, 해당 발전소의 설비개선 및 안전성 향상 사례 등을 파악하여 평가에 반영할 수 있도록 해야 한다. 이를 위해서 대상 구조물에 대한 시험, 검사, 운전 및 정비기록 등 과거 이력에 대해서 조사 및 평가가 수행되어야 하며 아울러 현재 발전소에서 진행하고 있는 대상 구조물에 대한 경년열화관리 프로그램에 대해서도 파악이 이루어져야 한다.

라. 현재 물리적상태 확인

평가 대상 구조물에 대한 분류 및 선정과 적용된 기술기준의 검토, 그리고 과거 운전경험 및 연구결과의 활용에 대한 검토가 완료되면 이를 토대로 하여 현장점검을 실시하고 현재 평가대상 구조물의 물리적인 상태를 확인한다. 현장점검시 확인 사항으로는 대상 구조물의 구성 및 고유기능 유지 여부를 파악하여야 하며, 설계 및 운전특성, 시험/검사/정비기록, 경년열화관리 실태 등 전반적인 사항에 대하여 조사가 이루어지고 이러한 자료들이 대상구조물의 현재 물리적 상태에 반영될 수 있도록 하여야 한다.

마. 경년열화분석 및 평가

대상 구조물에 대한 현재 물리적인 상태 조사가 완료되면 향후 발전소 수명기간동안 구

조물의 손상에 영향을 미칠 수 있는 경년열화기구를 분석하여야 한다. 가동중 원전 안전성관련 콘크리트 구조물에 대한 경년열화기구로는 다음 표와 같이 ACI 349.3R에서 총 14가지 항목에 대하여 규정하고 있다.

<표 1. 원전 콘크리트 구조물 경년열화기구 분석>

경년열화기구	경년열화현상 분석	발생가능부위	현상	점검방법
1. 마모/침식 (abrasion/erosion)	□ 기계적인 접촉, 유수중의 노출 등으로 재료적인 손실 및 내구성을 저하시키는 현상	바닥슬래브 벽체	콘트리트 탈락	육안점검
2. 화학적침해 (chemical attack)	□ 지하수, 산성비, 해수, 비래염분, 탄산가스 등에 의하여 콘크리트 구조물에 열화를 촉진하는 현상	외벽, 기초, 지하구조물	균열 탈락 철근부식	토양분석시험 , 중성화깊이, 염화물측정
3. 온도 (thermal exposure)	□ 원자로 및 증기발생기, 고온배관 관통부 등에 온도의 영향으로 콘크리트의 물리적특성 저하 등 열화현상을 유발	고온배관 관통부	균열, 탈락, 열룩, 변형	육안점검 표면온도 측정
4. 알칼리-골재반응 (cement-aggregate reaction)	□ 반응성 골재의 사용으로 인한 골재가 콘크리트중의 알칼리성분과 반응하여 알칼리 규산염겔을 생성하고 이것이 다시 수분을 흡수하여 팽창하는 현상	구조물 전체	망상균열 탈락	육안점검
5. 피로 (fatigue)	□ 기계적인 혹은 온도에 의한 반복적인 하중의 작용에 의해서 발생되던 콘크리트의 물리적인 특성의 저하 및 철근과의 접촉부의 결합력 손실을 초래하는 현상	회전/진동 기기들의 기초 및 고온배관부	균열	육안점검
6. 동결융해 (freeze-thaw cycling)	□ 외기온도의 상승과 강하로 인하여 콘크리트 내부의 간극수 등의 동결로 팽창압이 발생되고 이로 인해 콘크리트가 손상되는 현상	구조물 외벽	충분리 균열 탈락	육안점검
7. 방사선 (irradiation)	□ 과도한 중성자 조사량이 콘크리트의 내부온도의 상승과 탄성계수 및 내구성 저하를 초래하는 현상	격납건물 내부	균열	육안점검 및 샘플링 조사
8. 침출 (leaching)	□ 유수 혹은 지하수 등에 노출된 환경에서 콘크리트 내부의 석회질 성분이 흘러나와 콘크리트의 기계적인 특성 및 강도가 저하되는 현상	구조물 외벽 지하구조물	백태 균열	육안점검 내구성평가
9. 외부하중 (external load)	□ 지진, 허리케인, 홍수 등 외부하중에 의한 콘크리트 구조물의 손상	구조물 외벽	균열	구조해석을 통한 안전성 검토
10. 체적변화 (volum change)	□ 수화반응 및 건조수축, 크리프 등의 원인에 의하여 콘크리트의 체적이 변화하고 이로 인해 균열 등이 발생하는 현상	구조물 전체	균열	육안점검
11. 화재 (fire damage)	□ 화재로인한 국부적인 온도하중의 증가로 콘크리트 부재의 팽창 혹은 철근과의 결합력 손실 등 성능저하 발생	구조물 내부	열룩 균열 탈락	육안점검 내구성평가

경년열화기구	경년열화현상 분석	발생가능부위	현상	점검방법
12. steam impingement	□ 고온배관 파단사고로 인하여 누출되는 고온 증기에 의한 콘크리트 구조물의 손상	고온배관 주변의 구조물	침식/마모 재료손실	육안점검
13. 부등침하 (settlement)	□ 구조물 기초가 놓인 토질의 불균일한 압밀로 인하여 구조물의 부등침하가 발생되고 부등침하로 진단균열 등 손상이 발생	구조물 전체	균열	측량을 통한 침하량 조사
14. 누유 (tendon grease leakage effects)	□ 포스트 텐션 시스템의 앵커헤드 부분에 그리스의 누출로 인하여 주변 콘크리트의 화학적인 침해를 유발하는 현상	격납건물 앵커헤드 주변	균열	육안점검

표 1.에서 보는 바와 같이 일반적인 원전 안전성관련 콘크리트 구조물에 대하여 손상을 유발시킬 수 있는 경년열화기구로는 여러 가지가 있으나 모든 구조물이 이러한 경년열화기구의 영향을 동일하게 받는 것은 아니며 발전소 혹은 구조물의 지리적인 여건, 기후조건, 운전 및 환경조건 등에 따라서 동일한 구조물에 대해서도 서로 다른 경년열화기구의 영향을 받을 수 있다. 그러므로 평가 대상 구조물에 대한 주변 환경 및 운전조건을 감안하여 발생가능성이 비교적 높은 경년열화기구에 대하여 분석 및 검토, 평가가 이루어져야 한다.

바. 안전성 개선방안 수립

앞서 기술된 일련의 평가절차가 완료되면 수집된 평가 자료를 근거로 하여 현 상태에서 대상구조물의 안전성 개선방안이 도출되어야 한다. 안전성 개선방안을 도출함에 있어서 현재 해당 발전소에서 시행되고 있는 경년열화관리 프로그램과 해외에서 규정하고 있는 경년열화관리 프로그램과의 비교, 검토를 통하여 현재 진행되고 있는 관리프로그램의 적절성 여부를 평가하는 절차가 필요하다. 물론 현재 발전소에서 진행되고 있는 경년열화관리 프로그램이 해외에서 요구하고 있는 경년열화관리 프로그램의 모든 항목을 만족하고 있다면 문제가 없겠으나, 만약 해외 경년열화관리 프로그램에서 규정된 항목에 대해서 불만족 사항이 도출된다면, 이 부분에 대한 시정조치 및 개선방안이 수립되어야 할 것이다.

4. 향후 기술적 해결과제

국내의 원자력발전소는 해외의 기술 선진국에 비하여 원자력 산업의 역사가 짧아 아직까지 가동중 원전 콘크리트 구조물의 주기적안전성평가에 대한 확고한 체계가 성립되어 있지 못한 실정이다. 물론 국내 원전 콘크리트 구조물의 안전성 평가를 위하여 1990년대

초반부터 원전 수명평가 및 열화관리방안 수립과 같은 다양한 분야의 수명관리 연구를 추진해오고 있으며, 특히 원전 안전성관련 콘크리트 구조물에 대해서는 수명관리 시스템 (SLMS : Structure Life Management System)을 개발하여 고리 1호기를 포함한 가동중 원전에 대한 모든 수명관리 이력사항을 D/B화하여 운영 관리하고 있다. 그러나 이러한 일련의 연구 및 노력은 안전성관련 구조물에 편중되어 있는 면이 없지 않고 지중 매설물, 영구사면 및 부속 구조물, 해양 구조물에 대한 검토는 부족한 면이 있다. 향후로는 현재 운용되고 있는 수명관리 체계의 지속적 개선 및 보완을 통해 가동중 원전 콘크리트 구조물 주기적안전성평가에 대해서 기술 선진국보다 우수한 시스템을 구축하여 원전 안전에 대한 신뢰성을 높이고 국가의 원전 기술 경쟁력 향상에 크게 기여할 필요가 있다.

5. 결론

지금까지 가동중 원전 콘크리트 구조물의 주기적안전성평가 방안 및 절차에 대한 연구 결과를 기술하였다. 현재 국내 원전 콘크리트 구조물의 건전성 평가와 관련된 많은 연구와 논문이 발표되었으나 그 대부분은 일부 구조물 혹은 특정 경년열화기구에 대한 내용이 대부분으로 가동중 원전 콘크리트 구조물의 전반적인 안전성 평가에는 부족한 면이 없지 않다고 판단된다. 이에 본인은 본 논고를 통하여 기존에 발표된 원전 콘크리트 구조물의 건전성 평가와 관련된 연구를 종합하고 이를 근거로 하여 현재 가동중 원전 콘크리트 구조물의 주기적안전성평가 방안 및 절차를 체계적으로 수립하고 시행하여 향후 이와 관련된 업무를 수행시 예상되는 각종 시행착오를 미연에 방지하고 시간적, 경제적 손실을 최소화 하고자 하는 취지에서 본 논문을 발표하게 되었다. 더군다나 우리나라는 이러한 가동중 원전 콘크리트 구조물의 주기적안전성평가를 법제화하여 지속적으로 수행을 해야 함에도 불구하고 아직까지 이러한 원전 구조물 주기적안전성평가와 관련된 체계적인 방법 및 절차가 수립되어 있지 못한 것은 매우 안타까운 일이 아닐 수 없다. 이에 본 연구를 시발점으로 하여 원자력발전소 종사자 및 관련 기술자의 많은 관심과 지속적인 연구를 통하여 국내 원전 안전성 확보와 설비개선에 조금이나마 도움이 되었으면 하는 바램이다.

참고문헌

1. 전력연구원, “원전 안전성관련 콘크리트 구조물의 열화에 관한 연구” 최종보고서, 1996
2. 정일석 외, 1996, “원전 수명관리 연구(I)”, '96-전력연-단76, TR92NJ10.1996.01, 한국전력공사 전력연구원

3. 정일석 외, 1999, “원전 수명관리 연구(II)-중간보고서”, ‘99-전력연-단367, TM97NJ26.1996 한국전력공사 전력연구원
4. 함영승, 2000, “원자력발전소 콘크리트 구조물의 수명 관리 현황” 2000. 3, 콘크리트학회지 제12권2호
5. 최종범, 1990, “원자력발전소와 콘크리트”, 1990. 6 콘크리트학회지 제2권2호
6. 이남호 외, 2000, “원자력발전소 구조물의 안전성 확보를 위한 설계 기술” 2000. 3, 콘크리트학회지 제12권2호
7. ACI Manual of Concrete Practice, 1996