

< 기술논문 >

온라인 웹기반 원전 터빈 사이클 열성능 분석 시스템

김성근[†] · 최기상^{*} · 최광희^{**} · 지문학^{**} · 홍승열^{**}
(2004년 2월 10일 접수, 2004년 12월 29일 심사완료)

Web-Based On-Line Thermal Performance Analysis System for Turbine Cycle of Nuclear Power Plant

SeongKun Kim, KiSang Choi, KwangHee Choi, MoonHak Ji and SeungYeol Hong

Key Words: Heat Rate(열소비율), Measurement Validation(측정 유효화), Nuclear Power Plant Performance (원자력 발전 성능), Turbine Cycle(터빈 사이클)

Abstract

We need to develop a on-line thermal performance analysis system for nuclear power plant to determine performance status and heat rate of turbine cycle. We have developed PERUPS (PERformance UPgrade System) to aid the effective performance analysis of turbine cycle. Procedures of performance calculation are improved using several adaptations from standard calculation algorithms based on PTC (Performance Test Code). Robustness in the on-line performance analysis is increased by verification & validation scheme for measured input data. The system also provides useful web interfaces for performance analysis such as graphic heat balance of turbine cycle and components, turbine expansion lines, automatic generation of analysis report. The system was successfully applied for YongGwang nuclear plant unit #3,4.

1. 서론

원자력 발전소 터빈 사이클은 Fig. 1에서와 같이 증기 발생기, 고압터빈, 습분 분리기, 재열기, 저압터빈, 복수기, 복수기 펌프, 저압급수가열기 그룹, 주급수 펌프, 고압급수가열기 그룹을 순환하면서 발전 출력을 생산하는 사이클로 구성된다.

터빈 사이클의 열평형(heat balance) 분석은 사이클 각 과정 상태에서의 유량, 온도, 엔탈피 등의 상태량을 결정하고 전체 발전 효율, 열소비율(heat rate) 및 기기 대표 변수를 분석하기 위함이다. 발전소 별로 차이가 있으나 각개의 유동 트레인 별로 약 250-300개의 압력, 온도, 유량 등의 데이터들을 측정하게 되

고 열평형을 계산한다. 열평형 계산 결과로부터 터빈 사이클 상태량 데이터가 얻어지게 되는데 발전소 별로 약 1,500개 정도의 상태량 데이터가 얻어진다.

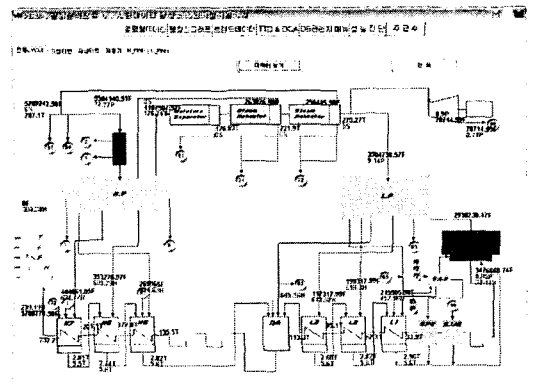


Fig. 1 Heat balance diagram of turbine cycle of nuclear power plant

[†] 책임저자, 회원, 호서대학교 공과대학 기계설계전공
E-mail : kimskun@office.hoseo.ac.kr

TEL : (041) 540-5811 FAX : (041) 540-5818

^{*} 회원, 호서대학교 대학원 기계설계전공

^{**} 회원, 한국전력공사 전력연구원 원자력연구실

이 상태량 데이터를 통하여 터빈 사이클의 대표 성능 지수인 열소비율과 터빈 사이클 효율이 얻어지며, 그리고 각 기기에 대해서는 터빈 효율, 습분 분리기 습분 분리율, 복수기 진공도, 급수가열기 온도 관련 성능 등의 대표 성능 정보가 얻어진다. 본 연구에서 개발된 PERUPS 시스템에서는 웹 인터페이스를 통해 Fig. 1과 같은 전체 사이클 열평형도, 그리고 세부 기기별로 고유한 열평형 분석 결과를 나타내게 된다. 이러한 열평형 분석 결과를 제공하는 주 기능 외에 다음의 기능들이 함께 개발되었다.

- 웹기반 성능 데이터베이스 관리 및 구축
- 온라인 성능 관련 데이터 취득
- 온라인 취득 데이터 검증
- 열소비율 신뢰도 계산
- 사이클 및 단위기기 운전성능 계산
- 웹기반 분석 결과 제공
(팽창선, 추이, 자동보고서)

지난 연구⁽¹⁻³⁾에서는 오프라인 데이터를 사용자가 모아서 입력하는 성능 분석 시스템을 개발하고 검증하였는데 본 연구에서는 온라인 플랜트 데이터를 연결하여 성능 분석을 하는 절차를 개발하고 이에 적합하게 유효 데이터를 검증하여 적용하는 시스템과 절차를 개발하였다. 오프라인 시스템 대비 변화된 내용은 다음과 같다.^(4,5)

- 온라인 성능 플랜트 데이터 취득 프로그램
- 단일 트레인화하여 성능 데이터를 결정
- 온라인 취득 데이터 검증
- 유량의 추정 모델, 주급수 유량 검증
- 열소비율 신뢰도 계산
- 웹기반 시스템으로 개발

2. 운전성능 분석 절차

2.1 터빈 사이클 운전성능 분석

터빈 사이클 성능 분석을 위해서 산업 표준인 ASME (American Society of Mechanical Engineers) PTC (Performance Test Code) 6, PTC 6A⁽⁶⁻⁹⁾를 기준으로 하여 터빈 사이클 열평형 계산 및 보정 계산 절차를 구성하였다. 열평형 수렴문제는 터빈 팽창선 끝

점을 독립 변수로 하고 열평형 오차 또는 습분 분리율 오차를 목적 함수로 하는 최적화 문제가 된다. PTC에서의 열평형 수렴의 방법은 몰리에르 차트 상에서 팽창선의 곡률을 이용한 근사해법^(10,11)을 적용한다.

운전 열평형 결과는 터빈 자체뿐만 아니라 터빈 사이클 내 부속기기의 영향이 복합적으로 나타난 것이다. 현재 시험 당시 모든 운전조건이 인수성능시의 조건대로 움직일 수 없으므로 현재 성능과 인수성능과의 정확한 비교분석을 위해서는 계약 보증값과의 비교가 필요하며 이를 확인하기 위해서 그룹 #1, 2의 보정을 시행한다. 이를 위해서는 시험 당시의 운전조건을 설계 또는 인수 당시의 열평형에 나타난 운전조건으로 맞추고 변화하는 전기출력 및 열소비율을 구하여 시험 당시의 값을 보정하여야 한다.

보정은 크게 복수 및 급수 계통이 전기출력 및 열소비율에 미치는 인자(그룹 1)와 터빈 계통의 성능을 좌우하는 인자(그룹 2)에 대해서 시행한다. 보정 항목은 터빈을 제외한 사이클 내 주요 기기들의 성능을 설계조건 기준으로 변환시켜 주면서 사이클 열평형 계산을 행하는 그룹 #1 보정 계산과 터빈 제작사가 제공하는 보정 곡선을 이용하여 외부로부터 터빈에 직접적으로 영향을 미치는 항목에 대하여 각각의 영향을 개별적으로 보정해주는 그룹 #2 보정으로 이루어진다.^(12,13) 정확한 보정을 위해서는 보정해야 할 양을 직접 계산하여야 하나 계약자와 협의 하에 보정곡선을 사용하도록 PTC 6.1-1984에서 추천하고 있다. 또한 100% 부하 시험은 거버너 밸브의 초과 드로틀 및 전기 열출력의 측정과 설계값의 차이에 대해서도 보정해야 한다. 본 연구에서는 현재 영광 원자력 발전소에서 사용하고 있는 영광 제2발전소 운영 절차를 기본으로 온라인 성능 분석 특성에 맞는 보정 성능 계산 절차를 개발하였다.

터빈 사이클 운전 열평형 계산을 위하여 Fig. 2와 같은 계산 절차를 적용하였다. 증기발생기 입구에서 고압급수가열기를 거쳐 저압급수가열기로의 열평형 계산을 끝낸 후, 여기에서 결정된 각 급수가열기 추기 단의 유량을 기초로 하여 터빈 측의 추기유량 및 상태량을 결정한다. 각 습분 분리단과 추기 단의 건 기준 효율과 습분 보정에 의한 팽창선과 반복 계산 절차를 통해 각 추기 단에서의 상태량을 계산한다.

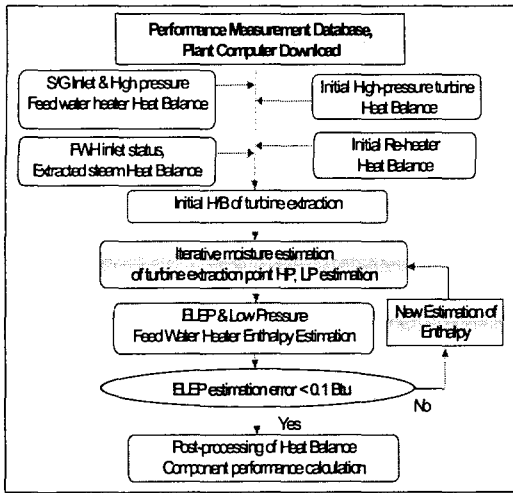


Fig. 2 Procedure for calculation of operating heat balance of turbine cycle

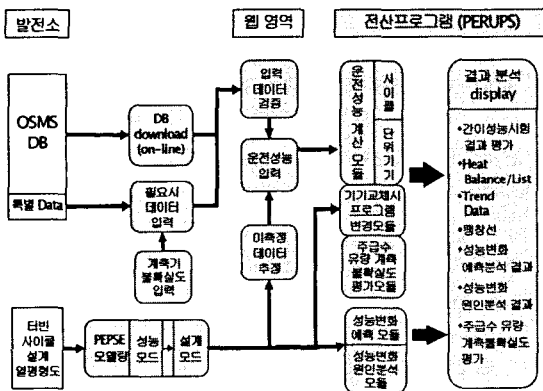


Fig. 3 Components of PERUPS

이를 바탕으로 저압 터빈 ELEP (Expansion Line End Point) 계산이 이루어지며, 새로운 팽창선에서 계산된 ELEP와 추정된 ELEP의 차가 ASME PTC의 영국단위계로 허용 편차 0.1 Btu/lb를 초과하면 추정 ELEP 대신 계산된 ELEP를 이용하여 터빈 팽창선을 재구성하고 반복 열평형 계산 과정에 들어가게 된다.

본 연구를 기반으로 구성된 열성능 분석 시스템 (PERUPS)^(4,5)은 웹 기반으로 구성되었으며 영광 3,4호기를 대상으로 설치 적용되었다. 전체적인 시스템 구성은 Fig. 3과 같다. 플랜트 컴퓨터와 연동 구성하여 온라인으로 성능 데이터를 취득, 수집하는 시스템을 구성하였으며, 웹을 기반으로 구성하여 사용

자가 쉽게 사용할 수 있도록 구성하였다.

본 연구에서는 PTC를 기반으로 하였으나, 인수성능 데이터를 원용하여 급수 가열기 라인의 급수 엔탈피 분포와 탈기 입구 증기량 대 출구 포화수량의 비, 저압 급수 가열기 1번으로 유입되는 포화증기량의 터빈 추기단별 분포 모델을 추가적으로 만들고 이를 성능 분석 모델에 편입시켜 성능 분석 방법을 구성하였다.⁽⁵⁾ 또한 반드시 측정되어야 하지만 계측기가 설치되어 있지 않은 드레인 유량에 대해서는 주증기 유량과의 관계 모델을 만들어 새로 적용하였으며, 건기준 효율로부터 습분 분리단의 습분을 반복하여 수정하는 알고리즘을 개발하여 습분분리단의 열평형 계산에 적용하였다.

2.2 운전성능 분석 모델의 구성

운전성능 상세 분석 모델은 다음과 같이 구성하였다. 증기발생기 입구와 고압 급수가열기를 구성하고 있는 각 기기의 전후 상태량을 파악한 후 각 급수가열기의 질량 및 에너지 평형을 통하여 각 상태량의 압력, 온도, 및 엔탈피 변화를 산출하였다. 고압 급수가열기(FWH, Feed Water Heater) 각 부분의 상태량 계산을 계산하고, 고압 FWH 추기량 산정을 하며, 열평형 방정식을 구성하여 주 급수량 등과 추기량 등을 산정하였다. 저압 급수가열기 각각의 측정값에 대한 상태량을 파악한 후 FWH 추기 중 습분분리단과 습증기 상태에 위치한 부분의 엔탈피를 추정하여 저압급수가열기 전체에서의 열평형을 통하여 각 저압급수가열기로의 추기 유량을 계산하였다. 저압 FWH 각 부분의 상태량 계산 후에 저압 FWH 각 단의 추기 및 주급수량 산정을 하게 된다.

본 연구에서는 저압 FWH #1, #2 추기의 상태량 추정을 위해서 인수 성능시의 저압 급수 가열기 1번으로 유입되는 포화증기량의 터빈 추기단별 분포를 이용하여 터빈 팽창선을 추정된 후 FWH #1,2의 추기에 해당하는 각각의 엔탈피를 추정하였다.

증기 발생기 입구에서 고압급수가열기를 거쳐 저압급수가열기로의 계산을 끝낸 이후, 이로부터 결정된 각 급수가열기의 추기 단의 유량을 기초로 하여 터빈 축의 추기유량 및 상태량을 계산한다. 증기 발생기 입구 급수량으로부터 증기 발생기와 주 증기관의 질량 평형을 통해서 주증기 유량을 계산하며, 교축 밸브 및 누설 증기량 계산을 위해서는 누설 증기량에 대한 PTC의 계산절차에 따라 누설계수와와의 비례식으로 결정하였다.

Table 1 Comparison between calculated results and manufacturer's data

Symbol	Description	Manufacturer's Data	PERUPS Calculated Data	Unit
WEht_1	HP #1 Ext. STM Flow to FWH	404061	404018	kg/h
WEht_2	HP #2 Ext. STM Flow to FWH	353277	353261	kg/h
WEr_i	1st R/H Inlet Heating STM Flow	263027	263107	kg/h
HSit_i	LP TBN Inlet Steam Enthalpy	714.4	714.4	kcal/kg
HEit_1	LP #1 Ext. STM Enthalpy to FWH	665.2	665.0	kcal/kg
HEit_2	LP #2 Ext. STM Enthalpy to FWH	643.9	641.5	kcal/kg
ELEpit	LP TBN ELEP	539.0	539.1	kcal/kg
UEEPit	LP TBN UEPP	548.3	548.4	kcal/kg
NHRcy	TBN Cycle Net Heat Rate	2315.6	2315.2	kcal/kWh
GHRcy	TBN Cycle Gross Heat Rate	2315.6	2315.2	kcal/kWh

각 터빈부의 증기 누설량 산정은 역시 교축 밸브의 누설량 산정방법과 마찬가지로 누설계수와와의 비례식으로 결정하였다. 고압 및 저압 각 터빈부의 추기량 산정은 급수 가열기 측 추기량으로부터 추기관에서의 증기유량 출력을 고려하여 터빈 측 추기량을 계산하였다.

재열 라인에서의 증기량 계산은 습분 분리기와 재열기에서의 입 출구에서의 출입 증기의 유량을 가감해서 계산하고 각각 계산을 통해 상태량을 결정하며, 벤트 유량과 드레인 유량과의 비는 설계치를 적용하였다. 각 습분 분리단과 추기 단의 건 기준 효율과 습분 보정에 의한 팽창선 계산과 반복 계산 절차를 구성하여 각 추기 단에서의 상태량을 계산하였다. 복수기 평형을 위해서는 급수가열기를 거쳐서 산정되는 복수량과 터빈을 거쳐서 산정되는 유량이 동일해야 하며 이 차이는 미 측정 손실로 조정하였다.

인수성능과 동일 운전 조건에서 본 연구의 성능 분석 방법에 따라 계산된 성능 결과와 영광 3,4호기 제작사가 제시한 주요 데이터⁽⁵⁾의 비교 결과가 Table 1에 나와 있으며 기준치내로 오차 범위가 들어와 있음을 확인할 수 있었다. Table 1에서 제작사 데이터는 영광 3,4호기의 건설 직후 인수 성능 시험에서 미국 제너럴 일렉트릭 등을 비롯한 발전소 건설 회사들이 계산하고 제시하여 인수성능으로 공식 인정을 받은 데이터이다.

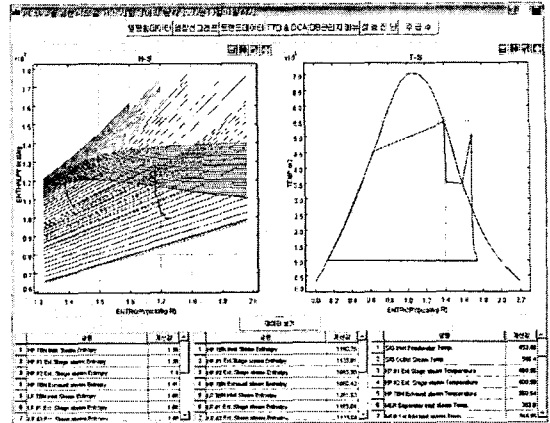


Fig. 4 Turbine expansion line diagram

이 데이터들은 제너럴 일렉트릭 등에서 ASME PTC 기준 절차와 특설 측정 장치를 이용하여 계산된 데이터이며, PERUPS 계산 결과는 본 연구에서 개발된 프로그램으로 계산된 결과이다. Table 1의 단위계는 영광에서 사용되는 메트릭 단위계로 표시하였다. 계산에 필요한 조건 데이터는 미국 제너럴 일렉트릭 등에서 인수 성능 계산 시에 사용한 데이터와 동일 조건하에서 계산하였다. 이 결과를 통해 본 연구에서 개발된 성능 분석 방법과 계산 프로그램을 사용한 열평형 계산 결과가 발전소 성능 기준인 인수성능 계산 결과와 거의 일치하게 나온다는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 개발된 발전소 성능 계산 프로그램은 Fig. 1의 열평형도와 다음의 Fig. 4와 같은 터빈 팽창선도(Turbine Expansion Line) 등을 제공하여 웹상에서 사용자가 쉽게 성능 분석을 하도록 적용되었다.

2.3 단위 기기성능 분석

트레인별로 고압 터빈, 저압 터빈, 재열기, 습분분리기, 복수기, 저압 급수가열기 그룹, 탈기, 고압 급수 가열기 그룹, 펌프류의 운전 열성능 모듈을 개발하였으며, 터빈 사이클 계산 결과와 트레인별 단위 기기의 연결 모듈을 개발하여 사이클 및 단위 기기의 운전 성능 계산이 일관적으로 이루어지게 구성하였다.

터빈 사이클의 터빈, 급수가열기 등의 주요기기는 두개 내지 세 개의 트레인으로 구성되어 유동이 각 트레인 별로 이루어져 있다. 그러나 터

빈 사이클의 전체 열평형도 및 성능 분석은 단일 트레인으로 하는 것이 일반적 관례이다. 이를 위해서 유량의 단일 트레인화는 각 트레인 유량의 합으로 처리하면 되지만 압력, 온도 등은 트레인 간의 유량 분포 비율 등에 따라 취득 포인트 별로 계산하는 절차를 따로 구성해서 처리하였다. 이전까지의 연구에서는 단위기기도 개별 트레인이 아닌 단일 트레인으로 가정하고 분석하였는데, 본 연구에서는 개별 트레인 분석이 가능하도록 구성하였다.

터빈의 내부 효율 계산은 추기단 입구의 상태량과, 출구 압력, 그리고 등 엔트로피 테이터와 팽창선 수식으로부터 정해지며, 각 추기단과 습분 분리단에서의 반복계산을 통해 건 기준 효율에서부터 수정된 습분분리효율을 추정하고 분리단의 열평형을 추정하였다. 복수기 성능 분석에서는 별도로 냉각수 온도, 냉각수 염도, 튜브 플러깅 수(TPmc) 등을 취득하고, 냉각수 온도 상승, 복수기 포화 증기 온도, 초기 온도차, 종단 온도차, 전열 면적, 냉각수 유량, 튜브내 냉각수의 유속, 대수평균 온도차(LMTD), 복수기 청결도 등에 대한 분석이 이루어진다.

급수 가열기의 대표 성능 변수는 TTD (Terminal Temperature Difference)와 DCATD (Drain Cooler Approach Temperature Difference)으로 구성한다. 급수 가열기는 그 구성에 따라 3-영역, 2-영역, 1-영역 급수 가열기와 같이 나뉘며 각각에 따라 계산식이 달라진다. 트레인별 급수 가열기 성능 계산을 위하여 튜브 플러깅 수(TPo), 드레인 레벨 등은 따로 온라인 입력되도록 구성하였다. 습분분리 재열기에서는 습분 분리 효율, 재열기 열부하, 전열 면적의 계산, 재열기 대수평균 온도차와 열전달 계수, 온도효율과 재열기의 종단 온도차에 대한 분석 결과가 구성되었다.

3. 보정 성능의 계산

3.1 그룹 1 보정

그룹 1의 보정 계수는 복수 및 급수 계통이 열 소비율에 영향을 주는 인자를 보정함으로써 터빈 및 발전기만의 성능을 비교분석하기 위해 사용한다. 단 영광 3, 4호기의 경우 공기 추출기 유량은 미미하여 보정인자에서 제외 하였다. 본 연구에서 적용한 보정항목은 다음과 같이 구성하였다.

(1) 고압 FWH #7 종단 온도차(TTD) 보정
 급수 가열기 성능을 고려한 터빈/발전기의 보정은 #7번 급수 가열기가 터빈으로부터 직접 추기를 받고 다른 가열기에 비해 터빈/발전기에 미치는 영향이 상대적으로 크므로 #7번 가열기만 Group 1 보정에 포함시켰다.

$$TTD = T_s - T_o \quad (1)$$

TTD : #7번 가열기 종단 온도차
 T_s : 급수 가열기 셀압력의 포화온도
 T_o : 급수가열기 급수 출구 온도

(2) 고압 FWH #7 배수 온도차(DCATD) 보정
 DCATD = T_d - T_i \quad (2)

DCATD : #7번 배수 냉각 온도차
 T_d : 급수 가열기 급수 입구 온도
 T_i : 급수가열기 Shell측 배수 온도

(3) 고압 급수 가열기 #7 추기관 압력강하 보정
 급수 가열기 #7로 연결된 추기관 압력 강하 계산은 터빈 셀측 압력에서 터빈 플랜지까지의 압력 강하를 2.05%로 가정하여 터빈 플랜지 압력에 2.05%를 보정한 것을 터빈 셀측 압력으로, 가열기 #7 셀측 압력들의 평균을 가열기 셀측 압력으로 계산하여 그 차이에 대한 백분율로 구한다.

(4) 급수 펌프 엔탈피 증가 보정
 $\Delta H = H_o - H_i \quad (3)$

H_o : T_o, P_o에서의 급수 엔탈피
 H_i : T_i, P_i에서의 급수 엔탈피
 T_o : 가동 중인 급수 펌프 평균 출구 온도
 P_o : 가동 중인 급수 펌프 평균 출구 압력
 T_i : 가동 중인 급수 펌프 평균 입구 온도
 P_i : 가동 중인 급수 펌프 평균 입구 압력

(5) 급수 펌프 터빈 증기 유량 보정
 급수 펌프 터빈 증기 유량의 보정은 증기 발생기에서 생성된 주증기중 일부가 터빈/발전기에서 아닌 급수 펌프의 터빈을 구동시키는데 사용되므로 이의 보정에 필요하다.

$$\%FLOW = \frac{\text{급수 Pump 터빈기유량}}{\text{증기발생기증기유량}} \times 100 \quad (4)$$

(6) 복수기 과냉각 보정
 복수기 과냉각에 대한 보정은 설계 시 복수기의 복수 온도가 포화온도라 가정하고 설계를 하나 실제로는 과냉각 되어 있으므로 이를 보정하기 위해서 사용하였다.

$$\text{복수기 과냉각} = T_{\text{sat}} - T_w \quad (5)$$

T_{sat} : 복수기 내 압력에서의 포화온도
 T_w : 복수기 Hotwell 온도

(7) 증기 발생기 취출수 유량 보정

증기 발생기 취출수량 보정인자는 보정곡선에서 VWO(Valve Wide Open) 조건에 해당하는 보정값을 구한 후 다음 식으로 구하였다.

$$\text{보정인자} = 1 - \frac{\text{correction}}{100} \times \frac{\text{설계취출수유량\%} - \text{실제취출수유량\%}}{1\%} \quad (6)$$

3.2 그룹 2 보정

그룹 2의 보정계수는 터빈 계통의 운전 조건이 설계치와 다를 경우 이를 보정함으로써 실제 터빈 및 발전기의 성능을 측정하기 위해 사용하였다. 그룹 2의 보정 항목은 다음과 같다.

- 교축 압력 보정
- 교축 습도 보정
- 저압 터빈 배기 압 보정
- 전기출력(MW) 열 출력 보정인자
- 교축 보정 인자

교축 압력 보정은 고압 터빈 스톱 밸브 전단 증기 압력을 적용하며, 교축 습도 보정은 증기 발생기 출구측 압력과 습분에 의해 정해지는 엔탈피에 의해 정해지는 습분 값을 적용하였다. 저압 터빈 배기 압 보정을 위해 저압 터빈 3개 트레인 배기 압력의 평균값을 적용하였다. 100%보다 적은 열출력의 경우 전기출력 보정이 필요하며 해당 플랜트의 100% 열 출력에 해당하며 보정인자를 사용하여 전기 출력에 대해서만 보정한다.

100% 부하 시험의 결과는 그 시험수행이 세번째 밸브 위치와 네번째 밸브 위치 사이에서 시행되기 때문에 가버너 밸브 교축에 대해서 보정해야 한다. 열소비율과 부하에 관한 보정 항목은 다음 식으로부터 주어진다.

$$C_{\text{thr.hr}} = 1 + \frac{\%Change}{100} \quad (7)$$

여기서 %Change는 교축 유량(TFR, Throttle Flow Rate)을 계산 후 보정 곡선에서 구한다.

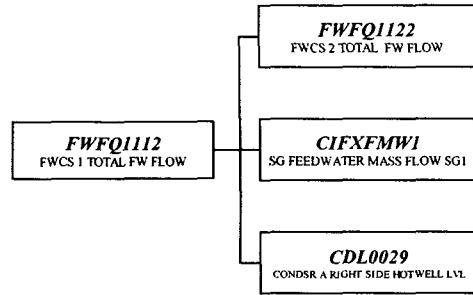


Fig. 10 Correlated variables for main feed water flow

$$TFR = \frac{M_1}{VWO} \times \left[\frac{P_d \div V_d}{P_t \div V_t} \right]^{1/2} \quad (8)$$

- M_1 : 시험 당시 터빈으로 들어가는 주증기 유량
- VWO : Valve Wide Open시의 주증기 설계 유량
- P_d, V_d : 고압터빈 증기 Stop Valve 전단의 설계 압력과 비체적
- P_t, V_t : 고압터빈 증기 Stop Valve 전단의 시험 압력과 비체적

3.3 보정 결과

보정 계산 결과를 정확하게 하기 위해서 본 연구에서는 구성된 온라인 데이터를 사용하기 전에 온라인 취득 데이터의 검증은 하기 위한 절차를 적용하였다. 오프라인 입력 검증 방식⁽⁴⁾에서 적용한대로, 상관관계에 의한 추정용 변수를 선택하고 추정 회귀 모델을 구성하여 보정 데이터를 구성하는 기본 원칙은 그대로 적용하였다. 이전의 연구⁽²⁾에서는 유사 플랜트의 수집데이터를 이용하여 상관관계 분석을 하였으나 본 연구에서는 영광 3호기와 4호기의 데이터를 전용으로 취득하고 이력데이터를 포함한 데이터 세트로부터 상관관계와 추정 모델을 구성한 것이 이전 연구와의 차이점이다. 한 예로 주급수 유량에 해당하는 FWFQ1112 취득 데이터의 상관 변수들과 이를 이용해서 추정한 결과가 Fig. 10과 Table 2에 나와 있다. 심볼 변수 "Measured FWFQ1112"는 주급수 유량의 트레인 #1에 해당하는 유량값이며 측정값이다. 추정값 "Estimated FWFQ1112"는 다음의 단계로 추정된 값이다.

Table 2 Estimated results for main feed water flow

Measured FWFQ1112	Estimated FWFQ1112	Estimation Error(%)
2920000	2926402.6	-0.342
2930000	2930091.5	0.341
2910000	2918764.7	-0.344
2940000	2935714.2	0.340
2950000	2939333.6	0.339
2910000	2906778.9	0.344
2930000	2919493.1	0.341
2930000	2930091.5	0.341
2930000	2929033.6	0.682
2940000	2930979.4	0.340
2900000	2898788.9	0.345
2920000	2922202.1	-0.342
2920000	2914234.7	0.342

Table 3 Correction results for operating performance

List of Correction Factor	PERUPS Calculation Result	Power Plant Calculation Result	Corrected Load Difference (MW)
Heater #7 TTD Correction Factor	0.99999	0.999995	-0.00438
Heater #7 DCATTD Correction Factor	1.000073	1.000073	0
Heater #7 Extraction Line Pressure Drop Correction Factor	1.000675	1.00067	0.005178
Feed water Pump TBN Steam Flow Correction Factor	1.00174	1.00174	0.00014
Condenser Sub-cooling Correction Factor	1.000015	1.000015	0.000213
Steam Generator Blowdown Makeup Correction Factor	1.000501	1.000501	2.09E-05
Feedwater Pump Enthalpy Rise Correction Factor	1.002938	1.002934	0.004273
Throttle Pressure Correction Factor	0.99707	0.997078	-0.00773
Throttle Moisture Correction Factor	1.000411	1.000422	-0.01083
LP TBN Exhaust Pressure Correction Factor	0.994756	0.994755	0.000454
M.W Thermal Correction Factor	1.009761	1.009587	0.176271
Throttling Correction Factor	1.003471	1.003427	0.045548
Total Correction Load	1.011389	1.011184	0.208693

(1) FWFQ1112에 가장 상관관계가 높은 3개 변수를 발전소 측정 이력 데이터를 사용하여 결정하여 Fig. 10에 나와 있는 3개 변수를 결정함.

(2) 회귀모델로 3개변수를 독립변수로, FWFQ1112를 종속변수로 하는 예측모델 구성.

(3) 현재 측정된 3개 변수값을 2)항의 모델에 대입하여 추정값 "Estimated FWFQ1112"를 얻음.

추정에 사용되는 변수들은 상관관계가 매우 높은 변수들이며, 거의 100% 부하에서 운전되는 발전소 운전 특성상 변동 비율 폭이 매우 작은 관계로 추정 오류는 대개 1% 이내에 있는 경향이

있었다.

온라인 취득데이터에 대한 보정 항목의 비교 결과는 다음의 Table 3에 나와 있다. 제작사 제공 데이터를 기준으로 한 절차서 기준에서 제시하는 보정계수와 본 연구에서 개발된 절차에 의해 결정된 보정계수 데이터가 유효하게 거의 일치함을 확인하고 PERUPS 성능 분석 시스템에 적용될 수 있었다.

4. 결 론

터빈 사이클에 대한 정확한 성능 분석에 의해서 원자력 발전소의 향상된 경제성 운전을 할 수 있게 된다. 유용하고 정확한 성능 분석을 위해서 본 연구에서는 온라인 데이터 취득 시스템과 직접 연결된 성능 분석 시스템을 개발하였으며, 신뢰성을 위해 PTC기준을 바탕으로 인수 성능 데이터를 원용하여 성능 분석 절차를 개선하였다. 발전소 설계 데이터, 인수 성능 데이터 및 기타 정상 운전에서의 데이터를 기준 데이터로 온라인 데이터의 검증에 대한 절차를 개발하여 정확한 성능분석 및 보정계산이 가능하게 하였다. 사용자가 편리하게 사용할 수 있는 웹기반 시스템으로 개발하여 기존의 영광 3,4호기 원자력발전소 성능 분석 시스템에 통합하여 보다 정확한 성능 분석을 할 수 있는 성능 분석 시스템을 구축하였다.

후 기

본 연구는 한국수력원자력(주)의 연구비 지원과 영광 3, 4호기 발전운영부의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kim, S.K. and Choi, K.H., 2001, "Development of Performance Analysis System (NOPAS) for Turbine Cycle of Nuclear Power Plant," *Journal of Korean Nuclear Society*, Vol. 33 No. 1, pp. 211~218.
- (2) Kim, S.K. and Choi, K.H., 2000, "Development of Performance Analysis Methodology for Nuclear Power Plant Turbine Cycle Using Validation Model of Performance Measurements," *Tran. of the KSME (B)*, Vol. 24, No. 12, pp. 1625~1634.

- (3) Kim, S.K. and Choi, K.H., 2000, "Thermal Performance Analysis System Based on Measurement Validation for Nuclear Power Plant," *4th KSME-JSME Thermal Engineering Conference*.
- (4) Korea Hydraulic and Nuclear Co., 2003, "User's Guide for PERUPS, Programmer's Guide for PERUPS, Technological Guide for PERUPS."
- (5) Korea Hydraulic and Nuclear Co., 2003, "Development of Thermal Performance Analysis Computer Program on Turbine Cycle of Yonggwang 3,4 Units," Research Report Korea Hydraulic and Nuclear Co.
- (6) American Society of Mechanical Engineers, 1976, Performance Test Code 6, "Steam Turbines."
- (7) American Society of Mechanical Engineers, 1982, Performance Test Code 6A, "Appendix A to Test Code for Steam Turbines."
- (8) American Society of Mechanical Engineers, 1978, Performance Test Code 12.1, "Closed Feed Water Heaters."
- (9) American Society of Mechanical Engineers, 1983, Performance Test Code 12.2, "Steam Condensing Apparatus."
- (10) Glorian, D., 1995, "Performance of Thermal Generating Plants Worldwide: Current Situation and Outlook," *8th Int. Conference & Exhibition for the Power Generating Industries, USA*, pp. 337~350.
- (11) Munchausen, J. H., 1995, "EPRI Performance Enhancement Program," *Proceedings of the American Power Conference, USA*, pp. 519~521.
- (12) Spencer, R.C., Cotton, K.C. and Cannon, C.N., 1974, "A Method for Predicting the Performance of Steam Turbine-Generators, 16,500KW and Larger," *General Electric Co. Report*.
- (13) British Electricity International, 1991, "Modern Power Station Practice: Volume G Station Operation and Maintenance."
- (14) Kim, S.K. and Han, S.T., 1996, "A Study on the Computerization of Performance Evaluation for Thermal Power Plant," *3rd KSME-JSME Thermal Engineering Conference*.