발전용 증기터빈 열성능 진단에 관한 연구

김광홍†·홍은기*·황광원*·장철호*·김시문*

A Study on the Diagnosis of Thermal Performance in the Steam Turbine for Generation

Kwang-Hong Kim, Eun-Kee Hong, Kwang-Won Hwang, Chul-Ho Jang, and Si-Moon Kim

Key Words: Thermal Performance(열성능), Turbine Cycle(터빈사이클), Performance Test(성능시험), Heat Rate(열소비율), Reference Flow(기준유량)

Abstract

This paper describes the results of steam turbine performance tests. The objectives of performance test is to exactly evaluate the degradation(decrease in performance) of the coal-fired steam turbine generator in order to provide plant information to help performance engineers identify problems, improve performance, and make economic decisions about scheduling maintenance and optimizing operation. To achieve these goals, the periodic thermal performance tests have been carried out since the initial operation period, 1997. We made the calculation program and guidelines for the tests and developed the performance index of the turbine cycle on the basis of the ASME PTC. By comparing the performance changes throughout the whole operation period, we confirmed the performance reliabilities of the turbine and its conditions.

기호설명

MMS : 주증기 유량 (kg/h)
HMS : 주증기 엔탈피 (kcal/kg)
MFW : 최종급수 유량 (kg/h)
HFW : 최종급수 유량 엔탈피 (kcal/kg)
MRS : 고온재열 증기 유량 (kg/h)
HHR : 고온재열 증기 엔탈피 (kcal/kg)
MCR : 저온재열 증기 유량 [kg/h]
HCR : 저온재열 증기 엔탈피 (kcal/kg)
MCW : 복수 유량 [kg/h]

† 한전 전력연구원 수화력발전연구소
E-mail : wayitisnow@kepco.co.kr
TEL : (042)865-5314 FAX : (042)865-7761
* 한전 전력연구원

1. 서 론

발전설비 열성능시험(Thermal Performance Test)의 궁극적 목적은 해당 설비의 운전에 따른 열화(degradation) 정도를 파악하고, 이를 토대로 유지보수 계획을 수립하여, 발전소 운영 최적화을 위한 경제적 의사결정을 하는데 도움을 주는 것이다. 본 논문은 터빈설비 인수 이후 지난 10년간의 성능 진단 결과를 요약한 것이다. 연구 대상 설비는 텐덤 복합 응축 과열기(Tandem Compound Type Condensing Reheater)형으로 설계된 500MW급 석탄화력 증기 터빈 사이클을 대상으로 하였다. 해당 터빈 설비의 열화 정도를 확인하기 위해 1997년 설비 인수이후 최근까지 총 4 회의 정밀(Full Scale Performance Test) 성능 시험을 수행하였다.

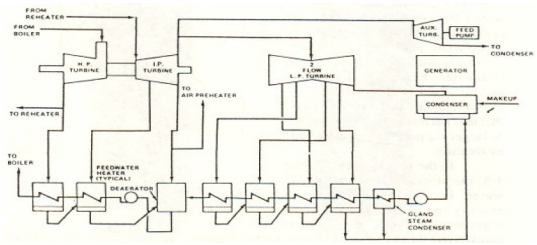

Fig 1 Schematic Diagram of Turbine Cycle

시험 방법은 ASME PTC를 근간으로 실시되었으며, 시험결과의 계산은 자체 제작된 프로그램에 의해 수행되었다. 시험별 성능 테스트 횟수(Test Run)는 시험조건 만족여부 확인을 위한 예비시험을 먼저 실시하고, 100% 부하에서 본시험 2회 및 참고시험으로서 75% 부하시험 등 총 4회의 시험을 실시하고 터빈 사이클 열성능을 측정하였다.

2. 실험방법

2.1 자료 취득 및 터빈 열소비율 지표

ASME PTC 6 Series에 의하면 터빈 열소비율(Heat Rate) 산정을 위한 시험방법은 3가지(Full Scale Method, Alternative Method, Simplified Method)가 있다. 시험방법은 3가지 종류 중 ASME PTC 6에서 권고하는 정밀시험(Full Scale Test Method)을 채택하였다. 실험 데이타를 얻기 위해 성능시험용 계측기 K-type 열전대 온도계 76개, 압력 전송기 40개를 열성능 계산에 필요한 개소에 설치하였다. 정확하고 효율적인 실험 자료 수집(Data gathering)을 위해 Fig 2와 같은 데이터취득 장치 KEPRI-DAS(Data Acquisition System)을 구축하였다.

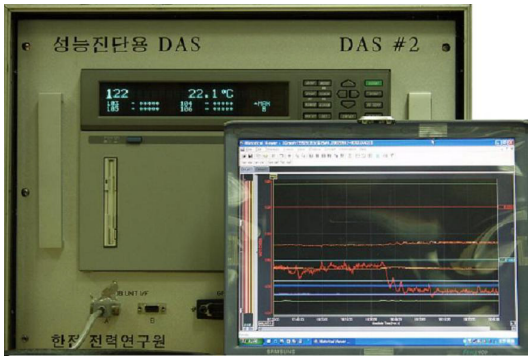

Fig 2 Data Aquisition System(KEPRI-DAS)

성능시험시 각 개소별로 측정된 자료는 검증작업(validation)을 통해 계산에 필요한 대표값을 구하고, 측정기구 특성에 따른 보정을 실시하였다. 터빈 사이클의 성능지표인 열소비율은 터빈 사이클 시험 범위(Test Boundary)에서 실제 전기 출력 생산에 사용된 열소비량(공급열-반환열)을 이용하여 식 (1) 열소비율(kcal/kWh)로 표시된다.

$$\text{열소비율} = \frac{\text{공급열} - \text{반환열}}{\text{발전기출력}} \qquad (1)$$

열소비량 = 공급열 - 반환열

=MMS (HMS - HFW) + MRS (HHR - HCR)

여기서 각 유량, 출력 및 엔탈피는 측정치 또는 계산치이며, 이를 통해 계산된 열소비율에 Group1 및 Group2 보정을 행하여 최종 보정 열소비율을 산정하였다. Group1 보정이란 터빈본체 외의 영향을 설계조건으로 보정하는 과정이고, Group2 보정은 증기조건과 터빈 배기압력을 보정하는 과정이다. 유체의 엔탈피, 엔트로피, 비체적, 비중량, 포화온도 등 열역학 특성치는 열역학 특성치 계산 프로그램, Win Steam 3.0 Table(1999)을 사용하였다.

2.2. 터빈 사이클 유량 산정

2.2.1. 기준유량 측정

탈기기 입구에 설치되어 있는 유량측정장치(교축기구; Flow Nozzle)를 이용하여 터빈 사이클 열수지 및 물질수지 정산을 위한 기준유량으로 사용하였다. 이 차압 발생기구에서 발생되는 차압은 정밀급 차압계에 의해 30초 간격으로 측정값을 취득하였고, 2시간 측정치의 평균값을 발생차압에 의한 유량산출 공식(ASME MFC-3M-1989)에 적용하여 계산하였으며, 그 기본 식은 다음의 식 (2)와 같다.

$$MCW = 0.012522 * C * E * \varepsilon * d^2 * SQR(\Delta P / 10000 * \rho) \qquad (2)$$

C : Coefficient of discharge [무차원수],

E : Velocity of Approach factor [무차원수],

ε : Thermal Expansion factor of Area [무차원수],

d : Flow Nozzle Throat Diameter[㎜],

ΔP : Measured Differential Pressure [㎜Aq],

ρ : Specific Weight of Fluid Water [kg/㎤]

2.2.2 최종급수유량 산정방법

최종급수유량은 탈기기에서의 열수지 및 물질

수지 정산을 기준으로 구한다. 즉, 물질수지 정산에 의해서 식(3), 열수지 정산에 의해서 식(4)를 유도한다.

M5E + M6D + MCW = MDV + iMDW + MRP + MFW (3)

(M5E×H5E) + (M6D×H6D) + (MCW×HCW) = MDV×HDV + iMDW×HDW + (MRP +MFW) × HDW (4)

M5E : Deaerator Heating Steam Flow
H5E : Deaerator Heating Steam Enthalpy
M6D : #6 Heater Drain Water Flow
H6D : #6 Heater Drain Water Enthalpy
MCW : Deaerator inlet Condensate Water Flow
HCW : Deaerator Condensate Water Enthalpy
MDV : Deaerator Vent Steam Flow
HDV : Deaerator Vent Steam Enthalpy
iMDW : Deaerator Tank Level Change Flow
HDW : Deaerator Tank Water Enthalpy
MRP : RH spray Water Flow
MFW : #6 Heater inlet Feed Water Flow

식 (3), (4)에서 엔탈피는 각 위치에서 직접 취득한 온도와 압력에 의해 산정되어지고, 유량 중 M6D는 #8, #7, #6 급수가열기 추기유량의 합이므로 각 급수가열기에서의 열수지에 의해 산정되어지며, MDV는 계통 격리시 차단하여 제로(Zero)화 하고, iMDW는 수위 변화 추이를 측정하여 탈기기 급수 저장조 용량에 따라 산정하고, MRP와 MCW는 유량측정기구에 의해 직접 측정하게 되므로 미지수는 M5E와 MFW 두개이며, 따라서 두 식을 연립하여 풀면 M5E와 MFW를 산정할 수 있다. 그러나, 이 과정 중에서 #6 Heater Drain Flow를 산정하기 위해서는 MFW를 구해야 하므로 최종급수유량의 산정을 위해서 반복계산법(Iteration)을 이용하였다.

2.2.3 주증기 유량 산정

터빈 사이클 물질수지와 열수지 정산에 의하여 터빈입구 주증기 유량을 산정한다. 최종 급수유량이 확정되면 보일러 증발량인 주증기 유량은 식 (5)로 구해진다. MBSP, MBCL 및 MLKS는 터빈 입구를 기준으로 한 주증기 유량산정 개념이며 이 항목에 대한 유량이 영(Zero)에 가깝도록 하는 완벽한 계통격리가 필요하다.

MMS = MFW - MBSP - MBCL - MLKS (5)

MBSP : Boiler Sampling Water Flow
MBCL : Boiler Cycle Loss Flow
MLKS : Main Steam leak-off to SSH Flow

2.2.4 재열증기유량 산정

주증기 유량이 확정되면 고압 터빈측 물질수지 정산에 의거 다음 계산식 (6)에 따라 재열증기유량이 산정된다.

MCR = MMS - MLK2 - MLK3 - MLK40 - MLK4 - MLK5 - M8E - M7E (6)

MLK2 : HP Turbine Control Vv leak-off to SSH
MLK3 : HP Turbine leak-off to IP Turbine Flow
MLK40 : HP Turbine Control Vv leak-off
MLK4 : HP Turbine 1st leak-off to Deaerator
MLK5 : HP Turbine 2nd leak-off to SSH Flow
M8E : #8 Extraction Steam Flow
M7E : #7 Extraction Steam Flow

2.2.5 열평형도 작성

주증기 및 재열증기 유량산정이 완료되면 시험결과에 따른 열평형도(Heat Balance Diagram)를 작성한다. 터빈사이클 각 개소의 유량을 산정하고, 터빈 각 부위의 유량 산정이 완료되면 Group 1 보정항목에 대한 보정을 시행한다.

2.2.6 시험결과 보정

성능시험시의 터빈성능은 설계 사이클과 대등한 조건에서 설계 성능과 비교되어야 하므로 설계치 대비 성능시험 운전조건, 즉 증기 및 운전 사이클의 변화 영향에 대하여 성능시험 결과를 보정해 주어야한다. 따라서, 설계 사이클에 상응하는 보정 사이클을 얻기 위하여 성능시험시의 증기 및 운전 사이클 조건 대신에 설계조건을 대입하여 재계산 또는 보정해 주어야 한다.

2.2.6.1 Group 1 보정

Group1 보정이란 급수가열기의 영향을 포함한 다음 항목을 설계조건으로 보정하는 과정을 말한다.

· Feed-Water Heater Terminal Temperature Difference
· Feed-Water Heater Drain Cooler Approach Difference

· Extraction Line Pressure Drops and Heat Loss
· System Water Storage Changes
· Feed-Water Enthalpy Rise(through the Feed Water pumps)
· Condenser Condensate Temperature Depression
· Make-up Water Flow
· Desuperheating Water Flow used to Control Steam Temp.
· Power factor and Generator Hydrogen Pressure
· Speed (Effect on Generator Losses)

2.2.6.2 Group 2 보정

Group1 보정결과에 의해서 산정된 열소비율에 이 열소비율 산정시 적용한 주증기압력, 온도, 재열 온도, 재열압력강하 및 저압터빈 배기압력(LP Turbine Exhaust Steam Pressure)에 대한 Group 2 보정을 보정 곡선에 의해 실시한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 터빈 사이클 열효율

Fig. 3은 설계치와 인수 이후 지난 10년간의 터빈 열성능 변화를 보여주고 있다. '05년 시험결과 45.74%는 인수치 대비 0.27 %P 낮지만, '04년 시험치보다 0.31 %P 향상되어 예방정비효과가 크며, 특히 고압터빈 내부효율 향상 및 N2 Packing 누설률이 감소되었음을 확인할 수 있었다.

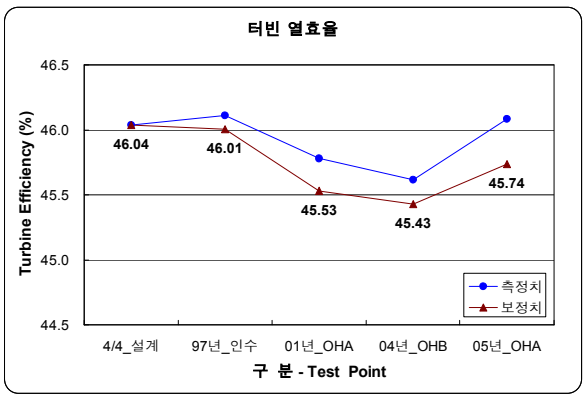

Fig 3 Turbine Efficiency Trend

3.2 급수 및 증기온도 변화추이

Fig. 4는 급수 및 증기온도 변화를 나타내고 있다. '05년 시험치의 최종급수온도가 높아진 것은 N2 Packing 누설률 감소에 의한 #8 추기압력이 높아졌기 때문이며, 주증기/재열증기 온도는 설계치 수준을 유지하였다.

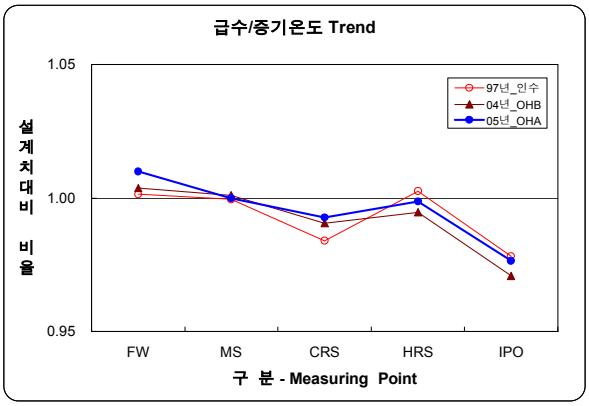

Fig 4 Temperature of Feed-water & Main Steam

3.3 과열기 및 재열기의 과열저감 수량

Fig.5 는 과열기 및 재열기의 과열저감 수량 변화를 나타내고 있다. 과열기 분사(SH Spray)는 최종급수관에서 공급되므로 이 유량 증감은 터빈 효율에는 영향이 없으며, 재열기(RH Spray) 유량은 영(Zero Base)를 유지하여 양호함을 알 수 있다.

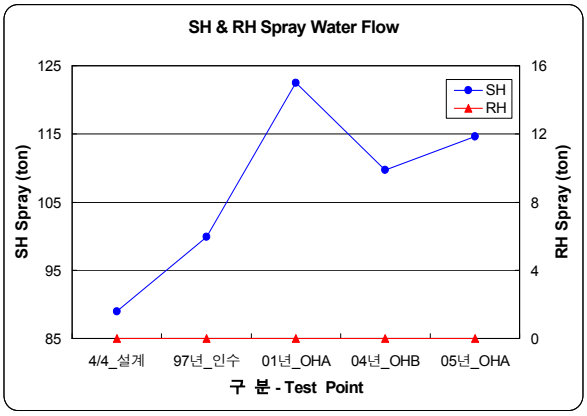

Fig 5 Spray Water Injection Trends

3.4 성능시험 유효성

1차 및 2차 시험 결과가 측정치는 각각 46.08 %와 46.09 %, 보정치는 각각 45.73 %와 45.74 %로 계산되었다.

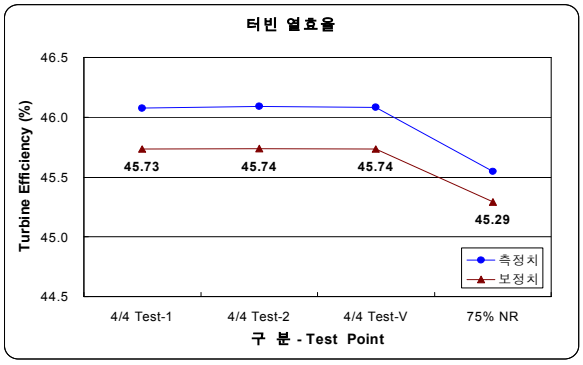

Fig 6 The Result of the 1st & 2nd Test

Fig 6에서 보는바와 같이 1, 2차 시험결과 차이가 각 0.01 %로서 ASME PTC 6의 시험 불확도 0.26 %보다 낮은 수준으로 나타나, 시험의 재현성이 높고 유효성이 충분히 확보되었다고 평가된다.

4. 결 론

터빈사이클 열성능 측정 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

① '05년 터빈효율 측정치는 46.09 %로서 인수치 46.11 %와 같은 수준이며 '04년 정비전 시험치 45.62 % 대비로는 0.47%P 높고, 설계치 46.04 % 대비로도 같은 수준이다. 이와 같이 양호한 수준을 유지하고 있는 것은 N2 Packing 교체 등 예방정비 효과가 컸었기 때문이다.

② 또한 보정치에 있어서도 '05년 45.74 %로서 인수치 46.01 % 대비 0.27 %P 낮은 수준이긴 하지만 '04년 정비전 시험치 45.43 % 대비 0.31 %P 향상되었으며 설계치 46.04 % 대비로는 0.30 %P 낮은 수준이다.

터빈 사이클에 대한 성능시험 결과, 설비 인수 이후 '04년 정비 전 시점까지 지속적으로 감소되던 열효율이 '05년 예방정비작업을 통해 열성능 효율이 대폭 개선되었음을 확인하였으며, 또한 설비의 효율적 운전이 가능함을 예측할 수 있었다.

참고문헌

(1) "화력발전소 성능시험지침", 한전전력연구원, 2006
(2) "계획예방정비공사후 정밀 열성능진단 결과보고서", 한전전력연구원, 2005.
(3) 장석원 외 7명 "화력발전소 실시간 성능감시 및 최적운용 시스템 개발", 한전전력연구원, 2006.
(4) Gray L.Borman and Kenneth W.Ragland. "Combustion Engineering", WCB/ McGraw-Hill, 1998
(5) "STEAM its generation and use 40th ed.", Babcock & wilcox, 1992
(6) ASME PTC 6, 'Performance Test Code for Steam Turbines', ASME, New York, 1991.
(7) ASME PTC 4, 'Performance Test Code for Steam Generating Units', ASME, New York, 1991.
(8) ASME PTC 12.1, 'Performance Test Code for Closed Feed Water Heater', ASME, New York, 1987.