중수로형발전소(PHWR) 운영 기술 개발 및 안정 운전을 통한 효율성 제고

황 민 영
한수원(주) 월성원자력본부 제2발전소장

한국원자력산업회의에서 수여하는 제13회 한국원자력기술상 은상을 받게 되어 매우 기쁘게 생각하며, 필자와 함께 국내 중수로발전소 운영 기술 및 원자력 발전 안정 운영을 위한 기술 개발 등에 참여한 한국수력원자력(주) 관련 부서 및 특히 월성원자력본부 직원 모든 분들께 수상의 영광을 돌리고자 한다. 그리고 원자력산업회의 관계자를 비롯하여 본 상을 추천하고 심의하여 주신 분들께도 깊은 감사의 말씀을 전해 드린다.

필자가 1975년 한전에 입사하여 고리 1호기 시운전 근무를 시작으로 원자력 발전에 몸을 담은 지 벌써 30여년이 지났다.

한국전력공사에 입사하여 고리 1호기, 월성 1호기 시운전 요원으로 선발된 후 현재까지 경수로, 중수로 발전소의 각종 현안 사항에 대한 철저한 원인 규명과 분석을 통해 문제점을 해결 원자력발전소의 안전 운영에 기여하였다.

특히 중수로발전소의 계통 신뢰도 분석을 위한 적용 프로그램을 개발하여 확률론적 안전성분석(PSA) 기틀을 조기 확립하고, 사건 대응형인 비상 운전 절차서를 중수로 최초로 징후 대응형으로 개발하여 운전 조직의 비상 대응 능력을 획기적으로 향상시켰으며, 최근 현안 사항인 월성 3호기 탄소-14(C-14) 배출량의 근본적인 문제 해결을 위해 전담팀을 구성하여 배출량을 현격히 낮추어 쾌적한 원전 주변 환경 조성에 크게 이바지하는 등 원자력 산업의 발전과 원자력 기술 개발을 위해 노력했다.

이런 업무를 추진하는 과정에서 원자력발전소 운영 및 기술 개발 업무에 적극적으로 참여하고 자신의 일처럼 도와주신 분들에게 더 감사드려야 할 것임은 물론이다.

원자력산업은 전 원자력 종사자가 빈틈없이 자기 역할을 완벽하게 수행해야 하는 종합 예술이라고 생각한다.

여기서는 본 한국원자력기술상 공적 대상 기간인 지난 수 년간 한국수력원자력(주)에서 필자가 주로 수행한 업무를 소개하고자 한다.

안전성 및 운전 능력 향상을 위한 기술 개발

국내 원자력발전소는 1978년에 고리 1호기 상업 운전 이래 현재까지 총20기가 가동하여 운영되고 있다. 한국수력원자력(주)는 설비면에서 세계적 규모의 발전 회사로 국내 전력의 40%를 공급하는 국가 에너지 공급의 중추적 역할을 수행하고 있으며, 설비 운영 면에서는 지난 수

년간 이용률이 계속 90%대를 넘어 세계 최고 수준을 유지하고 있다.

또한 기술 측면에서도 국내 자립 기술로 건설과 운영을 성공적으로 수행하는 등 국민에게 값싼 전력 에너지 공급이라는 책무를 충실히 수행하고 있다.

필자는 1979년 월성 원자력 1호기 시운전 요원으로 선발된 후 지금까지 중수로 안전성 및 운전 능력 향상을 위한 기술 개발에 몸담아 왔다.

1. 중수로 안전 계통 신뢰도 데이터 관리 및 분석 프로그램 개발

중수로발전소는 발전소 운영에 있어서 가장 중요한 안전 계통(제1정지 계통, 제2정지 계통, 비상 노심 냉각 계통, 원자로 건물 계통)의 이용 불능도 계산을 위해 원자력발전소에서 연간 발생한 고장 자료를 설계 자료에 포함시켜 수작업으로 연1회 신뢰도 분석을 수행하여 왔다.

신뢰도 분석 방법으로는 지난 1989년 한국에너지연구소(현 원자력연구소)에 의뢰하여 "원전 이용률 향상을 위한 설비 분석 연구" 과제로 개발한 전산 코드(BECHID Code)와 "Tree Master" 고장 수목을 이용한 DOS용 프로그램을 사용하였는데, 이를 수행하는 과정에서 고장 자료를 신뢰도 분석 TOOL에 입력하기 위한 Data Base 구축 수작업 및 이용 불능도를 계산하기 위한 프로그램 수정 작업이 장시간 소요되어 연간 1회 신뢰도 분석을 수행하는 데 6개월의 시간이 소요되었으며, 수집된 고장 자료의 DB화를 위한 프로그램이 없어 안전 계통 신뢰도 분석의 근간이 되는 수집된 각 부품별 고장 자료 및 내역 관리 체계가 취약하였다.

이런 문제점을 해결하기 위해 안전 계통 신뢰도 분석 절차를 일괄적인 공정으로 전산화 추진, 윈도우 운영 체제에서 신뢰도 분석의 신속한 수행으로 안전성 목표치의 만족 여부를 확인, 안전 계통에 대한 각 부품별 고장 자료 관리 체계화 추진 및 최근 상업 운전을 시작한 월성 2,3,4호기의 PSA(Probability Safety Assesment) 수행시 계통 이용 불능도 계산에 사용한 고장 수목 및 코드 적용을 통해 신뢰도 확보의 개발 목표로 개발 과제를 수행했다.

기술 개발은 1년 4개월 기간 동안 월성원자력, (주)액트 및 동국대학교와 공동 연구로 추진되었다.

주 개발 내용은 월성 1호기 안전 계통 기기들에 대한 13년간(1985년~1997년)의 부품별 고장 자료 수집 정리 및 데이터 베이스화, 안전 계통 시험 루프별로 시험 주기 수집 및 데이터 베이스화, 신뢰도 데이터 관리 프로그램(RDMS : Reliability Data Management System) 개발, 월성 1호기 고유 고장 자료 생산 및 데이터 베이스화, 월성 1,2호기 안전 계통별 고장 수목 작성, 윈도우즈용 종합 신뢰도 분석 프로그램(KIRAP : KAERI Integrated Reliability Analysis Code Package)과의 연계, 월성 1,2호기 안전 계통 신뢰도 분석 및 시험 주기 분석(비상 급수 계통 신뢰도 분석 포함) 등이 그 주된 내용이다.

중수로 안전 계통 신뢰도 데이터 관리 및 분석 프로그램 개발은 안전 계통 신뢰도 분석 체계의 자동화로 분석 업무 소요기 간이 기존보다 1/4 정도로 감소됨에 따라 1999년 이후 안전 계통에 대한 주기적인 신뢰도 분석을 매 분기마다 수행함으로써 중수로 원전의 안전성 향상에 기여하였으며, 안전 계통 관련 시험 절차서의 시험 주기 변경 사유 발생시 계통의 이용 불능도에 미치는 영향을 신뢰도 측면에서 즉시 분석 가능하도록 하였고, 중수로 안전 계통 신뢰도 데이터 관리 프로그램(RDMS)으로 안전 계통에 대한 고장 자료 관리와 기기 고유 고장률 계산을 완전 자동화하였다.

이를 통해 월성 1호기의 경우 13년간의 운전을 통해 발생한 고장 자료를 일반 고장 자료와 합성해 생산해 낸 고유 고장 자료를 이용하여 계통 이용 불능도 계산이 수행되었으며, 월성 3,4호기 프로그램 보급 및 안전 계통 신뢰도 분석에 이용하였다.

또한 국내 원전의 신뢰도 분석 전문 업체를 양성함으로써 이 분야의 기술 인프라 및 전문지식 확보 등에 기여하고자 하였다.

2. 월성 1호기 징후 대응형 비상 운전절차서 개발

원자력발전소의 비상운전절차서(EOP : Emergency Operating

Procedure)는 그 기술적 배경이 되는 고유기술배경서(EOG : Emergency Operating Guideline)에 근거하여 작성되어야 하며, 설계 및 설정치와 같은 발전소 고유 특성이 포함된 절차서로 개발되어야 한다.

월성1호기 EOP는 EOG 작성 없이 원전 공급자인 캐나다로부터 제공받은 기초 자료를 토대로 EOP가 작성되었고, 내용 또한 세계적 추세인 징후 대응형 절차서가 아니라 특정 사고에만 대응이 가능한 사건 대응형 내용으로 이루어져 있었다.

이에 중수로 원전 사고에 효과적으로 대처할 수 있는 징후 대응형 EOP 작성을 위하여 그 기술적 배경이 되는 EOG의 작성이 요구됨에 따라 월성1호기 징후 대응형 비상운전절차서 기술 개발을 추진하였다.

개발 목표는 월성 1호기의 비상운전절차서(EOP)의 작성 기준인 고유기술배경서(EOG)를 1983년 월성 1호기 상업 운전 이후 약 15년 동안 설계 변경된 사항들과 운전원 경험 및 운전 특성을 반영하고 월성 2, 3, 4호기와의 운전 특성상의 차이점을 비교, 분석하여 관련 기준에 적합한 체계로 작성함으로써 월성 1호기의 안전성 확보 및 이용률 향상에 기여하였다.

또한 중수로 원전 EOG 작성 요소기술을 확보하여 독자적으로 중수로 원전 EOG를 작성 가능하게 하였고, 향후 월성 1~4호기 EOG의 개정 또는 보완 작업을 자체적으로 수행 가능토록 하였다.

기술 개발은 13개월 동안 한전전력연구원, 월성원자력, 한국전력기술 등의 공동 연구로 수행되었으며, 개발 내용은 월성 1호기 설계 변경 영향 평가, 월성 1호기 EOP 및 OM(Operating Manual) 검토, 월성 2호기와 설계 차이점 분석, 설계 관련 서류 검토, 월성 1호기 비상 대응 전략 및 표준 냉각 절차 개발, 대형 냉각재 상실 사고시 건전 루프 식별 방법 연구 및 설정치 관련 계측기 불확실도 자료 수집 및 검토 등이다.

이를 통해 월성 1호기 EOG001(진입 절차서), EOG002(징후 대응형 절차서) EOG003~015(사건 대응형 절차서) 개발 및 Setpoint Accuracy Report, Step Deviation Report 등의 연구 성과물을 생산했다.

이 연구 개발을 통해 월성 1호기 EOG 및 징후 대응형 절차서인 EOP, 가상 사고시 발전소 거동 분석 기술 및 설정치의 불확실도 파악 및 설정치 근거 자료를 확보하였다.

특히 월성 원자력 및 국내 기관 공동 수행을 통한 기술력 확보, 경비 절감과 비상 사고 대처 능력 향상으로 발전소 안전성 및 경제성을 제고하였으며, 장기적인 기술 현안을 해소시킴으로써 대정부 및 국민의 신뢰를 향상시키는 계기를 마련하였다.

원자력발전소 안정 운영을 통한 효율성 제고

원자력발전소의 운전년수가 증가함에 따라 지속적인 안전 운전을 위한 운영상의 현안 사항이 발생되었고 이를 위한 체계적인 운영 및 개선이 요구되었다. 이에 따라 현안 해결을 통해 원자력발전소의 효율성 및 안전성 향상을 지속적으로 추진하였다.

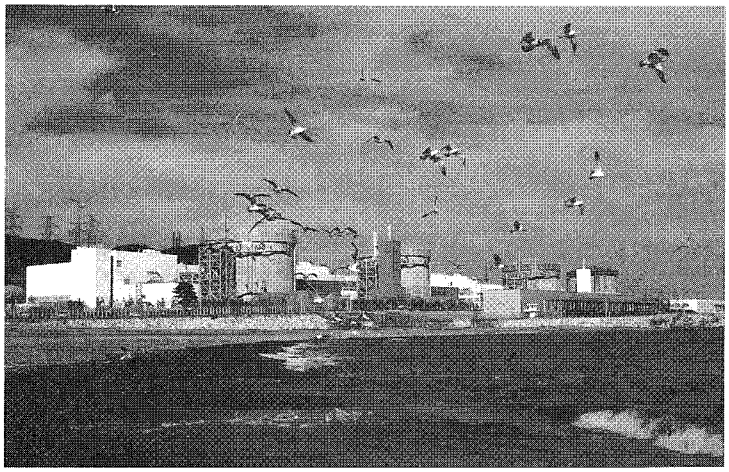
1. 월성 3호기 탄소-14 배출량 감소로 친환경 원전 조성

중수로 발전소의 감속재 계통에서 주로 생성, 방출되는 탄소-14 핵종은 에너지 준위가 높고 반감기가 5,730년으로 매우 길어 과기부 고시에 환경 감시 항목으로 관리되고 있다.

그러나 월성 3호기 탄소-14 방출량이 타호기보다 높아 1998년 12월부터 2004년 10월까지 탄소-14 저감화 대책 연구 개발을 시행하여 탄소-14의 누설 근본 원인을 파악하였다.

상기 연구 개발 과정에서 자체 전담팀 구성 및 누설 원인 파악을 위해 호기 간 감속재 상층기체 계통 압력 감소율 비교 검토 수행, 원자로 반응도 제어 장치를 통한 헬륨 누설 점검 수행, 감속재 상층 기체 계통 기기 외부 누설 점검 수행 및 독물질 주입 계통 점검 수행 등으로 상세한 현장 누설 점검 수행, 외부 누설 부위 밀 조치 및 일부 배관의 내부 누설 부위 확인(배출 주요 원인)후 이를 2004년 계획예방 정비시 밀봉 조치 완료하였다.

그 결과 월성 3호기 탄소-14 배출량이 감소되었으며, 월성 4개 호기 중 가장 양호한 값을 유지하고 있다. 이는 탄소-14 배출량 감소로 쾌적한 원전 주변 환경 조성에 기여한 사례라 할 수 있다.



월성 원전

2. 증기발생기 대체 급수원 개발에 따른 안전성 향상

중수로 발전소는 계획 예방 정비 기간 중에도 원자로에 연료가 장전되어 일정량의 열량이 지속적으로 발생되므로 경수로와 달리 노심 냉각 기능을 항상 확보해야 한다.

따라서 원자로 냉각을 위한 증기발생기 2차 측에 급수(냉각원) 공급이 항상 가능하도록 해야 하며 급수 계통 정비를 위해서는 별도의 조건과 정비 기간이 필요하다.

이를 위해 증기발생기 블로우다운 배관에 순수 공급 계통을 연결하는 설계 변경을 수행하여 계획 예방 정비시 급수 대신 순수를 냉각원으로 사용 가능토록 냉각원을 이중화하였으며, 따라서 주공정과 병행하여 급수 계통의 정비가 가능해짐에 따라 계획 예방 정비 기간을 5일 이상 단축시킬 수 있을 뿐만 아니라 노심 냉각 방법의 다양화로 계획 예방 정비 기간 중 한 차원 높은 원자로의 안전성을 확보할 수 있었다. 이 결과는 2006년 5월 현재 월성 1,2,3,4호기에 모두 적용 운영중이다.

3. 터빈 부하 운전 중 밸브 시험 절차 개선을 통한 이용률 향상

중수로발전소, 특히 월성 2,3,4호기 운전중 터빈 부하 밸브 시험을 1개월 주기로 수행하고 있으며, 밸브 시험 전 원자로 출력을 95%까지 감발한 후 고압 터빈 제어 밸브, 고압 터빈 정지 밸브, 저압 터빈 제어 밸브 등을 시험한 후 원자로 출력을 100%로 복원하게 된다.

그러나 시험 절차 과정을 정밀 분석하여 고압 터빈 제어 밸브(4개)는 기존처럼 95% 출력에서 시험을 수행하고 나머지 밸브(12개)는 100% 출력에서 시험을 수행토록 개선함으로써 출력 감발 유지 시간을 60분에서 10분으로 대폭 감소시켜 발전량 증대 효과 및 이용률을 향상시켰다.

추가적으로 원자로 고출력 부근 출력 정밀 조정 프로그램 개발 및 월성 1호기 압력관 교체 주공사 준비 업무 기반 구축 및 월성 1호기 계속 운전을 위한 설비 개선 업무를 추진하였다.

이런 안전성 및 운전 능력 향상을 위한 기술 개발 및 원자력발전소 현안 해결을 통한 효율성 제고를 위한 업무 수행으로 월성 1호기가 한 주기 무고장 안전 운전(OCTF : One Cycle Trouble Free) 4회를 달성하여 원자력발전소의 안전성을 국내·외에 알리는 계기를 마련하였다.

이 같은 성과는 과감한 투자를 통해 발전 설비의 건전성을 최상으로 유지하는 한편, 전 직원이 설비에 대한 애정을 가지고 자신의 업무에 최선을 다한 결과라고 볼 수 있다.

마지막으로 한국수력원자력(주)는 세계 6위 규모의 원자력 발전 설비를 갖추고 있으며, 국내 총전력 수요의 약 40%를 담당하고 있다.

2006년에도 안전을 최우선으로 신뢰도 높은 설비 운영 실적을 이룩함으로써 사상 유래 없는 고유가의 높은 파고 속에서도 국민 경제의 부담을 감소시키고 제반 산업의 경쟁력을 강화하는데 이바지하고자 한다.

그러나 이러한 원자력 발전 설비를 지속적으로 안전하게 운영하고 우수한 발전 실적을 유지하기 위해서는 설비에 대한 보다 깊은 관심과 철저한 관리가 필요하며, 선진 운영 기술을 적극적으로 수용하여 원자력발전소 운영 절차를 끊임없이 개선하는 일이 필수적이라 하겠다.

이를 통해 원자력 안전성을 확보하고 동시에 원자력에 대한 신뢰성 및 사회적 수용성이 날로 향상되어 갈 것임을 확신하는 바이다.