

## 원자력발전소 수명관리에 관한 연구동향

진태은, 최형집  
한국전력기술주식회사

홍승열, 정일석  
한전전력연구원

### 요 약

국내 기존원전의 가동기간 증가 및 신규 원전에 대한 투자비 상승으로 인하여, 기존원전에 대해 연장운전을 포함한 종합적이고 체계적인 수명관리가 시급한 문제로 대두됨에 따라 고리 1호기를 시범발전소로 선정하여 주요기기들에 대한 지금까지의 소비수명과 잔여수명을 기술적인 측면에서 평가하고, 연장운전의 경제성, 인허가 가능성을 고찰하여 최적 수명 종료시점까지의 운전에 필요한 수명관리 추진방안을 검토하고자 한다.

### 1. 서 론

원자력발전소 건설의 초창기에는 발전소 건설에 관련한 기술과 경험을 축적하기 위한 노력이 필요하였지만, 운전중인 원전의 가동시간이 증가함에 따라 노화(Aging)현상 규명과 적절한 예방보수를 위한 설비관리가 필수 과제로 대두되었으며 이러한 문제를 해결할 수 있는 효과적인 방안이 요구되었다. 따라서 발전소의 노화 및 유지보수 문제 뿐만 아니라 수명관리의 타당성 여부를 결정할 수 있는 원전수명관리연구(Plant Lifetime Management : PLIM)가 수행되었다.

이러한 원전수명관리는 장기적인 안목에서 I, II, III의 3단계로 나누어 추진된다. PLIM 1단계에서는 고리 1호기 수명관리 타당성 연구와 13개 주요기기(Major Components)의 노화손상평가에 중점을 두고 있으며 PLIM 2 단계에서의 업무범위 및 정밀평가에 대한 계획이 제시된다. PLIM 2 단계에서는 고리 1호기 주요 대상기기에 대한 수명의 정밀평가 및 수명관리 체제를 확립하고, 실질적인 수명관리를 위한 개보수 추진계획이 수립된다. 아울러 연장운전을 위한 인허가 서류가 작성되고, 규제기간에 제출하여 검토를 받는다. 마지막 단계에서는 개발 및 확립된 기술을 토대로 수명관리를 위한 개보수작업을 수행하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 PLIM의 기본전략과 현재 진행중인 PLIM 1단계에서의 최근 연구결과 및 고리 1호기 수명관리 관련업무를 소개하였다. 현장 자료조사, 계통/구조물의 분류와 평가기기 선정, 고리 1호기 원자로압력용기 검사시편의 파괴역학 해석 및 주요기기의 노화손상평가가 수행되었으며 아울러 경제성평가, 인허가 규제요건, 요소기술 개발 등이 검토되었다.

## 2. 본 론

### 2.1 KEPCO PLIM PROGRAM

KEPCO PLIM PROGRAM의 첫째 목적은 발전소를 설계수명까지 안전하고 경제적으로 운전하는 위함이며 이러한 첫째 목적이 실현된다면 설계수명을 넘어선 발전소 최적수명까지의 운전을 위한 두번째 목표가 수립된다. 이때 PLIM PROGRAM과 병행하여 수명관리 연구를 뒷받침할 수 있는 핵심기술이 R&D를 통하여 개발되며, PLIM의 일환으로 각 발전소별 최적수명이 보다 세밀한 연구로 평가되어진다. PLIM PROGRAM의 두번째 목적은 최적수명까지 발전소를 운전하는것이다. 만약 최적수명이 설계수명보다 길다면 설계수명 이상으로 운전하기 위한 추가조치들은 장기 계획예방정비계획으로 구체화된다.

고리 1호기 및 국내 원자력발전소의 수명연장을 포함하는 PLIM의 종합계획은 고리 1호기를 기술개발의 선행 발전소 모델로 선정하여 3단계로 나누어 추진된다. 1 단계에서는 규제요건 및 기술적, 경제적인 면에서의 수명관리 가능성이 검토되며 13개 주요기기에 대한 노화손상평가가 수행된다. 2 단계에서는 주요기기에 대한 정밀평가가 함께 1 단계에서 제외되었던 핵심 기기(Critical Components)에 대한 수명평가도 이루어 진다. 3 단계를 위한 PLIM 실행 계획은 1 단계와 2 단계의 수행과정에서 얻어진 결과를 바탕으로 제시된다. PLIM PROGRAM의 종합계획을 표 1에서 보여주고 있으며 이러한 장기계획은 PLIM 1 단계의 타당성 연구결과에 따라 개정될 수 있다.

표 1. PLIM PROGRAM의 3 단계 계획

단 계	기 간	항 목
1 단계	1993 ~ 1996	Feasibility Study <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 연구방법 및 기술개발</li> <li>○ 고리 1호기 PLIM 실현 가능성검토</li> <li>○ 2 단계 계획</li> </ul>
2 단계	1997 ~ 2001	Detail Evaluation & Engineering <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 고리 1호기 정밀 검사 및 잔여수명 평가</li> <li>○ 인허가 갱신을 위한 문서화</li> <li>○ 수명연장 계획</li> </ul>
3 단계	2001 ~ 2008	Refrubish, Replace and Maintenance <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 수명관리 수행</li> <li>○ 신기술개발</li> </ul>

### 2.2 고리 1호기 PLIM

#### 2.2.1 1 단계

1 단계에서의 업무범위는 다음 10개 과제로 구성되어 있다.

- Task 1 : PLIM 기본계획 및 설계수명 검토
- Task 2 : 주요 대상기기 분류 및 선정
- Task 3 : 자료조사 및 데이터베이스 구축
- Task 4 : 원자로 압력용기 수명평가

- o Task 5 : 13개 주요 대상기기 수명평가
- o Task 6 : 감시기술 검토
- o Task 7 : 수명관리 규제요건 검토
- o Task 8 : 경제성 평가
- o Task 9 : 수명관리 요소기술개발
- o Task 10 : 기술적 타당성 보고서 작성

### 2.2.2 설계수명 검토

본 연구에서의 주된 업무는 전체적인 기본계획 수립과 고리 1호기의 설계수명 조사를 포함하고 있다. 특히, 고리 1호기의 30년 설계수명을 재검토하여, 설계수명 30년 또는 40년의 근거를 재분석하였다. 이를 위해 기존의 각종 설계문서와 계약서 등을 검토한 결과, 고리 1호기 원자로 압력용기를 포함한 주요기기들은 당초 40년의 설계수명을 갖도록 설계·제작되었음을 알 수 있었다.

### 2.2.3 기기 분류 및 선정

노화손상 평가를 위한 주요기기의 선별은 PLIM 1 단계에서 매우 중요한 부분이다. 왜냐하면 PLIM 계획의 시작시점에서 발전소 수명에 가장 지대한 영향을 미치는 기기는 어떠한 기기이며, 그 이유는 무엇인가를 반드시 알고 있어야 하기 때문이다. 따라서 고리 1호기 계통, 구조물 및 주요기기(System, Structure, Components :SSC)를 웨스팅하우스 소유자 그룹(Westinghouse Owners Group :WOG)의 선정기준을 적용하여 분류하였다. 이러한 분류절차에는 10CFR54 및 10CFR50.65에서 각각 규정하고 있는 안전성관련기준인 미국 NRC의 인허가갱신규칙과(LR)과 유지보수규칙(MR)등이 주요 분류기준으로 적용되었으며 또한 발전소의 가동성(Availability)을 바탕으로 하고 있는 전력생산(PP) 관련 기준들도 포함하고 있다. 고리 1호기 SSC를 분류한 후, 주요기기과 구조물은 그들의 중요도를 결정하기 위하여 우선순위를 선정하였다. 고리 1호기 주요기기의 우선순위는 교체 혹은 개보수의 영향을 평가하기 위해 선택된 10개의 평가항목에 근거를 두고 있으며 이러한 평가항목에는 교체 및 개보수 비용, 발전소 가동성의 영향, 방사선선량 등이 포함되어 있다.

### 2.2.4 자료 조사

발전소의 현재 노화손상을 평가하기 위해서는 고리 1호기의 상업운전 이후 축적된 방대한 양의 설계 및 현장 데이터의 추적과 검토가 선행되어야 한다. 수집된 많은 자료에서 유용한 데이터로 재생하기 위한 노력은 운전천이횟수 등 각종 손상평가의 기본지표가 되는 변수를 구성한다는 측면에서 매우 중요한 일이다. PLIM(I)에서는 수집된 자료를 다음의 4개 분야로 구분하였다.

- o 일반자료 및 기술평가자료
- o 운전이력 관련자료
- o 기기별 설계 및 제작 관련자료
- o 정비 및 가동중검사 자료

## 2.2.5 주요기기 수명평가

고리 1호기의 노화상태를 평가하기 위해 PLIM(I)의 착수시점에서 주요기기를 선정된 결과, 다음과 같은 13개 기기를 PLIM(I)을 위해 우선적으로 검토해야 하는 기기로 도출한 바 있다.

- 원자로 압력용기
- 원자로 내부구조물
- 제어봉 구동장치
- 원자로 냉각재 배관
- 원자로 냉각재 충전 및 안전주입 노즐
- 가압기
- 가압기 밀림관 및 분무관 노즐
- 원자로 냉각재 펌프
- 원자로 압력용기 지지구조물
- 터빈
- 발전기
- 격납건물
- 케이블

주요기기의 수명평가를 수행하기 위해 손상촉진요인, 손상부위, 손상기구, 손상형태 및 운전이력 등을 기술적 평가를 통하여 확인하였다. 물론 본 PLIM(I)은 타당성 검토이므로 주로 기존의 이론들을 활용한 이론적 평가가 수행되었다. 이러한 업무는 가능한 노화관련 손상기구의 정량적인 평가를 목표로 하고 있다. 또한 평가방법은 수명관리연구를 이전에 수행했었던 기관에서 발행한 기술적인 수행절차와 수집된 기술논문에 의해 가능한 한 신뢰성을 확보하고자 하였다. 표 4는 일례로, 원자로 압력용기의 수명평가를 보여주고 있다.

원자로 압력용기는 건전성평가 측면에서 각별한 관심을 두고 있다. 본 원전수명관리 연구에서는 별도의 요소기술개발을 통하여 관련 요소기술개발 및 시험평가를 수행한 바 있다. 원자로 압력용기 벨트라인 부위에서 34EFPY의 조사량에 해당하는 감시캡슐 WOL 시편에 대한 파괴인성시험 결과 건전성을 확인하였다. 한편, 잔존 피로수명평가와 응력해석을 위하여 상업용 유한요소법 패키지인 NISA를 사용하여 고리 1호기 가압기 밀림관 노즐의 피로수명평가를 수행하였다. 응력해석 결과는 계산과정을 제시하지 않았던 Vender의 설계응력보고서와 잘 일치하였으며, 피로해석 수행 결과, 15년동안 운전한 가압기 노즐의 피로잔존수명은 40년 설계수명을 만족하는데 충분하였다.

## 2.2.6 연장운전 규제요건 검토

적절한 원전수명관리를 위해 인허가 타당성 검토를 수행하였다. 국내 원자력 관련법규로부터 수명관리의 인허가 기준 추진방안을 마련하기 위하여 해외 인허가 규제요건을 추적, 파악하고 해외의 규제동향이 어떻게 적용될 수 있으며, 이에 대한 전력회사의 대처방안이 어떤 형태로 준비되어야 하는지를 검토하였다.

표 4. 원자로 압력용기 수명평가 요약

sub-components	Specific ISI	Degradation Evaluation	Recommendations
Beltline Region	<ul style="list-style-type: none"> <li>o No crack found</li> <li>o 압력용기 : SA508 C1.2 단조강</li> <li>o 용접재 : Linde 80 Flux Mn-Mo-Ni filler wire</li> <li>o 노심대 용접 : B&amp;W WF-233 (Cu 0.29 wt%)</li> </ul>	<p><b>Radiation Embrittlement</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>o 검사시편 시험결과 확인                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 시험결과로 P-T Limit Curve 갱신</li> </ul> </li> <li>o RT<sub>NDT</sub> 천이문제                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- RT<sub>NDT</sub> = initial RT<sub>NDT</sub> + Margin</li> <li>- below 300 F during plant operation</li> </ul> </li> <li>o Upper Shelf Energy(USE)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- USE 규제요건 50 ft-1b 이상유지를 불만족시 저인성 파괴해석 수행</li> </ul> </li> <li>o 저인성파괴해석 및 탄소성 해석                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 34EFPY까지 안전성 확인</li> </ul> </li> </ul> <p><b>Fatigue : simple method</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>o DSR에 SALT, N<sub>t</sub> Design Transient n<sub>t</sub> 가 있으므로 운전이력의 n<sub>t</sub>을 이용하여 누적사용계수(C.U.F) 평가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o RT<sub>ps</sub> 가 수명기간동안 PTS Criteria를 초과할 경우 Plant Specific Analysis 수행</li> <li>o PTS 개정 및 신규 규제 지침 추적 및 적용</li> <li>o 조사량 감소방안</li> <li>o RPV 열소둔 등향 추적</li> <li>o 피로평가시 환경영향효과 고려가 필요</li> <li>o Clad 균열거동 연구</li> </ul>
Outlet/Inlet Nozzle	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Outlet Nozzle Shell 용접부에 결함 존재</li> <li>o 2차 및 5차 가동중검사시 No significant indication 확인</li> <li>o 8차 가동중검사시 Geomegric 으로 판명</li> </ul>	<p><b>Fatigue :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>o DSR에 SALT, N<sub>t</sub> Design Transient n<sub>t</sub> 가 있으므로 운전이력의 n<sub>t</sub>을 이용하여 누적사용계수(C.U.F) 평가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o U<sub>C,NEW</sub> ≥ 0.67 인 지점에서 정밀파괴해석요</li> <li>o 피로 천이 감시시스템 설치 검토</li> <li>o 결함 탐지를 위한 Advanced Ultrasonic Technique 개발 필요</li> </ul>
Instrumentation Nozzles and CRDM Housing Nozzles	<ul style="list-style-type: none"> <li>o No crack found</li> </ul>	<p><b>Fatigue :</b> DSR상의 Desing C.U.F가 0.02 및 0.00 으로 극히 미약하여 피로수명 평가 미수행</p> <p><b>PWSCC :</b> 아직까지 PWSCC가 보고된바 없음</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Detail inspection &amp; analysis 필요</li> </ul>
Flange Closure Studs	<ul style="list-style-type: none"> <li>o No crack found</li> </ul>	<p><b>Fatigue :</b> Outlet/Inlet Nozzle과 동일한 방법으로 평가</p> <p>DSR에 SALT, N<sub>t</sub> Design Transient n<sub>t</sub> 가 있으므로 운전이력의 n<sub>t</sub>을 이용하여 누적사용계수(C.U.F) 평가</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o 높은 설계 CUF 값</li> <li>o 연장운전 고려시 정밀 평가 및 교체 기준 수립</li> </ul>

### 2.2.7 감시기술

주요기기 정밀 수명평가를 위해서는 진단감시시스템의 개발과 이용이 요구된다. 본 연구에서는 주요기기의 건전성에 영향을 미치는 각종 손상기구들을 분석하여, PLIM에 필요한 감시분야를 도출하고 진단감시 시스템 개발현황에 대한 검토를 수행하였다.

### 2.3 연구활동

앞에서 언급한 바와같이 본 타당성 연구와 더불어 다음과 같은 5개 항목의 R&D 가 수행중이다.

- o 원자로 압력용기 소형시편제작 및 활용
- o 증기발생기 튜브의 Pb 분위기에서의 응력부식균열
- o 증기발생기 틈새 수질상태
- o 배관의 자연결합 소형시편 신호평가
- o 격납용기 전선 케이블의 열 및 방사선열화

### 2.4 기기교체

고리 1호기 증기발생기(Westinghouse Model-51) 세관의 재질은 Alloy 600MA의 인코넬합금으로서 관막음(plugging), 슬리빙(sleeving), 공식(pitting)/덴팅(denting), 1차수 응력부식균열 등으로 인

한 빈번한 유지보수 작업과 화학적 정제작업이 진행되어 왔다. 고리 1호기 증기발생기 교체타당성 연구는 PLIM과는 별도로 진행되어, 결정론적 및 확률론적 경제성 평가결과 증기발생기 교체가 가장 경제적이고 효율적이라는 결론을 제시한 바 있다. 이에 따라 1998년 증기발생기를 교체하도록 한바 있다. 이외에 고리 1호기 저압터빈로터의 현장검사결과 습분침투로 야기된 입계응력부식균열로 인한 Disk Head와 Dowel Hole에 많은 균열이 발견되어, 파괴역학해석에 의한 터빈의 안전운전을 입증하기 위해 균열된 부분을 제거하거나 재검사를 통한 완화제안을 제시한 바 있으며 향후, 저압터빈의 다이어프램과 로터를 교체하기로 결정하였다. 이러한 고리 1호기에 있어서의 기기교체 동향은 원전수명관리연구와는 별도로 추진되고 있는 사항들이나, 궁극적으로는 원전수명관리에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 기대된다.

### 3. 결 론

고리 1호기가 처음으로 상업운전을 시작한 이후 발전소 노령화에 따른 수명관리는 최근 원자력 산업계에서 중대한 과제로 대두되고 있다. 따라서 본 연구에서는 원전수명관리(PLIM)의 기본계획과 전략, 고리 1호기 PLIM의 타당성 연구 잠정결과 및 PLIM(I) 프로그램에 대해 소개하였다.

PLIM(I)의 남은 기간동안 주요기기의 노화손상평가, 경제성평가 및 규제요건의 검토 등이 수행될 것이며 경제적인 관점에서 PLIM의 긍정적 결과가 예상된다. 프로세스 컴퓨터 및 I&C의 Upgrade, Plant Uprating, 확률론적 안전성평가, 유지보수의 신뢰도 등이 PLIM과는 다른 프로그램으로 검토되고 있으며 PLIM은 장기적인 안목에서 가장 경제적이고 효율적인 원자력발전소 수명관리 방안을 제시할 수 있으리라 기대된다.

### REFERENCE

1. Korea Electric Power Corporation. 1994 White Paper of Korean Nuclear Power Plants, 1995
2. US. Nuclear Regulatory Commission. 10CFR Part 50.65, Requirements for Renewal of Operating Licenses for Nuclear Power Plants.
3. 한국전력기술주식회사, 원전수명관리연구 2차년도 중간보고서, 1995.