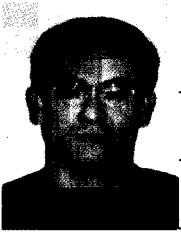


고리원자력발전소 1호기 증기발생기 교체 (Kori Unit 1 Steam Generator Replacement)



박 지 홍

(KIMM 원자력공인검사사업단)

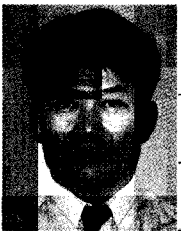
- '83 연세대학교 금속공학과(학사)
- '88 Case Western Reserve Univ. 재료공학과(석사)
- '94 Case Western Reserve Univ. 재료공학과(박사)
- '94 - '95 Case Western Reserve Univ. 연구원
- '96 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



이 재 훈

(KIMM 원자력공인검사사업단)

- '89 한양대학교 원자력공학과(학사)
- '88 - '95 한국중공업
- '95 - 현재 한국기계연구원 선임기술원



이 주 석

(KIMM 원자력공인검사사업단)

- '77 서울대학교 전기공학과(학사)
- '87 부경대학교 기계공학(석사)
- '93 부경대학교 기계공학(박사)
- '77 - 현재 한국기계연구원 원자력공인검사사업단 단장

1. 서 언

1971년 경남 양산군 장안읍 고리에서 착공된 고리원자력발전소 1호기가 1978년 4월에 가동되어 원자력발전소의 상업운전을 시작하게됨으로써 우리나라는 드디어 원자력에너지 시대를 맞이하게 되었다.

고리 원자력발전소 1호기는 원자로압력용기, 증기발생기, 가압기, 냉각재펌프, 터빈, 복수기, 발전기 등으로 구성되어 있다. 고리 1호기가 상업운전을 시작한지 20년이 지나 원자력발전소의 중요한 구성품인 증기발생기(steam generator) 전열관(tube)의 노후화로 국내에서는 처음으로 1,000억원 규모의 증기발생기(steam generator) 교체작업이 이루어졌다. 이 교체작업에 원자력발전소의 객관적인 신뢰성과 안전성을 확보하기 위해 정부가 승인한 공인검사기관인 한국기계연구원의 원자력공인검사사업단이 참여하여 공인검사업무를 수행하였다.

본연구원의 원자력공인검사사업단이 공인검사업무를 수행한 결과, 고리 1호기 증기발생기 교체에 따른 교체배경, 증기발생기 구조 및 기능, 사업수행 체제, 신/구형 증기발생기 교체공정, 공인검사 내용 등을 중심으로 본 글에서 개관해 보고자 한다.

2. 발전소 현황 및 특성

표 1, 표 2.

표 1. 고리원자력발전소 제1호기 현황¹⁾

호기	위치	용량	원자로형	상업운전일
고리1호기	부산시 기장군 장안읍	58.7만KW	가압경수로	78. 4. 29

표 2. 고리원자력발전소 제1호기 발전소 특성²⁾

원자로계통	PWR, Westing House 2-Loop
터빈공급	GEC
설계사	Gilbert & Commonwealth
설비용량	1782 Mwt(587 Mwe)
증기발생기 Model	Westinghouse 51계열(튜브재질 : Inconel 600MA)

3. 증기발생기(Steam Generator) 역할 및 구조

고리원자력발전소 증기발생기(steam generator)는 원자로에서 발생된 열을 이용하여 증기를 생산하는 기능을 가진 열교환기(heat exchanger)의 일종으로 여기서 만들어진 증기가 터빈을 구동하여 전기를 만든다. 고리 1호기는 2대의 증기발

생기(steam generator)가 설치되어 있다.

증기발생기(steam generator)는 아래 그림처럼 윗부분이 부푼 원통형으로 되어 있다(그림 1). 높이는 20.7m, 윗부분의 지름이 4.5m 이며 내부에는 \cap 자모양의 전열관(tube) 4,934개가 조립되어 있다. 전열관(tube) 안쪽에는 원자로에서 가열된 1차 계통수가 흐르고, 바깥쪽에는 방사능 성분이 없는 2차 계통수가 접촉되어 열을 전달

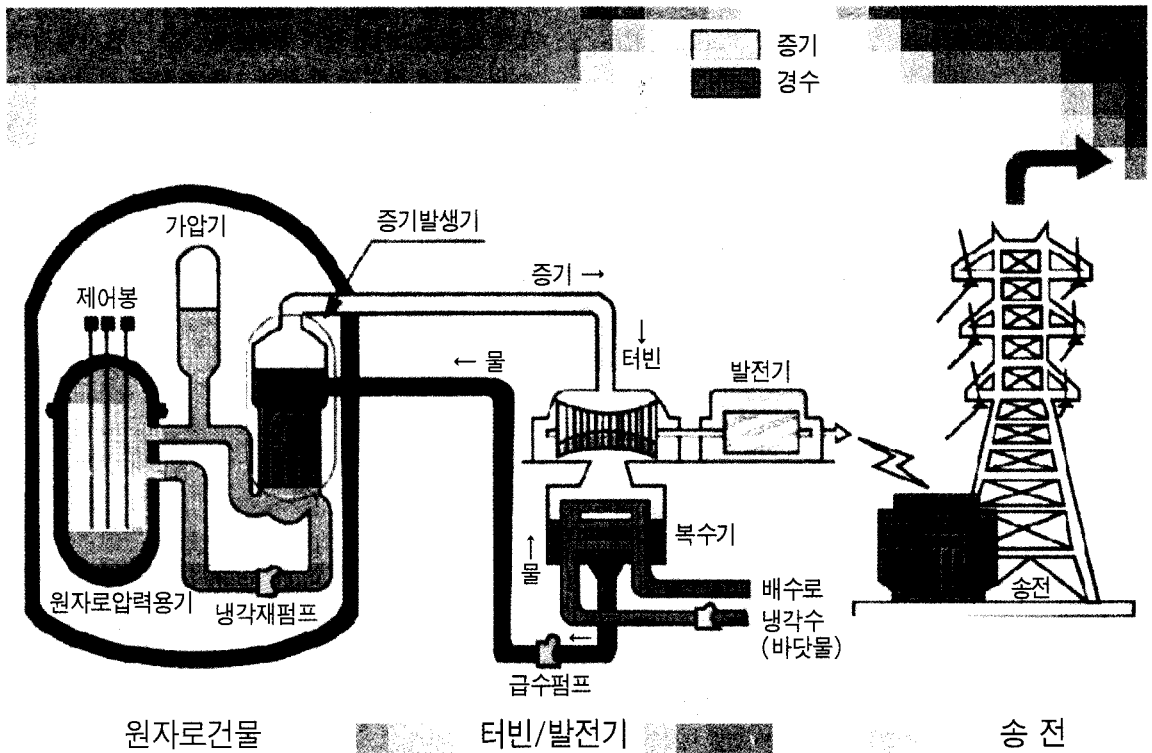


그림 1. 원자력발전 개략도

증기 출구(Steam Outlet)
2차계통수는 증기로 바뀌어 터빈으로 보내집니다.

고리 1호기 신형 증기발생기
Kori Unit 1 New Steam Generator

2차계통수의 입구(Feedwater Inlet)
복수기에서 식힌 물(순수)이 들어옵니다.

진동방지장치(Anti-Vibration Bar)
U자 모양으로 구부러진 부분의 전열관을 지지합니다.

전열관(Inconel-Tubes)
원자로에서 가열된 1차계통수가 흐르는 관입니다.
전열관의 밖을 흐르는 2차계통수에 열을 전달하는 중요한 부분입니다.
(바깥지름 19mm/두께 1mm)

관지지판(Tube Support Plate)
전열관을 지지합니다.

관판(Tube Sheet)
전열관의 일부분을 고정합니다.

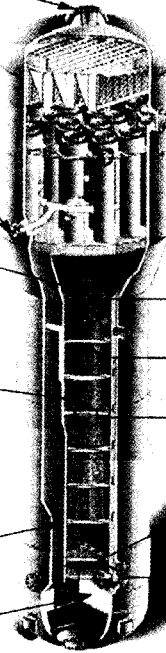


그림 2. 증기발생기 구조^[2]

받아 증기를 발생시킨다.

새로운 증기발생기(steam generator)는 전열관(tube)의 부식이나 마모, 진동에 의한 손상 방지를 위해 다음과 같이 성능을 개선하였다(표 3).

4. 교체 배경

증기발생기(steam generator) 전열관(tube) 노후화로 인한 결함 증대로 관막음을(plugging)이 설계제한치(15%)에 근접하고 있다. 현재의 증기발생기 관막음율은 증기발생기 A가 11.1% 증기발생기 B가 11.8%이다. 이에 한국전력은 94년부터 설비 신뢰도, 안전성 확보 및 타당성 조사를 하여 원자력발전소 종사자의 방사선 피폭을 줄이고 장기적으로 발전소 안정성 및 이용률을 향상시키고자 증기발생기 2대를 교체하게 되었다. 해외에서는

표 3. 신/구형 증기발생기(steam generator) 설계 비교^[1]

구 분	구 형 (WH-51)	신 형 (WH-60)	비 고
Steam Generator 무게/길이	304 Ton/20m	326 Ton/20m	외형은 동일
Tube 수량	3,388개	4,934개	열교환기
Tube 외경	7/8 inch	3/4 inch	열전달 면적 증대
Tube 재질	Inconel 600MA	Inconel 690 TT	내부식성 향상
Hand Hole	2개	6개	점검, 침전물제거 용이
U-Bend 검사구	-	2개	점검용이
Sludge 수집 점검구	-	2개	-
증기중 습분	0.25% 이하	0.25% 이하	-
Tube Sheet 확관	기계식	유압식	잔류응력 감소
Tube support plate	SA285 탄소강	405 스테인레스강	내부식성 향상
수위지시계 계측범위	144 inch	240 inch	- 운전여유도 향상
급수유로 분배판	-	설치	Sludge 퇴적 예방
1차 습분분리기	56inch×3개	20 inch×16개	-
급수링 구조	J-Nozzle	Elevated I-Nozzle	이물질 유입 차단
U-Bend 최소반경	2.19 inch	3.25 inch	잔류응력 감소
동체 제작방식	판재용접식	단조후 기계가공	용접부의 감소

技術現況分析

1979년 처음 교체하여 98년 2월까지 51개 발전 소가 증기발생기를 성공적으로 교체하여 안전하 게 운전하고 있다(표4).

표 4. 증기발생기(steam generator) 교체사례^[2]

교체국가	발전소명	상업운전	교체시기	운전기간	교체기간(일)	피폭량(맨,렘)
미국(20)	Surry 1, 2	73/72	80/79	7/7	295/560	1760/2140
	Turkey Point 3, 4	72/73	81/82	9/9	291/220	2150/1300
	H.B.Robinson 1	71	81	10	349	1210
	Point Beach 1, 2	70/72	83/97	13/25	210/	580/
	DC Cook 2	78	98	20	330	568
	Indian Point 3	76	89	13	140	541
	Palisades	71	90	19	178	397
	Millstone 2	75	92	17	228	650
	North Anna 1, 2	78/80	93/95	15/15	96.5/	240/142
	V.C Summer	84	94	10	97	327
	Catawba 1, 2	85/86	96/95	11/9		
	Robert.E.Ginna	70	96	16	70	135
	McGuire 1, 2	81/84	97/97	16/13		
일본(8)	Byron 1	85	97	12		
	Takahama 2	75	94	19	184	149
	Genkai 1	75	94	19	180	60
	Mihama 1, 2, 3	70/72/76	94/96/97	24/24/21	476/415/	110/146/
	Ohi 1, 2	79/79	94/97	15/18	240/	293/
프랑스(10)	Milhama 3	76	97	21		
	Dampierre 1	80	90	10	207	212
	Bugey 4, 6	79/80	96/93	17/13	/180	/149
	Gravelines 1, 2	80/80	94/96	14/16	105/	194/
	Gravelines 3, 4	81/81	94/97	13/16		
	Dampierre 3	81	95	14		
	St laurent 1	83	95	12		
벨기에(5)	Tricastin 2	80	96	16		
	Doel 1, 2	75/75	93/96	18/21	96.3/	
	Doel 3, 4	82/85	93/96	11/11		196/
스웨덴(2)	Tihange 1	75	95	20	93	153.5
	Ringhals 2	75	89	14	100	290
스페인(4)	Ringhals 3	81	95	14	90	129
	Asco 1, 2	84/86	95/96	11/10	97/	244/
독일(1)	Almaraz 1, 2	83/84	96/97	13/13	80/	153
독일(1)	Obrigheim	69	83	14	103	690
스위스(1)	Beznau 1	69	93	24	99	110
한국(1)	Kori-1	78	98	20	(90)	(140)

5. 인·허가

증기발생기교체공사를 위해 아래사항의 업무가 수행되었다.

5.1 인·허가 추진현황

- 96. 7. 23 : 인·허가서류 초안 안전기술원 제출
- 98. 3. 23 : 인·허가서류 개정보완본 안전기술원 제출
- 98. 4. 13 : 안전기술원 검사분과위원회 개최
- 98. 4. 28 : 안전기술원 안전심의위원회 개최
- 98. 5. 28 : 과기부 운영변형허가 신청

98. 6 - : 증기발생기교체공사 수행 및 결과 제출

5.2 인·허가 역무대상

1. 신규 증기발생기 설계·제작 안전해석 : 증기발생기 공급자 수행
2. 원자로계통(NSSS) 안전해석 : 증기발생기 공급자 수행
3. 교체·시공 안전해석 : 교체·시공자 수행

6. 사업수행 체제

6.1 참여업체

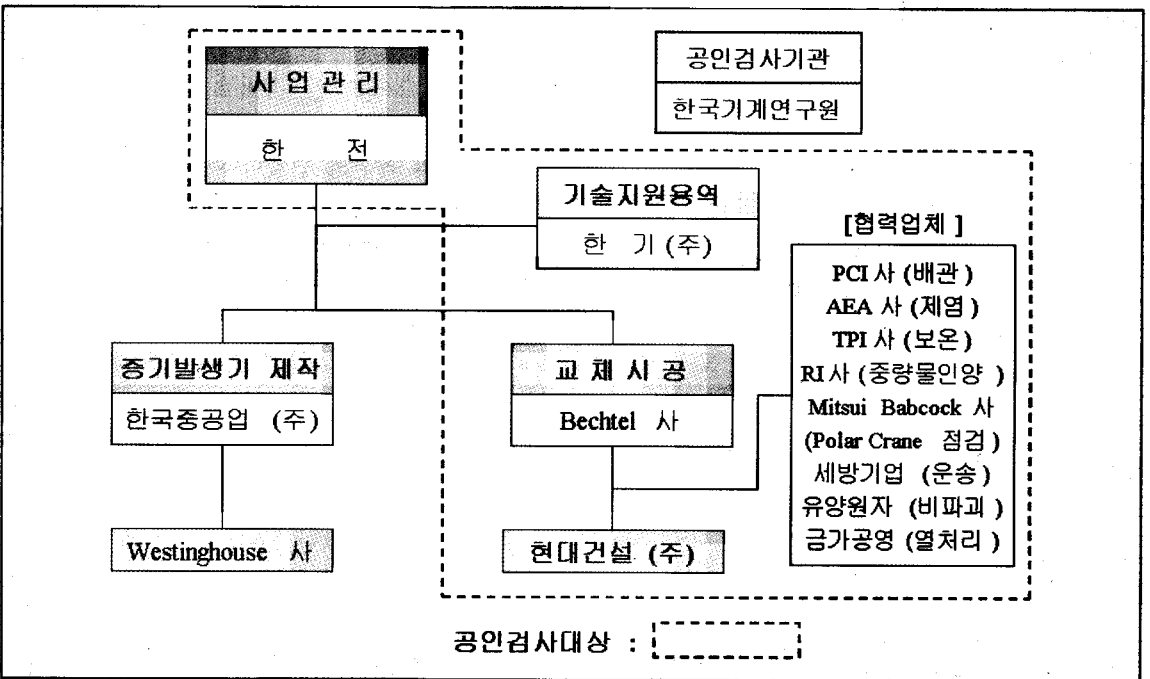


표 5. 소요예산 및 인력

소요 예산		투입 인력	
제작	359억원 (한중/Westing House)	한 전	100명
시 공	447억원 1. Bechtel : 230억원	교체시공사	520명(현대건설 등) 110명(Bechtel사 등)
	2. 현대 : 220억원		
기술인력지원	45억원(한기, KOPEC 등)		
부대설비공사	80억원		
합 계	931억원	합 계	730명

6.2 공사비 및 인력

표 5.

6.3 신형 증기발생기 설계·제작

- 1. 계약일 : 95. 2. 28
- 2. 계약자 : 주계약자 : 한국중공업 (ASME Section III NB 92 Edition with 93 addenda 에 따라 Westinghouse type으로 설계, 제작)
하도급자 : Westinghouse(설계·인허가 분야)
- 3. 제작기간 : 95. 02 - 98. 02 (37개월)
- 4. 공급범위 : 증기발생기 2기, 예비품

6.4 교체·시공 분야

- 1. 계약일 : 96. 01
- 2. 계약자 : 주계약자 : 벡텔사(전체 Project 관리)
하도급자 : 현대건설
- 3. 제작기간 : 96. 01 - 98.
- 4. 공급범위 : 시공설계, 인·허가 위한 안전해석, 시공 등 일괄 수행
(단, 방사선관리분야는 한전)

6.5 원자로계통 안전해석

- 1. 해석수행 : Westing House
- 2. 해석내용 : LOCA(loss of coolant accident), Non-LOCA등 12 분야
- 3. FSAR 개정항목 : 130개(신규 증기발생기 관련사항 해석결과)
- 4. Tech Spec. 개정항목 : 17개(증기발생기 수위 운전범위 개선 등)

7. 증기발생기(steam generator) 교체 작업

7.1 기존증기발생기(steam generator) 제거 공정

기존의 증기발생기 제거공정순서는 크게 다음과 같다.

- 1. 발전소 정지후 냉각
- 2. 핵연료 인출
- 3. 증기발생기 내부 배수
- 4. 증기발생기 배관 절단
- 5. 증기발생기 인양 및 CV(Containment Vessel) 반출
- 6. 구증기발생기 저장고 보관

그림 3.

7.2 신규 증기발생기(steam generator) 설치 공정

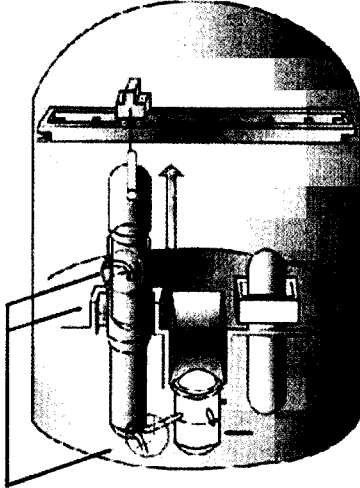
새로운 증기발생기 설치하는 제거 공정의 역순이며 설치방법은 기본적으로 건설시와 같다. 증기발생기와 배관의 연결이나 임시개방구의 밀폐에 대해서도 건설시와 동일한 방법으로 수행한다. 신규 증기발생기 설치 공정순서는 크게 다음과 같은 절차로 수행한다.

- 1. 신규 증기발생기 CV(Containment Vessel) 반입
- 2. 증기발생기 설치 및 용접
- 3. 계통 충수 및 핵연료 장전
- 4. 수압시험
- 5. CV(Containment Vessel) 기밀시험
- 6. 발전소 기동

7.3 주요공정별 Schedule

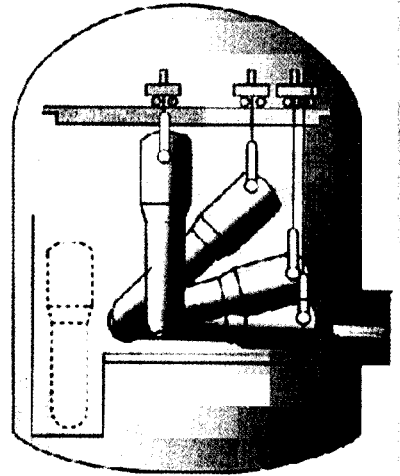
- 1. Shutdown : 98. 06. 19
- 2. Metal Containment Vessel Cutting : 98. 07. 03
- 3. RCL Cutting (2 joints/ 증기발생기 1대) : 98. 07. 07
- 4. 신규 증기발생기 Set-up : 98. 07. 18
- 5. RCL/Main Steam/Feedwater Line 용접완료 : 98. 08. 04

1. 증기발생기와 배관의 절단 분리



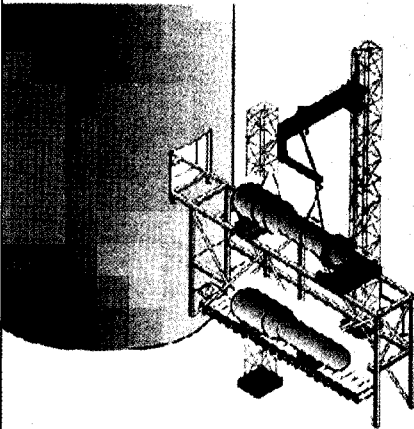
기존의 증기발생기에 연결된 배관을 절단하고 증기발생기 및 절단부의 오염을 제거하여 밀봉 용접합니다.

2. 증기발생기 인양과 인출



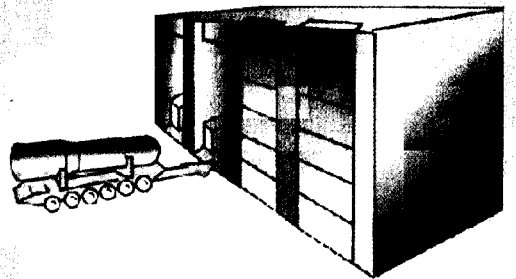
천정 크레인을 이용하여 인양된 증기발생기를 레일 위에 놓여 원자로건물 임시개방구로 밀어 넣습니다.

3. 제염처리 및 반출



증기발생기를 반출전 표면을 제염처리 후 임시 개방구로 반출하여 대형트레일러에 적재합니다.

4. 발전소내 기존의 방사물저장고로 운반 보관



구증기발생기는 발전소내 방사물 저장고에 보관하게 됩니다. 방사능은 중준위 수준으로 주변 환경에 영향을 미치지 않습니다.

그림 3. 증기발생기(steam generator) 제거 공정^[2]

6. Containment Vessel 용접완료: 98. 08. 05

7.4 증기발생기(steam generator) 교체공
사후 주요시험

- 1. 2차측 수압시험 : 98. 08. 11
- 2. 1차측 수압시험 : 98. 08. 23
- 3. 증기발생기 전열관 및 용접부 비파괴검사
- 4. 증기발생기 습분동반율시험
- 5. 강재 격납용기 종합누설시험 (ILRT)

7.5 구증기발생기(steam generator) 저장

- 1. 구증기발생기 개구부는 철판용접으로 완전 밀봉
- 2. 구증기발생기 외부 표면은 제염 및 특수 페인트 도포로 오염확산 방지
- 3. 구증기발생기 안전이송을 위한 이송로 50 개소 보강조치
- 4. 본부내 기존 제방시물 저장고 내에 적법하게 반입, 저장

8. 공인검사 활동

8.1 검사기간

1998. 05. 11 - 1998. 08. 28

8.2 적용기술기준

- 1) ASME Code Section XI, 1989 edition
- 2) ASME Code Section V, 1992 edition with 93 addenda
- 3) ASME Code Section III, NB, NC, NE, NF 92 edition with 93 addenda
- 4) ASME Code Section IX, 92 edition with 93 addenda
- 5) 고리원자력 1호기 FSAR

8.3 공인검사의 주요내용

1) 인수검사 :

- Identification(기기명, Heat No. & LOT No, 요구되는 내용)
- 형상 및 Dimension
- 외관 손상유무
- 수량
- CMTR 또는 C of C의 확인

2) 자재검사 :

- CMTR의 검토여부(제작자, 사전 검사자)
- Tech. Spec 또는 DWG의 요건과 일치여부
- 기술기준에서 요구하는 시험의 수행 및 결과의 만족여부
- 자재 Identification 및 Heat No. & LOT No 확인
- 자재의 손상여부

3) Marking 검사 :

- Lay-out이 Cutting Plan과 일치여부
- 관련 절차서에 따라 I.D Marking 실시여부
- 사용하는 Steel Stamp가 Round Nose/Dot Type이며 글자의 크기/깊이 적합여부
- Stainless Steel에 사용되는 Stamp의 구분

4) Cutting/Beveling 검사 :

- Thermal Cutting시 요구되는 예열실시 여부
- Thermal Cutting시 열영향부 제거여부
- Machine Cutting시 사용 절삭유 적합성 여부
- 개선형상, 치수(도면, ANSI B 16.25)
- 개선면 NDT 적용유무

5) Fit-up검사 :

- 검사장비 검교정 여부
- 용접부위 청정상태
- Tack weld 상태
- Tack-weld후 Root Gap 상태

- Tack-weld후 Alignment 상태
- 피용접물의 위치 및 방향
- 임시부착물 제거 및 위치 확인
- Fit-up후 도면과 자재 일치여부(자재 재질, 등급, 적용기준 등)

6) Welding Inspection :

- 용접사 Qualification
- WPS에 따른 작업여부
- 용접봉 사용 적정여부
- 용접봉의 Baking 상태와 보존유지 상태
- 예열온도와 층간온도 준수여부
- 용접절차 준수여부
- 용접Seam부위에 용접사 I.D Marking 여부
- 트레이블러에 용접사 I.D 기록여부

7) NDT(비파괴시험) :

- 시험시기
- 시험요건의 만족여부
- 절차서 확인
- 시험자 Qualification상태 확인
- 판정기준 적합여부
- Report 검토

8) PWHT검사 :

- 열처리 요원 Qualification
- 열처리로, 열전대 검교정
- 작업절차서의 준수여부
- 열전대의 위치, 수량, 부착의 견고성 확인
- Air Vent Hole의 Open 여부
- 열처리로는 제품 장입전 최소온도 유지여부
- 열처리 기록서의 올바른 기록
- Report 검토 (Heat-up Rate/Cool-down Rate/Minimum Temp./Holding Time)

9) Final 검사 :

- 제품 Identification Marking
- Dimension
- Orientation
- Contour(외관)
- Instrument Nozzle 내경처리

10) Hydrostatic Test 검사 :

- Hydrostatic Test 절차서 확인
- 압력계 검교정 여부
- 사용매질의 종류, 온도의 적정여부
- 압력계의 시험범위 만족여부
- Air Vent 확인
- 시험압력 및 유지시간
- 수두차에 의한 최소 시험압력 만족여부

표 6. 비파괴시험(NDT)

방사선투과시험(RT)	초음파탐상시험(UT)	액체침투탐상시험(PT/LPT)	자분탐상시험(MT/MPT)
- 방사선원의 적정 여부 확인	- 시험부위의 표면검사 준비상태	- 시험부위의 표면 검사 준비상태	- 시험부위의 표면검사 준비상태
- 필름 Type 및 유효기간 확인	- 장비의 검교정상태 확인	- 세척제, 침투제, 현상제의 기술기준 만족여부(성적서 확인)	- 장비의 검교정 상태 확인
- Screen 및 Filter 접합여부 확인	- Couplant의 성적서 확인	- 표준온도 이외에서의 시험에 대한 적합여부와 Demonstration 실시여부 및 이의 적합여부)	- 자분의 기술기준 만족여부(성적서 확인 및 강도 시험)
- 투과도계의 적정여부	- DAC Curve 작성여부	- 검사후 Cleaning	- Field Indicator에 의한 자장형성의 적합여부
- 기하학적 불선명도 만족여부	- 검사후 Cleaning		- Yoke Type의 경우 Lifting Power 점검
- Density 만족여부			- 검사후 Cleaning 및 탈자 이행여부
- 필름판독 결과의 적정여부			
- 판독된 필름의 보관상태			

- 과압으로 인한 Stress Analysis 검토여부
- 누수여부
- Test후 압력계 눈금이 "0"상태로 복귀여부
- Test Record 검토

11) DATA Report Review & Sign-off:

- Identification 확인
- 트레이블러 기록의 만족여부 확인(트레이블러 검토여부, 검사점 선정, 검사기록 등)
- 선정된 검사점의 검사여부 확인
- 관련 시험 및 검사요건 검토여부 확인
- 적용 기술기준의 만족여부 확인

8.4 공인검사 결과

국내에서 처음으로 시행한 1,000억원 규모의 증기발생기(steam generator) 교체작업은 한국전력공사 주관 하에 미국의 Bechtel, Westinghouse 그리고 한국중공업, 현대건설, 한기 등 많은 업체가 참여하였으며 업체들이 정확하게 적용하여 국내에서 처음으로 시행하는 증기발생기 교체작업이 성공적으로 이루어졌다. 한국기계연구원 원자력공인검사사업단은 울진 3,4호기/월성 2,3,4호기 시공공인검사의 경험을 바탕으로 시공 완료후 문제가 발생할 수 있는 소지를 미리 검토 및 분석하여 독립적이고 공정하며 객관적인 입장에서 한전 및 참여업체와의 의견수렴을 통해 해결방안을 제시하였다. 기술기준 및 관련요구사항을 벗어나는 사항에 대해서는 1건의 DNR(공인검사부적합보고서)과 6건의 Letter를 발행하여 사전에 시정, 조치하도록 하여 안전성과 더불어 교체공사의 가장 중요한 부분의 하나인 교체공사일수의 준수에 일익을 담당하였다. 앞으로, 고리 1호기 증기발생기 교체공사에서 발견된 지적사항을 후속호기 교체공사에 정확하게 Feed-Back 하여 불필요한 시간과 예산을 줄여 보다 나은 품질을 확보하여 안전성 제고에 기여할 것이다.

9. 결 언

국내에서는 1978년 4월 고리원자력 발전소 1호기의 상업운전을 시작으로 현재 19개의 발전소가 가동 또는 건설 중에 있으나 가동년수가 경과함에 따라 기기의 노후화로 인한 발전수의 가동률이 점점 떨어지고 있다. 그러나 원전을 추가로 건설하는 문제는 신규 부지확보의 어려움과 막대한 예산지출로 인해 국내에서도 문제가 되고 있어 노후화된 기기의 교체공사는 앞으로도 발전소를 보유하고 있는 국가에서는 빈번히 이루어 질 것으로 생각된다. 해외에서는 1979년 미국 Surry 1, 2호기의 증기발생기 교체공사를 시작으로 98년 2월까지 51개 발전소가 증기발생기를 성공적으로 교체하여 발전소의 수명연장에 노력을 기울이고 있다. 고리원자력발전소 제1호기의 증기발생기(steam generator)는 현재까지 안전운전에는 지장이 없으나 최신행의 증기발생기로 교체하여 종사자의 방사선 피폭을 줄이고 장기적으로 발전소의 안전성 및 이용률을 향상시키고자 약 3년간의 기기제작, 교체시공 준비기간을 거쳐 성공적인 교체작업이 이루어졌다. 교체후 발전소 성능이 향상됨으로 앞으로도 상당수의 발전소가 교체될 계획이다.

이 교체작업에 원자력발전소의 구조조건성확보 확인을 위해 한국기계연구원의 원자력공인검사사업단은 울진 및 월성원자력발전소의 시공공인검사서 얻은 많은 경험과 기술을 바탕으로 공인검사의 중요한 업무인 적용기술기준 관련요구사항 준수 확인 및 문제 발생 소지를 미리 검토, 분석하여 성공적인 증기발생기 교체작업이 이루어지는데 일익을 담당하였다.

이번 증기발생기 교체작업은 국내에서 최초로 수행한 1,000억원 규모의 대형사업으로 한전의 사업관리하에 많은 업체가 참여하였다. 국내에서 처음으로 이루어지는 사업관계로 많은 국외업체의 참여 및 기술지원 등의 도움을 받았다. 특히 교체시공 분야에서는 Bechtel이 주도하는 가운데

현대건설 등의 국내업체가 활동하였다. 이번 사업의 성공적인 교체작업에서 얻은 많은 경험과 기술적인 know-how 등을 바탕으로 차기 증기발생기 교체사업에는 많은 국내업체가 주도하는 활약을 하며 아울러 우리의 선진화된 기술 축적으로 향후 공인검사 부분과 더불어 원자력발전소의 주요기기의 교체공사와 관련된 기술의 해외수출을 기대하게 된다.

참 고 문 헌

- [1] 고리원자력 1호기 증기발생기 교체 설명회, 한국전력공사 원자력발전처, 97본사(단)-235, 1997. 05. 27
- [2] 고리1호기증기발생기교체, 한국전력공사 원자력발전처 설비개선팀, 98본사(단)-21, 1998. 02