

2003 추계 학술발표회 논문집  
한국원자력학회

국내 원전 습분분리재열기의 저압재열기 교체 및 성능진단

Replacement of Low Pressure Reheater and Performance Evaluation on Domestic NPP  
Moisture Separator Reheater

최유성, 정우태, 손선영, 김남훈  
한국전력공사 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력 발전소의 습분분리재열기는 고압터빈을 거친 습포화 증기의 습분을 분리하고 재가열하여 건포화 증기 상태로 저압터빈에 공급하며, 터빈의 건전성은 물론 발전소 출력 등 전체 효율에 가장 큰 영향을 주는 중요한 설비들 중의 하나이다. 동 설비는 가혹한 운전 조건하에서 상시 운전되는 관계로 주의깊게 관리되어야 하며 운전 신뢰성 확보가 매우 중요하다. 본고는 국내의 한 원전에서 습분분리재열기(MSR)의 저압재열기를 일부 교체한 후 MSR의 성능저하와 응축수 배수관의 진동문제가 발생되어, 이에 대한 원인분석 및 개선대책을 제시하여 현장에서 설비를 개선한 후 MSR의 정밀점검과 성능진단을 실시한 결과 성능이 양호하게 나타난 것을 기술한 내용임.

Abstract

Moisture Separator Reheater is one of the most important equipment for the integrity of low pressure turbine and the total efficiency of the nuclear power plant, It supplies the dry steam to low Pressure turbine after separation of moisture and reheating the wet steam out of high pressure turbine. This equipment is always operated under severe conditions, therefore it should be carefully maintained for safe operation and operating confidence. After replacement low pressure Reheater of Moisture Separator Reheater on domestic Nuclear Power Plant, there was MSR performance degradation and vibration of condensate drain line. So I found out root cause and commented a solution, site people modified the equipment. Finally I concluded the performance of MSR was good condition, after I inspected the equipment and evaluated the performance of MSR.

# I. 서론

## 1. 개요

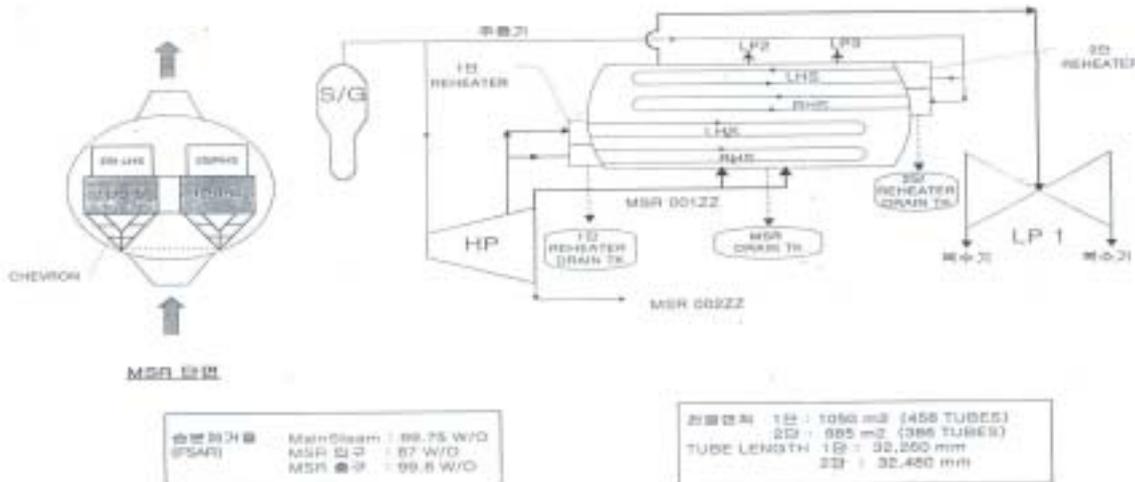
1988년 9월부터 상업운전을 시작한 국내의 한 원전 습분분리재열기(MSR)의 저압재열기 핀튜브의 관막음율이 서서히 증가하여 제한치(10%) 초과 및 주변 튜브로의 확산이 우려되어, 2000년 계획예방 정비시 내부 구조물 중 저압재열기 Z001를 스테인레스강 핀튜브로 교체하였다. 그 후 MSR의 성능저하와 응축수 배수관의 진동문제가 발생되어, 이에 대한 원인분석 및 개선대책을 제시하여 현장에서 설비를 개선하고 2001년 10월 Z002를 교체한 후 MSR의 정밀점검과 성능진단을 실시하였음.

## 2. MSR 제원

- 기기의 수량 : 습분분리재열기(MSR)는 원전 한 호기당 2대, MSR 1대당의 기기수 습분분리기(Moisture Separator - Chevron vane type) 1대, 재열기(Reheater)는 1단(저압, LP)과 2단(고압, HP)이 각 2대, Left 및 Right hand side로 구성됨
- 기기공급 및 설계사는 GEC - Alstom 및 Alstom - Stein Industry(프랑스)이고,
- 제작 및 설치사는 한국중공업(주)이며, 신규 저압재열기의 설계·제작 및 설치사
  - Z001 교체년도 및 설계사는 1호기 2000. 1이고, 2호기 2000. 7 및 TEI사(미국)
  - Z002 교체년도 및 설계사는 1호기 2001. 10이고, 2호기 2002. 5 : 두산중공업(주)

구 분	동 체	재 열 기	
		1단 (저압)	2단 (고압)
설계 압력(bar)/온도(°C)	18 / 210	40 / 292	75.8 / 292
튜브 수량		458	386
평균 외경/두께(mm)		18.8 / 1.485	18.8 / 1.65
핀튜브 외경/두께(mm)		17.5 / 1.995	17.5 / 2.1
핀수(fins/inch)		19	19
U튜브 평균길이(mm)		32,260	32,480
열전달 면적(m <sup>2</sup> )		1,050	885
재 질	탄소강	탄소강 (ST35.8)	탄소강 (ST35.8)
크 기(mm)	직경 3,800 길이 23,000	직경 1,150 길이 18,819	직경 1,072 길이 18,140
공급사	Manesman		

## 3. 계통 개략도



## II. 본론

### 1. 설비교체, MSR 성능저하 원인분석 및 대책검토

#### 가. 저압재열기 교체 추진방안

Tube bundle의 개선방안은 관막음 제한치를 초과하거나 향후 1년내 제한치의 초과가 예상되는 것은 1단계로 조기 교체, 누설이 없거나 적은 것은 운전중 건진성을 확보하고 MSR 전체의 성능을 진단한 후 2단계로 교체하기로 결정함.

○단계별 tube bundle 교체시기

구분	현재 누설수	현재 관막음율	차기O/H시 예상관막음율(%)	추진 단계	개선대상 연도	비고
#1	001ZZ LHS	32	6.0	15.6	1단계	2000.7~8
	001ZZ RHS	23				
	002ZZ LHS	7	0.8	2.1	2단계	2001년 이후
	002ZZ RHS	0				
#2	001ZZ LHS	96	10.4	22.9	1단계	2000.1~3
	001ZZ RHS	0				
	002ZZ LHS	0	-	-	2단계	2002년 이후
	002ZZ RHS	0				

※ 차기 O/H 예상 관막음율 = 현재 관막음율 × 호기별 년평균 증가속도(#1:2.6, #2: 2.2)

○교체공사 실적

호기	교체기간	공기(일)	소요인력(MD)	소요예산	비고
1 Z001	2000. 6. 12 ~2000. 7. 12	31	외국인 : 58 내국인 : 503	143,750\$ 17.25억원	환율:1200원/\$
1 Z002	2001. 10. 3 ~2001. 10. 27	25	내국인 : 455	15.02억원	
2 Z001	1999.12. 27 ~2000. 2. 1	34	외국인 : 65 내국인 : 509	143,750\$ 17.25억원	환율:1200원/\$

○ 설비 정밀점검 및 교체 관련 사진



그림 2. 재열기 U-Bend 부위의 침식 현상



그림 3. 재열기 직관부의 손상 현상



그림 4. 교체된 저압 재열기 전체 모습



그림 5. 재열기 번들 인출·삽입 모습

나. MSR 성능저하 원인분석 및 대책검토

1) 운전 및 정비이력 검토

- MSR 저압 튜브 번들의 관막음을 증가로 인해 1999년 OH209부터 4개의 번들에 대해 미국 TEI사(Thermal Engineering International)와 교체 계약을 추진하였음.
- 교체 전 1, 2호기 LP 번들 관막음 현황

호기	001ZZ	002ZZ	계
1호기	6.0%	0.7%	6.7%
2호기	9.7%	-	9.7%

- 교체 후 MSR 종단온도차(TTD : Terminal Temperature Difference)가 보증값에 미달하고 배수관의 진동이 발생되어 해결을 시도하였으나 개선 안됨
- Partition plate의 gasket 누설부 점검 실시
- Excess steam량의 조절을 위한 by-pass 밸브 설치 및 배수관의 orifice size를  $\phi 22.9\text{mm}$ 에서  $\phi 15\text{mm}$ 로 축소하였으나 배수관의 진동 및 TTD 불만족이 계속됨
- TEI사에서는 배관진동 해석 및 thermal balance 재계산을 통해 2001년 2호기 계획예방정비 기간중에 tube sheet내 증기 유량제한용 orifice size를 변경하였으나 오히려 1, 2단 가열증기 유량의 불평형 문제가 추가로 발생됨은 물론 TTD 및 MSR 출구 계통증기의 온도 개선에도 실패하게 되었음
- Tube sheet내 orifice size 변경 내역

구 분	교체전	교체후	비고
Zone - 1	$\phi 5.56$	$\phi 5.56$	
Zone - 2	$\phi 5.94$	$\phi 5.94$	
Zone - 3	$\phi 6.35$	$\phi 6.35$	
Zone - 4	없음	$\phi 3.87$	신설

- 2001. 8. 9 공급사의 기술자가 재방문하여 제반 문제점의 확인 및 배수탱크의 비상배기밸브(2GSS 073VV) 조절 등을 수행하였음에도 상태 변화가 없으며 O/H 수행기간 동안 1호기 MSR에 공급자 부담으로 개선작업을 추진중에 있음
- 개선작업 기간 : 2001. 10. 11 ~ 13(3일간)
- Tube sheet내 증기유량 제한용 orifice 재배치 작업
- Channel head내부의 equalizing(6"배관) 부위 점검

2) 주요 문제점 도출

가) TTD 불만족 및 MSR 출구 온도 저하

Designed TTD	Guaranteed TTD	설치 후 측정값	차이	비고
26°F	23°F	26.8°F 26.1°F	3.8°F초과 3.1°F초과	2호기 1호기

주) 보증 TTD 미달로 69,000US\$ penalty 부과 중(계약조건 10,000 US \$ / °F)

- MSR 출구 계통증기 온도(설계치 : 252.4°C)저하로 터빈 blade 침식 가능성 상존

나) 가열증기 유량 변화에 따른 1단 배수관(10") 진동문제 발생

- TEI 배관진동 해석 : ASME 요건 만족, 전력연구원 진동 해석 : ASME 요건 초과

다) 2호기 제 10차 계획예방정비 수행 후 1, 2단 가열증기 유량 불평형 현상 발생

- 정기·79(터빈보호 및 제어계통 주간시험) 수행 시 1, 2단 유량의 변화가 발생됨

- 유량 증가시 배수관 진동증가 및 유량 감소시 배수관 진동 감소
- 3) 원인분석 및 대책검토
- 배수 배관의 안전성 재검토
    - 전력연구원 발전설비 지원그룹 : 10월중, 배관의 건전성 및 안전운전 방향 제시
  - OH111 기간 중 공급자 개선작업에 대한 안전성 검토
    - 전력연구원 정비기획팀 및 공급자 회의 : 10월 17일(수)
    - 개선방법 : Partition plate 개조(도면참조) , 개선예정일 : 2001. 10.1 8 ~ 20(3일간)
  - 최적 운전방안 도출
    - 공급자 개선 작업에 대한 안전성 확인(전력연구원 및 공급자)
    - 각종 운전변수의 취득 및 분석을 통한 최적 운전방안 결정(전력연구원/공급자)
    - 운전중 배관 건전성 확보 : 필요시 배관 지지대 보강 또는 공급자 조속해결 요청
  - 저압변들 교체 전·후의 운전변수 및 작업이력과 원제작사(Alstom)의 도면과 현장을 정밀분석한 결과, LP bundle의 channel head 내부에서 응축수 배수탱크(CRT)로 연결된 압력평형관(pressure equalizing line)이 Cold leg 측에 연결되어야 하나 Hot leg 측으로 잘못 연결됨에 기인한 것으로 판단되어 부분 개조하여 원상 복귀시킴.
    - 교체전 대비 발전기 출력이 9.67 MWe 상승되는 등 MSR 전체 성능도 정상화 됨
    - 배수관의 진동 : 개선 전·후 4796 → 63 μm로 정상화 됨
  - 설비개선에 의한 출력증가에 따른 경제적 이득 계산
 
$$9.67 \times 10^3 \times 365 \times 24 \times 0.906(1-0.05) \times 39.34 = 2,868,248,260 \text{원/년} \approx 28.7 \text{억 원/년}$$



그림 6. LP bundle의 channel head 내부 모습(작업 전)

- 압력평형관이 Cold leg 측에 연결되어야 하나 Hot leg 측으로 잘못 연결됨



그림 7 LP bundle의 channel head 내부 모습(작업 후)

- 압력평형관 부위에 격막을 설치하여 Cold leg 측으로 연결후 정상화 시킨 모습

## 2. 설비개선 및 Z002(Right) 교체 후 성능진단

### 가. 1호기 MSR 성능진단 결과

- 종단온도차(Terminal Temperature Difference) 개선
  - GSS 001ZZ(Left) 1단 : 설계(26.82°F) 대비 개선 후(13.1°F)가 13.72°F 개선됨.
  - GSS 002ZZ(Right) 1단 : 설계(26.82°F) 대비 교체 후(8.05°F)가 18.77°F 개선됨.
  - 전체
    - GSS 001ZZ(Left) : 설계( <14.6°C) 대비 개선 후(17.2°C)가 2.6°C 저하되고, 개선 전(18.33°C) 대비 개선 후(17.2°C)가 1.13°C 개선됨.
    - GSS 002ZZ(Right) : 설계( <14.6°C) 대비 교체 후(15.5°C)가 0.9°C 저하되고, 교체 전(17.56°C) 대비 교체 후(15.5°C)가 2.06°C 개선됨.
- 계통증기 압력강하(Cycle Steam Pressure Drop)
  - 1단
    - GSS 001ZZ(Left) : 설계(1.3 psid) 대비 개선 후(0.362 psid)가 (0.938 psid) 개선됨.
    - GSS 002ZZ(Right) : 설계(1.3 psid) 대비 교체 후(0.362 psid)가 (0.938 psid) 개선됨.
  - 2단
    - GSS 001ZZ(Left): 설계(5.917 psid) 대비 개선 후(5.424 psid)가 (0.463 psid) 개선됨
    - GSS 002ZZ(Right): 설계(5.917 psid) 대비 교체 후(5.37 psid)가 (0.547 psid) 개선됨.
- 습분분리 효율(Moisture Separation Efficiency)

구 분		001ZZ(Left)/002ZZ(Right)	전체
설계치(%)		96.2	96.2
인수치(%)		-	93.42
교체전('97.9)(%)		-	92.53
개선 및 교 체 후 (%)	배수유량 기준 + 응축수탱크 압력 기준	98.001 / 92.812	95.41
	공급유량 기준 + 응축수탱크 압력 기준	91.026 / 92.233	91.63
	공급유량-3%기준 + 응축수탱크 압력 기준	92.222 / 93.391	92.81
	배수유량 기준+2nd pass 응축수온도 기준	97.080 / 91.745	94.41
	공급유량 기준+2nd pass 응축수온도 기준	89.909 / 91.150	90.53
	공급유량-3% 기준 + 2nd pass 응축수온도 기준	91.137 / 92.341	91.74

- 습분분리 효율은 설계 열평형도와 가열증기의 배수유량 및 계측기 신뢰도 고려시 “가열증기 공급유량-3%기준(%) + 2nd pass 응축수온도 기준”이 타당함.
- 측정 자료를 기준으로 습분분리효율(91.74%)은 설계치(96.2%) 대비 4.46% 저하됨.
- 습분분리 효율의 저하는 계통증기의 Moisture Carry over를 증가시켜 재열기 TTD 및 계통 증기의 과열도를 저하시켜 저압터빈 입구 증기온도를 저하시킴.

○ MSR 출구 (저압터빈 입구) 계통증기의 상태량

구 분	설계치	GSS 001ZZ(Left)	GSS 002ZZ(Right)
압력(bar.a)	7.99	7.926	7.93
온도(°C)	252.4	253.2	253.4
엔탈피(Btu/lb)	1270.7	1,271.5	1,271.7

- 저압 터빈 입구 증기온도는 설비개선 및 교체 후에 설계치(252.4°C) 대비 GSS 001ZZ / 022ZZ 측이 0.8°C 상승 / 1°C 상승되고, 설비개선 및 교체 전 대비 GSS 001ZZ / 022ZZ 측이 2.2°C 상승 / 5.4°C 상승된 상태임.

나. 유량분배 Orifice size 분석을 통한 과냉각도 최적화 기술검토

1) 검토 배경

- 1호기 습분분리재열기의 저압재열기 교체 및 설비개선 관련 가열증기 tube 입구 유량분배 orifice 규격과, 성능시험에서 취득된 tube 위치별 thermocouple의 과냉각도 점검 결과를 검토하여 설비의 최적상태 유지 및 효율 개선을 목적으로 검토함.
- TEI 및 두산중공업에서 설계한 orifice 규격은 3종류(5.56, 5.94, 6.35mm)로 tube row 별로 설치되어 있으나, tube 위치별 thermocouple의 과냉각도를 점검한 결과 개선 전/후(Z001) 3.3~87 / 0~66.35°F, 교체 후(Z002) 0~62.6°F로 설계치(2.5% 과잉 증기량 기준 10°F) 대비 불균일한 온도분포를 나타내어 검토 및 개선이 요망됨.
- 위의 결과로 재열기 TTD가 저하되고, 응축수 배수흐름의 불안정성이 증대됨 이는 최초 설계시의 주요 입력변수인 습분분리 효율은 설계치:96.2%, 실제:91.137 ~ 92.341%로 성능이 저하된 상태이나 설계치를 적용하여 LP bundle을 설계하여 신뢰도가 저하됨.
- 금번 성능시험 결과를 근거로 한 정확한 변수를 입력, 재설계하여 차기 O/H시 유량분배 오리피스(F·O) 규격 변경 등의 유량분배를 최적화하기 위한 조치가 필요함.
- 전형적인 예(TEI사) : Excess steam(2-pass design, 95% M.S. 습분분리효율)

Reheater parameter			0.25%	2.5% (design)	5%	10%	25%
TTD	°F	L.P.	16.9	16.7	16.7	16.7	16.8
		H.P.	13.6	12.7	12.7	12.4	12.4
Subcooling extent	°F	L.P.	15.0	9.0	9.0	8.0	5.6
		H.P.	26.0	12.0	7.5	3.5	0
Heating steam flow	lbs/hr	L.P.	243,800	253,800	260,000	273,000	313,700
		H.P.	217,000	230,000	239,000	252,000	288,000

2) 검토 기준

Design case	Design condition	비 고
1	Heat balance 기준 (100%) - $\eta$ : 96.2%, mass flow 기준 -TEI flow orifice 설치 상태 (excess steam 2.5% subcooled 10°F)	TEI 설계
2	Z001 현재 운전 상태 -운전 $\eta$ , mass flow 기준 -TEI F·O 설치 상태	현상태
	Z002 현재 운전 상태 -운전 $\eta$ , mass flow 기준 -TEI F·O 설치 상태 -Tube 10개 plugged (::손상)	
3	F·O 조정 : 1,2 row에 0.3" F.O 설치 -Actual $\eta$ , mass flow 적용	F·O 조정 Optimum
4	F·O 조정 : 5~8 row 0.25" 0.35"로 확대 -Actual $\eta$ , mass flow 적용	F·O 조정
5	F·O 조정 : 5~8 row 0.25" 0.3"로 확대 -Actual $\eta$ , mass flow 적용	F·O 조정
6	F·O 전부 제거 : Actual $\eta$ , mass flow 적용	F·O 조정
7	Heat balance 기준	Alstom 원설계

3) 검토 항목

항 목	TTD (°F)	Subcool rate (°F)	Excess vapor (%)	번들압 력강하 (psi)	튜브 압력 강하 (psi)	전열면적 (ft <sup>2</sup> )	Heat duty (Btu/hr)	비 고	
Case 1	19.52	10.60	2.3412	1.265	13.496	26985.5	9.1496 x 10 <sup>7</sup>	TEI 설계	
Case 2	Z001	20.96	11.11	5.4241	1.205	17.064	26981.1	9.9289 x 10 <sup>7</sup>	운전치:0~66.35°F
	Z002	20.37	5.02	10.2739	1.198	18.214	26573.7	9.1514 x 10 <sup>7</sup>	운전치:0~62.6°F
Case 3	21.08	9.46	5.3414	1.205	17.672	26981.1	9.9160 x 10 <sup>7</sup>	Optimum	
Case 4	20.65	13.76	5.3954	1.206	15.218	26981.1	9.9625 x 10 <sup>7</sup>		
Case 5	20.72	11.98	5.2476	1.206	15.828	26981.1	9.9544 x 10 <sup>7</sup>		
Case 6	20.30	20.86	5.8715	1.205	11.230	26981.1	9.9994 x 10 <sup>7</sup>		
Case 7	26.82	-	3.0	1.300	-	-	-	Alstom 원설계	

4) 검토 결과

- Alstom 원설계와 TEI 설계, 현상태 및 개선방안을 비교 검토한 결과 Case 3(1,2 row에 0.3" F·O 설치)이 Optimum design으로 판단되나, 두산중공업 및 TEI 설계 Program의 차이 및 이론과 설계상의 차이로 TEI 개선방안을 접수 및 분석 후 결정함이 바람직한 것으로 판단, 권고함.

### 3. MSR 성능 종합 분석 및 대책 검토

#### 가. 성능 및 설계측면

##### 1) MSR 성능종합

1호기 제11차 O/H(2001.11) 중 저압재열기 Z002 교체 및 1단 재열기의 가열증기가 Channel head에서 응축수배수탱크의 압력평형관(Pr. equalizing line)을 통하여 우회되던 것을 설비개선으로 정상화시킨 후 성능시험을 실시한 결과

- 발전기 출력 : 설계치 대비 0.32MWe, O/H전 대비 9.67MWe 정도 상승됨
  - 국내 원전의 설비교체 경험상 MSR LP bundle 2개 교체시 출력 상승은 미미하고 (약 1~ 2MWe)하고, 전체 교체시 출력 상승효과는 11~13 MWe 정도임('95, '96 고리 3, 4호기의 경우 : 최신설계 개념반영, 튜브재질-스테인레스강, 4 path 등)
- 저압터빈 입구 계통증기 온도 : 설계치 대비 Z001 / Z002가 0.8℃/1℃ 상승하고 O/H전 대비 Z001 / Z002가 5.4℃/2.2℃ 상승되어 저압터빈 건전성을 향상 시킴
  - 1단 재열기 배수배관(Pr. equaling line 등) 진동 : Z001 O/H 전/후가 4796 / 63μm 로 설비개선 후 정상화됨
- 재열기 중단온도차(TTD)
  - 1단 : Z001 / Z002가 설계치를 만족, 설계치 대비 13.72 / 18.77°F만큼 개선
  - 2단 : Z001 / Z002가 성능저하로 설계치를 불만족(2.6 / 0.9℃저하)하며 O/H전 대비 1.13 / 2.06℃ 개선됨
- 계통증기 압력강하(Pr. drop)
  - 1단 재열기 Z001 / Z002 모두 설계치를 만족, 설계치 대비 0.589psi 정도 개선됨
  - 전체 : Z001 / Z002가 설계치를 만족, 설계치 대비 0.463 / 0.547psi 개선됨
- 가열증기 응축수 과냉각도(subcooled) : O/H 전/후(Z001) 3.3~87 / 0~66.35°F, 교체 후(Z002) 0~62.6°F로 설계치(2.5% 과잉증기량 기준 10°F) 대비 불균일한 온도분포를 나타내어 향후 기술검토 및 개선이 요망됨.
- 1단 재열기 가열증기 유량이 설계 대비 약간 많음  
Channel head에서 응축수 배수탱크의 압력평형관(Pr. equalizing line)을 통하여 우회되므로 인하여 재열기의 성능이 제대로 나오지 않았는데, 설비개선 후 가열증기 유량이 Z001/Z002 : 126,526/122,688 kg/h로 설계값 103,498 kg/h에 비해 약간 높은 상태로 유지하고 있다. 가열증기 유량이 설계유량보다 높게 나오는 이유는 row No 1, 2의 cold leg tube(55개)가 finned tube 대신 습증기에 의한 erosion을 예방하기 위해 bare tube로 설계되었는데 이곳의 전열면적 감소에 의한 가열증기가 충분히 응축되지 못하고 튜브 내부를 우회(Channeling) 함에 따른 현상으로 판단됨.

##### 2) 습분분리 효율

- 1호기 습분분리 효율은 설계치 : 96.2%, LP bundle Z001 교체 전('97.9) / 후 : 92.83% / 92.55%로, 11차 O/H(2001.11) 후 Z001/Z002 : 91.137%/92.341%로 계산되었다. 이번의 습분분리 효율 계산시 입력변수 중 가열증기 유량은 전주기의 유체의 요동현상(Fluctuation)이 개선되어 계측기의 신뢰도가 향상되었다.
- Z001과 Z002의 습분분리 효율 비교시 Z001이 1.2% 정도 낮았으며, 1단 재열기 가열증기 공급압력도 같은 헤더에서 공급되는데도 고속 원심분리기를 거치면서 차이(Z001/Z002 입구가열증기 압력 : 23.9/22.7 bar.a)가 나므로 차기 계획예방정비시 고속 원심분리기의 분해점검이 필요하고 습분분리 효율은 습분분리기의 경년열화와 더불어 점차적으로 저하되어 습분분리재열기의 전체 성능을 저하시킬 것으로 판단됨.

나. 저압재열기 설비개선 및 Z002 교체 전·후 비교 분석

1) MSR 중단온도차 개선

구 분		설계치	OH-10전 (’00.05.30)	OH-10후 (’00.08.11)	OH-11전 (’01.09.26)	OH-11후 (’01.11.15)
1단	GSS 001ZZ(Left)	26.82°F	-	26.13	14.5	13.1
	GSS 002ZZ(Right)	(14.9°C)	-	-	-	8.05
2단	GSS 001ZZ(Left)	14.6°C	19.43	18.27	18.33	17.2
	GSS 002ZZ(Right)	(26.28°F)	17.56	14.33	17.56	15.5

○ MSR 성능은 1, 2단 재열기 중단온도차(TTD) 로 표시함.

- 재열기 중단온도차(TTD)

· 1단 : O/H전 대비 Z001 가 1.4°F만큼 개선됨

· 2단 : O/H전 대비 Z001 / Z002 : 1.13 / 2.06°C 개선됨

※참고사항 : 2단 TTD =  $T_i - T_o \leq 14.6[°C]$

$T_i$  : 재열기 1,2단공급 증기 온도(가열원),  $T_o$  : 1, 2단 재열기 출구증기 온도(피가열원)

○ MSR 출구 증기온도가 상승되어 저압터빈 최종단 동익의 건전성을 향상 시킴.

- MSR 출구 증기온도 : O/H전 대비 Z001 / Z002 : 2.1 / 5.4°C 개선됨

○ MSR 출구 계통증기상태

구 분		설계치	OH-10전 (’00.05.30)	OH-10후 (’00.08.11)	OH-11전 (’01.09.26)	OH-11후 (’01.11.15)
압력 (bar.a)	GSS 001ZZ(Left)	7.99	8.22	8.1	7.911	7.926
	GSS 002ZZ(Right)		8.22	7.9	7.88	7.93
온도 (°C)	GSS 001ZZ(Left)	252.4	249.9	251.7	251	253.2
	GSS 002ZZ(Right)		250.11	253.569	248	253.4

2) 1단 재열기 가열증기 유량 불평형 현상 해소

구 분	설계치	OH-10전 (’00.05.30)	OH-10후 (’00.08.11)	OH-11전 (’01.09.26)	OH-11후 (’01.11.15)
GSS 001ZZ(Left)	103,498	173,916	109,170	104,033	126,526
GSS 002ZZ(Right)	103,498	136,152	116,550	151,380	122,688
전체	206,996	310,068	225,720	255,413	249,214

○ HP 터어빈 4단 추기가 공급되는(설계압력 : 25.43 bar.a) 1단 재열기 가열증기는 튜브 외부를 흐르는 계통증기 압력보다(설계압력 : 8.49 bar.a) 높으므로 튜브의 누설이 발생할 경우 가열 증기량이 증가하게 된다. 2000년 계획예방정비시에 교체한 GSS 001ZZ(Left) 은 교체 전·후 가열증기 유량이 많이 감소하였고, GSS 002ZZ(Right)는 그 이후 급격히 유량이 증가하여 튜브가 급격히 손상되는 것을 보여주고, 2001년 계획 예방정비시에 교체한 후 유량이 각각 126,526/122,688 kg/hr 로 계열간의 불평형 현상이 해소됨.

○ 1단 재열기 가열증기 입구/출구 압력

구 분		설계치	OH-10전 (‘00.05.30)	OH-10후 (‘00.08.11)	OH-11전 (‘01.09.26)	OH-11후 (‘01.11.15)
입구/출구 압력 (bar.a)	GSS 001ZZ (Left)	25.43/-	22.71/16.69	24.53/23.93	24/23.65	23.9/22.32
	GSS 002ZZ (Right)		21.76/18.69	23.24/20.583	21.9/18.33	22.7/21.55

- 1단 재열기 가열증기 ΔP 및 응축수배수탱크 온도, 압력 정상화
  - 가열증기 입구와 출구의 ΔP가 Z001 교체 전/후 ΔP : 6.026bar / 0.599bar로 떨어졌으나 제11차 O/H(2001.11) 후 Z001/Z002 ΔP : 1.58/1.15bar 로 많은 개선됨.

3) 2단 재열기 가열증기 유량 정상화

구 분	설계치	OH-10전 (‘00.05.30)	OH-10후 (‘00.08.11)	OH-11전 (‘01.09.26)	OH-11후 (‘01.11.15)
GSS 001ZZ(Left)	115,719.5	183,204	162,630	168,509	149,018
GSS 002ZZ(Right)	115,719.5	172,656	159,390	185,684	147,730
전체	231,439	355,860	322,020	354,193	296,748

- 2단 재열기 가열증기 유량은 1단 재열기에서 계통증기가 제대로 가열되지 못하면 높은 온도차로 인하여 공급량이 증가한다. GSS 001ZZ(Left)은 1단 재열기 교체 전에 1단 재열기에서 가열증기 누설로 인해 많은 유량이 형성되었고, 2000년 계획예방정비시에 교체 후 유량이 감소되었다가 2001년 계획예방정비시에 설비개선 후 더욱 감소되었음. GSS 002ZZ(Right)은 교체 전에 1단 재열기에서 가열증기 누설로 인해 많은 유량이 형성되었고, 2001년 계획예방정비시에 교체 후 유량이 많이 감소되었다. 설비개선은 교체한 1단 재열기 응축수배수탱크(CRT) 압력평형관(Pr. equalizing line)이 원 설계대로 Cold leg 측에 연결되어야 하나 Hot leg 측에 잘못 연결됨에 기인하여, 부분 개조하여 원상복구 후 정상화됨.
- 1단 재열기 가열증기가 우회되어 성능저하로 2단 재열기에서 보상을 위해 가열증기가 많이 공급되며, 이는 터빈 사이클 전체 효율을 저하시키는 요인이 되었으나, 설비개선 후 계통증기의 가열에 사용됨으로 인하여 터빈 사이클 전체 효율이 증가되어 발전기 출력이 9.67 MWe 상승됨.

4) 1단 재열기 배수배관 진동현상 문제 해결

- 2000년 계획예방정비시에 GSS 001ZZ(Left)을 교체한 후 가열증기 응축수 배수배관에 심한 진동(최대 : 4796 μm)이 발생하였다. 이것은 1단 재열기 배수탱크(CRT) 압력평형관(Pr. equalizing line)이 Hot leg 측에 잘못 연결됨에 따라, 가열증기가 튜브에서의 ΔP가 부족하여 흐름이 원활하지 못하여 과냉각된 응축수와 2상 혼합유체가 교번 함으로 인하여 발생하였음. 설비개선으로 배관 내부의 응축수의 흐름이 정상화되어 배수배관의 진동(최대 : 63 μm)이 해소됨.

### III. 결론

국내 원전에서 MSR의 저압재열기를 일부 교체한 후 설비의 성능저하와 응축수 배수관의 진동문제가 발생되어, 근본 원인을 운전변수 및 정비 이력 검토와 제작사의 설계 프로그램을 활용하여 설계 측면에서 분석한 결과 저압 재열기 응축수 배수탱크의 압력 평형관이 재열기 Channel head에서 Hot leg측으로 잘못 연결되어 가열증기가 다량 우회됨에 기인한 현상으로 판단하였다. 그리고 적절한 개선 대책을 제시하여 현장에서 Cold leg측으로 연결 및 개선한 후 MSR의 정밀점검과 성능진단을 실시한 결과 성능이 양호한 것으로 나타났다. 저압 재열기 교체 및 설비개선 전 · 후의 주요 성능은 발전기 출력이 설계치(986.04MWe) 대비 0.32MWe, 계획예방정비 전 대비 9.67MWe 상승되고, MSR 출구 계통증기 온도가 설계치(252.4℃) 대비 0.8~1℃ 상승되고, 계획예방정비 전 대비 2.2~5.4℃ 상승되어 저압터빈의 건전성을 향상시켰으며, 저압 재열기 배수관의 진동이 설비개선 전 · 후 4,796에서 63 $\mu$ m로 완전히 정상화되었다. 기술 선진국인 외국사가 설계 · 제작한 사항이었지만 문제의 근본 원인을 원점인 설계측면에서 접근하여 분석 및 진단한 방법이 정확했으며, 이번 사례의 경험을 토대로 향후 국내 원전의 유사사례 재발을 예방하고 MSR 설비개선 및 교체 등에 필수적인 기술을 확보할 수 있게 되었다.

### ※ 참고 문헌

1. 한국전력공사, 울진원자력 1호기 MSR 저압재열기 교체 및 성능진단 보고서 TM.T07.S2002.041, 2002.03.07
2. 한국전력공사, 울진원자력 1, 2호기 습분분리재열기의 저압재열기 교체 보고서 TM.T07.S2000, 2000.12.20
3. 한국전력공사, 월성원자력 4호기 습분분리재열기 정밀점검 및 성능진단 보고서 TM.C99MS14.S2002.133, 2002.07.23
4. 한국전력공사, 월성원자력 1호기 습분분리재열기 정밀점검 및 성능개선 보고서 TM.T07.S2002.42, 2000.03.07 95-H-II-1-106, 1995.4.30
5. 한국전력공사, 고리원자력 3호기 습분분리재열기 점검 보고서, 정비기획실 94-59, 1994.6.10
6. 민의동, 열교환기 이론과 설계, 창원출판사, 1991.4
7. TEI, A.L Yarden & Clement Tam, MSR Literature 등, 1994 ~ 2003