

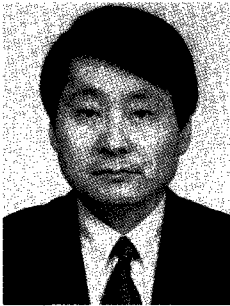


공로상

# 국내 최초 증기발생기 교체 공사

추연진

현대건설(주) 이사



**지**난 98년 원전 가동 20주년을 맞은 고리 원전 1호기의 증기발생기 2기가 국내 최초로 정기 계획 예방 정비 기간중에 신형 증기발생기로 교체되었다.

이번 교체 공사는 사용 기간이 20년을 경과하면서 증기발생기 전열관(3,388개)의 열전달 성능이 떨어져 튜브 관막음(Plugging) 등과 같은 방법보다는 아예 증기발생기 자체를 교체하는 것이 안전성과 경제성면에서 유리하다는 발주처의 판단 아래 증기발생기 2기 모두 교체하게 된 것이다.

원자력발전소의 설계 수명은 일반

적으로 30~40년을 기준으로 설계되나, 증기발생기는 다른 대다수 기기들과는 달리 정비 보수하기가 어렵다.

증기발생기는 단순한 열교환기로서의 역할뿐만 아니라 원자로 1차측 냉각수의 방사능을 밀폐하는 구실도 한다.

증기발생기의 세관 속으로는 150기압의 원자로 냉각수가 통과하고 동체쪽으로는 2차 계통 냉각수가 90기압으로 통과하면서 열 교환에 의해 증기가 발생되어 터빈에 증기를 공급한다.

세관은 300°C의 고온에서 60기압이나 되는 압력차를 견디며, 원전 수명 기간 동안 원자로 냉각재 누출 없이 건전성을 유지할 수 있어야 한다.

그러나 증기발생기의 세관은 부식·피로 또는 마모에 의해서 세관에 균열이 생기거나 작은 구멍이 발생되어 방사능에 직접 접촉한 1차 냉각수가 터빈 및 복수기 등 2차 계통으로 누출되어 방사능 오염 문제가 발생할 수도 있고 이로 인하여 원자력발전소

의 불시 정지를 야기시킬 수도 있기 때문에, 세관에 균열 및 작은 구멍이 발생되면 관막음 등을 실시하나 관막음 비율이 일정 이상이 되면 발전소의 효율이 저하되어 경제적 손실을 초래한다. 이러한 경우에 증기발생기를 교체하게 된다.

증기발생기 교체는 외국의 경우 이미 51기가 수행되었으나 국내에서는 상업 운전을 시작한 지 20년이 된 고리 1호기에서 처음 수행되어 그 의미가 자못 크다고 하겠다.

국내에서는 처음으로 수행된 공사였기 때문에 기술과 경험 부족으로 외국 기술 도입이 불가피하였고, 이에 따라 세계적으로 증기발생기 교체 공사의 경험이 가장 많은 미국 벡텔사와 현대건설(주)가 공동으로 수행하게 되었다.

성공적인 증기발생기 교체 공사와 안전성을 확보하기 위하여 고리 1호기 제15차 계획 예방 정비 기간(96년)동안에 Walkdown을 실시하여 기존 원자력발전소 여건에 대한 실사 자료를 확보하고, 발전소가 보유하고



있는 기술 자료를 근간으로 설계를 수행하였다. 제16차 계획 예방 정비 기간(97년) 동안에 Walkdown을 다시 실시하여 설계 내용이 기존의 발전소 여건과 일치하는지를 재확인하는 과정을 거쳐 미비한 설계 또는 누락된 설계를 보완하였으며, 제17차 계획 예방 정비 기간(98년) 동안에 교체 공사를 수행하였다.

**사업의 특성**

턴키 계약 방식으로 수행된 본 공사는 기존의 건설 공사와는 매우 다른 특징을 지니고 있다.

대표적인 본 공사의 특징은 다음과 같다.

첫째, 단기간에 많은 인원과 장비가 동원되며 상호 간섭에 의한 작업이 불연속적으로 이루어지므로 공사 시작 전에 도상 훈련 및 실제 모형을 중심으로 한 훈련을 통해 상호 간섭을 최소화시켜야 하며 예측 가능한 모든 상황에 대한 대응 연습 등으로 작업 공정을 조정해야 한다.

둘째, 기능 인력보다는 기술 인력의 투입이 더 많이 소요되는 엔지니어링 중심 공사이다.

셋째, 실공사 기간 동안에는 협소한 고방사능 구역에서 작업을 수행해야 하며 개인당 방사능 피폭을 최소화해야 할 뿐 아니라 오염된 방사성 물질의 외부 유출 및 확산을 완벽하게 방지해야 한다.

**〈표〉 고리 1호기 증기발생기 교체 공사 단계별 업무 내용**

Phase 1(1996. 1~1998. 5)	Phase 2(1998. 6~1998. 9)
증기발생기 교체 관련 설계 업무	증기발생기 교체, 보온재 제거 및 재설치
인허가 관련 업무	1차 및 2차 계통 배관 절단 및 재용접
정비 기간 중 준비 작업 수행 및 절차서 개발	원자로 냉각재 배관 및 종단부 제염 및 밀봉
영구 및 임시 자재 구매	증기발생기 관련 배관 공사
신증기발생기 인수	보온 공사
모의 훈련 실시	구증기발생기 제거 및 저장
	신증기발생기 설치
	격납 건물에 공사용 임시 개방구 설치 및 복구

교체 공사는 두 단계에 걸쳐서 수행되었으며, 구체적인 업무 내용은 〈표〉와 같다.

**인허가**

고리 1호기 증기발생기 교체 공사는 시공이 안전하게 시행되고 모든 설계 및 시공 작업이 적용 규격 요건에 부합됨을 보증하기 위하여 인허가 규제 기관인 한국원자력안전기술원(KINS)으로부터 인허가를 받아야만 했고 이를 위하여 조직 내에 인허가팀을 구성하여 관련 업무를 수행하였다.

본 교체 공사는 국내에서 최초로 이루어지는 공사이므로 먼저 인허가 업무를 수행하기 위해서는 관련 법규 및 외국의 사례에 따른 인허가 방식의 규정이 필요하게 되었다.

미국의 경우 초기에는 원자력규제위원회(NRC)가 증기발생기 교체를 운영 허가 갱신으로 간주하여

10CFR50.90(건설 허가 또는 운영 허가 변경 신청)을 적용, 공사 이전에 상세한 안전성 및 환경 영향을 검토하고 필요시 공청회를 거쳐서 인허가를 갱신 발급하였으나, 원전 산업계의 증기발생기 교체 경험이 증가하면서 증기발생기 교체의 기술적 타당성을 확신할 수 있게 되고 공사 내용도 과거 경험의 복제 경향이 두드러짐에 따라 현재는 10CFR50.59(변경, 시험 및 실험)을 적용하여 NRC의 사전 검토와 승인 없이 증기발생기 교체가 가능하게 되었다.

그러나 본 사업의 경우 국내에서는 최초로 수행되는 공사로서 그 안전성의 입증에 중요한 것으로 판단되어 미국의 10CFR50.90과 같이 운영 허가 사항 변경으로 간주하여 원자력법 제21조, 시행령 제34조, 시행규칙 제18조에 의거하여 인허가를 수행하였으며 이에 따른 각종 인허가 문서의 작성, 설계서의 안전성 및 규

제 기관과의 질의/답변 업무를 수행하였다.

주요 인허가 업무는 다음과 같다.

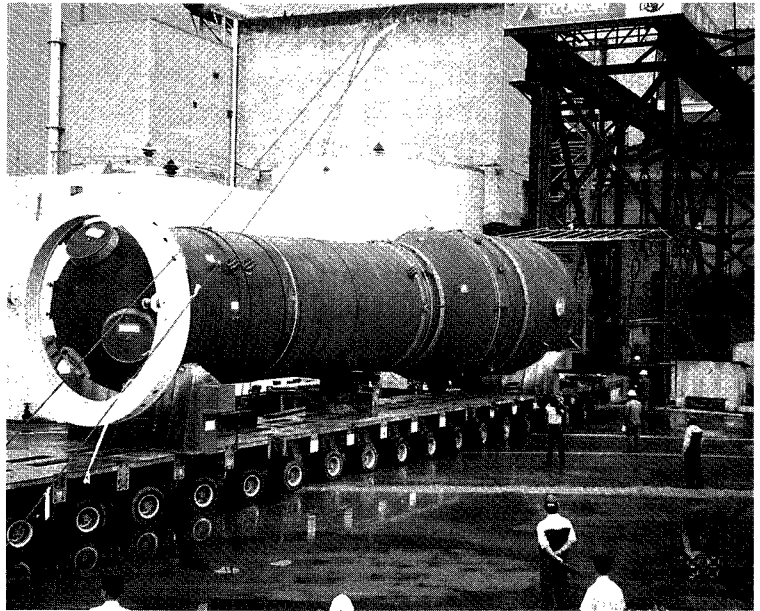
- 증기발생기 교체보고서 작성
- 사고 해석 수행
- 기술지침서 수정
- 최종안전성분석보고서 수정
- 엔지니어링 설계 패키지 및 안전성 평가
- 인허가 기관의 질의·답변
- 특별보고서
- 기타 문서

**성공적인 공사 수행의 의의**

**1. 국내 최초의 원전 주기기 교체 공사를 완벽하게 수행**

고리 1호기 증기발생기 교체 공사는 국내에서 처음으로 시행되는 원전의 핵심 주설비인 증기발생기(2기)를 신형으로 교체하고 일부 관련 설비를 개선하는 작업으로서, 협소한 고방사능 구역에서의 정밀 기계 가공 작업과 중량물을 설치하는 등 고난도 작업으로 인해 원자력 산업계의 주요 관심 프로젝트였다.

이와 같이 국내에서 처음으로 시도된 원전의 대규모 설비 개선 공사에서 현대건설(주)는 근 30여년 동안의 원자력발전소 건설 경험을 바탕으로 한 사전의 철저한 작업 준비와 새로운 시공 기술 개발 및 반복된 모의 훈련을 통한 작업 숙달을 통해 계획 공기 내에 완벽한 공사 수행을 가져올



적납 건물 내로 신증기발생기가 반입되고 있는 모습. 이와 같이 국내에서 처음으로 시도된 원전의 대규모 설비 개선 공사에서 현대건설(주)는 근 30여년 동안의 원자력발전소 건설 경험을 바탕으로 사전의 철저한 작업 준비와 새로운 시공 기술 개발 및 반복된 모의 훈련을 통한 작업 숙달을 통해 계획 공기 내에 완벽한 공사 수행을 가져올 수 있었으며, 국내외에 원전 건설에 이은 원전 보수 분야의 시공 기술력을 과시하는 데 크게 공헌하였고, 향후 유사 공사는 일부 국한된 작업에 한해서만 외국의 특수 기술을 적용하고 전체적인 공사 수행을 국내 주도로 충분히 수행할 수 있는 기반을 조성하였다.

수 있었으며, 국내외에 원전 건설에 이은 원전 보수 분야의 시공 기술력을 과시하는 데 크게 공헌하였고, 향후 유사 공사는 일부 국한된 작업에 한해서만 외국의 특수 기술을 적용하고 전체적인 공사 수행을 국내 주도로 충분히 수행할 수 있는 기반을 조성하였다.

**2. 철저한 사전 시공 준비 및 완벽한 품질 시공**

고리 1호기의 증기발생기 교체 공사 특성상 실제로 증기발생기 교체가 이루어지는 본 공사 작업 기간에 비해 대부분의 공사 기간은 기존 설비

에 미치는 안전성 영향 해석 및 인허가 준비, 교체·시공 방법의 안전성 사전 검토, 철저한 사전 작업 계획 수립, 실제 작업과 같은 모의 실험 등에 소요되었으며, 본 공사의 성패는 사전 준비 작업 여하에 달려있다는 자세로 임하였다.

이러한 철저한 사전 작업 준비의 수행 결과로 고리 1호기 증기발생기 교체는 외국의 교체 사례와 비교해 볼 때 매우 우수한 것으로 평가되고 있으며, 발전소 계획 예방 정비 주공정에 미친 영향도 27일 23시간밖에 되지 않아 외국의 교체 사례에 비해 현저히 짧고 완벽한 시공이 되었다.



### 3. 신시공 기술·공법 개발 및 적용

증기발생기 교체 공사의 가장 중요한 사항으로써 신증기발생기를 설치하였을 때 기존의 원자로 냉각재 배관 양 끝단의 내경 편차가 2.4mm를 넘지 않도록 사전에 레이저를 이용해 원자로 냉각재 배관 부위를 정확히 계측한 후 자료를 컴퓨터에 입력하여 신증기발생기 노즐 부위를 정밀 가공하였으며, 공정 단축을 위하여 원자로 건물 내부에서 증기발생기 인양이 용이하도록 기존 천정 크레인 상단에 유압식 리프트를 이용한 임시 인양장치를 설치하여 크레인 높이를 증대(7m)함으로써 인양시 콘크리트 벽체 간섭 문제를 해결하였다.

특히 증기발생기와 같은 거대 중량물의 인양과 관련하여 Load Test시 컴퓨터를 이용한 Stress Contour Analysis를 수행함으로써 안전성 확보에 기여하였다.

모든 공정이 방사선 피폭량을 최소화시키면서 짧은 보수 정비 기간 중에 다량의 공사를 동시 다발적으로 협소한 공간 내에서 수행해야 하기 때문에, 공정간의 간섭 사항을 제거하기 위한 공정 계획표를 건설 공사 현장에서는 국내 최초로 분 단위까지 작성하여 매일 점검 수정하는 치밀한 공정 관리를 실시함으로써 공정 관리 분야의 새 장을 열었다.

철근 설치 방법으로는 단순한 Lap 이음이 아니라 Bar Grip이라는 기계

적 철근 이음을 적용하였으며, 전기 설비 분야에 있어서는 Ground Bus Bar 작업시 기존에는 Brazing Welding 또는 Bolt로 작업을 수행했으나, 본 공사에서는 Bus Bar to Bus Bar 방식의 Cad Welding을 적용하여 기존의 연결 부위보다 월등히 좋은 결과를 가져왔다.

또한 증기발생기의 교체 기술은 특성상 발전소의 1차 계통(NSSS) 관련 기술이므로 1차 계통 설계와 관련한 고도의 설계 기술을 확보하여야만 안전성을 확보할 수 있다.

본 공사를 통하여 원자력발전소 Nuclear Island 중 핵심 기기의 하나인 증기발생기의 교체 기술을 국내에서 독자적으로 확보하고, 아울러 원자력발전소 설계의 핵심 기술인 1차 계통과 관련된 고도의 설계 기술, 즉 원자로 격납 용기 구조 해석 설계 기술, ASME Section III 배관 설계 기술, 원자력 구조물 설계 기술, 사고 해석 기술 및 자료를 다수 확보하였다.

아울러 방사선 환경하에서의 제염 기술을 확보한 점도 상당한 성과가 아닐 수 없다.

### 4. 철저한 안전 관리로 공사 전기 간 무재해 달성

본 증기발생기 교체 공사는 협소한 고방사능 구역에서의 중량물 취급·설치, 증기발생기의 격납 건물로의 반입·반출을 위한 임시 개구부의 절

단 및 해체, 재설치 등의 작업 특성으로 안전 관리가 특별히 요구되는 공사였다.

국내 최대 원자력발전소 시공 경험 사로서의 그 동안의 축적된 원전 건설 경험을 100% 활용하여 철저한 사전 작업 준비와 안전 시공을 수행하여 공사 전기간에 걸쳐 단 한 건의 경미한 안전 사고도 발생하지 않았으며, 방사선 방호 관리에도 최대의 노력을 경주한 결과 종사원들의 방사선 피폭량 역시 외국 사례에 비해 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

## 결 어

지난 78년에 완공되어 20여년간 운전돼 온 국내 최초의 원자력발전소인 고리 1호기는 약 3개월간의 성공적인 증기발생기 교체로 새로운 발전소로 탈바꿈하였다.

아울러 출력도 58만 3,000kW에서 59만 9,000kW로 1만 6,000kW 증가되었다.

노후된 증기발생기 2기를 성공적으로 교체함으로써 설비의 안전성 확보는 물론 경제적인 측면에서도 보탬이 되었다는 자부심을 가지며, 무엇보다도 사업 수행 과정에서 방사성 물질의 확산 방호에 대해 완벽하게 대처하면서 안전성 등에 대해서 세심한 조언을 아끼지 않으신 한국전력공사와 KINS의 여러분들께 다시 한번 감사드립니다. ☞