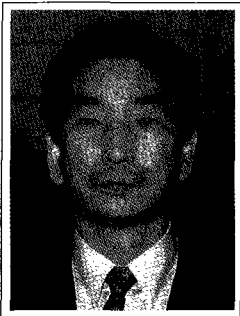


원전 저압터빈의 신뢰도 및 성능 향상

-고리 1~4호기 저압터빈 로터 교체 현황-

정재희

한전 고리원자력본부 제1발전소장



빈 설비 교체 사업이 이루어졌다.

고리발전소 1호기와 2호기는 저압 터빈이 2대씩, 3호기와 4호기는 3대씩으로 구성되므로 총 10대 분의 로터 및 고정익이 새로운 설계 방식으로 제작되어 97년과 98년 중의 계획 예방 정비 시기에 모두 교체되었다.

이로써 기존 터빈이 안고 있던 취약점을 근원적으로 해소하여 사고 위험과 과중한 정비 부담을 줄일 수 있는 충분한 설비 신뢰도를 확보하였을 뿐만 아니라, 기존 설비의 성능 열화 회복과 터빈차실 증기 팽창 경로의 재설계에 의한 내부 효율 향상을 통하여 도합 57,000kW 이상의 발전 출력 증대를 실현하였다.

본 사업은 짧은 기한 내에 기자재를 제작하고 발전소 정비 시기에 맞추어 개체 작업이 이루어져야 했던 바, 사업 추진 및 기술 관리를 전담하는 프로젝트팀을 구성 운영함으로써 참여 업체

와의 유기적인 협력 체제와 선행 작업에서의 경험 축적을 통하여 단기간 내에 집중적인 교체 시공이 가능토록 하였다.

이미 35기의 해외 원전에서 94대의 터빈이 교체되었고 교체 이전의 평균 가동 연수가 14년으로 밝혀져 있어, 우리나라의 타발전소에서도 터빈 교체 가능성을 배제할 수 없으므로 장차 유사한 설비 교체에 참고가 되기를 바라며 로터 교체 사업 전반을 소개한다.

저압 터빈 로터 교체 배경

전세계적으로 원자력산업 초기에 공급된 대형 저압 터빈에서 균열 현상이 90년대 초반에 집중 보고되었고, 특히 93년 12월에는 고리 원전과 동일한 설계인 미국 페르미 원전 2호기의 동익 이탈 사고와 San Onofre 2·3호기 로터 균열 등 GEC가 공급한 터빈의 대

고리원전 1~4호기의 터빈-발전기는 영국 GEC가 제작한 것으로 열 박음 디스크(shrunk-on disc)형식의 저압 터빈 로터에서 심각하게 나타나고 있는 응력 부식 균열 문제를 해소하기 위해서 로터 일체를 교체하였는데, 새 로터를 ABB사의 용접형 드럼 로터(Welded Drum Type)로 선택함으로써 국내 처음으로 Non-OEM Retrofit 방식의 터

다수에서 심각한 결함이 발생되었다.

고리 원전에서는 93년도 계획 예방 정비시에 로터 건전성을 확인하던 중 응력 부식 균열(stress corrosion crack)에 의한 결함이 다수 발견되었으며, 94년에는 2호기에서도 상당수의 결함이 발견되었다.

이에 따라 결함 부위의 보수 방안과 로터 교체 방안에 대해 기술적 타당성, 작업 공기, 소요 비용, 정비 전후 설비 신뢰성 등을 종합 검토하여 95년 3월에 로터를 교체기로 결정하고, 지명 경쟁 입찰에 의해 95년 12월에 ABB를 주계약자로 선정하였다.

교체용 로터 제작이 진행되고 있던 97년에는 고리 3호기에서 저압 터빈의 제6단 동익이 이탈되는 사건이 발생하였고, 당시 예방 점검중인 2호기에서도 유사 결함이 탐지됨으로써 6단 동익 전열의 제거 조치가 불가피하였다.

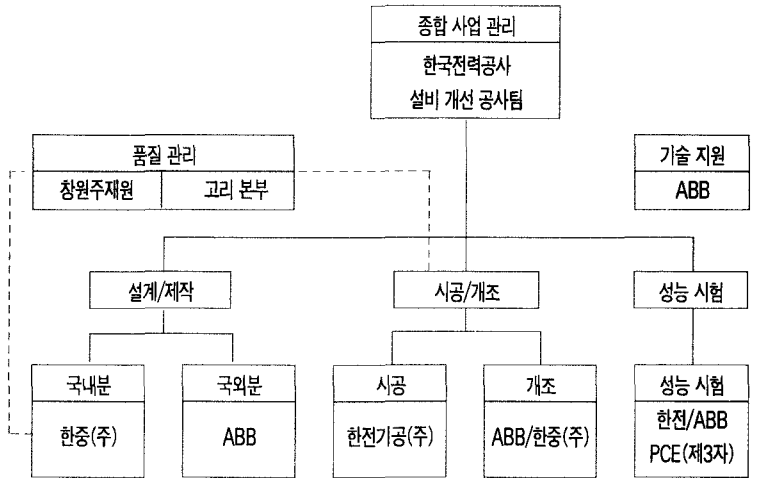
따라서 2호기와 3호기는 로터 교체를 1년 앞두고 6단 열을 잃고 임시 방책으로 준비해 둔 압력 강하판을 설치하여 교체시까지 고출력 운전을 할 수가 있었다.

사업 운영 체계

국내 처음 제작되는 용접형 로터이므로 발전 설비 생산 업체의 기술 축적을 위해 ABB사를 주계약자로 하고 제작 및 설치 분야에 한국중공업(주)가 참여토록 하여 용접형 로터 제작 기술 전수와 저압 터빈 교체 시공을 통해 설치 기

(표1) 고리 원전 저압 터빈 교체 이전 가동 연수

	출력(MW)	저압 터빈 수	상업 운전일	교체 시기	가동 연수
1호기	587	2	78. 4. 29	97. 3. 30	18년 11개월
2호기	650	2	83. 7. 25	98. 2. 2	14년 7개월
3호기	950	3	85. 9. 30	98. 5. 16	12년 8개월
4호기	950	3	86. 4. 29	97. 9. 14	11년 5개월



(그림 1) 고리 저압 터빈 로터 교체 사업 체계

술을 축적하는 계기로 삼고자 하였다.

시공 단계에는 한전기공(주)를 설치 및 조립 작업에 참여시켜 향후 정비 수행에 필요한 기술 능력을 배양하고 정비 기초 자료를 확보하여 정비 효율성을 한층 높일 수 있게 하였다.

성능 시험은 한전과 ABB사가 시험을 수행하고 그 결과를 제3자인 PC 엔지니어링사가 검증하는 형식을 취하고, 품질 관리는 한전 본사 및 창원주재원실과 사업소 조직이 담당하였다.

공사 관리 조직으로는 고리 1호기 증기발생기 교체 사업과 터빈 교체를 추진하는 전담반(Task Force Team)

을 구성하여 기자재 제작에서부터 설치 시공까지 일관적인 사업 관리가 되도록 하였다.

교체용 로터의 특징

용접식 로터는 1920년대에 개발된 ABB사 고유 제작 방식으로 60년대에 원자력발전소에 공급되어 현재까지 운전되고 있으나, 터빈 결함의 주요 원인인 응력 부식 및 피로 균열에 우수한 내구성을 가진 것으로 알려져 있다.

고리 1~4호기용 로터의 설계 및 제작 요건은 다음과 같다.

1. 설계 요건

- ① 설계 수명은 40년으로 할 것
- ② 10만 운전 시간 동안 응력 부식 균열이 발생되지 않을 것
- ③ 5만 운전 시간 동안 고주파 피로 균열이 발생되지 않을 것
- ④ 분해 점검 주기는 5만 운전 시간 이상이 되도록 할 것
- ⑤ 고리 1~4호기 동익들의 호환성을 최대한 유지할 것
- ⑥ 터빈 효율 개선에 의하여 출력 향상분이 1.4% 이상일 것

2. 시공 요건

- ① 계약 후 3년 이내 10대의 로터 교체 시공이 완료될 것
- ② 계획 예방 정비 기간 이내 교체 가능할 것
- ③ 기존 설비의 변경 부분을 최소화 할 것
- ④ 신규 및 재사용 구성품 간의 부합성이 보장될 것

3. 교체 부분

- ① 로터 및 동익 일체
- ② 다이어프램 및 고정익

4. 재사용 부분

- ① 내외측 실린더 케이싱
- ② 베어링 및 축 밀봉 장치 등

사업 추진 공정

결함 발생 로터의 안전성 확보가 시

급한 상황에서 9개월의 짧은 준비 기간으로 계약자가 결정되어 97년 1·4호기를, 98년 2·3호기 교체를 추진하였다.

Non-OEM 방식의 사업인 관계로 부족한 설계 자료, 도면은 계획 예방 정비 기간에 분해된 로터 실측을 통해 제작 도면을 작성하였으며, 가장 먼저 교체 공사가 시작된 1호기에서 내부 구조물에 대한 상세 도면 부족으로 작업 공정이 지연되는 등 다소 어려움이 있었지만 모두 계획된 예방 정비 기간 내에서 교체 작업이 완료되었다.

짧은 준비 기간에도 불구하고 시공상의 문제점을 극복하고 단시일에 교체 공사가 이루어진 것은 기자재 제작

에서부터 설치에 이르기까지 일관된 사업 관리 체계와 참여 업체 간의 긴밀한 협조를 바탕으로 하여 필요 자원의 적시 조달(just-in-time), 선행 경험의 활용(feed-back), 숙련된 인력 투입, 전용 장비 개선을 통해 애로 공정을 줄일 수 있었기 때문이다.

주요 공사 내용

1. 제작

1호기 및 4호기용 로터는 제작 기간이 촉박하여 ABB사에서 제작 완성하였고, 2호기와 3호기용은 한국중공업(주)에서 조립과 과속도 시험이 이루

(표 2) 고리 원자력 로터 교체 시공 공기

	목표 예방 정비 공기	실제 예방 정비 공기	로터 교체 공정
고리 1호기	72 일	71 일	35 일
고리 2호기	54 일	49 일	30 일
고리 3호기	52 일	51 일	35 일
고리 4호기	65 일	55 일	42 일

주 : 로터 교체 공정은 구로터 인출에서 ETG 기동까지 기간임

	96년				97년				98년				비고
	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	
고리1호기	제작		조립		운송 교체								97년 5월 교체 완료
고리2호기					제작		조립 운송		교체				98년 3월 교체 완료
고리3호기					제작				조립 운송		교체		98년 7월 교체 완료
고리4호기	제작		조립		운송 교체								97년 11월 교체 완료

(그림 2) 고리 저압 터빈 로터 교체 사업 주요 일정

어졌다.

고정의 구성품 전량은 한국중공업(주)가 ABB사로부터 소재를 공급받아 가공 및 조립 작업을 수행하였다.

한국중공업(주)는 용접식 로터의 제작 경험이 없어 ABB사의 지원을 받아서 가공 및 조립을 수행하고 한전 주재원이 상주 감독하여 만족한 품질을 구현하였다.

2. 중하물 운반 및 보존

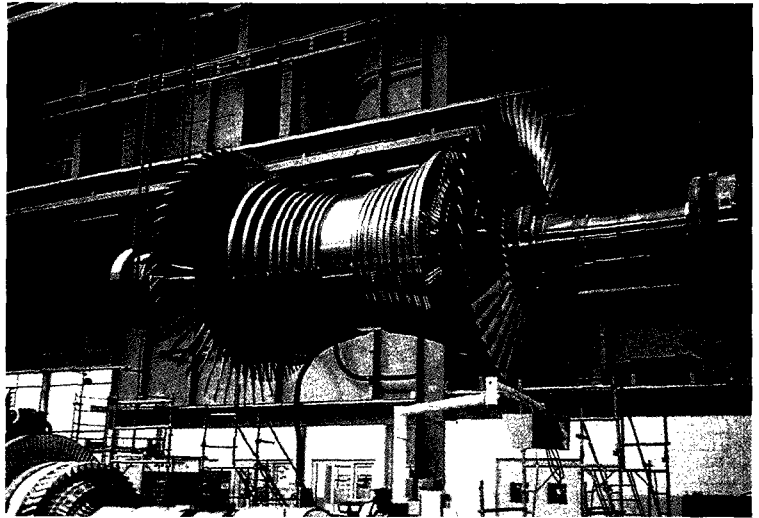
로터는 공장 출하시에 장기간의 해상 수송을 고려하여 전 표면을 방청 처리하여 운반용 Skid에 실리게 되는데, 설치 전의 방청 제거가 쉽지 않음을 착안하여 최소한의 방청 처리 후 진공 포장하는 방식을 채택함으로써 현장의 방청 제거 노력 및 산업 폐기물 발생을 최소화하였다.

현장 운반 및 하역시에는 로터 1대의 중량이 160여톤에 달하므로 부지 내 운반 경로의 취약 부분과 운전중인 순환수 도관(CW Culvert) 매설 부위에 대한 임시 보강이 필요하였다.

또 1·2호기는 계획 예방 정비 기간이 중첩되는 상황이어서 기자재 보관 장소 부족, 천정 크레인 사용, 숙련 인력 동원에 제약이 있었으며 3·4호기 또한 신·구 로터 부품 보관 장소가 부족하여 인접 발전소 건물을 이용해야 하였다

3. 개조 작업

GEC 저압 터빈이 복류 형식의 8개



용접형 로터로 바꾸어 터빈 분해 정비 주기가 5만 운전 시간으로 연장되었다.

단으로 설계된 데 비해 신규 터빈은 복류 11개 단으로 제작되어 짐에 따라서 내외부 케이싱을 제외한 고정의 구성품이 전부 교체되었는데, 터빈차실 내부의 부분적인 개조와 대체 구성품과 기존 설비간의 맞춤 가공을 한국중공업(주)가 수행하였다.

한편 로터 교체 작업과 함께 저어널 베어링이 모두 새 것으로 교체되었고, 축 팽창 및 진동 감시 장치도 신식 모델로 개체되어 터빈 설비 운전 편의성이 향상되었다.

4. 축선 수정 작업

용접형 드럼 로터는 열 박음 디스크 형식에 비해 축의 강성(stiffness)이 크므로 지중에 의한 축처짐 량도 감소되어서 터빈-발전기 전체의 축선이 전면적으로 재 설정되었다.

이에 따라 설치 구조물의 높낮이 수

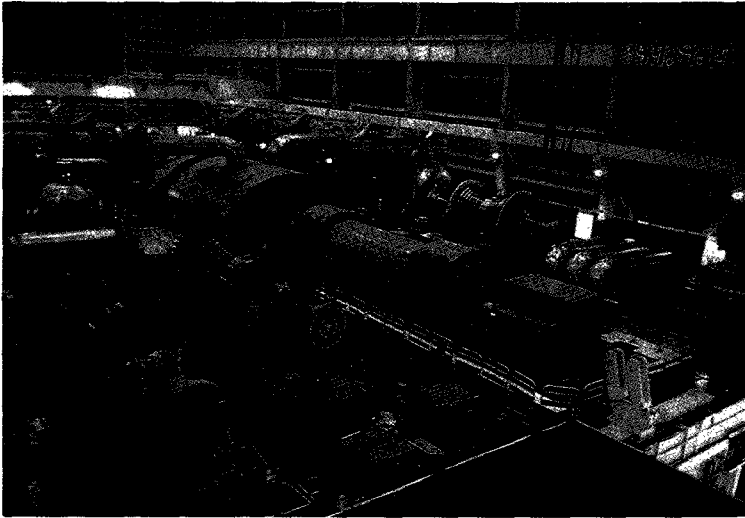
정이 필요하여 고압 터빈 및 발전기축이 이전보다 낮아지고 저압 터빈 구조물은 상향 조정되었다.

3대의 저압 터빈이 설치된 3·4호기의 경우 축선 수정량이 크고 저압 터빈의 설치 높이가 올라갔기 때문에 저압 터빈에 연결되어 있는 추기 배관의 연장 및 복수기축 이음 자재(rubber belt) 교체가 불가피하였다.

축선 수정은 신규 설치와는 달리 기존 기초에서 적정 위치를 찾는 작업으로 로터의 삽입, 측정 및 인출 과정이 되풀이되는 작업이었으나 레이저 빔 수준계와 개선된 로터 인양 기구를 사용하여 작업 시간을 단축하고 작업의 안전성을 높였다.

5. 터빈 신뢰도 재평가

기존 저압 터빈 로터를 새로운 형식으로 교체함에 따라서 원전 운영 허가



짧은 기간 내에 기자재를 제작하고 발전소 정비 시기를 이용하여 교체 작업이 이루어졌다

에 의해 내부 효율이 향상되어 열 소비율이 개선됨으로써 정격 원자로 출력에서 발전단 전기 출력이 증가되었는데, 이전 대비 도합 57,872kW의 출력증강을 실현하였다.

이 효과는 고리 원전의 연간 발전량이 4억5천만 kWh 증가되는 것을 의미하며 약 156억원의 석유 발전량에 상당한다.

로터 교체 전후의 성능 비교 시험은 ASME PTC 6.1 기준에 따라 정밀급 계측기를 설치하여 발전소 계통 전반의 성능을 측정하였고 제3자 확인 방식에 의해 시험 결과의 신뢰성을 검증하였다.

〈표 3〉 저압 터빈 교체 전후 성능 비교

단위: kW

구분	교체전 출력	교체후 출력	출력 증가분	열효율 향상
고리 1호기	589,712	598,807	9,095	1.54%
고리 2호기	657,020	673,860	15,659	2.38%
고리 3호기	985,818	1,002,700	16,882	1.71%
고리 4호기	986,940	1,003,176	16,236	1.64%

주: 2·3호기의 교체전 출력은 과년도 운전 출력 기준임.

에 관련된 안전성 분석 내용이 일부 개정되어야 했는데, 이를 위해 대형 회전체에서 발생할 수 있는 비산물의 영향이 재평가되었다.

원자로 시설에 심각한 영향을 줄 수 있는 비산물의 발생 구조를 이론적으로 규명하고 확률적 발생 빈도를 규제 권고 이내로 유지할 수 있도록 대응책을 제시하기 위한 것인데, 최근의 평가 기법을 적용하여 최종 안전성 분석 보고서가 개정하였다.

평가 결과 용접형 드럼 로터의 비산

물 발생 확률은 타형식에 비해 매우 낮은 수준으로 기존 로터보다 10배 이상의 높은 신뢰도를 보여주고 있어, 향후 터빈 분해 점검 주기를 5만 운전 시간으로 연장하더라도 안전 가동을 보장할 수 있게 되었다.

교체후 성능 향상

저압 터빈 개체 공사를 통하여 기존 설비에서 나타났던 성능 열화의 복구는 물론, 저압 터빈의 열역학적 재설계

맺는말

증기 터빈의 개체는 오래된 구형 발전 설비의 출력, 효율 및 신뢰도를 보다 향상시킬 수 있는 경제적인 대안인 하나이다.

고리 원전에서는 계획 예방 정비 기간을 이용하여 1~4호기의 저압 터빈에 대한 로터 교체 공사가 성공적으로 실시되어 괄목할 만한 신뢰도 및 출력 증대를 구현할 수 있었다.

장차 터빈 설계 기술의 발달과 함께 이와 같은 신뢰성 및 효율 개선 가능성도 더욱 넓혀질 것으로 믿으며, 국내 처음 시행된 고리 1~4호기 저압 터빈 교체 사업을 통하여 얻어진 성과와 경험이 향후 동종인 발전 설비의 성능 향상과 수명 연장에 또 하나의 대안으로 활용되기를 기대해 마지 않는다.