

2차계통 구성 기기의 성능저하에 따른 Heat Rate 변화 분석

박 성훈, 최 해윤, 이 기원, 지 성구, 권 중수

한국원자력연구소

요 약

원자력 발전소의 효율증대 및 경제적인 측면에서 2차계통 구성부품의 보수 및 유지를 위해서는 발전소 2차계통 구성 기기의 성능저하로 인한 Heat Rate의 변화와 그에 따른 출력변화를 감시하는 것이 무엇보다 중요하다. 이를 위하여, 영광 3호기의 성능보증 시험시 사용한 방법을 이용하여 Heat Rate를 계산하는 프로그램을 개발하였으며, 이 프로그램을 이용하여 2차계통 주요 구성 기기의 성능저하에 따른 Heat Rate의 변화율 계산을 수행하였다. 이 프로그램의 계산결과와 영광 3호기 성능보증 시험결과를 비교하여 이 프로그램이 Heat Rate를 정확히 계산할 수 있음과, Heat Rate의 변화율 계산의 타당성을 확인하였다. 또한, Heat Rate의 변화율을 이용한 2차계통 주요 구성 기기의 성능진단 시스템의 논리를 제시하였다.

1. 서론

원자력 발전소 운전에서 열효율을 유지하는 것은 경제적인 측면에서 중요한 사항이다. 2차계통 기기의 성능저하가 열효율에 매우 중요한 영향을 준다는 것은 잘 알려진 사실이며, 2차계통 기기의 성능을 효과적으로 감시하고 보수유지에 대한 사항을 결정하는 데에 기여할 수 있는 시스템을 개발하기 위한 많은 노력이 있었다. 한가지 예로 ABB-CE가 개발한 CEPIP (CE Productivity Improvement Program)을 들 수 있는데, 이 프로그램은 전문가 시스템의 개념을 바탕으로 실시간으로 2차계통 기기의 성능을 진단하는 프로그램이다.⁽¹⁾ 하지만, 이 프로그램은 매우 많은 측정 자료를 필요로 하여, 발전소에서는 Heat Rate의 진단 및 감시를 하는 데에 있어서 효과적인 프로그램으로 인정하고 있지 않고 있다. 또한 영광 3, 4호기에서는 발전소 감시계통(PMS)내에 BOP 성능 계산 프로그램이 있어서, 급수 가열기, 급수펌프, 급수펌프 터빈, 복수 펌프, 순환수 펌프, 터빈 사이클, 습분분리재열기, 복수기 및 급수 부스터 펌프 등의 성능을 프로그램 내에 설정된 기준에 따라 비교 및 계산한다. 하지만, 이 프로그램은 각 구성 기기의 계산된 성능변화만을 제공할 뿐, 열효율에 미치는 정량적인 영향에 대한 정보를 제공하지 못하고 있다.⁽²⁾⁽³⁾

원자력 발전소에서 Heat Rate를 감시 및 진단하고, 그와 병행하여 2차계통 구성 기기의 성능저하에 따른 Heat Rate 변화를 계산하여 발전소 효율증대를 위한 측면에서 이를 활용하기 위해서는, 간단하면서도 정확한 Heat Rate 계산이 가능한 프로그램과 각각의 2차계통 구성 기기의 성능저하에 따른 Heat Rate 변화의 정량적 계산이 필수적으로 요구된다.

열수력학적 방법을 이용한 Heat Rate 계산은 정확한 결과를 기대할 수는 있지만, 해당 계통의 모델링이 어렵고, 많은 입력 자료가 요구되어 실시간 계산이 어려운 점이 있다⁽⁴⁾. 본 논문에서는, 열수력학적 방법을 이용하지 않고, 영광 3호기 성능 보증 시험시의 계산 방법을 이용하여 Heat Rate 계산 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램에는 미리 결정된 Heat Rate 변화인자의 변수들만이 요구되어 간단하면서도 정확한 계산을 할 수 있다. 개발된 프로그램의 타당성을 영광 3호기 성능 보증시험 결과와 프로그램의 계산결과를 비교하여 확인하였다. 또한 개발된 프로그램을 이용하여 영광 3호기 2차계통 기기의 성능저하에 대한 Heat Rate 변화율을 계산하였고, 그 결과의 타당성을 영광 3호기의 성능 보증시험시의 측정자료를 이용하여 확인하였다. 계산된 Heat Rate 변화율을 이용하여 Heat Rate의 변화를 예측하고 2차계통 기기의 성능을 진단하는 시스템을 개발하기 위한 논리를 제시하였다.

2. 영광 3호기 Heat Rate 계산 프로그램 개발 및 Heat Rate 변화율 계산

2.1 Heat Rate 계산

영광 3호기 성능 보증시험의 Heat Rate는 다음 식에 따라 계산되었다.

$$HR_C = \frac{HR_U}{C_{HR}} \quad \text{-----} \quad (1)$$

$$HR_U = \frac{W_S(H_I - H_F)}{L_U} \quad \text{-----} \quad (2)$$

여기서, HR_C = 보정된 Heat Rate
 HR_U = 보정되지 않은 Heat Rate
 C_{HR} = 보정 계수
 W_S = 주증기 유량
 H_I = 증기 발생기 출구 엔탈피
 H_F = 급수 엔탈피
 L_U = 전력부하

식(1)의 보정계수 C_{HR} 은 2차계통 기기의 측정 변수들에 대한 보정계수들의 곱이며, 그 변수들은 7번 급수 가열기의 터미널 및 배수 냉각기 온도차, 7번 급수 가열기의 증기 추출관 압력강하, 급수펌프 추출 증기유량, 복수기 과냉각도, 급수펌프 엔탈피 증가, 증기발생기 취출수 유량, 증기압력, 복수기 압력, 증기의 수분함량 등이다. 이 계수들은 기기 공급업체인 GE사에서 제공한 각 기기 들에 대한 보정곡선에 각 기기에서의 측정변수와 TFR(Throttle Flow Ratio) 값을 보정곡선에 입력하여 구한다. 본 논문에서 기술된 Heat Rate 변화율의 결정은 이 보정계수들에 바탕을 두고있으며, 이 보정곡선을 최소 자승법과 Lagrangian Polynomials⁽⁵⁾를 이용한 내삽법을 이용하여 프로그램에 적용하였다.

영광 3호기의 성능 보증시험은 100% 출력과 90% 출력에서 각각 2회씩 모두 4회가 수행되었다. 개발된 프로그램에 4회의 성능 보증시험 자료를 입력하여 계산된 Heat Rate와 성능보증시험에서 계산된 Heat Rate를 비교한 결과, 표-1에 나타난 바와 같이 개발된 프로그램의 결과와 성능보증시험 결

과가 최대 0.3 % 오차내에서 일치함을 확인할 수 있다.

2.2 Heat Rate 변화율 계산

원자력 발전소에서 전기출력의 감소를 야기하는 주요 원인은 잘 알려진 바와 같이 2차계통 증기 발생기, 복수기, 습분분리 재열기, 급수 가열기, 터빈 트로틀 밸브, 증기 발생기 취출수, 터빈 등에서 발생한다⁽⁶⁾. 개발된 Heat Rate 계산 프로그램은 영광 3호기 성능 보증시험에 바탕을 두고 있으므로, 본 논문에서는 위에서 열거한 기기들의 측정 변수, 성능 보증시험시의 입력자료 및 보정계수, 그리고 발전소 감시 계통(PMS: Plant Monitoring System)에서 그 성능이 계산되는 기기의 종류 등을 종합하여, 2차계통 Heat Rate 변화 인자들을 정하고, 그 인자에 대한 Heat Rate 변화율을 계산하였다. Heat Rate 변화율은 3 가지 경우에 대하여 계산하였다. 첫 번째는 설계치를 Heat Rate 계산 프로그램에 입력하여 계산하였고, 두 번째와 세 번째는 100%와 90% 출력에서 수행된 2회의 시험중 각 1회의 측정 자료를 입력하여 계산하였다. Heat Rate 변화 인자와 세 가지 경우에서 계산된 Heat Rate 변화율을 표-2와 그림-1에 나타내었다. 그림의 기울기와 표의 값들을 살펴보면 계산된 Heat Rate 변화율이 세 가지 경우의 계산에서 작은 차이로 일치함을 알 수 있으며, 증기유량의 영향이 가장 크고 복수기 압력 및 급수 온도의 영향 또한 적지 않음을 알 수 있다. 그리고, 7번 급수 가열기의 배수 냉각기 온도차의 영향은 상당히 적음을 보여 준다. 표와 그림에서 설계치를 입력하여 계산된 값은 Test-D로 표기하였고, 100%와 90% 출력의 결과는 각각 Test-1, Test-3으로 표기하였다.

2.3 2차계통 기기 성능진단 시스템 논리

2차계통 기기의 성능을 진단하는 시스템의 논리를 다음과 같이 구현 할 수 있다.

- a) 2차계통의 Heat Rate 예측을 통한 전기출력 변화 예측
 - i) 2차계통 기기의 측정 변수들을 지속적으로 측정 및 감시
 - ii) 개발된 프로그램을 이용하여 일정한 주기로 Heat Rate를 계산하고 시간에 따른 Heat Rate 변화 기록
 - iii) 발전소 운전시간 경과에 따른 각 기기의 성능 변화율 계산
 - iv) iii)의 자료와 Heat Rate 변화율을 이용하여 각 기기의 성능저하에 대한 Heat Rate 변화 및 2차계통 전체의 Heat Rate 변화 예측
 - v) ii)과 iv)의 자료를 비교하고 필요시 iv)를 보정
 - vi) iv) 및 v)의 자료와 기기에 대한 보수 및 유지비용을 적용하여 최적의 2차계통 기기 보수 및 유지 계획 수립 및 이를 발전소 운전에 적용
- b) 비정상적인 전기출력 감소 발생시 보수계획 수립
 - i) 전기출력의 이상 감소 감지
 - ii) i)에 Heat Rate 변화율을 적용하여 각 기기의 Heat Rate에 대한 현재 영향 정도를 평가
 - iii) 비정상적인 전기출력 감소를 야기한 기기 결정

iv) 해당 기기에 대한 보수 및 유지비용을 적용하여 보수계획 수립

위에서 기술된 사항을 그림-2 에 도표로 나타내었다.

3. 결론

원자력발전소 2차계통의 성능 감시에 필수적인 Heat Rate 계산 프로그램을 영광 3호기 성능보증 시험시의 계산방법을 이용하여 개발하였으며, 이 프로그램을 이용하여 영광 3호기 2차계통 기기의 성능저하에 대한 Heat Rate 변화율을 계산하였다. 그리고, 개발된 프로그램으로 계산한 결과를 영광 3호기 성능보증 시험자료와 비교하여 프로그램 및 Heat Rate 변화율 계산의 타당성을 입증하였다.

프로그램과 계산된 Heat Rate 변화율을 더 많은 운전자료를 이용하여 개량하고 보다 확실한 검증을 거쳐, 원자력발전소에서 실시간으로 사용이 가능한 2차계통 성능진단 시스템 개발 및 그 진단자료가 바탕이 되는 보수 및 유지 계획을 수립하는 데에 이용할 수 있을 것으로 기대된다. 보다 유용한 진단 시스템 개발을 위해서는 발전소 감시 계통(PMS)과의 연계를 통한 진단 및 운전 방법의 개선 또한 고려되어야 할 사항으로 사료된다.

4. 참고문헌

- 1) C. CHIU, M. L. VAN HALTERN, B. CHING, "CE Productivity Improvement Program," (1984)
- 2) KEPCO, Yonggwang Nuclear Power Plant Units - 3 & 4, "10287-IC-OG710-00, Plant Computer System Operator Manual"
- 3) KEPCO, Yonggwang Nuclear Power Plant Units - 3 & 4, "Software Requirements Specifications for Balance-of-Plant Performance Calculations"
- 4) Hyun Gook Kang, Poong Hyun Seong, "Development of a Real- Time Thermal Performance Diagnostic Monitoring System Using Self-Organizing Neural Network for KORI-2 Nuclear Power Unit," Journal of the Korean Nuclear Society, Volume 28, Number 1, Feb. (1996)
- 5) D. V. Griffiths, I.M. Smith, "Numerical Methods for Engineers," Blackwell Scientific Publications (1991)
- 6) Chong Chiu, Neal J. Quigley, "A Simplified Method to Identify Causes of PWR Electrical Output Losses," Winter Meeting, Sanfransico, California Nov. 10-14, 1985, American Nuclear Society (1985)

표-1. Heat Rate 계산결과

	성능보증시험 Heat Rate (kcal/kw-hr)	프로그램 계산 Heat Rate (kcal/kw-hr)	상대 오차 (%)
TEST-1(100% 출력)	2299.444	2299.19	0.011
TEST-2(100% 출력)	2294.563	2297.73	0.138
TEST-3(90 % 출력)	2310.937	2315.82	0.211
TEST-4(90 % 출력)	2305.417	2311.20	0.251

표-2. Heat Rate 변화인자와 Heat Rate 변화율

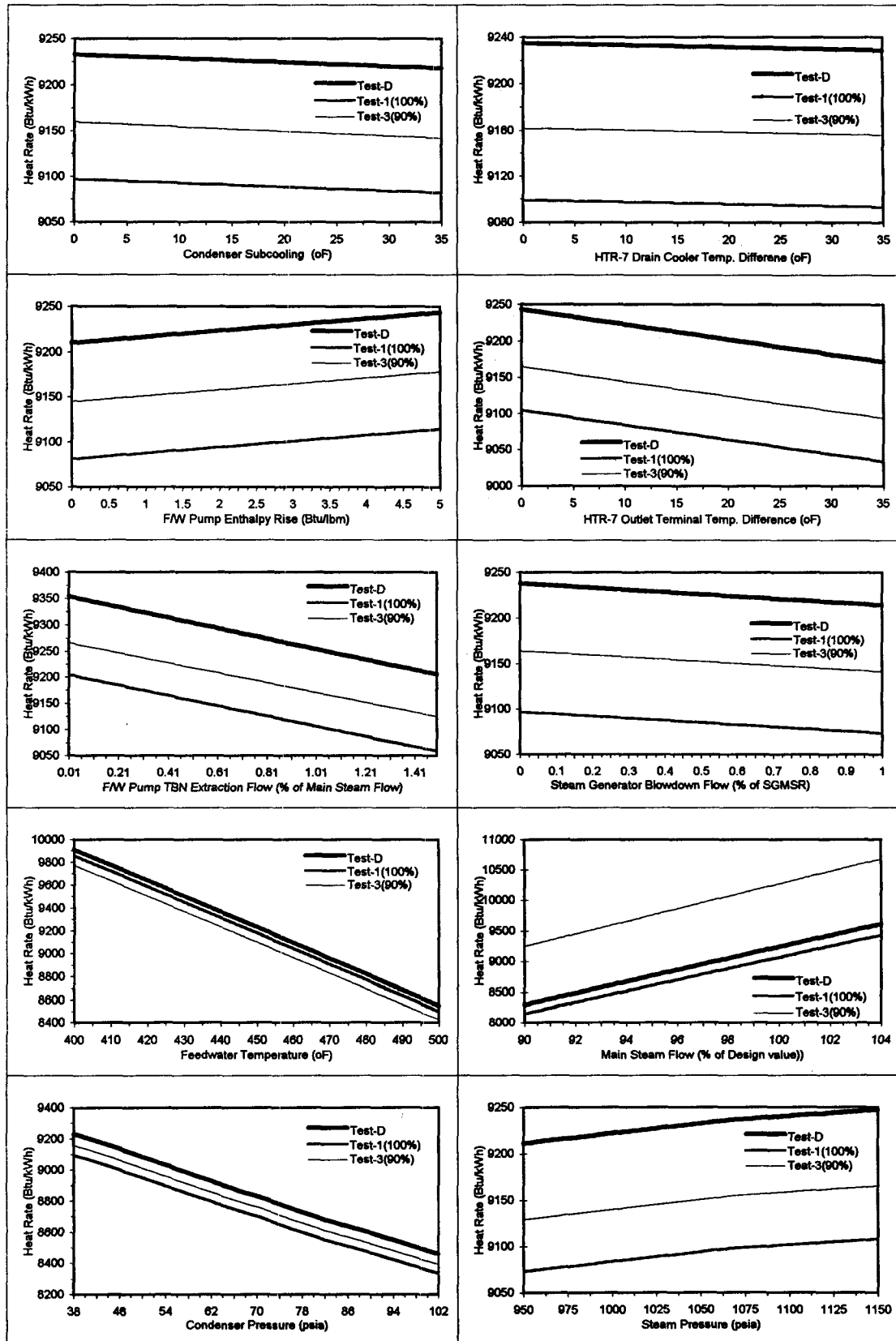


그림-1. Heat Rate 변화인자와 Heat Rate 변화율

Heat Rate 변화인자	Heat Rate 변화율			비 고
	Test-D	Test-1 (100%)	Test-3 (90%)	
Condenser Subcooling	-0.4327	-0.4242	-0.4668	/°F
F.W.P Enthalpy Rise	6.7616	6.6670	6.7140	/Entjalpy Rise
F.W.P TBN Extraction Steam Flow	-9.9095	-9.7601	-9.4734	/0.1% Steam Flow
F.W Temp.	-13.5972	-13.5527	-13.4430	/°F
Condenser Pressure	-12.0908	-11.9123	-11.9948	/mmHg
HTR-7 Drain Cooler Temp. Diff.	-0.1670	-0.1653	-0.1665	/°F
HTR-7 Outlet Terminal Temp. Diff.	-2.0604	-2.0294	-2.0429	/°F
S/G Blowdown Flow	-2.3699	-2.3325	-2.2879	/0.1% of SGMSR*
Steam Flow	93.5094	90.6221	97.7235	/%
Steam Pressure	>1070psia <1070psia	0.2169 0.1258	0.2090 0.1192	0.2182 0.1278 /psia

* SGMSR=S/G Maximum Streaming Rate=6,360,000 lbm/hr

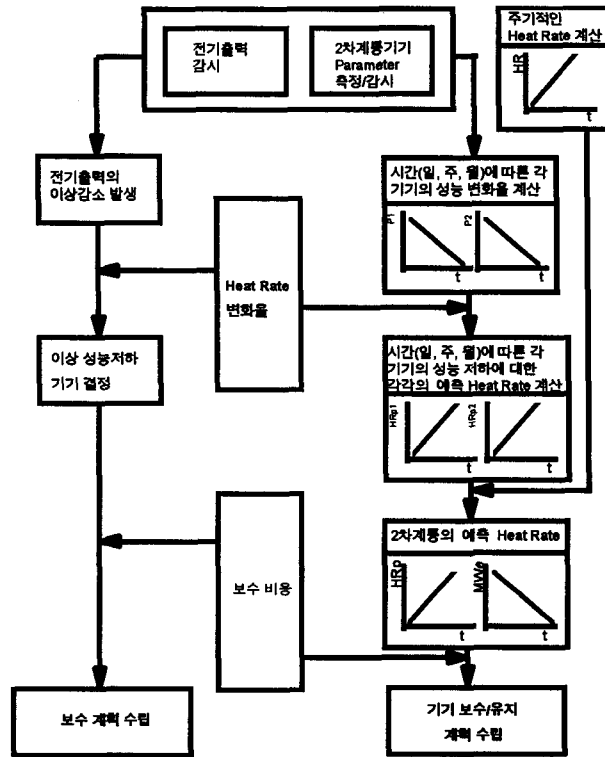


그림-2. 2차계통 기기 성능진단 시스템 논리