

원전 장수명 운전을 위한 구조물 수명관리 통합시스템

Development of Integrated Structural Life Management System in Nuclear Power Plants



조명석*
Myung-Sug Cho



노재명**
Jea-Myoung Noh



권기주***
Ki-Joo Kwon

1. 머리말

원자력은 녹색성장의 핵심 에너지원으로 2030년까지 전 세계에 300기가 넘는 신규 원전 건설이 예상되고 있다. 우리나라의 경우 현재 20기의 원전이 운전 중이며, 전체 발전량의 30% 이상을 차지하고 있어 국가 에너지원의 중추적인 역할을 담당하고 있다. 원전에서의 최우선 목표는 안전성으로, 격납건물을 비롯한 원전의 주요 구조물은 인체와 비교할 때 원자로 등 원자력발전소에 필수적인 주요 설비를 지지하고 보호하는 뼈대의 역할을 수행하고 있다. 특히 원전의 안전성관련 구조물의 대부분은 콘크리트 구조로 이루어져 있으며, 콘크리트의 경우 일반적인 인식은 반영구적인 수명을 갖는 것으로 생각하기 쉬우나 침묵의 장기인 간과 마찬가지로 암과 같은 심각한 질병이 발생하기 전까지는 이상 징후를 드러내지 않는 경우가 많다. 그러나 실제적으로는 대기 중의 이산화탄소나 염분 등 사용환경적 요인에 기인한 각종 열화현상(aging)이 발생하고 있으며, 이상 징후가 발생하여 사후조치를 취할 경우 막대한 경제적 손실은 물론이고 교체라는 근본적 조치 적용이 매우 제한적이어서 이미 그 시기를 놓친 경우가 대부분이다. 따라서 국내 원전의 특성이 고려된 사전예방적인 구조물에 대한 체계적이고 효율적인 수명관리기술의 개발 및 적용은 원전의 안전성 향상 및 향후 장수명 운전에 필수적인 요소라 할 수 있다. 이러한 필요성에 따라 한전 전력연구원 원자력발전연구소에서는 한국수력원자력(주)와 공동으로 설계·시공·유지관리 분야를 포괄하는 D/B 시스템을 기반으로 건전성평가 및 효율적인 대책 수립이 가능한 웹(web) 기반의 통합 수명관리시스템인 SLMSⅡ(Structural Life Management System Ⅱ)를 개발하였으며, 국내 전 가동 중 원전에 적용중이다.

* 정희원, 한국전력공사 전력연구원 원자력발전연구소 책임연구원
mscho@kepri.re.kr

* 정희원, 한국전력공사 전력연구원 원자력발전연구소 선임연구원

* 정희원, 한국전력공사 전력연구원 원자력발전연구소 수석연구원

2. 원전 구조물 수명관리의 중요성

원전 구조물 수명관리란 안전성과 소요성능을 유지하면서 경제성이 확보된 최적수명까지 원전을 운영하는데 필요한 제반 기술 활동이라 할 수 있으며, 지금까지 일반적으로 사용해 온 유지관리와는 달리 능동적이고 미래지향적인 성격이 강한 의미를 내포하고 있다. 즉, 유지관리는 현 상태 유지 측면의 수동적 의미가 강한 반면 수명관리는 현 상태는 물론 미래의 건전성 확보를 대상으로 하며 이러한 수명관리의 개념은 구조물의 사용기간 동안뿐만 아니라 설계 및 시공단계까지 적용하는 포괄적인 개념이다. 이와 같은 수명관리 활동의 주요 부분은 사용년수와 관련된 각종 열화 현상의 규명 및 경감대책의 수립이라 할 수 있으며, 이를 통하여 안전성이 확보된 원전의 장수명 운전을 달성하는 것이 원전 수명관리의 궁극적 목표라 할 수 있다.

우리나라의 경우 고리 원전 1호기가 상업운전을 개시한 이래 30년이 경과하고 있으며, 이러한 사용년수의 증가에 따른 효율적인 수명관리기법의 개발은 원전 안전성에 대한 국민적 신뢰감 제고는 물론 국가 경제발전의 원동력이라 할 수 있는 에너지원의 확보 및 경제성 측면에서 매우 중요한 과제라 할 수 있다. 특히 원전의 주요 안전성관련 구조물은 대부분이 철근콘크



사진 1. 원전 구조물 시공전경

리트로 이루어져 있으며, 해안가에 위치한 관계로 염해 등 각종 열악한 사용환경에 노출되어 있다. 따라서 심각한 손상이 발생하면 콘크리트라는 복합재료의 특성상 그 원인규명이 어려울 뿐만 아니라 일반 기계설비와는 달리 교체라는 근원적 해결방안의 적용이 매우 제한적인 대표적 장수명 수동형(long-lived passive) 특성을 가지므로 사용 환경을 도외시한 일반적인 외 국기술의 도입은 해결방안이 될 수 없으며 국내 원전의 사용재 료 및 환경조건이 고려된 고유의 수명관리기술의 개발 및 적용 이 필요하다.

3. 원전 구조물 수명관리기술 개발이력

국내 가동 중 원전 안전성관련 구조물의 경우 1997년 이후부 터 전력연구원의 「원전 안전성관련 콘크리트 구조물의 열화에 관한 연구」에서 개발된 점검절차 및 원전 구조물 수명관리시스 템(SLMS I)에 의해 주기적인 점검 및 데이터 관리가 이루어 지고 있다. SLMS I의 경우 10여년의 활용결과 전산기술의 발 전사항 반영 및 기타 개선사항이 도출되어 2009년 전력연구원 주도하에 웹(web)을 기반으로 한 SLMS II로 개선함으로써 선 진화된 수명관리시스템으로 거듭나게 되었다. 원전 구조물 분야 에서의 수명관리기술 개발이력을 요약하면 <그림 1>과 같다.

4. SLMS II(structural life management system II)

격납건물을 비롯한 원전 주요 구조물은 10년 주기로 수행되는 주기적안전성평가(PSR; periodic safety review) 및 계속운 전 인허가시 경년열화 평가분야의 정부규제기관 심사대상으로 안전성의 확보를 위해서는 효율적인 수명관리기법의 적용이 필 수적이다.

구조물 수명관리의 기본은 설계·시공·유지관리의 단계에서 발생하는 각종 이력사항(history)의 체계적인 관리이다. 이러한 분야별 통합 데이터베이스 시스템을 기반으로 하여 구조물의 현

상태를 정량적으로 평가할 수 있는 구조건전성 평가기법 및 평 가결과에 따른 보수·보강방안을 제시할 수 있는 실질적인 수명 관리시스템을 개발하였다.

본 시스템의 목적은 각 원전 수명관리 실무자들의 업무를 보 다 체계적이고 효율적으로 수행할 수 있도록 지원해 주는 것으 로, 설계·시공·유지관리 데이터베이스 시스템, 구조건전성 평 가 시스템 및 보수 프로그램의 3개 분야로 구성되어 있다<그림 2, 3>.

4.1 설계·시공·유지관리 데이터베이스 시스템

데이터베이스 시스템은 설계·시공단계에서 발생하는 각종 자 료를 체계적으로 관리하는 이력관리 데이터베이스와 유지관리 단계에서 수행되는 각종 점검 자료를 관리하는 열화관리 데이터 베이스로 대별할 수 있다.

이력관리 데이터베이스는 원전 건설의 착수시점에서부터 상업 운전 단계까지의 관련 도면, 절차서, 보고서, 시험결과, 품질사례 등의 자료를 확보하여 데이터베이스화함으로써 구조물에 대한 전반적인 정보를 제공하고 관련 자료의 체계적인 관리를 도모한 다<그림 4>.

열화관리 데이터베이스는 원전 운전 중 현장에서 수행된 각종

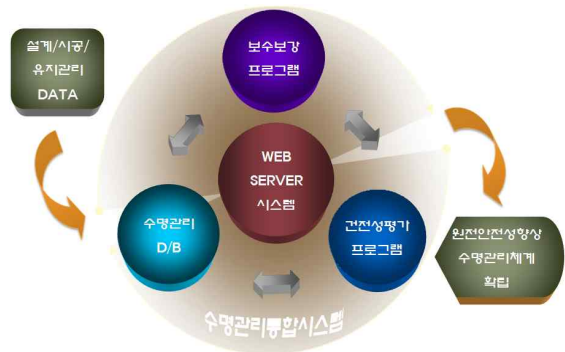


그림 2. SLMS II 구성 개요도



그림 1. 원전 구조물 수명관리기술 개발 추진이력

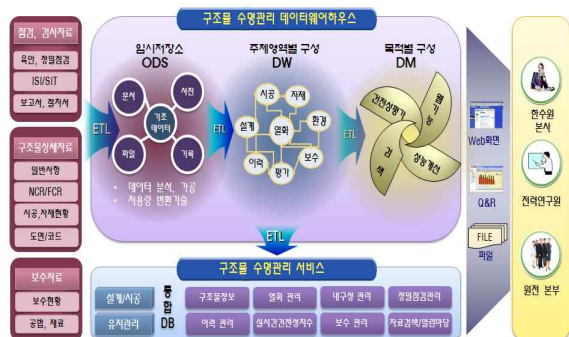


그림 3. SLMS II 기능 흐름도

육안점검 및 정밀점검 자료를 데이터베이스화하여 자동적으로 구조건전성 평가와 보수 관련 지원이 가능토록 한다. 또한 각종 부재에 발생할 수 있는 열화현상을 입력할 수 있도록 직선형, 영역형, 상대좌표형 등 다양한 방식의 입력기법 및 검색·통계처리 기능을 구비하고 있다<그림 5>.

현재 데이터베이스시스템에는 고리·월성·울진·영광 등 총 20기의 원전 구조물과 관련된 20여만 건의 각종 자료가 관리되고 있으며, 향후 건설 중인 신규 원전과 추가 발생하는 자료들도 데이터베이스화하여 수명관리의 기본 자료로 활용할 예정이다.

3.2 구조건전성 평가 시스템

구조건전성 평가시스템은 데이터베이스 시스템의 육안 및 정밀점검 자료를 활용하여 대상 구조물의 현재 상태를 정량적으로 평가하는 기능을 수행한다. 일반적으로 구조물의 건전성을 정량적으로 나타내기 위해서는 대상 구조물 및 부재 등에 중요도에

따른 가중치를 설정하고 발생하는 열화현상에 대한 상태평가 결과를 조합하여 수치화된 건전성지수로 나타내게 된다<그림 6>. 본 시스템에서는 이와 같은 일련의 과정들을 사용자들의 추가적인 작업 없이 데이터베이스 시스템에 입력된 자료를 자동화 처리하여 실시간으로 구조물의 건전성을 평가할 수 있게 함으로써 보수 등 수명관리의 우선순위를 손쉽게 결정할 수 있다.

3.3 보수 프로그램

보수 프로그램은 구조건전성 평가 결과 보수대상으로 선정된 열화현상에 대하여 필요한 보수설계를 자동적으로 수행한다<그림 7>. 즉 보수가 필요한 열화현상을 선정하고, 선정된 대상에 대한 물량 산출은 물론 그에 따른 설계내역서도 작성할 수 있으며 보수 완료사항들을 데이터베이스에 일괄 등록한다<그림 8>. 이를 통하여 사용자들의 보수 관련 수명관리 업무를 체계적이고 편리하게 수행할 수 있도록 지원하는 동시에 모든 작업의 자동화 처리를 통하여 데이터의 중복, 누락 등의 오류 없이 데이터베이스를 효율적으로 관리할 수 있다.



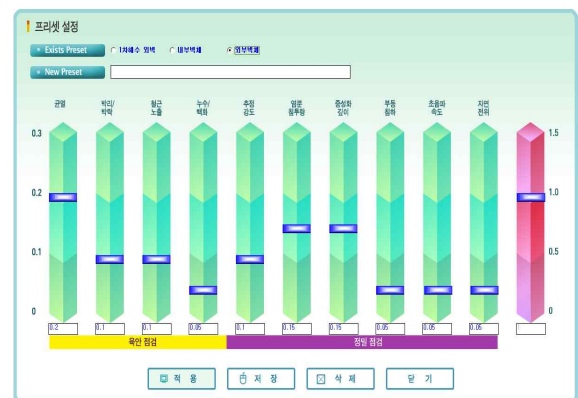
그림 4. 데이터베이스 시스템 예시(구조물 선택)

번호	구분	대상	중요도계수	부재간격	관형	벽면/색역	철근노출	부수/계좌	추경안도	중성축이탈	경보성형형	부동형하	조용파괴도	가장위험부위	비고
1	외부	A	9	0.25	0.2	0.1	0.1	0.05	0.15	0.15	0.15	0.05	0	0.05	1 선택
2	외부	B	1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.05	0.15	0.15	0.15	0.05	0	0.05	1 선택
3	외부	C	1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.05	0.15	0.15	0.15	0.05	0	0.05	1 선택
4	외부	D	1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.05	0.15	0.15	0.15	0.05	0	0.05	1 선택
5	외부	E	1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.05	0.15	0.15	0.15	0.05	0	0.05	1 선택
6	외부	F	1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.05	0.15	0.15	0.15	0.05	0	0.05	1 선택
7	외부	G	1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.05	0.15	0.15	0.15	0.05	0	0.05	1 선택
8	외부	H	1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.05	0.15	0.15	0.15	0.05	0	0.05	1 선택
9	외부	I	1	1.07	0.2	0.1	0.1	0.05	0.15	0.15	0.15	0.05	0	0.05	1 선택
10	외부	J	1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.05	0.15	0.15	0.15	0.05	0	0.05	1 선택
11	내부	내벽 -기.4m	1	1.500	0.25	0.25	0.3	0.2	0	0	0	0	0	0	1 선택
12	내부	내벽 -기.4m	1	1.500	0.25	0.25	0.3	0.2	0	0	0	0	0	0	1 선택
13	내부	내벽 0.0m	1	1.500	0.25	0.25	0.3	0.2	0	0	0	0	0	0	1 선택
14	내부	내벽 0.0m	1	1.500	0.25	0.25	0.3	0.2	0	0	0	0	0	0	1 선택
15	내부	내벽 0.0m	1	1.500	0.25	0.25	0.3	0.2	0	0	0	0	0	0	1 선택
16	내부	내벽 11.5m	1	1.500	0.25	0.25	0.3	0.2	0	0	0	0	0	0	1 선택
17	내부	내벽 21.0m	1	1.500	0.25	0.25	0.3	0.2	0	0	0	0	0	0	1 선택

(a) 연화 가중치



그림 5. 데이터베이스 시스템 예시(점검결과 통계)



(b) 가중치 자동선정

그림 6. 구조 건전성평가 예시

그림 7. 보수대상 선정 예시

그림 8. 보수설계서 예시

4. 기대효과 및 활용방안

전력연구원에서는 원전 안전성 확보에 기본 토대라 할 수 있는 격납건물을 비롯한 안전성관련 구조물의 수명관리를 체계적으로 수행할 수 있는 SLMS II를 개발하였다. 본 시스템은 유지관리 단계 데이터베이스시스템인 기존의 SLMS I을 웹을 기반으로 하여 그 기능을 대폭 개선한 것으로 구조물의 설계로부터 운영까지의 전 단계의 데이터베이스 시스템은 물론 이를 활용한 건전성 평가와 성능개선 활동이 자동적으로 수행되도록 한 전문가 시스템이다. 이와 같은 구조물 분야의 첨단화된 수명관리시스템은 원전 선진국이라 할 수 있는 미국, 일본, 프랑스 등에서도 현재까지 갖추지 못한 세계 최고수준의 선진기술이다.

SLMS II는 고리 원전 등 국내에서 운전중인 20기의 원전에 실제 활용중으로 원전 안전성에 대한 신뢰도 향상에 기여하고 있을 뿐만 아니라 현재 우리나라가 의욕적으로 추진하고 있는 원전 해외수출에도 건설기술과 함께 고위 핵심기술로 활용이 가능하다. 또한 원전 이외의 기타 사회 중요 구조물에도 기본 이론의 확대 적용이 가능하므로 특허출원 등을 통한 기술상표화를 추진할 예정이다.

참고문헌

1. 한국전력공사 전력연구원, '원전 안전성관련 콘크리트 구조물의 열화에 관한 연구', 1996.
2. 한국전력공사 전력연구원, '원전 구조물 수명관리시스템 개선 연구', 2009.
3. USNRC, "Nuclear Plant Aging Research(NPAR) Program Plan", 1991.
4. Naus, D.J., "Structural Aging Program Status Report", 1995.
5. ACI, "Guide to a Recommended Format for Concrete in a Materials Property Database", 1999.

담당 편집위원 : 권기주(한국전력공사) kyeunkjoo@kepco.co.kr