



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2016년 8월  
석사학위 논문

# 원자력발전소 2차계통 열성능시험을 통한 터빈출력 개선 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

강 경 훈

# 원자력발전소 2차계통 열성능시험을 통한 터빈출력 개선 연구

A study on the improvement of Turbine Power  
at Nuclear Power Plant for Turbine Performance  
Diagnostic Test

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

강 경 훈

# 원자력발전소 2차계통 열성능시험을 통한 터빈출력 개선 연구

지도교수 : 이 경 진

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 4월

조선대학교 대학원

원자력공학과

강 경 훈

## 강경훈의 석사학위논문을 인준함

위원장    조선대학교    교수    나만균    (인)

위    원    조선대학교    교수    김종현    (인)

위    원    조선대학교    교수    이경진    (인)

2016년 5월

조선대학교 대학원

## 표 목 차

표 3.1 한빛5호기 2차 계통 정밀 열성능진단 일정 .....	6
표 3.2 한빛 5호기 주급수 유량계 (벤츄리 노즐) 사양 .....	8
표 3.3 ASME PTC 6.0 에서 요구하는 주요 성능변수의 허용 변동폭 .....	13
표 4.1 ASME PTC 6 Full Scale Test 와 Alternative Test 의 비교 .....	16
표 4.2 정격조건 기준 2차 계통 성능지표 (CV#4 교축손실 보정 전) .....	18
표 4.3 정격조건 기준 2차 계통 성능지표 (CV#4 교축손실 보정 후) .....	19
표 4.4 한빛 5호기 설계 대비 발전단 전기출력 편차 원인분석 .....	23
표 4.5 한빛 5호기 고압터빈 성능지표 .....	26
표 4.6 한빛 5호기 저압터빈 성능지표 .....	27
표 4.7 한빛 5호기 MSR 성능지표 .....	28
표 4.8 MSR 성능지표의 설계 대비 편차가 발전단 전기출력에 미치는 영향 ...	29
표 4.9 한빛 5호기 급수가열기 성능지표 .....	30
표 4.10 한빛 5호기 복수기 성능지표 .....	31
표 5.1 한빛 5호기 벤츄리 노즐 검교정 성적서 분석 결과 .....	33
표 5.2 한빛 5호기 발전단 전기출력 오차 분석 1 .....	37
표 5.3 한빛 5호기 발전단 전기출력 오차 분석 2 .....	37

## 그림 목차

그림 2.1 2차계통 설비 개략도 .....	2
그림 3.1 압력측정 및 압력수두 보정 .....	7
그림 3.2 ASME PTC 6.0 에 따른 전력량 측정을 위한 결선도 .....	11
그림 3.3 100% 원자로 열출력 성능진단 1차 시험(TR01) 주증기 압력 변화추이 .....	13
그림 3.4 100% 원자로 열출력 성능진단 1차 시험(TR01) 발전단 전기출력 변화추이 ..	14
그림 3.5 100% 원자로 열출력 성능진단 2차 시험(TR02) 주증기 압력 변화추이 ..	14
그림 3.6 100% 원자로 열출력 성능진단 2차 시험(TR02) 발전단 전기출력 변화추이 ..	15
그림 4.1 한빛 5호기 인수성능대비 전기출력 저하 원인분석 .....	22
그림 4.2 고압터빈 및 저압터빈 증기팽창 선도 .....	24
그림 5.1 한빛 5호기 벤츄리 노즐 내부 상태 .....	35
그림 5.2 한빛 5호기 발전단 전기출력 변화 추이 .....	35
그림 5.3 한빛 5호기 성능진단 시험 중 D/A 추기 압력 변화추이 .....	36

# 목 차

표 목차 .....	i
그림 목차 .....	ii
ABSTRACT .....	v
<b>제 1 장 서 론 .....</b>	<b>1</b>
<b>제 2 장 발전소 설비 현황 .....</b>	<b>2</b>
1. 증기발생기 .....	2
2. 터빈 .....	3
3. 발전기 .....	3
4. 습분분리재열기 .....	4
5. 복수기 .....	4
6. 터빈구동 주급수펌프 .....	4
7. 급수가열기 .....	4
<b>제 3 장 2차계통 열성능 진단시험 .....</b>	<b>5</b>
제 1 절 2차계통 열성능 진단 시험 개요 .....	5
1. 진단 목적 .....	5
2. 진단 항목 .....	5
3. 진단 일정 .....	5
4. 참조 기술기준 .....	6
제 2 절 2차계통 열성능 진단 시험 수행 .....	7
1. 특설계측기 설치 및 데이터 취득 .....	7
2. 계통격리 (Cycle Isolation) .....	11
3. 성능시험 조건 (Test Conditions) .....	12
<b>제 4 장 2차계통 열성능 진단시험 결과 분석 .....</b>	<b>16</b>
제 1 절 서론 .....	16



제 2 절 발전단 전기출력 및 터빈 사이클 열소비율 .....	18
1. 발전소 운전 변수 분석 .....	20
2. 고압터빈 Control Valve 개도 분석 .....	20
3. 주급수 유량 변경을 통한 Heat Balance 시뮬레이션 .....	21
제 3 절 고압터빈 성능 분석 .....	24
제 4 절 저압터빈 성능 분석 .....	27
제 5 절 습분분리재열기 성능 분석 .....	28
제 6 절 급수가열기 성능분석 .....	30
제 7 절 복수기 성능분석 .....	31
<b>제 5 장 2차계통 열효율 개선 방안 .....</b>	<b>32</b>
제 1 절 주급수 유량 측정 신뢰성 개선 .....	32
제 2 절 벤츄리 노즐 파울링 방지를 위한 2차 계통 수질 개선 .....	34
제 3 절 탈기기 추기 증기압력 측정용 도압관 점검 .....	36
제 4 절 성능관리를 위한 기준발전단 전기출력 신호 선정 .....	37
<b>제 6 장 결 론 .....</b>	<b>38</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>39</b>

## ABSTRACT

### **A study on the improvement of Turbine Power at Nuclear Power Plant for Turbine Performance Diagnostic Test**

Kang, Kyung Hoon

Adviser : Prof. Lee, Goung Jin, Ph. D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

In a nuclear power plant, a steam cycle of secondary system that excepts a part of low pressure turbine is operated on saturated steam area. That is why precision thermal performance test which is in the level of ASME PTC 6.0 Full Scale Test is technically difficult to do and it also needs high-priced test fee.

For this reason, acceptance performance test of the nuclear power plant which is done in the scope of the whole secondary system was only able to check generator electric power and heat rate by ASME PTC 6.0 Alternative Test. Moreover, it was not capable of doing performance index management of the secondary system that is sorted by the main unit facilities.

As a result, although generator electric power is changed, it is not easy to do cause analysis and seek a solution to the problem since there is not enough basic performance index data.

Since Hanbit unit 5 had been commercially operated in 2002, there was a decrease of generator electric power during the fourth operation. To analyse an accurate cause and check performance deterioration which is compared to the initial acceptance performance, precise heat rate test of the secondary system was done.

This paper has been prepared to optimise the efficiency of the secondary

system which is done by the management of Hanbit unit 5 reactor thermal power and check performance deterioration state of the main facilities.

Furthermore, it also has been prepared to analyse the main problem of generator electric power decrease and draw a conclusion of the optimal operation so that the plant utilisation and competitiveness could be increased.

## 제 1 장 서 론

원자력발전소는 저압터빈 일부를 제외한 2차 계통 증기 사이클이 포화증기 영역에서 운전되어 ASME PTC 6.0 Full Scale Test 수준의 정밀 열성능진단 수행이 기술적 측면에서 어려울 뿐 아니라 고가의 시험 비용이 소요된다. 이러한 이유로 원자력발전소 초기 인수성능시험은 ASME PTC 6.0 Alternative Test를 통해 2차 계통 전체를 시험범위(Test Boundary)로 발전단 전기출력 및 열소비율만을 확인하는 수준에 그쳤으며 2차 계통을 구성하고 있는 주요 단위설비별 성능지표 관리는 불가능하였다. 결과적으로 상업 운전 중 발전단 전기출력 변화가 발생하더라도 기초 성능지표 데이터가 미흡한 관계로 정확한 원인 분석 및 조치방안 수립에 어려움이 있는 것이 현실이다.

한빛 5호기는 2002 년 상업운전 이후 4 주기 운전 중 발전단 전기출력 저하가 발생함에 따라 정확한 원인을 분석하고 인수성능 대비성능 노후화 정도를 확인하기 위해 2차 계통 정밀 열성능 진단을 수행하였다.

본 논문은 한빛 5호기 2차 계통 정밀 열성능진단을 통해 원자로열출력 관리를 통한 2차 계통 효율 최적화 및 주요 단위설비별 성능 노후화 상태를 진단하고 주기 운전중 지속적으로 발생하는 발전단 출력 저하근본 원인을 분석하고 설비의 최적운영을 방법을 도출함으로써, 발전소 이용률 향상 및 경쟁력을 확보하기 위해 작성하였다.

## 제 2 장 발전소 설비 현황

한빛 5호기는 가압경수로(PWR)-1,000MW 정격 용량으로 2002년 5월에 상업운전을 시작하여 현재까지 운영 중에 있으며, 다음과 같은 설비현황을 가지고 있다.

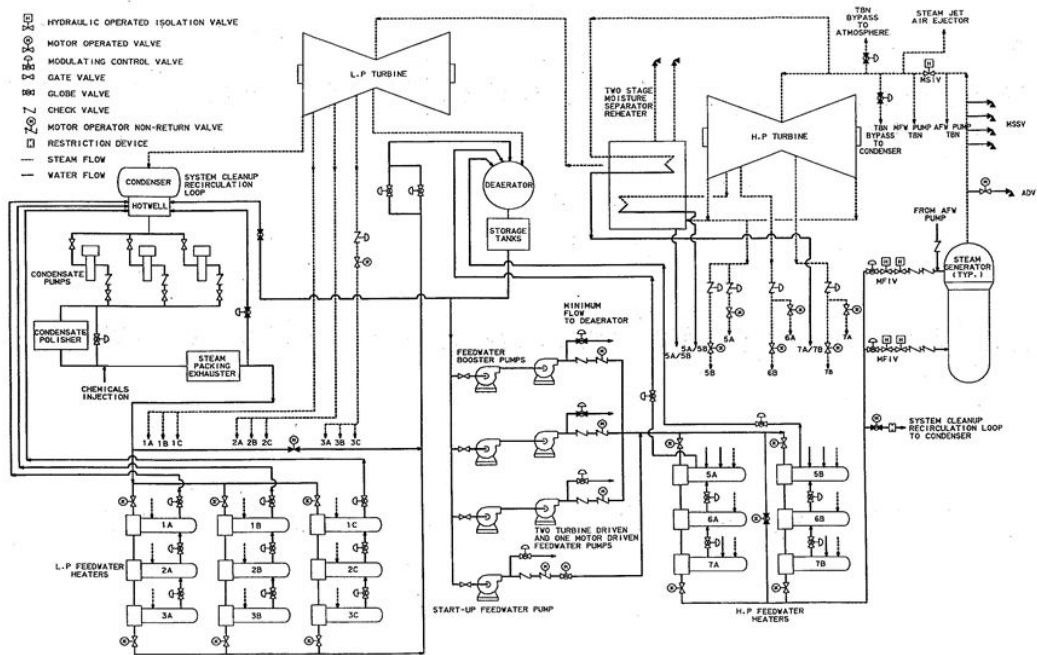


그림 2.1 2차계통 설비 개략도

### 1. 증기발생기

증기 발생기는 수직 U-tube형 열교환기로서 관내측(Tube Side)에는 원자로 냉각재가, 동체측(Shell Side)에는 급수가 흐르면서 열교환이 이루어지며 원자로 냉각재 각 루프당 1대씩 설치되어 원자로 노심에서 발생된 열을 1차측 냉각재를 통해 2차측 냉각재에 전달하여 터빈-발전기의 구동력을 제공해 주는 역할을 한다.

- 형 식 : Pressurized Light Water Reactor (가압 경수로형)
- 열출력 : 2,825 MWt
- 주급수 유량 : 5,769 tons/hour

- 주증기 압력 : 75.2kg/cm<sup>2</sup>
- 주증기 건도 : 99.75 % 이상
- 제작자 : 두산중공업(주)

## 2. 터빈

증기발생기에서 보내 온 고온 고압의 증기를 팽창시켜 기계적 에너지로 변환시키는 것으로, 그 에너지로 발전기를 회전시켜 전력을 생산시키는 설비

- 형 식 : Double Flow HP Turbine (1 Casing),  
Double Flow LP Turbine (3 Casing)
- 단수 : 고압터빈 7 단, 저압터빈 7 단
- 최종단 회전익 길이 : 1,092mm
- 회전수 : 1800 RPM
- 정격출력 : 발전단 기준 1,050,819 MWe
- 주증기 압력 : 72.768kg/cm<sup>2</sup>
- 추기단수 : HP-2, LP-4
- 복수기 진공도 : 38.1 mmHg abs.
- 열소비율 : 2,312 kcal/kWh
- 제 작 자 : 두산중공업(주)

## 3. 발전기

발전기에서 전력을 생산하는 최종설비로 원자력발전소 주발전기는 정상운전 중 송전망에 연결되어 전력계통과 동기를 유지한 상태에서 운전한다.

- 형 식 : 4 Poles, 3 Phase
- 냉각방식 : Hydrogen(Rotor) & Water(Stator) Cooled
- 최대 용량 : 1,219,600 kVA
- 정격 전압 : 22 KV
- 역률/주파수 : 0.9 Lagging / 60 Hz
- 제작자 : 두산중공업(주)

## 4. 습분분리재열기

고압터빈에서 팽창된 습분을 동반한 포화증기를 습분분리기에서 습분을 제거하고, 1단 및 2단 재열기를 통해 과열 증기로 만들어 저압터빈에 공급하여 저압 터빈 날개보호 및 열효율을 향상시킨다.

- 3 Stage(습분분리기, 1st and 2nd 재열기), 2 Pass

## 5. 복수기

증기사이클에서 열제거원으로서 저압터빈과 주급수 펌프 터빈 배기를 응축시키며, 터빈 우회 증기의 응축과 기타 급수가열기의 배수, 배기를 흡수하는 기능을 가진다.

- 2 Pass, Single pressure, 2 Shells per Unit

## 6. 터빈구동 주급수펌프

두 대의 터빈구동 주급수펌프가 운전되어 공통 모관을 통해 두 계열의 고압 급수가열기로 급수를 공급한다. 급수 가열기에서 공급된 급수를 증기발생기 수위제어에 따라 증기 발생기에 충분한 급수를 공급한다.

- 2×50% Turbine Driven Feedwater Pumps

## 7. 급수가열기

### 가. 고압급수가열기

고압급수 가열기는 2계열로서 각 계열에는 3개의 급수가열기로 구성되어 있다.

- No. 5, 6, 7 HP Heater, 2 Feed Flow Path

### 나. 저압급수가열기

저압 가열기는 3계열로서 각 계열에는 3개의 급수가열기로 구성되어 있다.

- No. 1, 2, 3 LP Heater, 3 Feed Flow Path

## 제 3 장 2차계통 열성능 진단시험

### 제 1 절 2차계통 열성능 진단 시험 개요

#### 1. 진단 목적

본 성능진단 프로그램은 원자력 발전소 경쟁력 확보를 위한 효율적 설비운영을 위해 2002 년 5 월 상업 운전을 시작한 한빛원자력 5호기의 5주기 계획 예방정비 이후 100% 원자로 열출력에서의 발전단 전기출력 및 터빈사이클 열소비율 진단을 통해 인수성능시험 대비 2차 계통 열 성능지표 변화 추이를 분석하고, 향후 2차 계통 주요 설비별 성능이력 관리를 위한 기준 성능지표 (Baseline Performance)를 확보하는 목적이 있다.

#### 2 진단 항목

- ① 100% 원자로 열출력 및 정격 증기조건에서의 발전단 전기출력 및 터빈사이클 열소비율 진단
- ② 터빈사이클 Heat Balance 분석을 통한 2차 계통 주요 설비별 (터빈, MSR, 급수 가열기, 복수기 등) 성능 분석 및 기준 성능지표 확보
- ③ 발전소 주요 성능변수에 대한 PMS 데이터 대비 진단시험용 특설계측기 데이터 비교분석
- ④ 2차 계통 내 밸브누설 등에 의한 에너지 손실요인 점검

#### 3 진단 일정

한빛 5호기 2차 계통 정밀 열성능진단 프로그램은 영아래의 일정으로 수행되었으며, 2차 계통 열 성능지표 분석을 위한진단시험과 정상 운전 상태에서의 발전소 주요 운전 변수 확보를 위한 참조시험으로 구분하여 진행되었다.



시험번호	시험항목	시험종류	날짜	시간
TR 01	100% RTO 1 차 시험	진단시험	'08.09.24	15:00~17:00
TR 02	100% RTO 2차 시험	진단시험	'08.09.25	11:20~13:20
TR 03	RTO 정상 운전 참조시험	진단시험	'08.09.25	14:30~15:30

표 3.1 한빛5호기 2차 계통 정밀 열성능진단 일정

정상 운전 참조시험은 증기발생기 Blowdown System 운전 상태에서 수행되었으며, Continuous Blowdown Flash Tank 의 Vent 되는 유량과 SGBD REG HX 로 Drain되는 유량의 Mass Flow and Energy Balance 가 측정되지 않아 ASME PTC 6.0CODE 에 근거한 정확한 터빈사이클 성능분석에는 부적합하다. 따라서, 100% 원자로 열출력 정상운전 조건에서의 터빈사이클 성능분석은 진단시험(TR01, TR02) 결과 확보된 2차 계통 주요 설비별 성능지표를 이용하여 설계 Heat Balance 와 동일 조건으로 증기발생기 Blowdown 유량 전체가 복수기로 배수된다는가정 하에 Heat Balance 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

#### 4. 참조 기술기준

본 진단시험에 적용되는 주요 설비별 성능시험 기준 및 계측기술 기준은 아래와 같다.

- ASME PTC 6.0 Steam Turbine (Full Scale Test)
- ASME PTC 12.1 Closed Feedwater Heaters
- ASME PTC 12.2 Surface Condenser
- ASME PTC 12.4 Moisture Separator Reheaters
- ASME PTC 19.1 Test Uncertainty
- ASME PTC 19.2 Pressure Measurement
- ASME PTC 19.3 Temperature Measurement
- ASME PTC 19.5 Flow Measurement
- ASME PTC 19.6 Electrical Measurements

## 제 2 절 2차계통 열성능 진단 시험 수행

### 1. 특설계측기 설치 및 데이터 취득

#### 가. 특설 계측기 설치

한빛 5호기 2차 계통 정밀 열성능진단에 사용된 특설된 모든 압력계, 차압계, 열전대 등은 ASME PTC 6.0 및 ASME PTC 19 CODE 의 요구 조건에 따라 정밀 검교정되었다.

#### 1) 압력 측정 (Static Pressure)

Honeywell 사의 Smart Type Pressure Transmitter 가 사용되었으며, 관련 기술기준 요구 조건에 따라 Secondary Standard 로부터 +/-0.1% 이내 오차 범위에서 정밀 검교정이 수행되었다.

대기압 이상의 압력 측정에 사용되는 모든 압력계는 도압관(Sensing Line) 내 수두형성을 위해 발전소 안정화 상태에서 Blow Down 되었으며, 배관상의 압력 측정용 탭과 압력계 설치 위치까지의 수직 거리(Water Lag)를 실측하여 도압관에서 형성된 압력 수두를 계산하고 설치된 압력계에서 측정된 값에 이를 보정하여 배관을 흐르는 유체의 게이지 압력을 계산하였다. 측정된 게이지 압력은 특설된 대기 압력계를 통해 측정된 대기압력을 보정하여 절대압력으로 환산한 후 성능분석에 사용되었다.

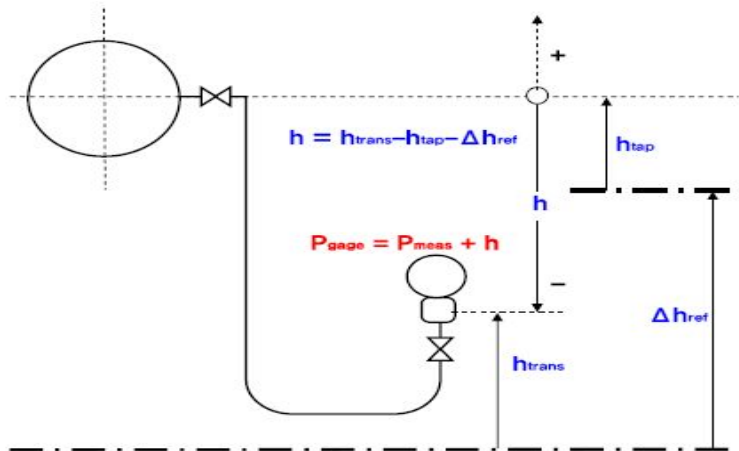


그림 3.1 압력측정 및 압력수두 보정

저압터빈 추기 증기 압력 및 복수기 진공도 등 진공 압력 등 수두 형성이 불가능하여 증기 압력을 직접 측정하는 포인트에 대해서는 정밀 미압 측

정 시스템(Scanivalve System)이 사용되었다.

본 장비는 압력이 낮고 습분 함량이 높은 습증기 영역의 압력을  $\pm 0.05\%$ 의 정밀도로 측정할 수 있으며, 발전소 내 계측용 공기(Instrument Air)를 이용하는 Purge 기능이 있어 도압관 내부에 습증기가 응축되고 공기 포켓(Air Pocket)을 형성하여 발생하는 압력 측정오류를 방지한다.

2) 온도 측정 (Temperature)

Chromel-Constant 재질의 E-Type 열전대가 사용되었으며 모든 온도측정 포인트는 기계식 온도보상장치 (Ice Bath)에 의한 물리적 영점 보정이 이루어 졌다.

3) 유량 측정 (Flow)

주급수 유량(Primarily Flow) 및 이차 유량(Secondary Flow) 계산을 위한 차압 측정에는 Honeywell 사의 Smart Type Differential Pressure Transmitter 가 사용되었으며, 관련 기술기준 요구조건에 따라 Secondary Standard 로부터  $\pm 0.1\%$  이내의 오차범위에서 정밀 검교정이 수행되었다. 유량 측정에 사용된 유량계 내역은 다음과 같다.

① 주급수 유량 (Primarily Flow)

발전소 기준 유량(Primary Flow)인 주급수 유량 측정을 위해서는 증기 발생기 입구에 설치된 기존 발전소 유량계인 벤츄리 노즐(FE1112 및 FE1122)를 사용하였으며 주요사양은 아래 표 3.2 과 같다.

Tag NO		FE-1112X	FE-1112Y	FE-1122X	FE-1122Y
Device Symbol		C_NZ	C_NZ	C_NZ	C_NZ
Pipe Material		Austenitic SS	Austenitic SS	Austenitic SS	Austenitic SS
Flow Element Material		Austenitic SS	Austenitic SS	Austenitic SS	Austenitic SS
D <sub>20</sub> Pipe diameter @ 20°C	inches	17.000	17.000	16.997	16.997
d <sub>20</sub> Throat diameter @ 20°C	inches	8.330	8.330	8.330	8.330
Cx From Calibration Report		1.0056	1.0051	1.0062	1.0071

표 3.2 한빛 5호기 주급수 유량계 (벤츄리 노즐) 사양

한편, 한빛 5호기에 설치된 벤츄리 노즐의 최초 정밀 검교정 성적서 분석 결과로는 FE1112 와 FE1122 에 설치된 총 4 개의 Tap Set 중 증기 발생기 B 입구 측에 설치된 FE1122 “Y” Tap Set 은 ASME 19.5

CODE 의 요구 조건을 만족하지 못하며 “X” Tap Set 과의 과도한 유량 편차로 인해 주급수 유량 측정용으로는 부적합 한 것으로 판단된다.

이러한 이유로 인해 2002 년 수행된 터빈/발전기 인수성능시험에서도 증기발생기 A 입구 유량 계산에는 FE1112 X 및 Y Tap Set 에서 측정된 유량의 평균값을 사용하고, 증기발생기 B 입구 유량 계산은 X Tap Set 에서 측정된 유량만을 사용하였으며 본 진단시험에서도 동일한 방법을 적용하였다.

② 이차 유량 (Secondary Flow)

터빈사이클 Heat Balance 계산 및 2차 계통 주요 설비별 성능 분석을 위해서는 고압재열기와 저압재열기로 공급되는 가열 증기 유량(Heating Steam Flow) 및 잉여 증기유량(Excess Steam Flow)이 측정되어야 하나 한빛 5호기의 경우 이들 유량 측정을위한 기존 발전소 유량계가 설치되어 있지 않아 설계 K-Factor 및 가열 증기 대비설계 % 유량(저압재열기 10%, 고압재열기 2%)으로 가정하여 성능 분석을 수행하였다.

고압터빈 Contorl 밸브 Stem 누설 유량, 고압터빈 로터 축 밀봉장치 (Shaft Packing)누설 유량 등 별도의 유량계가 설치되지 않은 포인트는 설계 C-Factor 를 적용하여 유량을 계산하였다.

이외, 급수펌프 구동용 터빈(Feedwater Pump Turbine) 및 주급수 펌프 (FeedwaterPump) 입구 유량은 기존 발전소 유량계를 사용하여 측정하였다.

- HP(2nd stage) Reheater Heating Steam Flows (설계 K-Factor 적용)
- LP(1st stage) Reheater Heating Steam Flows (설계 K-Factor 적용)
- HP(2nd stage) Reheater Excess Steam Flows (설계 % 유량 적용)
- LP(1st stage) Reheater Excess Steam Flows (설계 % 유량 적용)
- FWPT LP Driving Steam Flows (FE007, FE008)
- Feedwater Pump Suction Flow (FE023, FE024)
- Dearator Inlet Condensate Flow (FE300)
- LP Turbine Seal Steam Flows (설계 유량 적용)

4) 전력량 측정 (Electric Power)

ASME PTC 6.0 CODE 에 근거한 정확한 발전단 전기출력 측정을 위해서는 발전기 각 상(Phase)에서의 전력량 측정을 위해 검교정된 전압계 (Potential Transformer) 및 적산 전력량계(Watt-hour Meter)가 임시로 설

치되어야 한다.

일반적으로 전류 측정은 운전 중인 발전소에 추가 설치가 불가능하므로 기존 발전소전류계(Current Transformer)를 사용한다.

발전단 전기출력 측정을 위한 회로 결선은 그림 3.2과 같이 Wye Generator 3 Phase, 4 Wire 방법을 사용한다. 각 상의 전압 측정은 발전기 Terminal 혹은 발전소 운전용 전압계 Cabinet 내부 1 차 측 전압을 고압 전선케이블을 통해 특설 전압계(Potential Transformer)로 결선하여 약 120 Volts 로 감압된 2차 측 전압을 측정하며, 각 상의전류량은 전압측정 포인트에 인접한 전류계 단자함(CT Terminal Box)에 결선하여 측정한다. 각 부하별로 측정된 전압, 전류 및 적산전력량을 이용하여 발전단 출력을 계산하는 과정은 아래 식과 같다.

$$kW Output = \left( \frac{\#Counts}{TestTime(hrs)} \right) \times K \times WHMCF \times CTRCF \times PTRCF \times CTR \times PTR$$

K = Watt-hour meter constant

WHMCF = Watt-hour meter correction factor

CTRCF = Current transformer ratio correction factor

PTRCF = Potential transformer ratio correction factor

CTR = Current transformer ratio

PTR = Potential transformer ratio

반면, 본 성능진단 프로그램에서는 전압계 및 적산 전력량계의 특설 과정에서 발생할 수 있는 발전소 안정성 문제를 고려하여 기존 발전소 전류계, 전압계 및 전력량계를 사용하였으며 이들 소내 전력 측정 장비는 최초 설치시점부터 이후 현재까지 검교정이 수행되지 않았으므로 측정된 전기출력의 불확도(Uncertainty) 증가는 불가피하다.

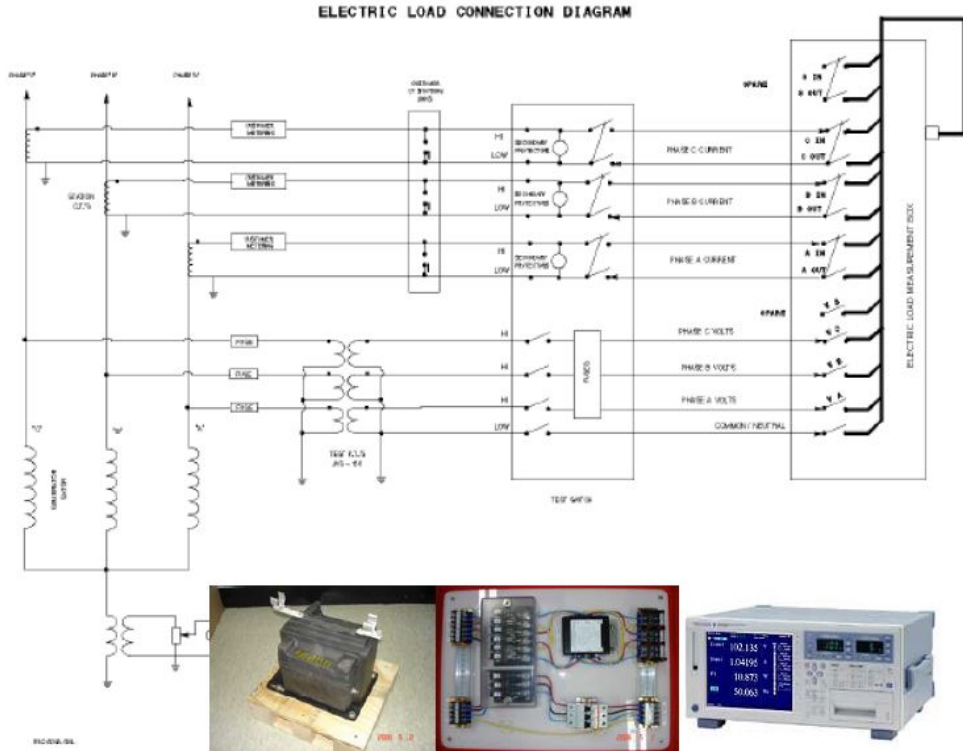


그림 3.2 ASME PTC 6.0 에 따른 전력량 측정을 위한 결선도

## 나. 데이터 취득 (Data Acquisition)

본 성능진단 프로그램을 위해 특설된 모든 계측기는 현장에 설치된 데이터 전송장치(Data Acquisition System)로부터 10 초 간격으로 데이터를 취득하여 PC 에 전자파일로 저장되었다. 진단시험 데이터 취득 기간 중 운전조건 적합성 분석을 위해 주요 운전변수에 대해서는 시험 진행 중 PC 상에서 경향을 모니터링 하였다.

전산실 서버로 저장되는 발전소 운전용 데이터(PMS DATA)는 1 분 간격으로 취득되었으며, Steam Generator Drum, Drain Receiver Tank 및 Condenser Hotwell, LPDrain Tank 등 수위 변화는 발전소 운전원에 의해 주제어실에서 수기로 기록되었다.

## 2. 계통격리 (Cycle Isolation)

터빈사이클 열평형도(Turbine Cycle Heat Balance) 상의 전기출력과 열소비율 진단, 주요 설비별 성능분석을 위해서는 진단시험을 위한 데이터 취득 기간 중

열평형도에 명시되어 있지 않은 모든 응축수 배수, 급수가열기 배기, 증기발생기 취출수, 복수기 충수, 보조증기 변환장치 및 주증기를 비롯한 각종 우회(Bypass) 라인 등이 차단되어 있어야 한다. 이들 라인으로 작동유체(증기 혹은 물)가 흐를 경우의 시험조건은 기준열평형도와 다른 사이클로 발전소가 운전되는 것과 같다. 따라서 정확한 터빈 사이클 계통격리는 성능진단의 가장 기본이 되는 요건중의 하나이다.

정상상태 및 시험상태 모두 차단되는 밸브들은 발전소 정상운전 중 사전 누설 점검을 수행하였으며, 성능진단 시험을 위한 데이터 취득 기간 중에는 사전 점검 결과 정상상태에서 일부 누설이 의심되는 밸브 및 정상상태에서 개방되고 시험상태에서 차단되어야 할 밸브목록을 별도로 작성하여 계통격리를 수행하였다.

### 3. 성능시험 조건 (Test Conditions)

원자로 감시장치(NIS) 출력영역(PR Range) 지시계는 진단시험 전에 교정을 완료하고, 진단시험 원자로 출력은 100%로 안정된 상태를 유지하도록 하였다. 증기터빈의 경우 비교 시험간에 보다 정확한 결과 비교 및 분석을 위해 진단 시험은 동일한 Governing 밸브 개도 기준으로 수행되어야 하나 원자력발전소의 운전 특성을 고려하여 100% 원자로 열출력 기준으로 실시하되 가능한 각각 시험에서는 유사한 밸브 개도를 유지하였다.

발전소 운전상태가 진단시험 결과에 영향을 미치지 않도록 모든 발전소의 설비들이 정상상태에서 열적 평형상태가 유지되었으며 주요 성능변수는 시험결과에 대해 보정(Correction)을 최소화 할 수 있도록 가능한 규정된 시험 조건에 가깝게 운전 되었다.

ASME PTC 6.0 CODE 에서 요구하는 주요 성능변수의 허용 변동폭은 표 3.3 와 같다. 본 성능진단 프로그램의 결과 분석에 사용된 100% 원자로 열출력 성능진단 시험(TR01, TR02) 중 취득된 주요 성능변수의 변동 경향은 그림 3.3~ 그림 3.6 과 같다.

Table 3-1 Permissible Deviation of Variables

Variable	Permissible Deviation for the Average of the Test Conditions from Design or Rated Conditions [Note (1)]	Permissible Fluctuations During Any Test Run [Note (2)]
Initial steam pressure	±30% of the absolute pressure	±0.25% of the absolute pressure or 5.0 psi (34.5 kPa), whichever is larger
Initial and reheat steam temperature	±15°F (8K) when superheat is 27°~50°F (15~30K); ±30°F (16K) when superheat is in excess of 50°F (30K)	±4°F (2K) when superheat is 27°~50°F (15~30K); ±7°F (4K) when superheat is in excess of 50°F (30K)
Initial steam quality	±0.5 percentage points of quality for turbines with wet throttle steam	±0.1 percentage points of quality for turbines with wet throttle steam
Primary flow	Not specified	Refer to para. 4-10.1
Secondary flows	±5.0% × (primary flow)/(secondary flow)	Same as (d) × (primary flow)/(secondary flow)
Pressure drop through fossil unit reheater	±50.0%	
Extraction pressures	±5.0%	
Extraction flows [Note (3)]	±5.0%	
Temperature of feed water leaving final heater	±10°F (6K)	
Exhaust pressure [Note (4)]	±0.05 psi (0.34 kPa) or ±2.5% of the absolute pressure, whichever is larger	±0.02 psi (0.14 kPa) or ±1.0% of the absolute pressure, whichever is larger
Load	Refer to para. 3-13.5	±0.25%
Voltage	±5.0%	
Power factor	Not specified	±1.0%
Speed	±5.0%	±0.25%
Aggregate isentropic enthalpy drop of anyone of the sections of an automatic-extraction turbine	±10.0%	

NOTES:

- (1) In any event, the manufacturer's allowable variations in pressure temperature and speed are not to be exceeded, unless specifically agreed to before the test.
- (2) Fluctuations would be indicated by scatter in the data (refer to para. 3-9.2).
- (3) When steam is extracted for feedwater heaters, the extraction pressures (which are fixed by the turbine design and flow conditions) may deviate from expected values by a few percent. This normally has a negligible effect upon the overall performance. It shall be ascertained that such deviations that do exist are not due to malfunctioning of feedwater heaters. If large deviations persist, agreement must be reached as to the course to be followed.
- (4) If it is not practicable to obtain design or rated exhaust pressure, the test may be conducted by agreement at another exhaust pressure, and either party may require that the exhaust pressure correction curve be verified by test.

표 3.3 ASME PTC 6.0 에서 요구하는 주요 성능변수의 허용 변동폭

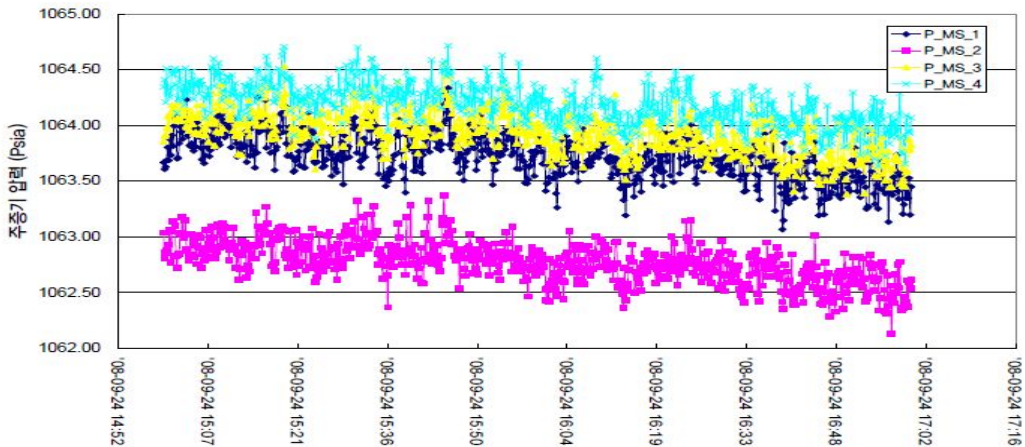


그림 3.3 100% 원자로 열출력 성능진단 1차 시험(TR01) 주증기 압력 변화추이



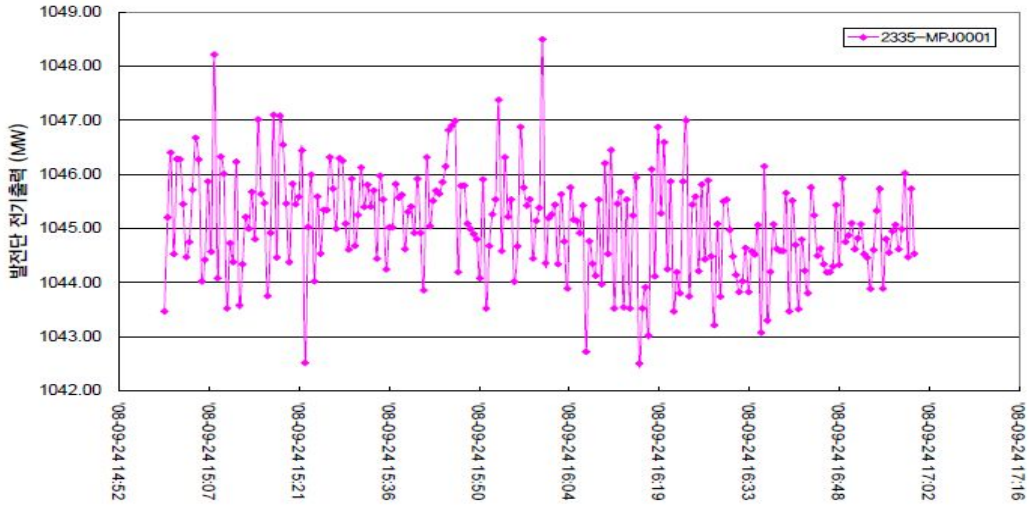


그림 3.4 100% 원자로 열출력 성능진단 1차 시험(TR01) 발전단 전기출력 변화추이

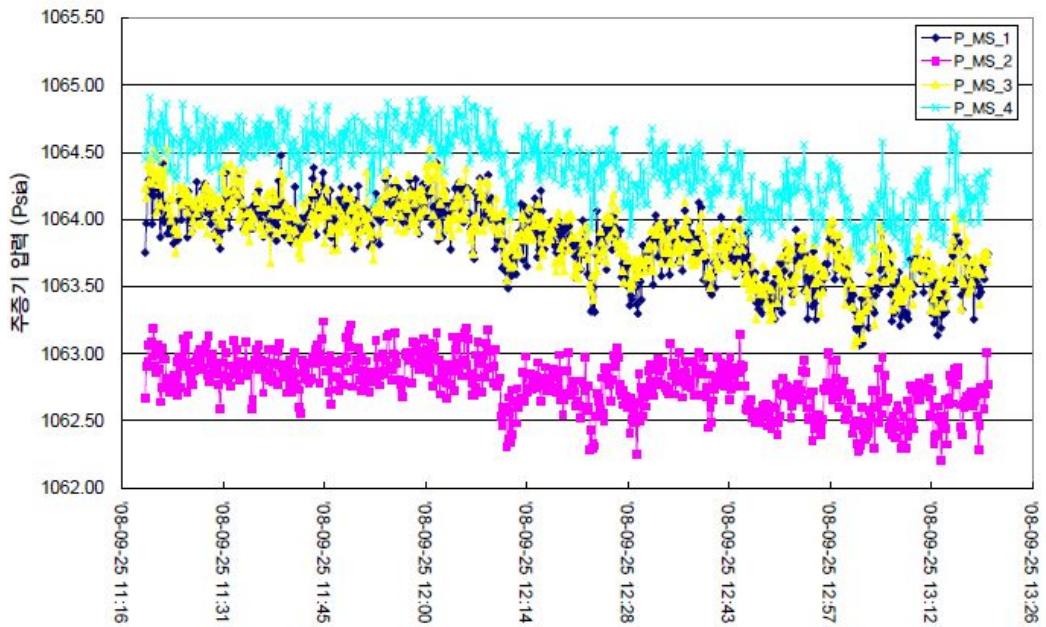


그림 3.5 100% 원자로 열출력 성능진단 2차 시험(TR02) 주증기 압력 변화추이

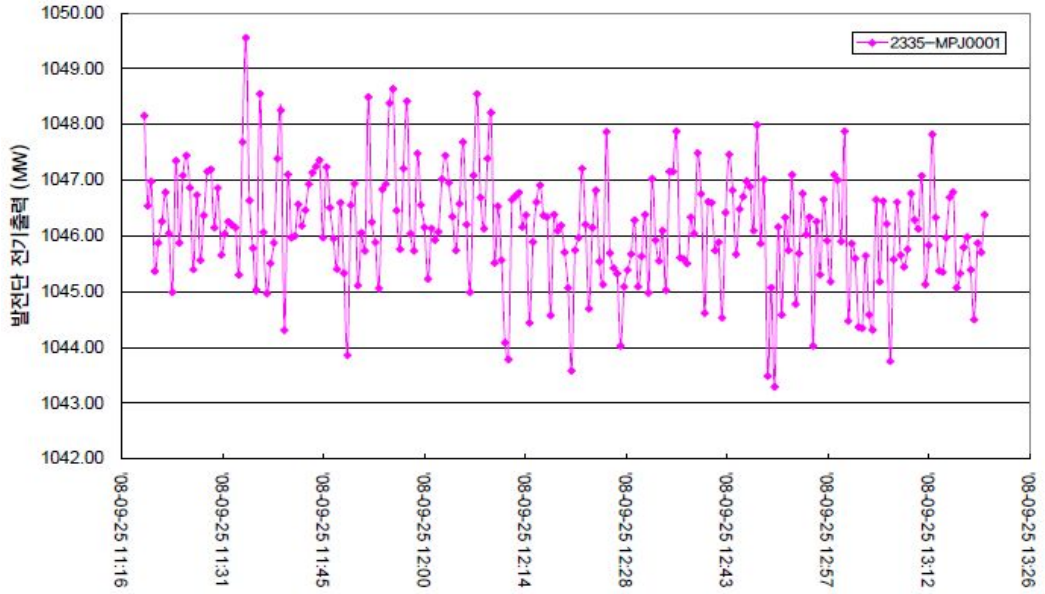


그림 3.6 100% 원자로 열출력 성능진단 2차 시험(TR02) 발전단 전기출력 변화추이

## 제 4 장 2차계통 열성능 진단시험 결과 분석

### 제 1 절 서론

원자력발전소 2차 계통(=터빈사이클) 성능진단은 증기터빈 성능시험 CODE 인 ASMEPTC 6.0 를 적용하여 수행 가능하며 ASME PTC 6.0 성능시험은 Full Scale Test 와 Alternative Test 로 구분된다. Full Scale Test 를 통해 터빈사이클 성능진단을 수행할 경우 발전단 전기출력과 터빈사이클 열소비율(혹은 효율)뿐만 아니라 2차 계통 주요설비별 상세 성능 분석이 가능한 반면, Alternative Test 는 단위 기기별 성능 분석을 위한 변수를 취득하지 않으며 단지 2차 계통 전체를 경계조건으로 하는 발전단 전기출력 및 터빈사이클 열소비율에 대한 정보만 제공한다.

	ASME PTC 6.0 Full Scale Test	ASME PTC 6.0 Alternative Test
시험 범위	증기터빈 최대용량 (전기출력) 및 터빈사이클 효율 진단	
시험 불확도	약 0.35% (원자력 발전소 기준)	약 0.50%
Group 1 보정방법	Heat Balance Calculation	보정곡선
Group 2 보정방법	보정곡선	보정곡선
주요 적용 발전소	화력 발전소	원자력 발전소
진단가능 항목	<a href="#">증기터빈 성능진단</a> <a href="#">습분분리재열기(MSR) 성능 진단</a> <a href="#">급수가열기 성능진단</a> <a href="#">복수기 성능진단</a>	<a href="#">단위기기별 성능진단 불가</a>

표 4.1 ASME PTC 6 Full Scale Test 와 Alternative Test 의 주요 차이 비교  
 화력발전소의 경우 일반적으로 저압터빈 마지막 2 단을 제외한 증기터빈 사이클증기(Cycle Steam)의 팽창(Expansion)이 과열 증기 영역에서 이루어지므로 Full ScaleTest 수행이 상대적으로 용이하며 국내 대부분의 화력발전소에서 증기터빈 인수성능시험 기술기준으로 주로 사용되고 있다.

원자력발전소에서는 최초 건설 시 증기터빈 인수성능시험 및 2차 계통 성능 확인을 위해 Alternative Test 를 사용하고 있으며 따라서 2차 계통 주요 설비별 성능지표는 확보하지 못하였다.

본 성능진단 프로그램은 ASME PTC 6.0 Full Scale Test를 기준으로 특설 계측기를 설치하여 운전 변수를 취득하였으며, 성능 분석 기법 측면에서는 Full

Scale Test 와 Alternative Test를 혼용한 성능분석이 수행되었다.

2차 계통 전체를 시험 경계조건(Test Boundary)로 하는 성능 분석(정격조건 발전단기출력 및 터빈사이클 열소비율)에는 2002 년 한빛원자력 5호기 인수 성능시험과 같이 성능 보정곡선을 사용하는 Alternative Test 분석 기법을 적용 하였으며, 시험조건에서의 2차 계통 주요 설비별 성능 지표를 터빈사이클 Heat Balance 분석을 통해 확보하였다.

분석된 성능지표들을 이용하여 정격조건 발전단 전기출력 및 터빈사이클 열소 비율을 Full Scale Test 분석기법으로 터빈사이클 Heat Balance 시뮬레이션을 통해 재 계산하고 이들 결과를 서로 비교함으로써 성능 분석 결과에 대한 신뢰성을 검증하였다.

## 제 2 절 발전단 전기출력 및 터빈 사이클 열소비율

한빛 5호기 2차 계통 정밀 열성능진단(TR01, TR02)은 표 5.1 과 같이 원자로 열출력 평균 100.44%에서 진행되었으며 진단시험 기간 중 측정된 발전단 출력은 평균 1,045,609kW 이다. 측정된 시험조건 발전단 전기출력을 100%원자로 열출력, 설계기준 터빈 입구 주증기 압력(72.768kg/cm<sup>2</sup>), 발전기 역율(0.9) 및 복수기 진공도(38.1mmHg) 등으로 보정한 정격조건 발전단 전기출력은 1,043,517kW 로 2002 년인수 성능 대비 4,290kW 저하되었으며 터빈사이클 열소비율 및 터빈 사이클 효율은 각각 2,328.27 kcal/kWh 와 36.93%로 확인되었다.

표 4.2 상의 인수성능 및 정밀 열성능진단에서는 고압터빈 입구 Control Valve #4가 부분 개방(30.17% 및 31.57%) 되어 교축 손실이 발생하는 상태에서의 성능이 분석된 반면 설계 성능은 Valve의 부분 개방에 의한 교축 손실이 없는 이상적인 조건(Valve Best Point)에서의 기준 값이다.

따라서, 인수성능 및 정밀 열성능진단에서의 정격조건 발전단 전기출력을 설계 성능과 비교하기 위해서는 CV#4 교축 손실에 대한 추가적인 보정과정의 필요하며 결과는 표 4.3 와 같다.

CV#4 교축 손실이 보정된 정격조건 발전단 전기출력은 1,047,354kW로 설계성능 1,054,645kW 대비 7,291kW 낮은 수준이며, 2002년 인수성능 1,051,684kW 대비로는 4,330kW 저하된 것으로 분석되었다.

정격조건 터빈사이클 열소비율은 2,319.77kcal/kWh로 설계성능 2,303.6 kcal/kWh대비 16.17kcal/kWh 높은 수준이며, 2002년 인수성능 2,310.15kcal/kWh 대비 9.63kcal/kWh 증가하였다.

2 차 계통 열 성능지표 (CV#4 교축손실 보정 전)	단위	설계성능	2002 년	2008 년	설계대비	인수대비
		(a)	인수성능 (b)	성능진단 (c)	편차 (c-a)	변화 (c-b)
시험조건 원자로 열출력		2,825.49 (100%)	2,830.86 (100.19%)	2,838.00 (100.44%)	12.51 (0.44%)	7.12 (0.25%)
시험조건 발전단 전기출력	kW	1,054,645	1,055,835	1,045,609	-9,036	-10,226
시험조건 터빈사이클 열소비율	kcal/kWh	2,303.60	2,305.38	2,333.80	30.19	28.42
시험조건 터빈사이클 효율	%	37.33%	37.30%	36.84%	-0.48%	-0.45%
정격조건 발전단 전기출력	kW	1,054,645	1,047,807	1,043,517	-11,128	-4,290
정격조건 터빈사이클 열소비율	kcal/kWh	2,303.60	2,318.66	2,328.27	24.67	9.61
정격조건 터빈사이클 효율	%	37.33%	37.08%	36.93%	-0.39%	-0.15%

표 4.2 한빛 5호기 정격조건 기준 2차 계통 성능지표 (CV#4 교축손실 보정 전)

2차 계통 열 성능지표 (CV#4 교축손실 보정 후)	단위	설계성능 a	2002년 인수성능 b	2008년 성능진단 c	설계대비 편차 c-a	인수대비 변화 c-b
정격조건 발전단 전기출력	kw	1,054,645	1,051,684	1,047,354	-7,291	-4,330
정격조건 터빈사이클 열소비율	kcal/kWh	2,303.60	2,310.15	2,319.77	16.17	9.63
정격조건 터빈사이클 효율	%	37.33%	37.22%	37.07%	-0.26%	-0.15%

표 4.3 한빛 5호기 정격조건 기준 2차 계통 성능지표 (CV#4 교축손실 보정 후)

한편, 2차 계통 주요 설비별 성능분석 과정에서 한빛 5호기의 인수성능 대비 성능저하가 증기발생기 입구 주급수 유량계(벤츄리 노즐)의 파울링 현상이 주요 원인으로 판단되며 근거는 아래와 같다.

ASME PTC 6.0 Alternative Test로 2002년 5월 수행된 터빈/발전기 인수성능시험은 터빈/발전기 및 MSR 이외의 모든 2차 계통 설비가 설계 조건일 때의 전기출력 및 열소비율을 확인하기 위한 시험으로 측정된 전기출력 및 열소비율을 설계 조건으로 보정하게 되며 Group 1 보정과 Group 2 보정 과정으로 구분된다.

이중 Group 1 보정은 복수 계통(Condensate System)과 주급수 계통(Feedwater System) 상에 설치된 급수가열기, 급수 펌프, 급수펌프 구동용 증기터빈(FWPT) 및 추기 증기배관 압력 손실 등을 설계 조건으로 보정하는 과정으로 2차 계통 내 보조 기기의 성능을 대변하는 지표이다.

2002년 인수성능시험과 2008년 정밀 열성능진단의 Group 1 보정 계수 비교 결과 이들 2차 계통 보조기기의 성능변화에 따른 발전단 전기출력 저하에 미치는 영향은 약 580KW 인 것으로 분석되었다.

2002년 인수성능시험은 ASME PTC 6 Alternative Test 로 수행됨에 따라 증기터빈 및 MSR 의 정확한 성능지표를 확인할 수 없었다. 하지만 MSR 의 경우 고압재열기(1st Reheater) TTD 및 저압터빈 입구 증기의 과열도가 측정되었으며 그 결과를 2008년 정밀 열성능진단에서의 측정값과 비교할 경우 MSR A 는 인수성능을 유지하고 있으나 MSR B 는 고압재열기 TTD 가 인수성능 대비 약 0.9℃ 증가 하였음을 확인할 수 있었다. 하지만, 2차 계통 주요기기별 성능분석을 통해 확보된 성능지표를 이용한 Heat Balance 시뮬레이션 결과

MSR B 의 성능 저하가 발전단 전기출력에 미치는 영향은 약 50kW 로 거의 무시할 수 있는 수준이다.

따라서, 한빛 5호기 인수성능 대비 성능저하 원인 분석에서는 2차 계통 내 보조기기 및 MSR 은 제외되어야 하며, 증기터빈 성능저하 및 주급수 유량 측정 오류에 따른 원자로 열출력 과다 지시가 예상 원인으로 남게 된다.

앞서 언급한 바와 같이 인수성능시험 당시 증기터빈 성능지표가 확보되지 않아 정밀 열성능진단 결과를 비교할 수 있는 기준이 없는 상태이므로 증기터빈의 설계특성을 이용하여 주급수 유량 측정 오류 가능성 분석을 아래 과정을 통해 수행하였다.

## 1. 발전소 운전 변수 분석

증기터빈의 설계 특성상 고압터빈의 첫 단 출구 증기압력은 고압터빈으로 유입 되는 주증기 유량에 비례하여 변하게 되며 이는 증기발생기 입구 주급수 유량 또한 같은 특성을 가지고 있음을 의미한다. 이러한 증기터빈의 특성에 따라 발전소에서는 고압터빈 첫 단 출구 압력을 2차 계통 부하를 대변하는 기준 지표(T Reference)로 이용하고 있다.

본 성능진단 프로그램에서 측정된 고압터빈 첫 단 출구 증기압력은 54.939kg/cm<sup>2</sup> 으로 인수성능시험 시 측정된 55.181kg/cm<sup>2</sup> 대비 0.437% 감소한 반면 주급수 유량은 0.06% 밖에 감소하지 않았으며, Heat Balance 시뮬레이션 결과로는 동일 조건에서 주급수 유량이 0.411% 감소하는 것으로 분석되었다.

이를 통해 정밀 열성능진단에서 주급수 유량이 과다하게 측정되고 있음을 간접적으로 알 수 있다.

증기발생기 입구 주급수 온도 또한 인수성능시험 결과 235.99℃ 대비 0.94℃ 감소한 235.05℃로 측정되었으며, 이러한 온도 저하는 2차 계통 내 보조기기 전체 성능저하가 인수성능 대비 약 630kW 인 점을 감안하면 단위기기의 성능저하에 보다는 벤츄리 파울링에 의한 원자로 열출력 과다 지시로 2차 계통의 부하가 인수시험 대비 낮은 상태에서 운전되고 있었음을 시사하고 있다.

## 2. 고압터빈 Control Valve 개도 분석

증기터빈공급사가 제출한 고압터빈 Control Valve 개도 대비 터빈 입구 주증기 유량 설계 데이터(CAM DATA) 상에는 정격 주증기 조건(72.768kg/cm<sup>2</sup>, 0.45% 습분)에서 Control Valve 개도 대비 고압터빈으로 유입되는 주증기 유량에 대한 정보가 포함되어있다.

고압터빈 Control Valve #4 개도는 아래 인수성능시험 당시 30.17%에서 정밀 열성능진단에서는 31.57%로 1.47% 증가하였으며 CAM DATA 상으로는 이 경우 정격 증기조건에서 주증기 유량이 약 0.41% 증가하게 된다. 반면, 인수성능시험 및 정밀 열성능진단에서 측정된 고압터빈 입구 유량을 정격 주증기 조건으로 보정한 유량은 0.89%로 2 배 이상 증가하는 것으로 계산되었으며 이러한 결과는 본 성능진단 시 주급수 유량이 과다하게 측정되었음을 간접적으로 말해 준다.

### 3. 주급수 유량 변경을 통한 Heat Balance 시뮬레이션

한빛 5호기 인수성능 대비 전체 발전단 전기출력 저하량 4,330kW 중 보조기기 (약 580kW) 및 MSR(약 50kW) 성능저하에 따른 영향성을 제외한 3,700KW 를 벤츄리 노즐 파울링에 기인한 것으로 가정하고 측정된 주급수 유량을 표 5.3 상의 Heat Balance 시뮬레이션 결과를 이용하여 0.411% 감소시켜 Heat Balance를 재 계산한 결과 아래 표 5.4 에서 보는 바와 같이 발전단 전기출력이 3,675kW 증가하는 것으로 분석되어 추정된 3,700kW 와 유사한 결과를 보여준다.

위의 벤츄리 파울링 분석결과를 이용하여 한빛 5호기 정격조건 발전단 전기출력 변화추이를 재 분석한 결과는 아래 표 5.5-표 5.6 과 같다.

벤츄리 노즐 파울링에 의한 정확한 주급수 유량 측정오차를 확인하기 위해서는 직접 벤츄리노즐을 취외하여 정밀 검교정을 수행해야 하지만 이는 현실적으로 불가능하다.

아래 결과는 2차 계통 정밀 열성능진단을 통해 벤츄리 파울링의 영향성을 간접적으로분석한 것으로 비록 정확도는 정밀 검교정에 비해 떨어질 수 있으나 발전단 전기출력저하 원인분석 및 대책 수립을 위한 기술적인 근거 자료로는 충분히 신뢰성을 가지고있다고 판단된다.

벤츄리 파울링 및 CV#4 교축 손실이 보정된 정격조건 발전단 전기출력은



1,051,052kW 로 인수성능 대비 632kW 저하된 것으로 분석되었으며, 이는 MSR 과 급수계통 및 복수계통의 성능저하 분석 결과 630kW 와 일치하는 수치이다.

하지만, 위의 결과를 기준으로 인수성능 대비 고압터빈 및 저압터빈 성능저하가 전혀 발생하지 않았다고 판단할 수는 없다. 발전단 전기출력 측정치 분석 결과 본 성능진단에서의 전기출력은 인수성능시험 당시 특설 전력량 측정시스템 대비 약 1.35 MW높게 계산되었으며 이에 해당하는 만큼의 성능 저하가 증기터빈에서 발생한 것으로 추정된다.

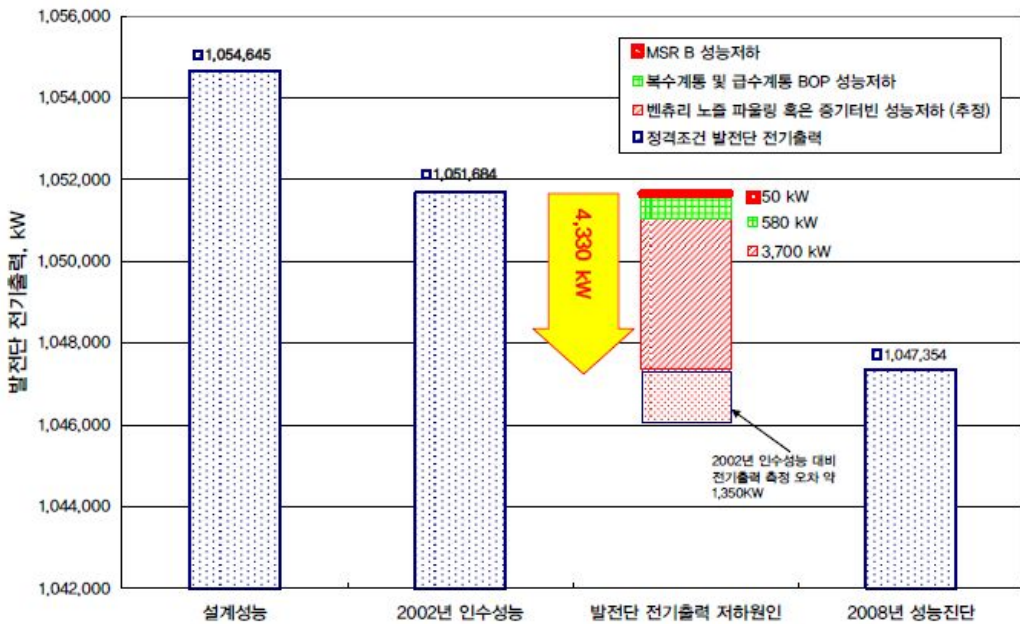


그림 4.1 한빛 5호기 인수성능대비 전기출력 저하 원인분석

한편, CV#4 교축 손실을 보정하지 않은 실제 발전소 운전 조건을 기준으로 설계성능 대비 발전단 전기출력 편차는 약 7,447kW 로 주요 원인은 표 4.4 과 같다.

한빛 5, 6 호기 계약서 상의 설계 Heat Balance 에서는 고압터빈 및 FWPT 의 Control Valve 에서 발생하는 교축 손실을 고려하지 않고 있으나 실제 발전소 운전에서는 교축손실로 인한 발전단 전기출력 저하 요인이 발생하고 있으며 이외에 저압터빈의 설계대비 효율 저하가 전기출력 편차의 주요 요인으로 볼 수 있다.

반면, 설계 Heat Balance 대비 급수가열기 성능 향상 및 증기 배관 압력 손실 감소는 발전단 전기출력을 증가시키는 요인으로 작용하고 있다.

주급수 승압 펌프(Feedwater Booster Pump)의 경우 설계(35.15kg/cm<sup>2</sup>) 대비 높은 출구 압력(46.41kg/cm<sup>2</sup>)으로 2차 계통이 운전됨에 따라 주급수 펌프(Main Feedwater Pump) 소요 동력 감소로 인해 FWPT 구동용 추기 증기량이 감소하고 결과적으로 발전단 전기출력이 증가하는 효과가 있으나 소내 보조 전력 소비량을 증가시키고 있다.

이외 설계 대비 복수 펌프(Condensate Pump) 출구 압력 증가 및 증기터빈 Sizing (Flow Passing Capacity) 편차 등은 급수가열기 추기 증기량을 감소시켜 미미하지만 발전단 전기출력 증가에 기여하고 있다.

설계 성능	2008 년 성능진단	전기출력 편차	전기출력 증감 요인	전기출력 변화량
1,054,645 kW	1,047,198 kW  (벤츄리 파울링 보정 후 결과)	-7,447 kW	고압터빈 효율 및 교축 손실	-2,756 kW
			저압터빈 효율	-7,440 kW
			FWPT 효율 및 교축 손실	-2,214 kW
			MSR 성능	-452 kW
			복수기 Make-up (0.2%)	-550 kW
			급수가열기성능	1,800 kW
			증기 배관 압력손실	653 kW
			복수 펌수 출구 압력	170 kW
			주급수 승압 펌프 출구압력	2,249 kW
			증기터빈 Sizing	757 kW
			<b>합계</b>	<b>-7,782 kW</b>
			기타 (+)	335 kW

표 4.4 한빛 5호기 설계 대비 발전단 전기출력 편차 원인분석

### 제 3 절 고압터빈 성능 분석

원자력 2차 계통 Heat Balance 분석의 기준이 되는 성능지표는 고압터빈 효율이다. 터빈섹션 전체가 습증기 영역에서 운전되는 원자력용 고압터빈의 효율 산정은 습분 동반을 시험을 통해 고압터빈 배기 증기의 습분 함량을 측정하고 그 결과를 이용하여 엔탈피를 계산하는 방법과 배기 증기가 추가되는 급수가 열기(한빛 5호기의 경우 5번급수가열기)의 Mass Flow and Energy Balance를 통해 추가 증기의 엔탈피를 간접적으로 계산하는 방법을 통해 가능하다. 한빛 5호기의 경우 급수가열기 및 MSR Drain Tank 배수 유량 측정을 위한 기준 발전소 유량계가 설치되어있지 않아 후자의 방법을 적용할 수 없었으며, 습분 동반을 시험 또한 습분 함량 변화에 따른 엔탈피 민감도가 크므로 습분 함량의 측정 불확도(Measurement Uncertainty) 수준을 만족시키기가 힘들며 과도한 소요경비 및 시험 수행의 난이도를 고려할 경우 고압터빈의 성능분석을 위해서는 비 효율적인 면이 있다.

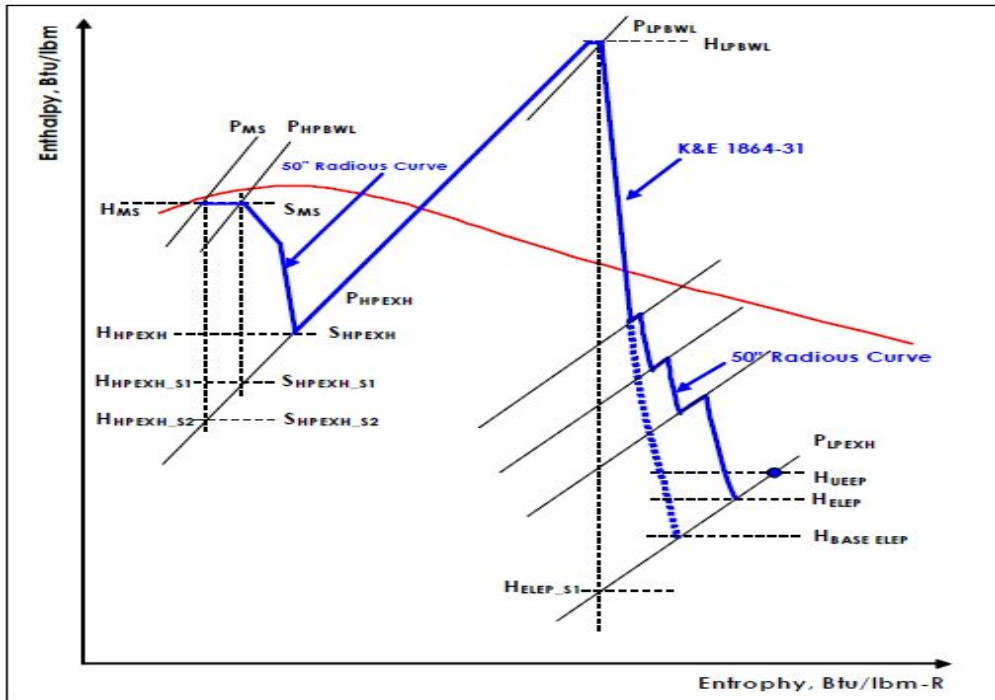


그림 4.2 고압터빈 및 저압터빈 증기팽창 선도

본 성능진단에서는 기술적 대처 방안으로 한빛 5호기 고압터빈 설계 단계에 적용된 Mollier 선도 상의 증기 팽창 선도(Expansion Line) 기울기를 이용하여 고압터빈 효율 및 추기 증기 엔탈피를 분석하였으며, 이러한 증기 팽창선도 기울기는 터빈 증기유로의 물리적인 손상이 없을 경우 항상 일정한 값을 유지하는 터빈 고유의 특성 값이므로 현재 발전소 여건상으로는 가장 현실적이며 신뢰 수준이 높은 접근 방법이라 볼 수 있다. 좀 더 정밀한 고압터빈의 성능분석을 위해서는 계획 예방정비 기간 중 고압터빈의 증기유로 점검(Steam Path Audit)을 통해 외부 이물질에 의한 유로 손상 혹은 경년 열화에 의한 설계값 대비 성능저하 정도를 평가하고 그 결과를 다시 정밀 열성능진단에 반영하는 것이 효과적이다.

설계 단계에 적용된 증기 팽창선도 기울기를 이용하여 분석한 한빛 5호기 고압터빈 섹션 효율은 82.36%이며 이 수치는 CV#4 교축 손실이 발생하는 상태에서의 결과이다.

CV#4 교축 손실이 없는 조건에서의 이상적인 고압터빈 효율 (Valve Best Point)은 83.06%로 설계 효율 83.29% 대비 약 0.23 % 낮은 수준으로 비교적 양호한 상태를 유지하고 있다.

MSV(Main Stop Valve) 입구 기준 고압터빈 0.1324 (=고압터빈 케이싱 출구 압력÷MSV 입구 압력)로 측정되었으며, 향후 고압터빈 성능지표로 관리되어야 할 고압터빈 첫 단 출구 기준 압력비는 0.1802 (=고압터빈 케이싱 출구 압력÷고압터빈 첫 단 출구압력)로 측정되었다. MSV 기준 압력비는 Control Valve 개도에 따라 변하는 값이나 고압터빈 첫 단 기준 압력비는 항상 일정한 값을 유지하는 고압터빈 고유의 특성 값이므로 향후 이 값이 변할 경우 케이싱 내부 씰 팩킹(Seal Packing)의 심한 마모 혹은 증기유로 손상을 의심하여야 한다. 고압터빈 축 출력의 경우 406,638kW 로 설계 출력 412,268kW 대비 약 5.6 MW 낮은 수준이며 이중 3.8 MW 는 CV#4 에서 발생한 교축 손실에 기인한 것이다.

고압터빈 출력 분담율은 설계 대비 약 0.15% 낮게 분석되었다. 고압터빈 축 출력 및 출력 분담율은 주증기 압력 및 습분 함량에 따라 변하게 된다.

100% 원자로 열출력 성능진단 시험(TR01, TR02)에서 분석된 고압터빈 성능지표는 표 4.5와 같다.

고압터빈 성능지표	단위	설계 성능 ㉑	2002 년 인수 성능 ㉒	2008 년 성능진단		설계 대비 편차 ㉓-㉑
				벤츄리 파울링 보정 전	벤츄리 파울링 보정 후 ㉔	
$\eta$ Main Steam to HP Exhaust (터빈섹션 효율)	%			82.38%	82.36%	
$\eta$ Main Steam to HP Exhaust (Valve Best Point 효율)	%	83.29%		83.08%	83.06%	-0.23%
% Load Distribution	%	38.64%		38.64%	38.48%	-0.15%
HP Turbine Shaft Power	kW	412,268		408,308	406,638	-5,630
Pressure Ratio ( $P_{HPEXH}/P_{MS}$ )	-	0.1311		0.1324	0.1324	0.0013
Pressure Ratio ( $P_{HPEXH}/P_{1st\ STG\ Shell}$ )	-	0.1853		0.1802	0.1802	-0.0051

표 4.5 한빛 5호기 고압터빈 성능지표

## 제 4 절 저압터빈 성능 분석

저압터빈 효율은 터빈사이클 전체 Flow & Energy Balance 에 의해 계산되며 주급수유량 측정에 오차가 있을 경우 저압터빈 효율 또한 오차를 발생하게 되며, 표 5.9 에서 벤츄리 파울링 보정 전후 저압터빈 효율 편차의 원인이다.

벤츄리 파울링이 보정된 상태에서의 정격 복수기 진공도(38.1mmHg) 기준 저압터빈 ELEP 효율은 86.80%로 설계 효율 87.85% 대비 1.05% 낮은 수준이며, BASE ELEP 효율 또한 90.77%로 설계 효율 91.79% 대비 1.03% 낮은 수준으로 분석되었다.

저압터빈 축 출력은 650,001kW 로 설계 출력 654,710kW 대비 약 4,710kW 낮은 수준으로 분석되었으며, 출력 분담율은 61.52%로 설계 대비 0.15% 높게 분석되었다. 반면, 저압터빈 축 출력 및 출력분담율은 복수기 진공도에 따라 변하는 값이다. 100% 원자로 열출력 성능진단 시험(TR01, TR02)에서 분석된 저압터빈 성능지표는 표 4.6 와 같다.

저압터빈 성능지표	단위	설계성능 a	2002년 인수성능 b	2008년 성능진단		설계대비 편차 c-a
				벤츄리 파울링 보정 전	벤츄리 파울링 보정 후 c	
$\eta_{LP}$ Bowl to UEEP (UEEP 효율)	%	83.17%		83.35%	83.65%	0.48%
$\eta_{LP}$ Bowl to ELEP at Test Pressure	%	87.85%		86.54%	86.89%	-0.97%
$\eta_{LP}$ Bowl to ELEP at 38.1mmHg (ELEP 효율)	%	87.85%		86.47%	86.80%	-1.05%
$\eta_{LP}$ Bowl to BASE_ELEP	%	91.79%		90.31%	90.77%	-1.03%
LP Turbine Shaft Power at Test Pressure	KW	654,710		648,525	650,001	-4,710
% Load Distribution	%	61.36%		61.36%	61.52%	0.15%

표 4.6 한빛 5호기 저압터빈 성능지표

## 제 5 절 습분분리재열기 성능 분석

본 성능진단 결과 전반적인 MSR 성능지표 (습분 분리 효율, 저압 재열기 TTD, 고압재열기 TTD 등)가 설계 대비 성능이 떨어지는 것으로 분석되었다. MSR A 와 B 의 습분 분리 효율은 각각 93.65%와 92.98%로 설계 성능 97% 대비 3.35% 및 4.02% 낮은 것으로 분석되었으며, 저압 재열기 TTD 또한 A 와 B 각각 15.39°C와 15.79°C로 설계 성능 11.33°C 대비 4.05°C 및 4.46°C 높게 분석되었다.

고압재열기 TTD 의 경우 MSR A TTD 는 17.85°C로 설계 성능 14.00°C 대비 3.85°C 높은 수준이며 표면적으로 인수성능 18.23°C 대비 향상된 것으로 보이나 이는 벤츄리 노즐 파울링으로 인해 2차 계통의 부하가 상대적으로 낮은 상태에서 운전된 것에 기인하는 것으로 판단되며 실제로는 거의 동일한 수준을 유지하고 있는 것으로 보인다.

MSR B TTD 는 18.95°C로 설계 성능 대비 4.95°C 높은 수준이며 2002 년 인수성능시험과 동일한 2차 계통 부하에서는 오히려 인수성능 18.40°C 대비 약 0.9°C 증가할 것으로 추정된다. 반면, MSR B 성능저하로 인한 발전단 전기출력 영향은 약 50kW 로 아주 미미하다.

사이클 증기 압력강하는 MSR A 와 B 각각 0.76%와 0.85%로 설계치인 2.44% 대비 1.67% 및 1.58% 낮게 측정되었으며 발전단 전기출력 증가에 기여하고 있다. 100% 원자로 열출력 성능진단 시험(TR01, TR02)에서 분석된 저압터빈 성능지표는 표 4.7 과 같다.

MSR 성능지표	단위	설계성능 ①	2002 년 인수성능 ②	2008 년 성능진단		설계대비 편차 ③-①
				벤츄리 노즐 파울링 보정 전	벤츄리 노즐 파울링 보정 후 ③	
Moisture Separator Effectiveness	A	%	97.00%	93.90%	93.65%	-3.35%
	B			93.25%	92.98%	-4.02%
LP Reheater TTD	A	°C	11.33	15.22	15.39	4.05
	B			15.6	15.79	4.46
HP Reheater TTD	A	°C	14	18.23	17.84	3.85
	B			18.40	18.9	4.95
Cycle Steam ΔP	A	%	2.44%	0.76%	0.76%	-1.67%
	B			0.85%	0.85%	-1.58%

표 4.7 한빛 5호기 MSR 성능지표

성능진단 결과 측정된 MSR 성능지표의 설계 대비 편차가 발전단 전기출력에 미치는 영향을 분석한 결과 표 4.8 와 같이 습분 분리 효율, 저압 재열기 TTD, 고압 재열기 TTD 등이 약 2,256kW 의 발전단 전기출력 저하요인으로 작용하고 있으며, 사이클 증기 압력 강하가 설계 대비 낮음에 따라 약 1,804kW 의 발전단 전기출력이 증가하는 것으로 확인되었다. 따라서 MSR 성능지표의 설계 대비 편차가 발전단 전기출력 저하에 미치는 영향은 약 452kW 로 볼 수 있다.

MSR 성능지표		단위	설계성능 a	2002년 인수성능 벤처리 파울링 보정 후 b	설계대비 편차 c-a
Moisture Separator Effectiveness	A	%	97.00%	93.65%	-1,215 kW
	B			92.98%	
LP Reheater TTD	A	°C	11.33	15.39	-554 kW
	B			15.79	
HP Reheater TTD	A	°C	14	17.85	-487 kW
	B			18.95	
Cycle Steam ΔP	A	%	2.44%	0.76%	+1,804 kW
	B			0.85%	

표 4.8 MSR 성능지표의 설계 대비 편차가 발전단 전기출력에 미치는 영향



## 제 6 절 급수가열기 성능분석

100% 원자로 열출력 성능진단 시험(TR01, TR02)에서 측정된 급수가열기 성능지표 분석결과 한빛원자력 5호기 급수가열기 성능은 표 4.9 에 정리된 바와 같이 전반적 으로 설계치 보다 양호한 상태이다. 7 번 급수가열기의 경우 2002 년 인수성능 대비 성능 저하량 또한 미미하며 온도 측정 불확도 이내에 존재한다.

본 결과는 ASME PTC 19.1 에 따른 보정계산을 위한 설계자료가 확보되어 있지 않은 관계로 측정된 성능지표들을 보정하지 않은 상태이다. 하지만 기저 부하용으로 100% 원자로 열출력을 일정하게 유지하는 원자력발전소 2차 계통 의 경우 급수 및 터빈 추기 증기 조건이 크게 변하지 않으므로 성능 이력관리를 목적으로 하는 성능지표로서는 충분한 신뢰성을 가질 것으로 판단된다.

급수가열기 성능지표 TTD/DCA	단위	설계성능 Ⓐ	2002 년 인수성능 Ⓑ	2008 년 성능진단 Ⓒ	설계대비 편차 Ⓒ-Ⓐ
Feedwater Heater#7 A	°C	2.78 / 5.56	2.23 / 6.22	2.46 / 7.93	-0.32 / 2.37
Feedwater Heater#7 B	°C	2.78 / 5.56	1.80 / 7.35	2.43 / 6.77	-0.35 / 1.22
Feedwater Heater#6 A	°C	2.78 / 5.56		1.85 / 4.88	-0.92 / -0.68
Feedwater Heater#6 B	°C	2.78 / 5.56		1.49 / 6.40	-1.29 / 0.84
Feedwater Heater#5 A	°C	2.78 / 5.56		1.95 / 3.80	-0.83 / -1.75
Feedwater Heater#5 B	°C	2.78 / 5.56		2.34 / 4.47	-0.44 / -1.09
Deaerator	°C	0.00		-0.50	-0.51
Feedwater Heater#3 A	°C	2.78 / 5.56		0.78 / 4.19	-2.00 / -1.37
Feedwater Heater#3 B	°C	2.78 / 5.56		1.23 / 4.33	-1.55 / -1.23
Feedwater Heater#3 C	°C	2.78 / 5.56		1.07 / 4.00	-1.71 / -1.55
Feedwater Heater#2 A	°C	2.78 / 5.56		1.04 / 6.80	-1.74 / 1.25
Feedwater Heater#2 B	°C	2.78 / 5.56		1.23 / 7.95	-1.55 / 2.39
Feedwater Heater#2 C	°C	2.78 / 5.56		1.46 / 7.30	-1.32 / 1.75
Feedwater Heater#1 A	°C	2.78 / 5.56		1.14 / 5.64	-1.64 / 0.08
Feedwater Heater#1 B	°C	2.78 / 5.56		0.84 / 5.79	-1.94 / 0.23
Feedwater Heater#1 C	°C	2.78 / 5.56		0.92 / 5.37	-1.86 / -0.18

표 4.9 한빛 5호기 급수가열기 성능지표

## 제 7 절 복수기 성능분석

100% 원자로 열출력 성능진단 시험(TR01, TR02)에서 분석된 복수기 성능지표는 아래 표 4.10 와 같다.

진단 결과 시험 조건에서의 복수기 TTD, 대수 평균 온도차(Logarithmic Mean Temp Difference), 열관류율(Heat Transfer Coefficient), 복수기 과냉각도(Subcooling) 등 모든 복수기 성능지표가 전반적으로 설계 성능 대비 양호된 것으로 분석 되었다.

이들 복수기 성능지표를 이용하여 『ASME PTC 12.2 Steam Surface Condensers』에 따라 시험 조건에서 측정된 복수기 진공도를 설계 조건에서의 진공도로 보정 계산한 결과 또한 35.93mmHg 로 설계치 38.1mmHg 대비 2.17mmHg 낮은 수준이다.

복수기 성능지표	단위	설계성능	2002년	2008년	설계대비
		㉠	인수성능	성능진단	편차
			㉡	㉢	㉢-㉠
<b>Measured Condenser Pressure</b>	<b>mmHg</b>	<b>38.1</b>		<b>47.91</b>	<b>9.82</b>
Condenser A TTD	°C	4.3		3.15	-1.15
Condenser B TTD	°C			3.17	-1.13
Condenser C TTD	°C			2.86	-1.44
Condenser A CW Temp Rise	°C	6.93		7.14	0.21
Condenser B CW Temp Rise	°C			6.86	-0.07
Condenser C CW Temp Rise	°C			7.51	0.58
Condenser A LMTD	°C	7.22		6.03	-1.19
Condenser B LMTD	°C			5.96	-1.26
Condenser C LMTD	°C			5.83	-1.39
Condenser A Subcooling	°C	0		-0.18	-0.18
Condenser B Subcooling	°C			-0.09	-0.09
Condenser A Subcooling	°C			-0.29	-0.29
Condenser Heat Duty (Total)	kcal/hr	1.58E+09		1.54E+09	-3.51E+07
Heat Transfer Coefficient (Total)	kcal/hr-m <sup>2</sup> -°C	2,423.82		2,884.18	460.36
<b>Corrected Condenser Pressure</b>	<b>mmHg</b>	<b>38.1</b>		<b>35.93</b>	<b>-2.17</b>

표 4.10 한빛 5호기 복수기 성능지표

## 제 5 장 2차계통 열효율 개선 방안

### 제 1 절 주급수 유량 측정 신뢰성 개선

한빛원자력 5호기는 국내 대부분의 원자력발전소와 마찬가지로 원자로 열출력 계산용 주급수 유량 측정을 위해 증기발생기 입구에 설치된 벤츄리 노즐을 사용하고 있다.

벤츄리 노즐의 주급수 유량 측정 표본 오차  $\pm 0.25\%$ 를 만족하기 위해 ASME PTC19.5 CODE 에서는 아래의 3 가지 허용 조건(Acceptance Criteria)을 요구하고 있다.

#### Average Cx Value

이론적인 유량 계수 공식  $C_q = C_x - 0.185Rd - 0.2 \times (1 - 361239/Rd)^{0.8}$  에서  $C_x$  평균값이  $1.0054 \pm 0.0025$  이내에 존재해야 하며 이는 1 차 적으로 실제 검교정이 수행된 Reynolds Number 영역( $2.0E+6 \sim 5.0E+6$ )에서 유량 측정 표본 오차  $0.25\%$ 를 만족함을 확인하기 위한 조건이다.

#### Reynolds Number Independence

$C_x$  값을 Reynolds Number 함수로 선형화한 방정식( $C_x = a + b Rd$ )의 기울기 (b)가  $\pm 2.7E-10$  이내에 존재해야 하며 이는 벤츄리 노즐을 설치 후 실제 발전소에서 운전조건에서의 Reynolds Number 영역( $3.0E+7 \sim 4.0E+7$ )에서도 유량 측정 표본 오차  $0.25\%$ 를 만족함을 확인하기 위한 조건이다

#### Scatter of Calibration Data

95% 신뢰수준을 만족하기 위한  $C_x$  값의 분포가 통계학적으로 Reynolds Number 함수로 선형화한 방정식( $C_x = a + b Rd$ )의  $\pm 0.0003$  이내에 존재해야하며 이는  $C_x$  평균값에 대한 신뢰성을 확인하기 위한 조건이다.

한빛 5호기에 설치된 벤츄리 노즐의 최초 정밀 검교정 성적서 분석 결과 표 5.1 와같이 FE1112 와 FE1122 에 설치된 총 4 개의 Tap Set 중 증기발생기 B 입구 측에 설치된 FE1122 “Y” Tap Set 은 ASME 19.5 CODE 의 요구 조건을 만족하지 못하며 “X” Tap Set 과의 과다한유량 편차로 인해 주급수 유량 측정용으로는 부적합 한 것으로 판단된다.

	증기발생기 A		증기발생기 B	
	FE-1112X	FE-1112Y	FE-1122X	FE-1122Y
$1.0029 \leq C_x \leq 1.0079$	만족	만족	만족	만족
$b \leq \pm 2.7E-10$	만족	만족	만족	불만족
신뢰 구간 $\pm 0.03\%$	만족	만족	만족	만족

표 5.1 한빛 5호기 벤츄리 노즐 검교정 성적서 분석 결과

2002 년 인수성능시험 당시 FE1112 의 “X” 및 “Y” Tap Set 에서 측정된 유량 편차는 0.21%인 반면, FE1122 의 경우 1.16%의 유량편차를 보이고 있으며 원인은 FE 1122“Y” Tap Set 의 유량 측정 불확도(Measurement Uncertainty) 증가로 인해 과도한 유량이 측정되어 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 2008 년 성능진단시험에서는 이러한 Tap Set 간 유량 편차가 증가하는 경향을 보이고 있다.

참고로 한빛 6 호기의 인수성능시험에서 분석된 벤츄리 노즐의 Tap Set 간 유량편차 는 0.08%와 0.05%로 아주 양호한 상태였다.

위 분석 내용을 근거로 2002 년 수행된 인수성능시험에서는 증기발생기 A 입구 유량계산에는 FE1112 “X” 및 “Y” Tap Set 의 평균값을 사용한 반면, 증기발생기 B 입구 유량 계산은 FE1122 “X” Tap Set 에서 측정된 유량만을 사용하였으며 본 진단시험에 서도 동일한 방법을 적용하였다.

한빛 5호기는 운전 중 증기발생기 B 입구 유량 계산을 위해 “X” 및 “Y” Tap Set 유량의 평균값을 사용하고 있으며 이로 인한 발전단 전기출력 영향은 3,275kW 로 분석되었다.

## 제 2 절 벤츄리 노즐 파울링 방지를 위한 2차 계통 수질 개선

국내 대부분의 원자력발전소에서 주급수 유량 측정용으로 주로 사용되고 있는 벤츄리 노즐은 유체의 압력손실이 적고 초기 정밀 검교정 시 $\pm 0.25\%$ 이내의 표준오차를 확보할 수 있는 장점이 있는 반면 장기간 발전소 운전 시 벤츄리 목(Throat) 표면 이물질 침적현상 등으로 인해 유출계수(Cd)가 민감하게 변함으로 인해 유량측정의 불확도가 급격히 증가하는 문제점이 있으며 이러한 현상을 벤츄리 파울링이라 한다.

벤츄리노즐 파울링과 관련해 일반적으로 가지고 있는 잘못된 접근은 첫 번째 이물질 침적현상이 유량측정에 미치는 영향이 단지 침적물의 두께 만큼만 노즐 내경(d)을 감소 킬 뿐이라는 생각과 두 번째 유량측정의 원리가 노즐 상류와 하류의 정압을 측정하는 것이므로 탭(Tap)의 상태에는 크게 영향을 받지 않을 것이라는 생각이다.

벤츄리 노즐 파울링에 의한 유량계수 변화 메커니즘 및 유량측정 오차는 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 벤츄리 노즐 내부 표면조도(Surface Roughness)이다.

만약 벤츄리 노즐 내부 침적물이 균일하게 발생할 경우에는 초기의 표면 조도가 크게 손상이 되지 않으므로 침적물 두께에 해당하는 만큼의 유량 감소가 발생하나 이물질 침적이 불 균일할 경우 표면 조도 증가로 인해 벤츄리 노즐 표면의 Boundary Layer Thickness (경계층 두께)가 증가하고 실제 유체가 통과할 수 있는 단면적은 줄어들게 된다.

두 번째 요소는 압력 탭 오류(Pressure Tap Error)이다. 하부 탭(Throat Tap) 주위에 이물질이 침적되어 탭 홀(Hole)이 유체 흐름 방향과 직각이 아니거나 날카로운 끝선(Sharp Edge)을 유지하지 못할 경우 탭 주위에 와류가 발생하여 국부적으로 Boundary Layer(경계층)가 파괴되고 Shear Stress 증가에 따른 Drag 가 형성되어 벤츄리 노즐을 통과하는 유체의 속도가 증가하게 된다.

그림 5.1 은 한빛 5호기 계획 예방정비 기간 중 벤츄리 노즐의 상태를 촬영한 것으로 앞서 언급한 두 가지 요소(벤츄리 노즐 내부 표면조도 증가에 따른 경계층 두께 증가 및 탭 주위 이물질 침적에 따른 압력 측정 오류)가 동시에 유

량 계수 변화에 영향을 준 것으로 판단된다.



그림 5.1 한빛 5호기 벤츄리 노즐 내부 상태

한빛 5호기의 경우 벤츄리 노즐 파울링 현상으로 인한 원자로 열출력 과다 지시 및 이에 따른 발전단 전기출력 저하 현상이 매 주기 운전 중 반복적으로 발생하고 있으며, 계획예방정비 기간 중 세정 작업을 통해 이를 일부 복원하고 있으나 최초 설치 상태로의 복원은 불가능하며 운전 시간이 경과할수록 벤츄리 파울링에 의한 전기출력 저하가 누적되는 경향을 보이고 있다.

파울링 현상 개선을 위해서는 2차계통 내 이물질 생성 원인 및 제거 방안이 우선적으로 검토되어야 할 것으로 보인다.

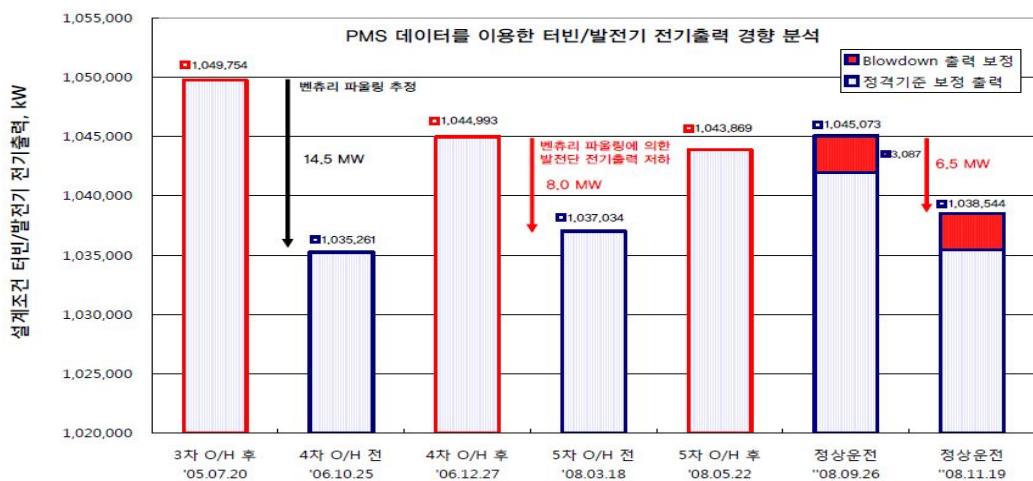


그림 5.2 한빛 5호기 발전단 전기출력 변화 추이 (PMS 데이터 이용 분석결과)

### 제 3 절 탈기기 추기 증기압력 측정용 도압관 점검

저압터빈에서 D/A 로 추기되는 배관 노즐에서의 증기압력(PT151, PT152, PT153) 측정결과 그림 5.3 와 같이 저압터빈 A 추기단 압력이 상대적으로 낮게 측정되었으며 압력 변동폭 또한 크게 나타나고 있음을 확인하였다.

이러한 현상은 저압터빈 추기단 노즐에서 Hood Side Lagging 으로 연결된 도압관의 Crack 가능성을 내포하고 있으며, 현재 상태로는 그 정도가 경미하나 향후 지속적인 운전 시 진전될 수 있으므로 차기 정비기간 중 점검이 필요하다.

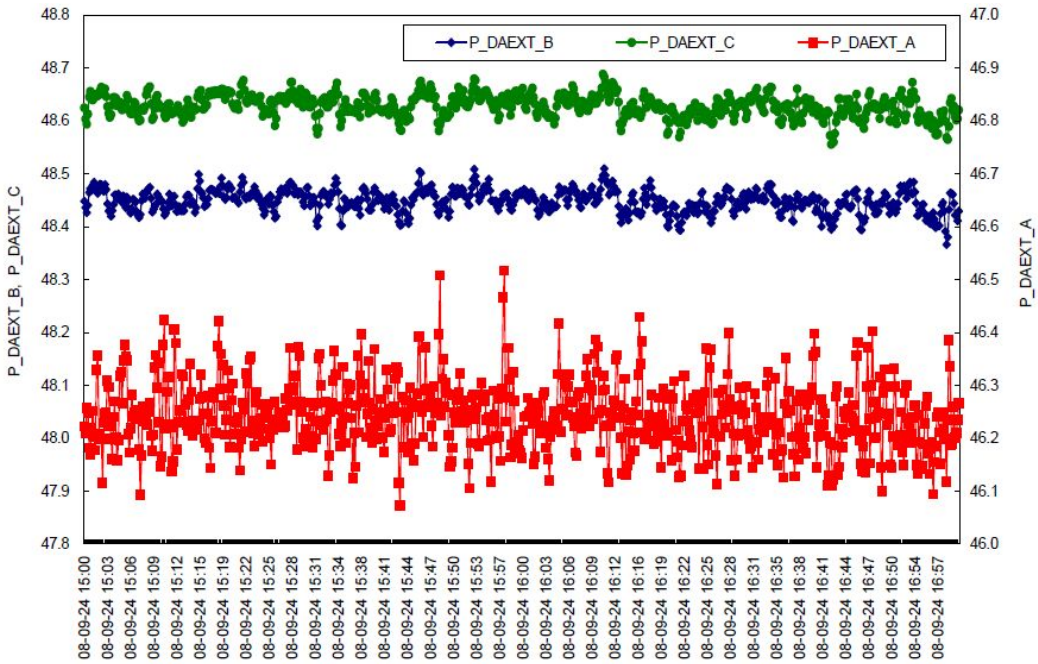


그림 5.3 한빛 5호기 성능진단 시험 중 D/A 추기 압력 변화추이

## 제 4 절 성능관리를 위한 기준발전단 전기출력 신호 선정

2002 년 한빛 5호기 인수성능시험에서는 정확한 발전단 전기출력 측정을 위해 정밀 전압계 및 전력량계를 특설하였으나, 본 성능진단에서는 특설 전력량 측정 시스템 설치과정에서의 발전소 안전성 문제를 고려하여 기존 발전소 내 전력량계를 사용하였다.

소내 전산 신호(PMS) 중 2335-MPJ0001 는 표 5.2 과 같이 인수시험 수행 당시 특설 전압계 및 전력량계를 통해 측정된 전기출력과 가장 근접한 오차 (0.129%)를 보이고 있었으며, 2008 년 성능진단 시 사용된 소내 전력량계 측정 값에 소내 전압계 감압 오차(Turndown Ratio Error)를 보정한 결과와도 표 5.3와 같이 매우 일치하는 것을 확인하였다. 따라서, 향후 매 주기별 간이 성능 시험 등 성능관리를 위한 발전단 전기출력 기준으로 MPJ0001 를 사용할 것을 추천한다.

인수성능시험 발전단 전기출력	단위	TR01	TR02	TR03	Average
특설 계측장비 측정 전기출력	KW	1,056,874	1,055,835	1,056,334	1,056,348
PMS MPJ0001 지시 전기출력	kW	1,058,560	1,057,040	1,057,538	1,057,713
편차	%	-0.16%	-0.11%	-0.11%	<b>-0.129%</b>

표 5.2 한빛 5호기 발전단 전기출력 오차 분석 1

2008 년 성능진단 발전단 전기출력	단위	TR01	TR02	TR03	Average
소내 전력량계 측정치 x 0.9970	KW	1,045,070	1,046,149	1,044,555	1,045,258
PMS MPJ0001 지시 전기출력	kW	1,045,047	1,046,089	1,044,441	1,045,192
편차	%	0.00%	0.01%	0.01%	<b>0.006%</b>

표 5.3 한빛 5호기 발전단 전기출력 오차 분석 2



## 제 6 장 결 론

본 연구에서는 한빛 5호기 2차 계통 정밀 열성능 성능진단 결과로 2차계통 효율 향상을 위한 여러 방안을 도출하였고 현장에 그 방안을 적용함으로써 발전소 출력을 향상시키고 효율을 개선하였다.

첫째, 보정된 정격조건 발전단 전기출력은 1,047,345kW로 인수성능대비 4,300kW 저하된 것으로 분석되었으며 성능저하의 주요요인은 MSR 및 급수계통/복수계통 BOP 성능저하와 벤츄리 노즐 파울링으로 분석되었다. 특히 주급수 유량측정 벤츄리 노즐 검교정 성적서 및 진단시험 시 측정된 주급수 유량의 비교 분석을 통해 증기발생기 B 측 "Y" Tap 이 ASME PTC 19.5 의 요구조건을 만족하지 못함을 이번시험을 통해 확인하고 개선하므로 문제점을 해소하였다.

둘째, 상업 운전 이후 현재까지 2차 계통의 성능 노후화 자료 및 터빈 사이클 Heat Balance 분석을 통한 주요 단위 설비별 성능지표 자료를 확보하였다

이는 2차 계통 효율 최적화 및 주요 단위설비별[터빈, 급수가열기,복수기,습분분리재열기,펌프등] 성능 노후화 관리를 위한 기술적인 방향을 제시할 수 있게 되었다.

2차계통 정밀 열성능시험 결과를 지속적으로 보완하여 향후 국내 원자력 발전소의 성능관리를 위한 기준으로 확립함으로써 발전운영 효율성을 극대화 할 수 있을거라 확신한다.

## 참고문헌

- [1] EN-P-RPT-007, Turbin Cycle Performance Diagnostic Test Report : , Enesco, 2009
- [2] 한빛3발전소 System Manual(증기발생기 설비)
- [3] EPRI TR-101388, Feedwater Flow Measurement in U.S Nuclear Power Generation Stations, EPRI, 1992.11.
- [4] EPRI-1003472, Level Control Guide for Feedwater Heater, Moisture Separator /Reheaters, and Other Equipment, 2002. 12
- [5] ASME PTC 6.0:Steam Turbines
- [6] ASME PTC 12.1:ClosedFeedWaterHeaters
- [7] ASME PTC 12.2:Steam SurfaceCondensers
- [8] ASME PTC 12.4:MoistureSeparatorreheaters
- [9] ASME PTC 19.1:MeasurementsandTestUncertainty
- [10] ASME PTC 19.2:PressureMeasurement
- [11] ASME PTC 19.3:TemperatureMeasurement