

특집

원자력발전소 설계 및 기술 동향

원자력발전소 콘크리트 구조물의 수명 관리 현황

- Service-Life Management of Concrete Structures in Nuclear Power Plants -



함영승*

1. 서론

원자력발전소(이하 '원전') 수명 관리란 안전성과 소요 성능을 유지하면서 경제성이 확보된 최적 수명까지 원전을 운영하는 데 필요한 제반 기술 활동이라 할 수 있으며, 지금까지 일반적으로 사용해 온 유지 관리 개념과는 달리 능동적이고 미래 지향적 성격의 의미를 강하게 내포하고 있다. 즉, 유지 관리는 현 상태 유지 측면의 수동적 의미가 강한 반면 수명 관리는 현 상태는 물론 미래의 건전성 확보까지를 대상으로 하며 이러한 수명 관리의 개념은 구조물의 사용 기간 동안뿐만 아니라 설계 및 시공 단계에까지 적용되어야 할 포괄적인 개념이다.

이와 같은 수명 관리 활동의 주요 부분의 하나는 사용 연수와 관련된 각종 열화 현상(Aging Related Degradation)의 규명 및 경감 대책의 수립이라 할 수 있으며, 이를 통하여 원전의 수명 연장을 이루는 것이 원전 수명 관리의 궁극적 목표라 할 수 있다.

우리나라의 경우 원자력발전소가 상업 운전을 개시한 이래 22년이 경과하고 있으며, 이러한 사용 연수의 증가에 따른 효율적인 수명 관리 기법의 개발은 원전 안전성에 대한 국민적 신뢰감 제고는 물론 국가 경제 발전의 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 문제점 발생시 교체 등의 근원적 해결 방법의 적용이 매우 어려운 실정이다. 따라서 본고에서는 원전의 수명 관리 분야에 대한 국내외 연구 개발 동향을 소개하고, 주요 콘크리트 구조물의 수명 관리 기법 개발시 고려되어야 할 기술적 해결 과제를 제시하고자 한다.

2. 국내외 연구 동향

2.1 국외

미국의 경우에는 원전의 운영 허가 시점으로부터 40년간 운전을 허가하는 제도를 시행하고 있으며, 최

* 한국전력공사 원자력건설처 부처장

초 인허가 수명인 40년이 종료된 후 20년씩 연장 운전이 가능하도록 한 인허가 갱신 규정(10CFR54)이 1991년에 제정되었다. 1986년 미국의 자료에 의하면, 미국에서 운전 중인 원전의 수명을 20년 연장할 때 일반 수용가는 KW/h 당 약 3센트의 경제적 이익이 있으며, 10만 MW의 용량을 연장 운전시 약 3,500억 달러의 경제적 이익이 발생한다고 보고하고 있다. 이러한 연장 운전과 관련된 기술은 DOE (Department of Energy), EPRI(Electric Power Research Institute), 국립연구소들을 중심으로 80년대 초반부터 기초 연구가 시작되었으며 80년대 후반에는 Owners Group과 NEI(Nuclear Energy Institute)를 중심으로 인허가 갱신을 위한 기술이 개발되었다. 90년대 들어서는 발전소별로 인허가 갱신 신청서 작성을 위한 연구를 수행하였으며 1998년에는 DOE, EPRI가 공동으로 가동 중 원전의 열화 관리와 인허가 갱신, 운전성 향상을 위한 연구 개발 전략을 수립하는 등 수명 관리 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 1998년에는 Calvert Cliffs #1, 2호기와 Oconee #1, 2, 3호기가 다음 60년 동안의 계속 운전을 위한 인허가를 NRC(Nuclear Regulatory Committee)에 신청하였으며 현재 긍정적으로 심사가 진행되고 있다.

일본의 경우에는 원전 수명 기간에 대한 규정이 없으며 매 정기 검사시 안전성이 확인되면 다음 정기 검사시까지 NSC(Nuclear Safety Commission)가 인허가를 발급하는 방식을 취하고 있으며 수명 관리를 위한 기술 개발은 경수로 기술 고도화 계획의 일환으로 추진 중이다. 발전설비검사협회(JAPEIC), 일본 전력중앙연구소(CRIEPI), 일본원자력연구소(JAERI) 등에서 수명관리 및 원전 주요 기기에 대한 열화 손상 연구를 추진하고 있으며, 발전소로는 미하마 1호기, 주루가 1호기, 후쿠시마 다이하치 1호기의 상세 수명평가를 수행하고 있다.

영국의 경우에는 연장 운전 기간에 대한 규제는 없으나 10년마다 주기적 안전성 재평가를 수행하여 안전성이 확보되면 다음 10년까지의 운영 허가를 발급하는 개념으로 운영 중이며, 세계 최초의 상업용 원자로인 Calder Hall 원전 4기와 Chapelcross 4기

(초기 설계 수명 25년)는 1956년 상업 운전 이후 40년이 지난 1996년부터 2006년까지 10년 연장 운전 할 수 있는 인허가를 NII(Nuclear Installation Inspectorate)로부터 획득하였다.

2.2 국내

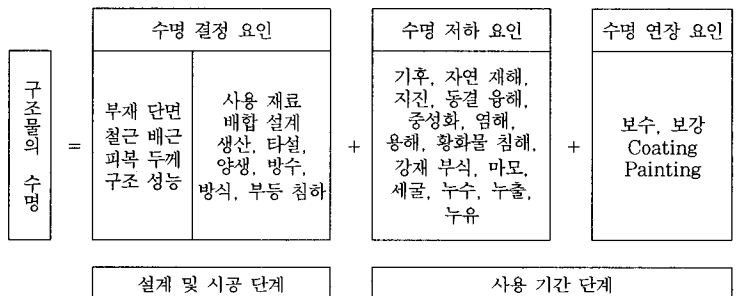
국내의 원자력발전소는 미국의 경우와 같이 일반적으로 40년의 인허가 수명을 가지고 있으나, 국외의 기술 선진국에 비해 원자력산업의 역사가 짧아 아직까지 연장 운전의 경험을 가지고 있지 못하다. 이러한 현상 때문에 아직 국내 인허가 법규와 규제 기준이 없는 실정이며, 규제 기관에서는 1996년부터 연장 운전 관련 규제 정책을 수립하기 위한 연구를 수행 중이다. 한편, 국내 원전의 수명 관리를 위한 본격적 연구는 1990년대 초부터 한전 전력연구원을 중심으로 연장 운전 타당성 평가, 상세 수명 평가 및 열화 관리 방안 수립과 같은 종합적인 수명 관리 연구를 추진하고 있다.

특히 원전 안전성 관련 콘크리트 구조물의 수명 관리 시스템(SLMS : Structure Life Management System)을 개발하여 고리 1호기를 포함한 가동 중 원전에 대한 모든 수명 관리 이력 사항을 D/B화하여 운영 관리하고 있다. 또한 기존 구조물의 상태 평가와 손상 요인의 모델 구성을 바탕으로 한 구조물의 미래 상태 예측, 시간 의존성 수명 저하 모델을 이용한 정량적 잔존 수명 예측 분야의 연구를 수행하고 있다.

3. 콘크리트 구조물의 수명 지배 요인

콘크리트 구조물의 사용 수명을 지배하는 요인을 명확히 정의하기란 그 요인 및 환경 조건의 다양성으로 인해 매우 어려운 일이나 구조물을 설계 및 시공,

표 1. 원전 콘크리트 구조물의 수명 지배 요인



사용 기간 단계로 구분할 때 <표 1>과 같이 정의할 수 있다.

즉, 설계 및 시공 단계에서 균열, 투수·투기성, 강도 등이 구조물의 수명을 결정지어 주는 주요 요소가 된다. 그러나, 구조물의 품질에 따라 일정한 수명이 주어지더라도 아무런 장애 없이 그 수명을 다하게 되는 것은 아니며 사용기간 단계에서의 주변 환경을 비롯한 각종 열화 요인의 영향으로 인해 수명저하 현상이 발생하게 되고, 이러한 저하 현상에 대한 적절한 보수, 보강 등의 활동은 수명 저하를 최소화시키며 나아가 수명 연장 요인으로도 작용하게 된다.

이같은 관점에서 구조물의 수명 지배 요인을 정의할 때 수명 관리의 개념은 설계, 시공 및 사용 기간에 걸친 전 단계에 적용되어야 할 개념이며, 사용 기간 중에 발생한 각종 열화 현상에 대한 분석 결과가 지속적으로 설계 및 시공 단계에 피드백(feed back)되어야 한다.

한편, 가동 중 원전의 경우에 일차적으로는 수명 저하 요인의 관리 측면이 중요시되어야 할 것이며, 각 저하 요인에 대한 매커니즘의 규명, 그에 대한 점검 및 평가 기준의 체계화, 각종 자료에 대한 D/B 구축, 각 원전이 위치한 환경적 요인을 고려한 주요 수명 저하 요인의 결정 등이 이루어져야 한다.

4. 국내 원전 구조물 수명 관리 현황

국내 원전 구조물에 대한 수명 관리 활동은 주로 안전성 관련 콘크리트 구조물을 중심으로 수행되고 있다. 구조물 수명 관리의 <표 2>와 같이 구조 건전성 점검 및 평가, 보수·보강, 이력 관리 및 정량적 수명 평가로 구성되어 있으며, 이와 관련된 각 분야별 주요 내용은 <표 3>에 소개되어 있다. 또한 각종 경년 열화(Aging) 현상의 이력 관리를 위해 현재 운용 중인 D/B 시스템의 로고 및 정보창 화면의 예가 <그림 1>과 <그림 2>에 각각 나타나 있다.

표 3. 국내 원전 구조물 수명 관리 현황

구성 요소	주요 ACTIVITY
현장 점검 및 구조 건전성 평가	<ul style="list-style-type: none"> · 점검 절차서에 따른 현장 점검 수행 · 정기 점검 및 특별 점검 수행 · 열화 추적 관리 구역에 대한 일상 점검 · 본사, 사업소 및 연구원 간의 유기적 체계 구축 · 건전성 평가 기법에 대한 연구 수행 중 (2000년 완료 예정)
보수 및 보강	<ul style="list-style-type: none"> · 보수 절차서 작성 활용 · 보수 성능 평가 연구 예정
이력 관리 D/B 구축	<ul style="list-style-type: none"> · SAMS → SLMS¹⁾에 이르는 전산화된 D/B 시스템 구축 완료 및 활용 · 현장 점검시 자료의 입력 의무화 · 시공 및 설계 사항까지 관리할 수 있는 종합적 시스템으로 개선 예정(2001년 완료 예정)
정량적 잔존 수명 평가	<ul style="list-style-type: none"> · 촉진 시험을 통한 콘크리트의 정량적 잔존 수명 예측 모델 개발 연구 수행 중 · 고리 1호기 수명 연장을 위한 정밀 진단 및 수명 평가 수행 중(2001년 완료 예정)

주 : 1) SLMS(Structure Life Management System)

5. 수명 관리의 향후 과제

구조물의 경우 일반 기계 설비 등과는 달리 수명 연장 등과 관련하여 문제점 발생시 교체 등의 근원적 해결 방법 적용에 한계가 있으며, 원전 주요 구조물의 대부분을 차지하고 있는 철근 콘크리트(또는 P.S 콘크리트)의 경우 아직도 그 재료 특성이 규명되지 않은 불확실성 요소를 내포하고 있다는 점에서 기계 설비의 수명 관리 기법과 구별되는 특징 및 어려움을 갖고 있다.

원전 콘크리트 구조물의 수명 관리 기법은 현 상태 평가를 위한 구조 건전성 평가 기법과 정량적인 미래 상태 예측을 위한 잔존 수명 예측 모델 분야로 대별할 수 있으며, 각 항목에서 고려되어야 할 기술적 해결과제는 다음과 같다.

표 2. 구조물 수명 관리의 구성 요소

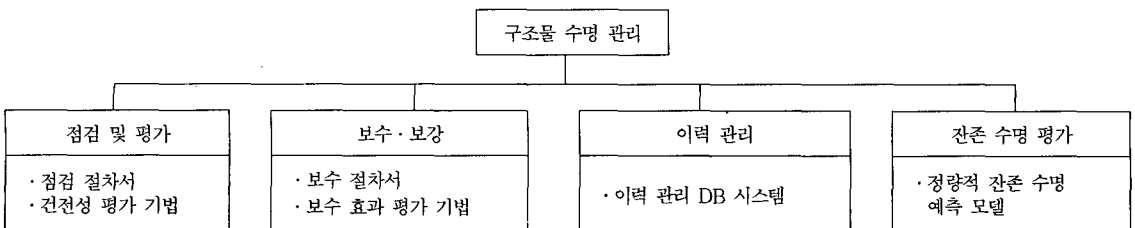




그림 1. SLMS LOGO

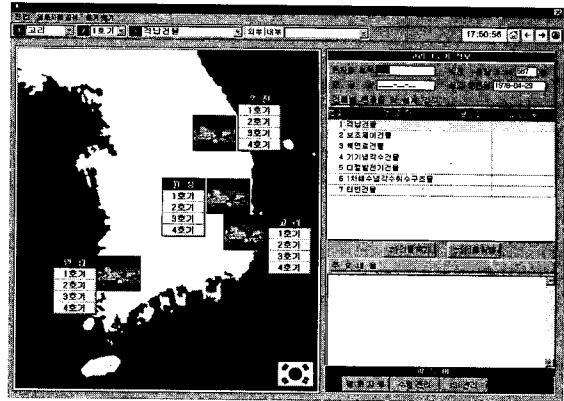


그림 2. 원전 호기별 정보 창

5.1 종합적 구조 건전성 평가 기법의 개발

원전 구조물 현 상태의 구조 건전성은 전술한 수명 지배 요인(결정 요인, 저하 요인, 연장 요인)에 대한 평가를 바탕으로 하며, 원전 구조물은 많은 부재들로 구성되므로 구조물의 건전성은 각 부재에 대한 건전성의 조합이라 할 수 있다. 결국 원전 구조물의 건전성은 각 구조물을 구성하는 개별 부재들에 대한 수명 지배 요인들의 현 상태 평가를 조합함으로써 평가할 수 있다.

구조물에 대한 건전성은 각 부재의 중요도 및 각 수명 지배 요인의 영향을 고려한 가중치를 부여하여 합산한 건전성 지수(또는 안전성 지수)에 따라 평가하는 것이 일반적이며, 이 때 중요도가 높은 구조물일수록 개별 수명 지배 요인에 대한 독립적 평가를 수행함으로써 상대적으로 중요도가 떨어지는 많은 소수 항목의 영향에 의한 평가 착오를 피할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 원전 구조물 및 구조물을 구성하는 부재와 이에 대한 세부구분을 열로, 수명 지배 요인을 행으로 하는 SEAM(Structure-Element Aging Matrix) 행렬을 구성하고, 각 구분별로 설계 조건 및 점검 결과 등을 고려하여 합리적인 가중치를 결정하는 것이 종합적 구조 건전성 평가 기법 개발의 관건이 될 것이다. 이상과 같은 구조 건전성 평가 기법의 체계를 도식화하면 <그림 3>과 같다.

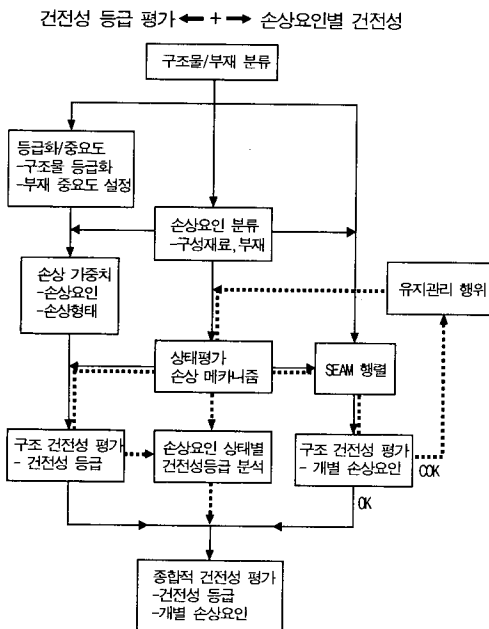


그림 3. 구조 건전성 평가 기법 체계

5.2 잔존 수명 예측 모델의 개발

구조물의 수명을 예측하기 위한 방법으로는 ① 경험에 의한 방법, ② 유사 재료로부터의 성능 비교, ③ 촉진 시험에 의한 방법, ④ 추계학적 방법, ⑤ 화학적 및 물리적 요인에 근거를 둔 수학적 모델링 기법이 있으며, 각 방법마다 장단점이 있으므로 일반적으로 상황에 따라 이들을 조합하여 이용하고 있으나, 수학적 모델링 기법이 가장 확실한 방법으로 알려져 있다. 따라서, 원전 콘크리트 구조물의 경우 각 열화 현상별 수학적 잔존 수명 예측 모델 개발을 목적으로 촉진시험 및 현장 점검 결과 등에서 얻어지는 데이터의 활용을 병행하는 것이 바람직하다.

그러나, 콘크리트 구조물의 수명 예측에는 많은 영향 인자와 데이터의 부족, 촉진 시험법의 개념 정립 및 평가, 콘크리트 내로의 염분, 중성화, 화학적 침해 등에 의한 매개 물질의 침투 확산을 등에 대한 확립된 이론이 부족하여 구조물의 수명을 정량적으로 예측하기란 대단히 어려운 실정이며, 향후 해결해야 할 과제는 다음과 같다.

(1) 촉진시험법(Accelerated Testing Method) 개발
촉진 시험은 수명 예측을 위한 직접적인 방법은 아니나 모델 개발시의 데이터 확보 측면에서 대단히 중요한 요소이다. 그러나, 실제 자연 현상을 재현하기란 쉬운 일이 아니며, 많은 열화 현상에 대한 표준 촉진 시험법이 개발되지 못한 실정이다. 따라서 향후 구조물의 실제 조건을 최대한 모사(simulation)할 수 있는 실험 및 평가 기법 개발이 잔존 수명 예측을 위해 선행되어야 한다.

(2) 수학적 모델(Mathematical Modeling) 개발
구조물의 수명을 정량적으로 예측하기 위해 최종적으로 정립되어야 할 부분으로서, 각종 열화 현상의 침투·확산 경로, 화학적 반응과 물질 변화율에 대한 사항이 우선적으로 고려되어야 한다. 이를 위해서는 현장 및 촉진 시험 등을 통한 관련 데이터의 확보는 물론 침투, 확산에 영향을 미치는 인자들을 고려하여 이들 계수들에 대한 모델 구성이 필요하다. 그러나, 동결 융해, AAR 등과 같이 이론적 모델 구성이 매우 어려운 항목도 있으며, 실제 구조물에 발생하는 열화 현상은 단일 요인에 의한 다기보다는 여러 요인의 복합적인 작용에 의해 발생하는 것이 일반적이므로 각 요인별 모델을 종합하는 방법에 대한 연구도 지속적으로 이루어져야 한다.

6. 결 론

이상에서 원전 수명 관리의 국내의 현황과 우리 실정에 적합한 수명 관리 기법 개발을 위한 향후 해결 과제를 제시하였다. 수명 관리의 구성 요소 중 점검 절차, 이력 관리를 위한 D/B 구축등 많은 부분에서 실무 적용이 체계적으로 이루어지고 있으며, 구조 건전성 평가 기법 및 잔존 수명 예측 모델 분야에 대하여는 고리 1호기에의 적용을 목표로 현재 연구가 수행 중에 있다.

또한 지금까지 안전성 관련 구조물에 집중되어 있는 수명 관리 대상 구조물의 범위를 지중 매설물, 영구 사면 및 부속 구조물까지 확대하고, 현재 운용되고 있는 수명 관리 체계의 지속적 개선 및 보안을 통해 기술 선진국보다 우수한 시스템을 구축함은 원전 안전에 대한 신뢰성을 높이고 국가의 원전 기술 경쟁력 향상에도 크게 기여할 것으로 판단된다. □

참고문헌

1. 전력연구원, "원전 안전성 관련 콘크리트 구조물의 열화에 관한 연구" 최종보고서, 1996
2. 전력연구원, "원전 수명관리연구(1)" 최종보고서, 1996
3. D. J. Naus, "Report on Aging of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures", 1996
4. James R. Clifton, "Predicting the Remaining Service Life of Concrete", 1991
5. BGENC, "Calvert Cliffs Nuclear Power Plant Integrated Plant Assessment Methodology", 1996

시간 안내

2000 한국콘크리트업체 총람

"총 7편으로 구성, 콘크리트 관련 기관과 업체를 총 정리하였습니다. 별도의 CD-ROM으로도 정보를 검색할 수 있어 편리합니다."

가격 : 회원 60,000원/비회원 70,000원(유편료 3,000원 별도) 문의 및 주문 : (02) 568-5985-7