



한국 원전 설비 개선 현황 및 계획

이 용 태

한수원(주) 발전처 기계부장

고리 1호기 증기발생기 교체

1. 개요

고리 1호기의 증기발생기는 발전소 운전 연수 증가와 함께 전열관의 열화가 진행되었으며, 주된 열화 원인은 1차측 응력 부식 균열이었다. 한수원은 체계적인 비파괴 검사와 관막음, 관재생 등의 정비로 증기발생기를 관리해 왔다.

1994년 증기발생기 전열관 누설로 인한 발전소 불시 정지 후, 한수원은 발전소의 신뢰성 확보와 효율적인 발전소 운영을 위해 증기발생기 교체가 필요하다고 결정하였다.

비용 및 교체 가능성 검토 결과 증기발생기의 조기 교체가 발전소 장기 운전을 감안할 때 경제성 측면에서 유리하다는 결론에 이르렀고, 증기발생기 교체 시기는 새 증기발생기 제작에 필요한 기간과 예상되는 관막음률을 고려하여 1998년 여름에 예정된 17차 계획 예방 정비

기간이 적절한 것으로 결정하였다. 1998년 증기발생기 교체 직전의 관막음률은 'A'가 11.1%, 'B'가 11.8% 이었다.

2. 사업 조직 및 공정

가. 사업 조직

증기발생기 교체 사업은 1995년 한수원 본사와 고리 본부에 사업 조직을 구성하면서 시작되었다. 사업 내용은 다음과 같다.

- 신증기발생기 2대 구매
- 개선된 증기 설계 및 안전성 분석
- 교체 시공 회사 선정
- 교체 시공 계획 수립
- 보조 계통 개선

한수원은 증기발생기 공급 회사와 교체 시공 회사를 분리 계약하였다. 공급 주계약사는 한국중공업이, 증기발생기 설계 및 안전성 분석 하도급 업체로 Westinghouse가 선정되었다. 교체 시공 주계약사

는 Bechtel이, 한국 내 인력·구매 및 하도급 관리 업체로 현대건설이 선정되었다.

나. 사업 공정

- 검사 및 작업 준비 : 1996.1~3/1997.3~6
- 격납 용기 내부 실사 및 천정기 증기 정비 : 1996.1~3/1997.3~6
- 신증기발생기 제작 : 1995.2~1998.2
- 교체 시공 설계 및 검토 : 1996.1~1998.8
- 교체 주공정 (원자로 냉각재 배관 절단~용접) : 1998.7.3~7.20 (28일)
- 교체 전체 공정 (격납 용기 절단~복구) : 1998.6.20~8.13 (55일)

3. 신증기발생기의 설계

신증기발생기는 Westinghouse 사 설계로 창원의 한국중공업에서



〈표 1〉 신증기발생기 주요 설계 개선 내용

항 목	기 존 (W51)	변 경 (Δ60)
중량 / 전장	300 ton / 20 m	326 ton / 20 m
전열관 수량	3,388	4,934
전열관 외경	7/8"	3/4"
전열관 재질	Inconel 600 MA	Inconel 690 TT
NWR	144"	242"
습분 동반율	< 0.25 %	< 0.1 %
전열관 지지판	Carbon Steel (Drill Type)	Stainless Steel (Trifoiled Type)
1차 습분 분리기	3 ea.	18 ea.

제작하였다. 외부 치수는 원증기발생기와 같아 격납 건물 내부의 기존 위치에 꼭 맞게 제작되었으며, 내부 성능 개선으로 전열관 열화 요인을 제거하였으나 운전 특성은 동일하게 설계하여 인허가 조건에 맞고 고리 1호기 핵증기 공급 계통과 적합하도록 하였다.

신증기발생기는 다수의 개선 사항을 포함하였으며 그 중 주요 내용은 다음과 같다.

- 내부식성 Inconel 690 전열관
- 개선된 Trifoiled 유로 채택으로 전열관 지지판 위의 슬러지 침적 최소화
- 체적 증가로 전열 능력 및 1차 습분 분리 용량 증대
- 강화된 Stainless Steel제 반진동봉
- 유량 분배판 설치

나. 요약

1998년 6월 고리 1호기가 계통병입되었으며 증기발생기 교체를 위한 계획 정지 기간은 80일에 달

했다. 고리 1호기의 증기발생기 교체 사업은 완전히 성공적인 것이었다. 원자로 냉각재 계통의 작업을 28일로 단축하였으며 집적 방사선량은 122man-rem으로 세계 원자력 산업계에서도 자부심을 가질만한 것이었다.

고리 1~4호기 저압터빈 회전자 교체

1. 개요

고리 1~4호기에는 총 10대의 저압 터빈이 있으며 모두 Shrunk-on-Disc 형식의 Blade를 가지고 있어 Disc Bore, Keyway, Blade와 Disc 접합부에 응력 부식으로 인한 균열이 다수 발견되었다.

터빈 개선 작업 수 년 전부터 응력 부식 균열 및 고주파 피로 현상이 주로 5단과 7단 Blade 뿌리 접합부에서 진전되었다. 4개 호기 모두 매년 계획 예방 정비 기간중에 저압 터빈에 대한 비파괴 검사를 실시하여 비용이 해마다 증가하였다.

정밀 검사와 긴급 정비에도 불구하고 Blade의 상태는 악화되어 갔으며 균열의 성장이 멈추지 않았다. 마침내 고리 2·3호기에서 회전의 한단체를 제거하기에 이르렀고 계획 예방 정비 기간이 연장되어 발전 손실도 늘어났다.

이런 상황에서 한수원은 저압 터빈 회전자를 교체하는 것을 고려하였고 회전자 설계를 검토하였다.

1995년 한수원은 고질적인 문제의 해결을 위해 저압터빈 회전자의 교체를 결정하고 제작 기간·비용·운전 이력·신뢰성 등 여러 조건들을 종합적으로 검토하여 ABB사의 용접식 회전자를 선정하였다.

2. 신회전자의 특성

용접식 회전자는 단조로 제작되어 용접된다. Blade가 회전자에 직접 부착되기 때문에 응력 부식 문제가 원천적으로 제거된다.

단조체 중심부의 응력은 Shrunk-on-Disc 형식의 절반 정도로 이는 불림 처리된 연성 재질인 저합금 Cr-Ni-Mo강을 사용함으로써 가능하게 되었다. 또한 내부 커플링을 사용하여 끼워맞춤·키홈·중공부가 없다.

일체형 회전 Blade는 한 개의 Shroud를 가지고 있어 Tie Wire, Riveted Shroud Band, Lacing Spool이 없다. 마지막 두 단은 Shroud가 없고 Free-Standing

형식이다.

3. 터빈 개선 작업

개선 작업은 추가 공기 없이 보통의 계획 예방 정비 기간중에 이루어졌다. 터빈 후드를 제거하고 회전자와 Diaphragm을 새 부품들과 함께 교체하였다. OEM 후드는 재설치되었는데, 교체된 회전자는 직경이 및 강성이 크기 때문에 축의 Sag Line이 OEM 보다 훨씬 작아 운전 상태가 매우 부드러우며, 진동 상태도 상당히 호전되었다.

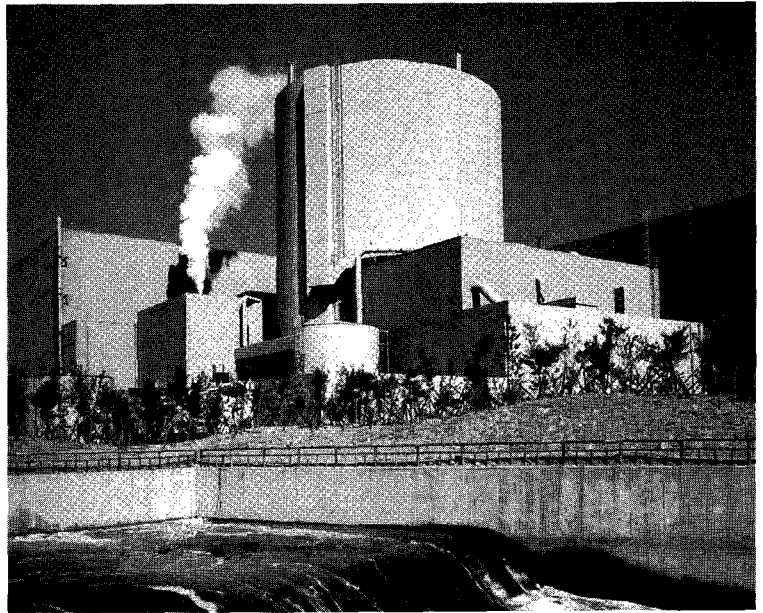
4. 성능 평가 및 결론

터빈 개선 작업의 품질은 기동시 진동 레벨, 임계 속도, 비틀림 진동 등의 저압 터빈 성능 평가와 관련된 운전 변수들을 통해 확인되었다.

기계적 성능이 상당히 개선되었으며, 가장 중요한 사항은 터빈의 신뢰도가 향상되었다는 점이다.

성능 시험이 개선 작업 전후에 같은 운전 조건에서 ASME Performance Test Code 6.1에 따라 수행되었다. 그 결과 증기 유로 재설계와 성능 회복으로 4개 호기의 발전량이 평균 1.9% 정도 증가되었다. 또한 개선 작업 결과로 터빈 검사 기간을 단축하여 계획 예방 정비 공기 추가 요인을 없었다.

고리 원자력발전소의 저압 터빈 개선 작업은 응력 부식의 문제를 겪고 있는 다른 많은 증기 터빈 발전



고리1호기

소들에게 좋은 본보기가 될 것이다.

고리 1~4, 영광 1·2호기 원자로 냉각재 계통 온도 검출 우회 배관 제거

1. 개요

원자로 냉각재 계통 온도 검출 우회배관은 필요한 신호를 원자로 제어 및 보호 계통으로 송출하는 중요한 계통이다. 최근 차단 밸브와 플랜지의 누설로 발전소가 불시 정지되고 종사자의 방사선 피폭이 증가하는 문제가 발생하였다. 발전소의 지속적인 안전 운전을 위해 한수원은 이 우회 배관을 제거하고 원자로 냉각재 계통 주배관에 직접 온도 검출기를 설치하는 개선 작업을 수행하였다.

2. 수행 범위

가. 기계 분야

① 우회 배관 절단·제거

- 배관 : 123m
- 밸브 : 53개

- 방진기, 지지대 : 134개
- 콘크리트, 치핑 등

② 보호관식 저항 온도 검출기 설치

- 고온관 : 기존 위치에 보호관 용접 및 Dual Element RTD 설치 (3개소)
- 저온관 : 배관 절단부에 보호관 용접 및 Dual Element RTD 설치 (1개소)
- 중간관 : 배관 절단부에 플러그 용접
- Borescope로 이물질 검사
- 정상 운전 압력에서 누설 시험 수행

나. 계전 분야

① 공정 제어 계통 회로 교체

- 고온관 : 3 온도 신호 평균 연산 회로 설치
- 저온관 : 온도 신호를 제어신호로 바꾸도록 회로 수정
- Median Signal Selector 설치
- 격납 건물 관통하는 신호 케

이블 교체

- 7300 렉 개조 및 성능 시험
- 출력 운전중 계통 성능 시험 및 교정
- 기동 시험 (RTD 반응 시간 시험)
- 최종 인수 검사

다. 인허가 자료 분석 및 평가

- ① 응답 시간 및 불확실도 평가
- ② 계통 안전성 평가
- ③ 구조적 안전성 평가

3. 효과

① 우회 배관 차단 밸브 누설로 인한 발전소 불시 정지 가능성 제거로 운전 신뢰도 향상 및 발전소 이용률 증가

② 정비 기간 단축, 방사선 피폭량 감소 및 정비 비용 절감

③ 격납 건물 내 방사선 준위 저감

④ 방사성 폐기물 감소

고리 1호기 계측 제어 및 컴퓨터 계통 개선

1. 개요

고리 1호기는 공정 보호 및 제어 계통에 아날로그 모듈이, 발전소 감시 계통에는 1960~1970년대 기술로 제작된 PRODAC-2500 컴퓨터가 설치되어 있었다. 20여년의 운전 후 1998년 제17차 계획 예방 정비 기간중에 계측 제어 계통 개선

〈표 2〉 원자로 냉각재 계통 온도 검출 우회 배관 제거 작업 수행 기간

호 기	고리 1	고리 2	고리 3	고리 4	영광 1	영광 2
수행기간	1998. 6	1999. 4	1998. 5	1999. 2	2000. 10	2001. 9
계약자	Mitsubishi Heavy Industry					

〈표 3〉 계측 제어 및 컴퓨터 계통 신·구형 설비 비교

계통	항 목	기 존 설비	신 형 설비
제어 및 보호 계통	공급사	Foxboro	Foxboro
	장 비	H-line	SPEC200/SPEC200 Micro
	모 돌	아날로그	아날로그/디지털
	정밀도	0.5 %	0.5 % / 0.1 %
	캐비넷	35	24
발전소 컴퓨터 계통	공급사	Westinghouse	(주)우리기술
	장 비	W2500	XW-7000
	신 호	898	2080
	계 통	단일	중복
	CPU	16 bit	64 bit

사업이 성공적으로 수행되었다.

이 사업은 구형 설비의 점검 빈도 증가, 정비 비용 증가 및 전체적인 계통 노화 진행으로 추진되었다. 한수원은 한국전력기술과 계약을 체결하여 일괄 발주 방식으로 개조 사업을 수행하였다.

사업 내용 중의 현저한 성과는 다음과 같다.

- ① 국내 조직에 의한 사업 수행
 - ② 1년 내에 전체 사업 완료
 - ③ 해외 제작사의 지원 없이 사업 성공
 - ④ 기동중 원자로 정지 없음
- 사업 범위는 기초 설계 검토, 구매, 세부 설계 검토, 인허가, 설치, 기동 및 사업 관리로 구성되었다.

사업 관리에는 예산 관리, 공정 계획 수립, 문서 및 도면 제작, 기술 관리, 품질 보증 등이 있다.

2. 기존 및 신형 설비 비교〈표 3〉

3. 인허가

보호 계통에 디지털 장비가 설치되었기 때문에 US NRC의 10CFR50.59에 따른 엄격한 시험 절차를 거쳐야 했다.

주요 인허가 활동으로는 최종 안전성 분석 보고서 개정, 다양성 및 심층 방어 분석(EPRI TR-102348, NUREG/CR-6003), 불확실도/설정치 계산(ISA-S67.04), EMI/RFI 검증(EPRI TR-

102323), 소프트웨어 검증 및 확인 (RG 1.152), 공장 검사시의 규제 검사 등이 있다.

개정된 최종 안전성 분석 보고서를 한국원자력안전기술원에 제출하여 과학기술부의 검토를 거쳐 1998년 6월 25일에 계통의 승인을 획득하였다.

규제 절차를 촉진하기 위한 지속적인 대화 창구가 사업 시작부터 끝날 때까지 수립되어 있었다.

4. 설치 및 기동

85일간의 계획 예방 정비 기간중에 38개의 캐비닛과 42km의 케이블이 제거되고 32개의 캐비닛과 87km의 케이블이 273개의 지시계, 187개의 전송기, 32개의 I/P 변환기와 함께 설치되었다. 성능 확인을 위해 발전소 인수 시험, 교정 시험, Loop 시험, 감시 시험, 성능 시험 등의 기동 시험이 각각의 절차서에 따라 수행되었다. 작업은 원래의 공정대로 수행되었으며, 기동중에 발전소 정지도 없었다.

고리 1호기는 1999년의 계획 제어 계통 개선 작업 이후 한 주기 무고장 운전을 달성하였다.

고리 1호기 수명 연장

고리 1호기는 1978년 상업 운전 이후 24년 동안 성공적인 운전을 해 왔으며 계획된 수명 30년이 곧

〈표 4〉 고리 1호기 주요 설비 개선 항목 및 수행 시기

연도	주요 설비 개선 항목
2003	터빈 조속기 제어함 교체, 저온 과압 방지 설비 개선 등 21건
2004	원자로 냉각재 펌프 개선, 주발전기 여자 시스템 교체 등 16건
2005	원자로 수조 밀봉링 영구형 개선, 노내 열전대 설비 개선 등 18건
2006	원자로 헤드 단순화, 계속 운영을 위한 대단위 설비 보강 등 35건
2007	원자로 정지 및 우회 차단기 교체, 주급수 펌프 교체
2008	2차 추기 계통 배관, 습분 분리 재열기 교체 등 4건

도래하게 된다. 한수원은 고리 1호기의 체계적인 수명 연장을 위한 기본 계획을 수립하였으며 다음의 일정에 따라 수행하고 있다.

- 확률론적 안전성 평가 : 1999. 11~2002. 11
 - 주기적 안전성 검토 : 2000. 5~2002. 11
 - 화재 위험도 / 안전 정지 분석 : 1999. 9~2001. 9
- 아래 기준에 따라 기본 계획을 수립하였고 주요 기기의 교체를 수행할 예정이다.
- PSA 및 PSR 결과 증강 또는 교체가 필요한 기기
 - 자주 고장이 발생하는 취약 설비
 - 교체 및 개선 작업에 장기간이 소요되는 기기

결론

위에서 언급한 바와 같이 한국의 원자력발전소는 더욱 효과적이고 훌륭한 성능을 보이고 있으며, 이의

주된 요인은 여러 가지가 있다. 취약 설비에 대한 집중적인 개선 및 신뢰도 향상, 발전소 정지와 관련된 회로의 중복 운영, 주요 회로 판넬 주위 환경 개선, 주요 기기 및 취약 설비에 대한 특별 감시 등이 한수원이 발전 부분에서의 우위를 유지하기 위해 수행하고 있는 사항들이다.

한수원은 비정상적인 신호를 보이거나 수명을 알 수 없는 기기들을 주기적으로 교체함으로써 발전소 안전성과 신뢰성을 확보하는 데 주력하고 있다. 한수원의 경험이 보여주는 바와 같이 장래에는 더욱더 어렵고 심각한 교체 사항들이 많을 것이다. 특히 고리 1호기는 수명 연장을 위해 주기에 대한 작업을 시작하였다.

한수원이 안전하고 경제적인 개선 작업 수행에 온 노력을 다할 것을 기대하면서, 이번 회의가 우리 모두에게 이로운 기회가 되기를 바란다. ☺