

원전 계속운전의 기술평가

진 태 은 · 한국전력기술(주) 전력기술연구소, 처장

_e-mail : jinte@kopec.co.kr

이 글에서는 원전 계속운전을 위해 지난 '80년대 후반부터 국내에서 수행되어 왔던 각종 기술개발 내용과 고리 1호기 계속운전을 위한 기술평가 내용을 소개하고자 한다.

개 요

'80년대 후반부터, 국내에서도 각 학계, 연구소 및 산업계를 중심으로 가동 원전 등 실제 발전 설비의 경년열화손상 및 수명을 평가하기 위한 연구가 본격적으로 시작되었다. 이는 세계적으로 경년열화 연구가 본격화되기 시작한 '80년대에 국내에서도 정부 주도의 원전 표준화 설계 사업을 수행하면서 기존 원전의 불시 운전정지를 감소시키기 위한 방안을 모색하는 과정에서 태동되었다고 할 수 있다. 이때부터 한국 전력공사 전력연구원, 한국원자력 연구소, 한국전력기술 등을 비롯한 국내 산학연에서 원전의 대표적인 기기/설비에 대한 중성자 조사, 피로, 부식 등 각종 경년열

화현상을 평가하기 시작하였다.

이러한 요소기술 연구개발을 바탕으로 '93년에 원전수명관리 연구(Ⅰ)이 착수되어 원전 전체 계통, 구조물, 기기(SSC ; System Structure Components)에 대해 종합적이고 체계적인 경년열화 평가 및 관리 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 계속운전의 타당성을 기술 및 경제적인 측면에서 평가하였고 인허가 사항을 평가하였다. 기술적인 측면에서는 수명관리의 대상이 되는 계통과 구조물을 분류하고 주요 기기를 선정하여 이들의 수명을 평가하였다. 주요 기기의 수명을 평가한 결과, 평가대상 기기들은 40년 이상 운전이 가능한 것으로 일차적으로 평가되었다. 이외에 심도 있는 요소기술 평가도 병행

하여 계속 추진하였다. 예를 들어 가압열충격평가 연구에서는 원자로압력용기에 대한 추가적인 건전성을 확보하기 위해 미국의 Reg. Guide 1.154에 따라 초기 사건 선정, 열수력 계통해석, 열유동 혼합해석 및 확률론적 파괴역학 해석 등을 수행하였다. 그 결과, 가압열충격에 의한 원자로 압력용기 종합파손빈도는 운전연수 40년과 60년을 기준으로 미국 규제지침서에 제시된 허용기준인 $5.0 \times 10^{-6}/\text{Rx-yr}$ 를 만족하는 것으로 평가되어 계속운전에 대한 확신을 갖게 되었다.

이러한 종합 및 요소기술들을 기반으로 하여 '98년도에 원전수명관리연구(Ⅱ)를 수행함으로써 원전 한호기 전체 계통, 구조물, 기기에 대해 완전한 경년열화 평

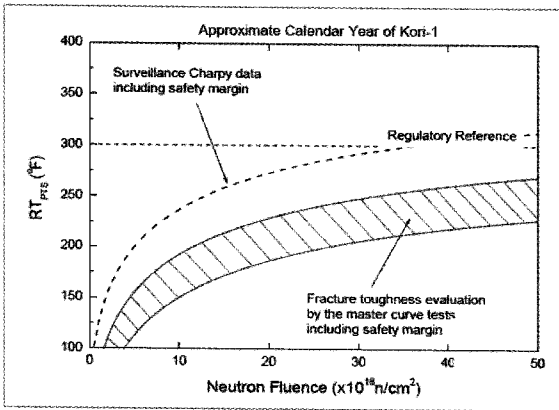


그림 1 고리 1호기 노심대 용접재의 RT_{PRG} 평가 결과

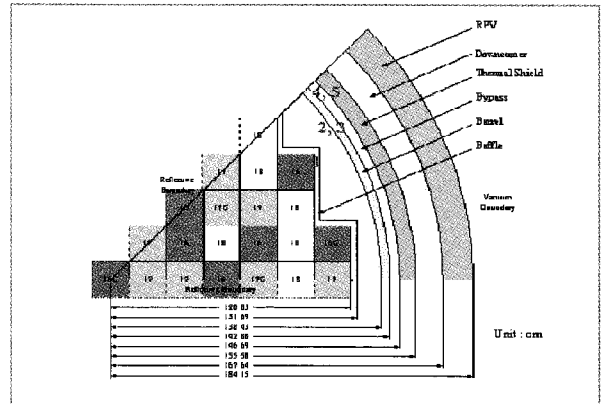


그림 2 조사량 예측을 위해 모델링한 원자로 압력용기 단면

가를 수행한 경험을 보유하게 된다. 이외에도 국내 원자력법 개정에 따른 주기적안전성평가(PSR)가 고리 1호기를 대상으로 2002년에 완료되어 그때부터의 10년 운전의 안전성을 확보하였으며 이러한 경험들을 바탕으로 원전 계속운전의 안전성에 대한 기술평가가 가능한 토대를 구축하였다.

계속운전을 위한 안전성 기술평가

이러한 20여 년간 국내에 축적되었던 고리 1호기 관련 각종 평가결과 및 경험을 바탕으로 2005년 고리 1호기 계속운전을 위한 기술평가가 원자력법에 의거하여 착수되었다. 계속운전을 위해 과학기술부에 제출하여야 할 문서로는 과학기술부 고시 제 2005-31에 제시된 바와 같이 주기적안전성평가 보고서, 경년열화관리 대상선정 평가, 경년열화관리 계획평가, 계속운전을 위한

수명평가, 그리고 타 원전의 운전 경험 및 연구결과 반영사항을 포함한다. 고리 1호기 계속운전을 위해 과학기술부에 제출한 안전성 평가보고서는 총 9권으로 구성되어 있다. 본 보고서에 포함된 주요 기술평가 내용을 간단히 설명하고자 한다.

(1) 주기적안전성평가

주기적안전성평가는 IAEA에서 제시하는 11종류의 안전인자를 대상으로 한다. 이러한 안전인자는 원자로시설의 평가 당시의 물리적 상태, 안전성분석, 기기검증, 경년열화, 안전성능, 원전의 운전경험 및 연구결과의 활용, 운영 및 보수절차서, 조직 및 행정, 인적요소, 비상계획, 환경영향에 관한 사항이다. 이러한 안전인자 11개를 국내 PSR에서는 일반사항 등 다섯 개의 주요 장으로 구분하여 수행하고 있다.

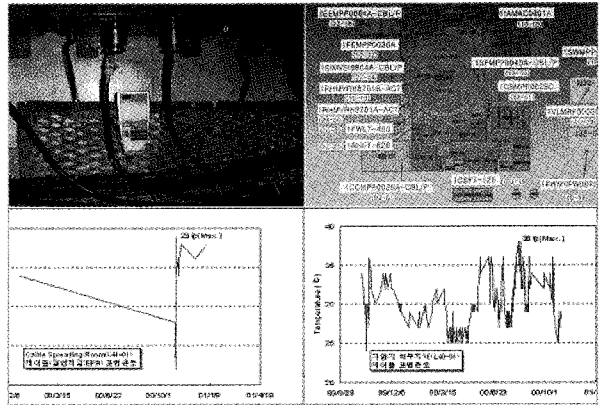
경년열화평가(AMR)의 주요 사항은 SSC에 대한 경년열화의 메

커니즘/영향을 분석하는 것이다. 본 경년열화평가 분야에서는 제1차 PSR에서 도출된 87개의 경년열화 관련 안전성 증진사항들의 이행 현황과 계획을 검토하여 제시하였다. 경년열화 평가는 NUREG 1800, 1801과 NEI 95-10에 기술된 절차에 따라 수행하였다. 이러한 절차에 따라 수행된 경년열화평가 결과는 SSC가 현재 및 보강된 발전소 프로그램으로부터 경년열화현상에 대비하여 적절히 관리될 수 있다는 것을 증명하였다.

원자로압력용기의 경우 중성자 조사취화 평가를 위해 최대흡수에너지, 가압열충격 압력-온도한계곡선을 평가하였다. 최대흡수에너지 평가는 Reg. Guide 1.161 요건에 따라 수행한 결과와 32EFPY(40년 운전 상당) 이상의 중성자가 조사된 5차 감시시험편에 대한 파괴인성시험 결과를 분석한 결과 안전여유도가 충분한 것으로 평가되었다. 가압열



▶▶▶ 초음파 두께 측정 장면



▶▶▶ 케이블 표면온도 측정장치 및 측정데이터

충격 평가는 고리 1호기 고유의 데이터를 사용하여 B&WOG의 Master Curve 방법에 따라 평가한 결과 가압열충격 허용기준(300°F 이하)을 만족하는 것으로 확인되었다. 압력-온도 한계곡선은 온도 및 압력 측정기기 오차를 포함하여 ASME Sec. XI, App. G에 따라 작성하였다.

원자로내부구조물의 여러 경년열화현상 중에 조사응력부식균열, 중성자 조사취화, 기공팽창 및 응력이완은 중성자 조사량과 밀접하게 관련되어 있다. 따라서 중성자 조사량이 가장 많을 것으로 예상되는 고리 1호기 원자로내부 구조물 노심영역에서 운전연수별로 중성자 조사량을 계산하여 이들 경년열화기구 평가에 활용하였다.

이러한 이론적인 기술평가 외에 방대한 양의 현장 검사 및 평가가 병행되었다. 탄소강 재질인 압력용기와 배관에서의 유동가속 부식이나 일반부식 등의 평가는

초음파검사로 두께측정을 수행하고 이를 ASME 코드에 따라 계산한 최소요구두께와 비교하여 잔여수명을 평가하였다. 케이블의 경년열화평가를 위해서는 케이블 표면온도 측정장치를 약 18개월간 부착하여 일정간격으로 온도 데이터를 확보하였다.

(2) 경년열화 관리계획

경년열화 관리대상 SSC 선정은 10CFR54.21에 따라 수행하였으며 NUREG-1800, NUREG-1801을 주로 참조하였다. 경년열화관리 대상 선정은 범위설정 및 기기선정 절차에 따라 기계기기, 구조물 및 전기기기 등 3개 영역으로 구분하여 수행하였다. 그 결과 25개 계통 7개 구조물이 계속 운전 동안 관리되어야 할 범위로 설정되었다. 경년열화관리 대상선정과 관련해 해외 참조원전의 방법론을 참조하여 경년열화관리의 대상이 되는 계통·기기·구조물을 선정하였으며 해당 기기 목록

과 해당되는 경년열화 관리계획을 제시하였다.

경년열화 관리계획 평가는 과학기술부 고시 제2005-31에 따라 안전등급 1·2·3 기기 가동중검사, 안전등급 지시대 가동중검사, 일회검사, 원자로용기 감시, 이물질 감시, 중성자 소음 감시, 모션 덕트, 휴즈 홀더, '환경검증 요건'을 적용받지 않는 전기케이블 금속 연결부 등 총 39개 항목으로 구성되어 있다. 이러한 경년열화관리 프로그램은 NUREG-1801(GALL 보고서)에 제시된 항목들을 기초로 선정된 것들이다.

각각의 경년열화 관리계획은 적용범위, 예방조치, 감시 및 검사 변수, 경년열화영향 탐지, 감시 및 경향분석, 허용기준, 시정조치, 확인절차, 행정적 통제, 운전경험 등 10개 속성에 대한 내용으로 구성되었다. 이러한 속성들은 타 원전의 운전경험 및 연구결과를 고려하여 평가되었다.

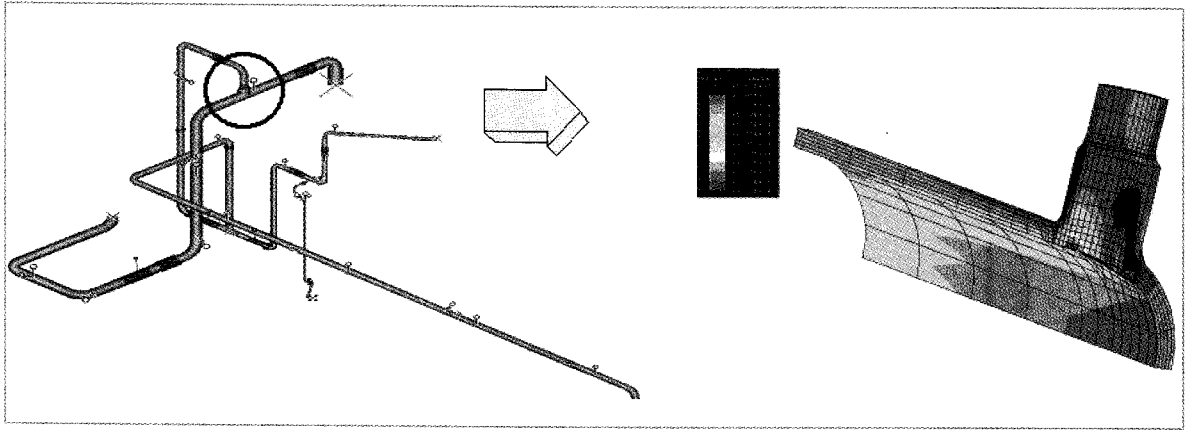


그림 5 안전등급 1 배관 피로평가

경년열화 프로그램 평가의 중요한 부분은 현재 적용 중인 경년열화 프로그램으로 다양한 경년열화현상을 쉽고 효과적으로 관리할 수 있음을 확인하기 위해 현재의 감시/관리 절차 및 정비관리 활동을 분석하는 것이다. 만일 그렇지 못하다면 새로운 절차 또는 관리 방법을 만들어야 한다. 이를 위해 고리 1호기 계속운전을 위한 경년열화관리계획 평가에서는 총 39개의 경년열화관리 프로그램을 대상으로 수행하였다. 검토 결과 대부분의 현행 관리프로그램이 각 SSC에서 나타날 수 있는 경년열화현상을 적절히 효과적으로 관리할 수 있을 것으로 확인되었다. 그러나 일회검사, 재료의 선택적 침출 등 13개의 경년열화관리 프로그램이 신규로 작성되거나 개선할 필요가 있는 것으로 판단되어 모든 조치를 완료하였다. 이러한 신규 또는 개정이 필요하다고 판단된 일회검사, 선택적 침출 등의 분야는 현장과

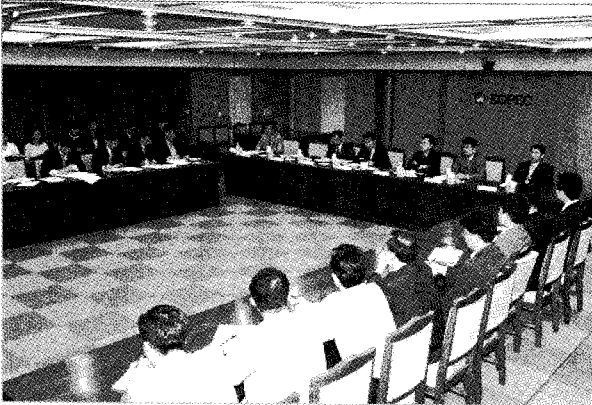
의 유기적인 업무 협조 하에 수행 완료함으로써 이행계획만 제시한 해외 참조 원전과 비교하여 선 수행함으로써 이 분야에서의 기술적 노하우와 경험을 먼저 축적하는 성과를 이루었다.

(3) 시간제한 경년열화 평가

시간제한 경년열화 평가(TLAA)는 계속운전기간 동안 관리될 경년열화현상에 대비하여 계통·기기·구조물의 건전성을 평가하기 위해 수행된다. 고리 1호기의 경우는 원자로압력용기 조사취화, 금속피로, 기기의 내환 경검증, 격납건물 라이너플레이트 및 격납용기 관통부 피로 등 4개의 일반 TLAA 항목과 중성자속 검출관 마모, 기중기 하중운전 횡수 제한, 원자로냉각재펌프 플라이휠, 사용후연료저장조 라이너, 기기 및 배관 표면하 지시사항, 주조오스테나이트 스테인리스강의 열취화 등 6개의 고리 1호기 TLAA를 구분하여 평가하였다.

시간제한 경년열화 평가가 계속운전기간 동안 유효함을 보이거나, 시간제한 경년열화 평가를 계속운전기간 종료시점까지 예측하거나 혹은 고유기능에 대한 경년열화의 영향은 계속운전기간 동안 적절히 관리될 것임을 입증하여 평가가 수행되었다.

원자로압력용기, 제어봉구동장치, 원자로내부구조물, 원자로냉각재펌프, 증기발생기, 원자로냉각재계통 주배관, 안전주입탱크 등 주요 기기에 대한 피로평가는 보수적으로 계산한 운전과도상태 발생횟수를 이용한 결과 40년 운전시점에서도 누적피로사용계수가 1.0 미만으로 허용기준을 만족하는 것을 확인되었다. 이외에도 경수로 조건하의 피로특성도 고려하였으며 향후 10년 계속운전을 위한 추가적인 안전성 확보를 위하여 선진국 원전에서 설치하여 운영하고 있는 피로감시시스템을 고리 1호기에 설치하여 피로영향을 관리하고 있다.



고리 1호기 계속운전 관련 PM 회의



보고서 종합검토회의 모습

계속운전평가보고서를 과학기술부에 제출하였으며, 2006년 8월 29일 과학기술부로부터 서류적합성 검토결과 적합하다는 판정을 접수하였다. 계속운전 안전성 평가서를 과학기술부에 제출한 후 18개월 동안의 법적 심사기간 동안 3차에 걸쳐 규제기관으로부터 총 1,000여 건에 대한 질의를 접수하여 기술적인 답변을 완료하고 승인 받았다. 이 외에도 과학기술부 고시 제2005-31호 제9조에 의거, 고리 1호기 계속운전 평가를 위해 적용된 기술기준에 따른 발전소 현장조치 및 조치의 적정성을 확인하기 위해 3차에 걸친 규제기관의 고리 1호기 현장점검이 실시되어 적절한 조치가 이루어졌음이 확인되었다.

과학기술부는 보다 신뢰성 있는 검증을 위해 국제원자력기구(IAEA)에 고리 1호기 안전성 평가보고서 검토 및 현장점검을 위탁하였다. 이에 따라 한수원은 IAEA에 영문보고서를 방문 3개월 전에 발송하였고 IAEA는 보고

서를 검토했던 각국에서 선발한 7명의 전문가를 파견하여 2주 동안 기본원칙, 기기분류, 기계, 전기 및 계측기기, 구조물 및 방사선환경영향평가 등 6개 분야로 구분하여 검토를 수행하였다. 2주간의 IAEA 검토결과 고리 1호기는 계속운전시 안전성에 문제가 없으며 관리가 잘 되어 있다고 판단하여 고리 1호기의 계속운전을 위한 제반 내용이 국제기준에 부합한 것으로 과학기술부에 보고하였다.

계속운전 승인 및 재가동

고리 1호기는 특기할 만한 사건 없이 30년 동안 가동되었다. 설계 당시 고리 1호기는 ASME Sec. III, 1968 ed.에 따라 설계되었다. 이 이후로 국내외 운전경험 및 연구결과를 반영하여 최신의 기술기준을 적용하여 개정되어 왔다. 발전소 수명은 비용과 이익에 근거하여 안전성을 기초로 결정하여야 한다. 계속운전기간 동안 SSC의 경년열화현상이 적절하게 관리됨

을 증명할 수만 있다면, 계속운전을 위한 결정은 타당하다고 판단할 수 있다. 고리 1호기는 상기의 조건들을 모두 만족하여 계속운전이 가능할 것으로 원자력안전전문위원회는 판단하였다. 결국, 현재 또는 보강된 발전소 프로그램으로 경년열화가 적절하게 관리될 수 있음이 증명되어 고리 1호기의 계속운전에 기술적 한계가 없다는 결론에 도달하여 과학기술부는 계속운전을 공식 허가했다.

이러한 고리 1호기 계속운전의 안전성을 확보하기 위한 기술평가에는 한수원, 전력연구원, 한전기술(주) 전문 연구원을 포함한 원전 산업계, 원자력연구원, 각 대학 등 국내 원자력 분야의 거의 모든 산학연의 수백여 전문가가 투입되어 평가 및 인허가 질의답변을 수행하였다. 특히 기술평가는 지난 20여 년간 국내 원자력 산·학·연의 연구, 기술평가 내용을 총 망라하여 반영한 국내 원자력 기술평가 노력의 결실이라고 말할 수 있다.