

'99 추계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## 원전 구조물의 수명관리기법 개발을 위한 향후 과제

조명석, 송영철  
전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16  
함영승  
한국전력공사  
서울특별시 강남구 삼성동 167  
조철희, 김용철  
한국전력공사 중앙교육원  
서울특별시 노원구 공릉2동 170-2

### 요 약

원전의 수명관리란 안전성과 소요성능을 유지하면서 최적수명까지 원전을 운영하기 위한 제반 기술활동으로 정의할 수 있으며, 이러한 수명관리의 개념은 구조물의 사용기간 동안 뿐 만이 아니라 설계 및 시공단계에까지 적용되어야 할 포괄적인 개념이다. 본 고에서는 국내외 원전 수명관리 분야의 연구 동향을 소개하고, 우리 실정에 적합한 수명관리기법의 개발시 필수적으로 고려되어야 할 해결과제를 구조물의 현상태평가를 위한 구조건전성 평가기법 개발과 미래상태 예측을 위한 잔존수명 예측모델 분야로 구분하여 제시하였다.

### Abstract

The technical terminology of life cycle management(LCM) of nuclear power plant(NPP) can be defined by the technical activities to maintain the safety and integrity of plant operation and to preserve the optimum lifetime. This is inclusive concept which should be applied in design and construction period as well as operation time. In this study, LCM research trends in Korea and abroad were introduced. Also, as the development of LCM which is suitable for NPP in Korea, essential subjects for the development of structural integrity evaluation method and prediction the remaining service life model were proposed.

### 1. 서 론

우리 나라의 경우 원자력발전소가 상업운전을 개시한 이래 20여년이 경과하고 있으며, 이러한

사용년수의 증가에 따른 효율적인 수명관리기법의 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 발생 시 교체 등의 근원적 해결 방법의 적용이 매우 어려워 실정이다. 따라서 본고에서는 원전의 수명관리 분야에 대한 국내외 연구개발 동향을 소개하고, 주요 콘크리트 구조물의 수명관리기법 개발 시 고려되어야 할 기술적 해결과제를 제시하고자 한다.

## 2. 수명관리의 정의

원전 수명관리란 안전성과 소요성능을 유지하면서 경제성이 확보된 최적수명까지 원전을 운영하는데 필요한 제반 기술활동이라 할 수 있으며, 지금까지 일반적으로 사용해 온 유지관리와는 달리 능동적이고 미래 지향적인 성격이 강한 의미라 할 수 있다. 즉, 유지관리는 어떠한 문제점 발생 시 이에 대한 대처를 통한 현 상태 유지 측면의 수동적 의미가 강한 반면 수명관리는 현 상태는 물론 미래의 건전성 확보를 대상으로 하며 이러한 수명관리의 개념은 구조물의 사용기간 동안 뿐 만이 아니라 설계 및 시공단계에 까지 적용되어야 할 포괄적인 개념이다.

이와 같은 수명관리 활동의 주요 부분의 하나는 사용년수와 관련된 각종 열화현상 (aging related degradation)의 규명 및 경감 대책의 수립이라 할 수 있으며, 이를 통하여 원전의 수명 연장을 이루는 것이 원전 수명관리의 궁극적 목표라 할 수 있다.

1986년 미국의 자료에 의하면, 미국에서 운전중인 원전의 수명을 20년 연장할 때 일반 수용가는 Kw/h 당 약 3센트의 경제적 이득이 있으며, 100,000 MW의 용량을 연장 운전시 약 3,500억 달러의 경제적 이득이 발생한다고 보고하고 있다. 우리 나라의 경우에도 인허가 수명 30년인 고리 1호기의 주요 기기는 40년 이상 연장 운전이 가능하며, 경제적 타당성 또한 확보할 수 있다는 분석 결과가 있다.

## 3. 국내외 연구 동향

### (1) 국 외

미국의 경우에는 원전의 운영허가 시점으로부터 40년간 운전을 허가하는 제도를 시행하고 있으며, 최초 인허가 수명이 40년이 종료된 후 20년씩 연장 운전이 가능하도록 한 인허가 갱신규정 (10CFR54)이 1991년에 제정되었다. 이러한 연장운전과 관련된 기술은 DOE(Department of Energy), EPRI(Electric Power Research Institute), 국립연구소들을 중심으로 80년대 초반부터 기초연구가 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 가동중 원전의 열화관리와 인허가 갱신, 운전성 향상을 위한 연구개발 전략을 수립하는 등 수명관리 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 1998년에는 Calvert Cliffs #1,2호기와 Oconee #1,2,3호기가 60년까지의 계속운전을 위한 인허가를 NRC(Nuclear Regulatory Committee)에 신청하였으며 현재 긍정적으로 심사가 진행되고 있다.

일본의 경우에는 원전 수명기간에 대한 규정이 없으며 매 정기검사시 안전성이 확인되면 다음 정기검사 시까지 NSC(Nuclear Safety Commission)이 인허가를 발급하는 방식을 취하고 있으며 수명관리를 위한 기술개발은 경수로 기술 고도화 계획의 일환으로 추진 중이다. 발전설비 검사협회(JAPEIC), 일본 전력중앙연구소(CRIEPI), 일본 원자력연구소(JAERI) 등에서 수명관리 및 원전 주요 기기에 대한 열화 손상 연구를 추진하고 있으며, 발전소로는 미하마 #1호기, 쭈루가 #1호기, 후쿠시마 다이하찌 #1호기의 상세 수명평가를 수행하고 있다.

영국의 경우에는 연장운전 기간에 대한 규제는 없으나 10년마다 주기적 안전성 재평가를 수행하여 안전성이 확보되면 다음 10년까지의 운영허가를 발급하는 개념으로 운영 중이며, 세계 최초의 상업용 원자로인 Calder Hall 원전 4기와 Chapelcross 4기(초기 설계수명 25년)는 1956년 상업운전 이후 40년이 지난 1996년부터 2006년까지 10년 연장 운전 할 수 있는 인허가를 NII(Nuclear Installation Inspectorate)로부터 획득하였다.

## (2) 국 내

국내의 원전 수명관리 연구는 전력연구원을 중심으로 연장운전 타당성 평가, 상세 수명평가 및 열화관리 방안 수립과 같은 종합적인 수명관리 연구를 추진하고 있으며, 특히 구조물 분야에 있어서는 콘크리트 구조물의 수명관리시스템(SLMS : Structural Life Management System)의 개발을 통하여 고리 1호기를 포함한 가동 중 원전에 대한 D/B 시스템을 구축하였다. 그러나, 기존 구조물의 상태평가와 손상요인의 모델 구성을 바탕으로 한 구조물의 미래상태 예측, 시간의존성 수명저하모델을 이용한 정량적 수명예측 분야의 연구는 전무한 실정이다.

한편, 원전의 연장운전과 관련하여서는 아직 국내 인허가 법규와 규제기준이 없는 실정이며, 규제기관에서는 '96년부터 연장운전 관련 규제정책을 수립하기 위한 연구를 수행중이다.

## 4. 콘크리트 구조물의 수명지배요인과 수명관리

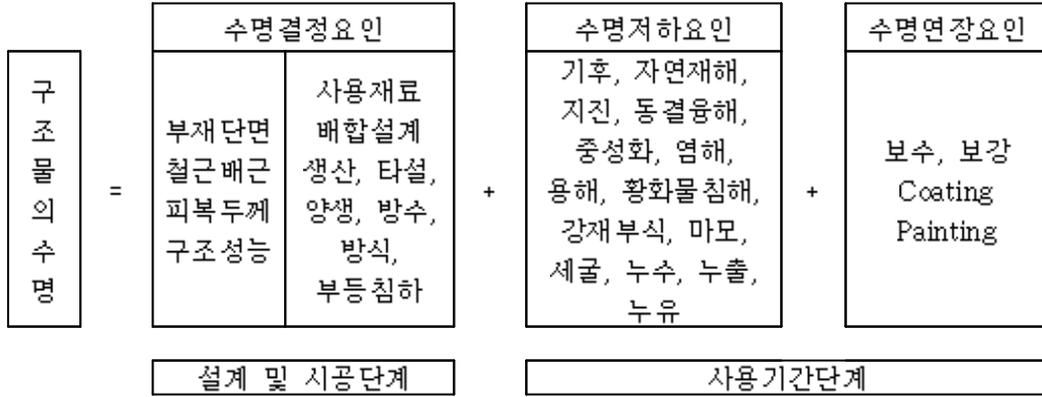
콘크리트 구조물의 사용수명을 지배하는 요인을 명확히 정의하기란 그 요인 및 환경조건의 다양성으로 인해 매우 어려운 일이나 구조물을 설계 및 시공, 사용기간 단계로 구분할 때 <표 1>과 같이 정의할 수 있다.

즉, 콘크리트 구조물은 설계 및 시공단계에서 균열, 투수·투기성, 강도 등이 결정되어 구조물 품질에 따라 일정한 수명(품질상의 수명)이 주어지게 된다. 그러나, 구조물의 품질에 따라 일정한 수명이 주어지더라도 아무런 장애 없이 그 수명을 다하게 되는 것은 아니며 사용기간 단계에서의 주변 환경을 비롯한 각종 열화요인의 영향으로 인해 수명저하 현상이 발생하게 되고, 이러한 저하 현상에 대한 적절한 보수, 보강 등의 활동은 수명저하를 최소화시키며 나아가 수명연장요인으로도 작용하게 된다.

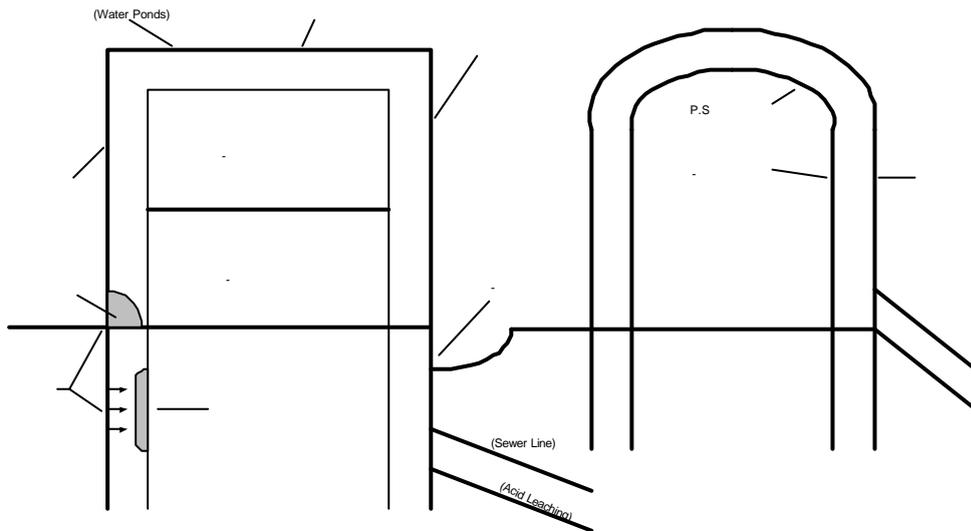
위와 같은 관점에서 구조물의 수명지배요인을 정의할 때 수명관리의 개념은 설계, 시공 및 사용기간에 걸친 전 단계에 적용되어야 할 개념이며, 사용기간 중에 발생한 각종 열화 현상에 대한 분석 결과가 지속적으로 설계 및 시공단계에 Feed-back 되어야 한다.

한편, 가동중 원전의 경우에 수명관리를 적용 시 일차적으로 수명저하요인의 관리 측면이 중요시되어야 할 것이며, 각 저하요인에 대한 메카니즘의 규명, 그에 대한 점검 및 평가기준의 체계화, 각종 자료에 대한 Data Base 구축과 각 원전이 위치한 환경적 요인을 고려한 주요 수명저하요인의 결정 등이 이루어져야 할 것이다.

<표 1> 원전 콘크리트 구조물의 수명지배요인



참고적으로 원전 콘크리트 구조물에서 일반적으로 발생할 수 있는 열화현상을 요약하면 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 원전 콘크리트 구조물의 열화 현상

## 5. 국내 원전 구조물 수명관리 현황

국내 원전 구조물에 대한 수명관리 활동은 주로 안전성 관련 콘크리트 구조물을 중심으로 수행되고 있으며, 구조건전성 평가, 보수·보강, D/B 구축 및 정량적 수명평가와 관련된 각 분야별 주요 현황은 <표 2>와 같다.

<표 2> 국내 원전 구조물 수명관리 현황

| 구 성 요 소  | 주 요 ACTIVITY   | 비 고   |
|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 현장점검 및 구조 건전성 평가</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 점검절차서에 따른 현장 점검 수행</li> <li>· 정기점검 및 특별점검 수행</li> <li>· 추적구역에 대한 일상점검 실시</li> <li>· 본사, 사업소 및 연구원간의 유기적 체계 구축</li> <li>· 건전성평가 기법에 대한 연구 수행중 (2001 완료예정)</li> </ul> <p>&lt;현장조사 항목&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 염화물, 중성화, AAR, 동결융해, 구조물변형 (부등침하, 경사등), 균열, 철근탐사, 철근부식 및 노출, 탈락, 박리, 백화, 용해, 누수, 강도, 마모, 세굴, 콘크리트 성분 및 조직분석, 기타 특수환경 상태(산·알칼리 접촉, 건습, 온도, 지진, 화재, 구조변경등)</li> </ul> |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 보수 및 보강</li> </ul>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 보수절차서 작성 활용</li> <li>· 보수 성능 평가 연구 예정</li> </ul>  |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 이력관리 D/B 구축</li> </ul>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>· SAMS→SLMS에 이르는 전산화된 D/B 시스템 구축 완료 및 활용</li> <li>· 현장 점검시 자료의 입력 의무화</li> <li>· 시공 및 설계사항까지 관리 할 수 있는 종합적 시스템으로 개선 예정 (2000 완료예정)</li> </ul>   | <p>*SLMS<br/>(Structure Life Management System)</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 정량적 수명평가</li> </ul>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 촉진시험을 통한 콘크리트의 정량적 잔존수명 예측 모델 개발 연구 수행중</li> <li>· 고리 1호기 수명연장(30→40년)을 위한 정밀진단 및 수명평가 수행 중 (2001 완료예정)</li> </ul>  |   |

## 6. 원전 콘크리트 구조물 수명관리기법 개발방향 및 과제

구조물의 경우 일반 기계설비 등과는 달리 수명연장 등과 관련하여 문제점 발생 시 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 기계설비의 수명관리기법과 구별되는 특징 및 어려움을 갖고 있다.

원전 콘크리트 구조물의 수명관리기법은 현 상태 평가를 위한 구조건전성 평가 기법과 정량적인 미래상태 예측을 위한 잔존수명 예측모델 분야로 대별할 수 있으며, 각 항목에서 고려되어야 할 기술적 해결과제는 다음과 같다.

## (1) 구조건전성 평가기법의 개발

### 1) 주요 대상 구조물의 선정

원전은 안전성을 최우선으로 하는 구조물로서 원전을 구성하는 모든 구조물이 수명관리의 대상이 되어야 하나, 수명연장 측면에서 볼 때는 원전의 수명에 미치는 영향 정도에 따라 주요 대상 구조물을 분류할 필요가 있다. 현재 원전에서는 발생할 수도 있는 방사성 물질의 누출 등의 위험으로부터 국민의 안전과 자연환경을 보전하기 위하여 설계, 시공, 운영기간 중에 필요한 관리의 정도를 각 구조물, 계통, 기기에 대해 구분하여 부여함으로써 안전성 확보를 도모하고 있으며, 구조물의 등급분류 방식을 요약하면 <표 3>과 같다.

<표 3> 원전 구조물의 등급분류 체계 및 상호관계

| Quality Group | Seismic Category | Safety Class | Safety Designation | Quality Class | 비 고 |
|---------------|------------------|--------------|--------------------|---------------|-----|
| A             | I                | SC-1         | SR                 | Q             |     |
| B             | I                | SC-2         | SR                 | Q             |     |
| C             | I                | SC-3         | SR                 | Q             |     |
| D             | I                | NNS          | NR                 | T             |     |
|               | II               | NNS          | NR                 | T             |     |
|               | III              | NNS          | NR                 | (T, R, S)     |     |
| E             | I                | NNS          | NR                 | T             |     |
|               | II               | NNS          | NR                 | T             |     |
|               | III              | NNS          | NR                 | (T, R, S)     |     |
| G             | I                | SC-3         | SR                 | Q             |     |

※ Quality Group : 품질그룹, Reg. Guide 1.26에 의함

Seismic Category : 내진등급, Reg Guide 1.29에 의함

Safety Class : 안전등급, ANSI/ANS-51.1에 의함

Safety Designation : 안전지정, 10 CFR 50 App. B, Reg. Guide 1.28에 의함

Quality Class : 품질등급, 한전의 품질보증규정에 의함

위의 분류기준을 참고할 때 수명연장과 관련하여 우선적으로 고려되어야 할 구조물은 각 기준의 상위등급에 속하는 구조물을 기준으로 선정되어야 할 것으로 판단되며, 계통 및 설비 부분의 분류 체계도 고려하여 그에 속하는 구조물의 포함여부도 각 원전별 특성을 고려하여 선정하여야 할 것이다.

### 2) 점검절차의 체계화

원전 콘크리트 구조물에서 발생할 수 있는 각종 열화현상에 대한 메카니즘 규명을 통하여 각 현상별 점검항목, 점검 방법, 평가 기준이 수립되어야 한다. 아울러, 원전 콘크리트 구조물의 경우 그 특성상 Core 채취나 재하시험 등을 통한 직접적인 방법의 적용에는 한계가 있으므로, 비파괴 검사방법의 개발 및 분석 분야에 대한 연구가 필요할 것으로 판단되며, 모든 열화 현상이

그 구조물이 위치한 환경적 요인에서 기인하는 만큼 토양, 지하수, 대기, 해수 등의 환경적 요소에 대한 조사도 병행되어야 한다. 그리고 이러한 각종 점검은 구조물 수명기간 동안 주기적으로 수행되어야 하고, 그 결과에 의해 발생하는 모든 이력사항은 구조물의 수명 Data Base로 체계적으로 관리됨으로서, 구조물 현 상태 평가를 위한 기본 자료로서 뿐만이 아니라 수명연장 고려시 미래 상태 예측을 위한 자료로도 활용되어야 한다. 이와같은 점검절차의 체계화는 수명지배요인 중 저하요인에 대한 효율적인 Monitoring 기능을 수행할 것이며, 그 과정에서 도출된 문제점들을 설계·시공단계 및 보수·보강 단계에 반영함으로써 원전 수명관리의 기틀을 마련할 수 있을 것이다.

### 3) 종합적 구조건전성 평가기법의 개발

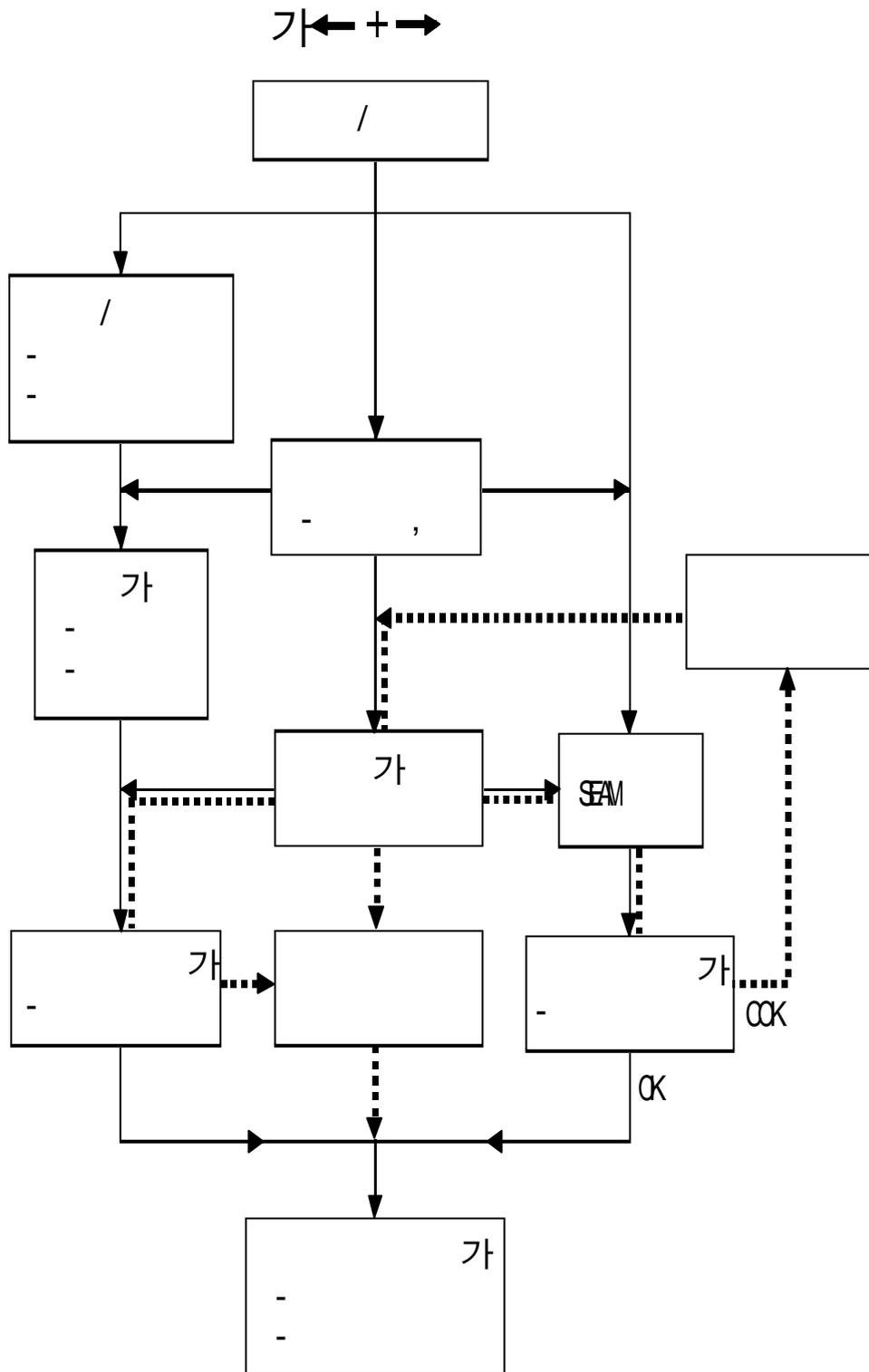
원전 구조물 현 상태의 구조 건전성은 전술한 수명지배요인(결정요인, 저하요인, 연장요인)에 대한 평가를 바탕으로 하며, 원전 구조물은 많은 부재들로 구성되므로 구조물의 건전성은 각 부재에 대한 건전성의 조합이라 할 수 있다. 결국 원전 구조물의 건전성은 각 구조물을 구성하는 개별 부재들에 대한 수명지배요인들의 현 상태 평가를 조합함으로써 평가할 수 있다.

원전 구조물을 구성하는 부재는 격납건물과 같이 특수한 부재를 포함하는 구조물도 있지만 일반적으로 <표 4>와 같이 나타낼 수 있다.

<표 4> 원전 구조물 및 부재 세분화 예시

| 1 단계<br>(최상위조직)  | 2 단계<br>(상위조직)   | 3 단계<br>(중간조직)  | 4 단계<br>(최하위조직)   |
|--|--|---|---|
| 원전 구분  | 구조물 구분   | 부재그룹 구분   | 부재그룹 세부구분   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>· 고리</li> <li>· 영광</li> <li>· 울진</li> <li>· 월성</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 격납건물</li> <li>· 보조/제어건물</li> <li>· 핵연료취급건물</li> <li>· 기기냉각수건물</li> <li>· 디젤발전기건물</li> <li>· 필수냉각수취수구조물</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 각 구조물을 구성하는 부재의 그룹화               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 벽체</li> <li>- 기동</li> <li>- 슬래브</li> <li>- 보</li> <li>- 강재</li> <li>- 기타부재</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 각 부재그룹에 대한 세부구분               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 벽체 세분화</li> <li>- 기동 세분화</li> <li>- 기타 부재그룹의 세분화</li> </ul> </li> </ul> |

구조물에 대한 건전성은 각 부재의 중요도 및 각 수명지배요인의 영향을 고려한 가중치를 부여하여 합산한 건전성 지수(또는 안전성 지수)에 따라 평가하는 것이 일반적이며, 이때 중요도가 높은 구조물일수록 개별 수명지배요인에 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, 수명지배요인을 행으로 하는 SAEM(Structure-element aging matrix) 행렬을 구성하고, 각 구분별로 설계조건 및 점검결과 등을 고려하여 합리적인 가중치를 결정하는 것이 종합적 구조건전성 평가기법 개발의 관건이 될 것이다. 이상과 같은 구조건전성 평가기법의 체계를 도식화하면 <그림 2>와 같다.



<그림 2> 구조건전성 평가기법 체계

## (2) 잔존수명 예측모델의 개발

구조물의 수명을 예측하기 위한 방법으로는

① 경험에 의한 방법, ② 유사재료로부터의 성능비교, ③ 촉진시험에 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 열화현상별 수학적 잔존수명 예측모델 개발을 목적으로 촉진시험 및 현장 점검결과 등에서 얻어지는 데이터의 활용을 병행하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

그러나 콘크리트 구조물의 수명예측에는 많은 영향인자와 데이터의 부족, 촉진시험법의 개념 정립 및 평가, 콘크리트 내로의 염분, 중성화, 화학적 침해 등에 의한 매개물질의 침투 확산을 등에 대한 확립된 이론이 부족하여 구조물의 수명을 정량적으로 예측하기란 대단히 어려운 실정이며, 향후 지속적인 연구 수행을 통하여 해결하여야 할 과제는 다음과 같다.

### 1) 촉진시험법의 개발

촉진시험은 수명예측을 위한 직접적인 방법은 아니나 모델 개발시의 데이터 확보 측면에서 대단히 중요한 요소이다. 그러나 실제 자연현상을 재현하기란 쉬운 일이 아니며, 많은 열화현상에 대한 표준 촉진시험법이 개발되지 못한 실정이다. 따라서 향후 구조물의 실제조건을 최대한 모사(Simulation) 할 수 있는 시험 및 평가기법 개발에 대한 연구 개발은 잔존수명 예측을 위한 매우 중요한 요소이다.

### 2) 수학적 모델 개발

구조물의 수명을 정량적으로 예측하기 위해 최종적으로 정립되어야 할 부분으로서, 각종 열화현상의 침투·확산경로, 화학적 반응과 물성 변화율에 대한 사항이 우선적으로 고려되어야 한다. 이를 위해서는 현장 및 촉진시험 등을 통한 관련 데이터의 확보는 물론 침투, 확산에 영향을 미치는 인자들을 고려하여 이들 계수들에 대한 모델 구성이 필요하다. 그러나 동결융해, AAR 등과 같이 이론적 모델 구성이 매우 어려운 항목도 있으며, 실제 구조물에 발생하는 열화현상은 단일 요인에 의한 다기보다는 여러 요인의 복합적인 작용에 의해 발생하는 것이 일반적이므로 각 요인별 모델을 종합하는 방법에 대한 연구도 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

## 6. 결 론

이상에서 원전 수명관리분야의 국내외 연구동향과 우리 실정에 적합한 수명관리기법 개발을 위한 해결과제를 현 상태 평가를 위한 구조건전성 평가기법과 미래상태 예측을 위한 잔존수명 예측 모델 개발 분야로 구분하여 제시하였다. 제시된 해결과제 중 점검절차의 체계화 및 D/B 구축분야 등은 많은 부분에서 연구 결과의 현장 적용이 이루어지고 있으며, 구조건전성 평가기법 및 잔존수명 예측모델 분야에 대하여는 고리 1호기에의 적용을 목표로 현재 연구가 수행 중에 있다. 이러한 원전 구조물의 수명관리 체계 확립 노력은 국가 주요 에너지원인 원전의 안전성 확보를 통하여 대 국민적 신뢰감 제고는 물론 국가 경쟁력 향상에도 크게 기여할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- (1) 전력연구원, "원전 안전성 관련 콘크리트 구조물의 열화에 관한 연구" 최종보고서, 1996
- (2) 전력연구원, "원전 수명관리연구( I )" 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) BGEC, "Calvert Cliffs Nuclear Power Plant Integrated Plant Assessment Methodology", 1996