

2002년 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

영광 원자력발전소 3·4호기 간이성능시험 및 주간효율점검
프로그램의 개발

Software Development for Simplified Performance Tests and Weekly
Performance Check in Younggwang NPP Unit 3&4

허균영, 장순홍

한국과학기술원

대전광역시 유성구 구성동 373-1

이정운, 김정택, 박재창

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

본 논문에서는 원자력발전소 터빈사이클의 성능분석 현황을 간단하게 살펴보고 이와 관련하여 실제 현장에서 요구되는 문제점을 해결하는 소프트웨어의 개발에 대한 내용을 기술한다. 개발된 소프트웨어는 영광 원자력발전소 3·4호기의 간이성능시험과 주간효율점검시 사용되는 성능분석 프로그램이다. 실제 성능분석 업무와 일관성을 유지하고 그 동안 축적된 성능분석의 결과물을 계속적으로 사용할 수 있도록 현장의 기능 요건을 최대한 반영하였다. 발전소 컴퓨터에 내장되어 있는 성능분석 프로그램 모듈이 실제 효율 담당 부서에서 수행하는 업무와 다소 다른 점에 주목하고, 이러한 차이로부터 발생하는 업무 부하를 줄이고, 터빈 사이클 주요 성능변수의 추이분석을 통하여 보다 효율적이고 신뢰적인 성능분석이 가능하도록 보조해 주며, 보정곡선을 자유롭게 사용할 수 있도록 하여 유지·보수 작업을 수행하는데 있어 의사 결정의 도구로서 활용할 수 있도록 도와 준다.

Abstract

This paper covers the current status of turbine cycle performance test in nuclear

power plants and the software development which can solve some shortcomings related to performance tests. The software developed is for simplified performance tests and weekly performance checks in Younggwang nuclear power plant unit 3&4. This software includes the requirements from the efficiency division for the consistency with actual performance analysis work and the usability of the collected performance test data. From the working survey, we identify the difference between the embedded performance analysis modules and the actual performance analysis work. This software helps operation or maintenance personnels to reduce work load, to support the trend analysis of essential parameters in a turbine cycle, and to utilize the correction curves for the decision-making in their work.

I. 서론

최근 국내 원자력발전 분야는 전반적인 전력산업구조의 개편과 해외 발전회사와의 경쟁체제로 돌입하는 과정을 겪으면서 발전소 효율 향상에 대하여 이전보다 훨씬 높은 수준의 관심을 갖게 되었다. 효율 향상에 대한 관심은 이제 이차계통의 운영 및 관리를 효과적으로 수행함으로써 얻어지는 이용률 향상에까지 미치고 있다.

대부분의 경수형 원자력발전소에서 채택하고 있는 랭킨사이클에 기반한 이차계통의 전반적인 설계 및 운영방법이 이미 정립된 상태라 여겨진다. 더불어 안전성을 최우선으로 여기는 원자력발전소에서 이차계통, 즉 터빈사이클은 방사성 물질의 누출과는 별 관계가 없으며, 원자력발전소의 특성상 한번 연료를 장전하면 한 주기가 끝날 때까지 특별한 이유가 없는 한 발전소 정지를 시키지 않기 때문에 효율 향상 측면에서 터빈사이클을 연구한 사례는 그렇게 많지 않다.

본 논문은 터빈사이클의 정확한 감시 및 분석을 통해 이용률 향상을 꾀할 목적으로 수행되고 있는 원전계측제어시스템 개발사업단 과제의 일환으로 개발된 영광 원자력발전소 3·4호기 간이성능시험 및 주간효율점검 프로그램에 대한 내용을 담고 있다.

II. 개발 배경

대부분의 원자력발전소에는 발전소 컴퓨터에 터빈사이클의 성능을 계산하는 모듈이 포함되어 있다. 이 모듈은 온라인으로 전송받은 현장 신호를 내부 알고리즘에 따라 계산을 수행하는데, 이 프로그램으로부터 나오는 결과물이 실제 효율 담당 부서에서 필요로 하는 결과물과는 다소 차이가 있음을 발견하였다.

이러한 차이점은 설계자가 관심을 갖고 있는 성능지표와 운영자가 관심을 갖고 있는 성능지표 사이의 견해 차이 때문에 나타나는 것으로 생각된다. 또한 실제 성능분석 업무에서 중요시하는 부분이 발전소 별로 차이가 나는데 이를 설계시 반영하기는 힘들기 때문으로 풀이된다. 영광 원자력발전소 3·4호기에서도 이와 비슷한 문제점이 제기되었다. 영광 원자력발전소 3·4호기는 비교적 신규 발전소로 운전기간이 오래된 다른 발전소보다는 계측기의 개수가 많고 성능이 우수하며 발전소 컴퓨터에서 주기적으로 터빈사이클의 성능계산을 수행하고

있다. 이미 소내에서는 자체 인트라넷을 통해 홈페이지 상에서 터빈사이클의 성능 현황을 포함한 발전소 상황을 확인할 수 있다. 그럼에도 불구하고 실제 효율담당부서에서는 자체적으로 개발한 프로그램을 이용하여 업무 수행을 하고 있었다. 이 과정에서 자체 개발 프로그램이 완전한 전산화가 이루어지지 않아 업무 부하가 상당히 많이 걸린다는 문제점을 파악하여 이를 해결하기 위한 방법을 모색하기로 하였다. 핵심 사항은 다음과 같다.

- 프로그램의 전체적인 구조 및 인터페이스(현재는 마이크로소프트 엑셀 프로그램으로 구현되어 있음)
- 성능시험에 필요한 데이터의 자동 입력
- 증기표 라이브러리의 통합
- 보정곡선의 정밀한 피팅 작업과 전산화
- 추이분석을 위한 차트 관리자의 요구
- 보정곡선을 통한 손실출력분 계산 기능
- 기타 효율점검 보고서의 자동 작성 기능 등

III. 개발 전략

현장 실무진들과의 협의를 통해 지금 수행되고 있는 방법이외에 새로운 성능분석 방법론을 도입하여 새롭게 만들어질 프로그램에 삽입하는 안을 검토하였으나 발전소가 처음 가동된 순간부터 수행되어 온 업무 형태에 변화를 주는 것은 그다지 바람직하지는 않다고 결론을 짓고 가급적 기존의 업무 형태를 일관성있게 유지하는 것에 초점을 맞추었다.

영광 원자력발전소 3·4호기에서는 현재 크게 두 가지 형태의 성능시험을 수행하고 있다. 하나는 계획예방정지기간을 전후로 수행하는 시험으로서 현장에서는 이 성능시험을 ‘간이성능시험’이라고 부르고 있다. 이 시험에서는 발전소 인수성능시험의 경우와 마찬가지로의 성능분석 방법을 사용하고 있다. 다른 하나는 ‘주간효율점검’으로서 이 때에는 로칼에서만 확인이 되는 신호는 제외하고 발전소 컴퓨터로 온라인으로 전송되는 신호를 이용하여 성능분석이 수행되며, 일주일 간격으로 수행된다. 간이성능시험의 주 목적이 계획예방정지기간의 정비 효과를 관찰하는 것이라면 주간효율점검은 지속적인 성능 감시를 통하여 주요 발전소 변수들의 추이 분석을 수행하는 것이 주 목적이라 할 수 있겠다. 두 가지 성능시험에서 약간 다른 점이 있기는 하지만 거의 유사한 성능분석 절차를 따르고 있기 때문에 두 프로그램의 인터페이스를 일관성있게 구성하였다.

그림 1에는 두 가지 성능분석 프로그램의 데이터 흐름을 나타내고 있다. 데이터의 입력은 발전소 컴퓨터와 연결되어 있는 원격감시시스템을 이용하여 수행되는데, 원격감시시스템에 있는 웹 페이지로부터 신호값을 입력하게 된다. 계산 수행은 현장 절차를 기본으로 하는데, 간이성능시험과 주간효율점검의 분석 방법은 거의 유사하다. 또한 이 방법은 발전소의 인수성능시험에서 사용한 방법과 동일하다. 계산과정에서는 전산화된 증기표와 보정곡선이 사용된다. 축적된 데이터를 이용한 추이분석을 위하여 차트 관리 기능과 주요 변수별 출력증감의 영향을 계산하기 위한 손실출력 계산 기능이 제공된다.

IV. 개발 현황 및 데모

프로그램은 현재 마무리 작업을 진행 중에 있다. 두 차례에 걸쳐 현장에 프로그램을 전달하고 사용경험을 피드백 받아 다시 반영하는 검증 과정을 거쳤다. 프로그램은 예전에 사용하던 성능분석 프로그램의 인터페이스를 유지하기 위하여 예전과 마찬가지로 마이크로소프트 엑셀 상에 구현하였다. 성능분석 절차 역시 현재 현장에서 사용하고 있는 절차서를 그대로 준용함으로써 업무의 일관성을 유지하였다. 프로그램은 총 다섯 장의 기본 슈트가 제공된다. 각각의 기능은 다음과 같다.

- 데이터 : 성능분석에 필요한 필수 신호를 입력할 수 있으며, 차트 관리에 추가적으로 필요한 신호를 추가할 수 있다.
- 분석결과 : 성능분석 절차를 그대로 옮겨 놓았으며, 계산 과정을 확인할 수 있다.
- 성능점검표 : 주요 신호에 대한 기준값과 현재값, 그리고 차이를 정리해 놓은 슈트이다.
- 보고서1 : 현재 성능분석을 수행한 결과와 인수성능시험의 결과를 비교한 슈트이다.
- 보고서2 : 현재 성능분석을 수행한 결과와 사용자가 성능비교를 위한 결과를 함께 정리한 슈트이다.

III.1. 성능분석

그림 2과 3은 성능분석을 위하여 데이터를 입력하는 화면과 계산을 수행을 위한 옵션을 선택하는 화면이다. 데이터는 현재 영광 원자력발전소에서 활용할 수 있는 인터넷 원격감시시스템으로부터 데이터를 얻거나 사용자가 원하는 값을 임의로 입력할 수 있다. 입력된 데이터를 이용하여 성능분석을 수행할 수 있는데, 이 때 비교대상을 임의로 설정할 수 있다. 일반적으로 인수성능시험시의 결과와 바로 직전 성능시험과의 결과를 비교하게 된다.

성능분석이 수행되고 나면 그 결과가 ‘분석결과’, ‘성능점검표’, ‘보고서1’, 그리고 ‘보고서2’에 나타나게 된다. 모든 성능분석 과정에서 사용자가 수작업으로 진행해야 하는 부분은 없다. 증기표 라이브러리를 삽입하고 보정곡선의 피팅 및 회귀분석을 통한 상관식을 입력하여 모든 과정이 완전히 전산 처리되도록 하였다. 그림 4, 5, 6은 각각 성능분석이 종료된 다음의 ‘분석결과’, ‘성능점검표’, ‘보고서1’의 화면이다.

새롭게 구현된 프로그램은 기존에 수행되었던 성능분석 업무 자료를 이용하여 재계산함으로써 검증 단계를 거쳤다. 차이가 나는 부분에 대해서는 현장 실무자와 협의를 거쳐 프로그램을 수정하는 작업을 수행하였다.

III.2. 추이분석

실제로 추이분석은 성능분석에서 상당히 중요한 역할을 차지하고 있다. 원자로 상태와 기상 상태에 따라 외기 조건이 변화하는 상태에서 터빈사이클의 성능지표는 절대값만으로는 성능 수준을 가늠하기가 매우 어렵다. 이런 상황에서 추이분석은 수시로 변화의 과정을 감시하는 것이기 때문에 성능분석 사이의 등락폭을 분석함으로써 경우에 따라서 유지·보수 스케줄을

세우는데 매우 중요한 역할을 한다.

터빈사이클에도 사실상 발전소 출력과 관계가 있는 중요 변수들이 상당히 많이 존재하며, 모든 변수들의 추이분석을 위해서는 쉽고 강력한 차트 관리자가 필수적이라는 것은 현장 경험으로 알려진 사실이다. 더군다나 이러한 업무를 수작업으로 하는 것은 업무 효율 측면에서 매우 불합리하다. 따라서 본 프로그램에서는 차트 관리를 효율적으로 할 수 있는 방법을 제공하고 있다.

그림 7과 같은 차트 관리자에서는 차트에 포함되어지는 모든 속성을 사용자 편의를 고려하여 설정할 수 있도록 하여, 일단 한번 등록된 차트는 새로운 데이터가 입력되면 자동적으로 차트가 생성되도록 구성하였다. 또한 원하는 기간 동안의 차트를 확대하여 볼 수 있는 기능이 제공되어 자세한 분석이 필요한 부분이 있다면 이를 손쉽게 확인할 수 있다. 그림 8은 차트 관리자를 통해 만들어진 추이분석용 차트이다.

III.3. 보정곡선 계산기능

모든 발전소에는 성능분석용 보정곡선이 있다. 보정곡선은 성능분석 결과를 기준이 되는 성능수준과 비교할 수 있도록 해주는 보정계수를 제공한다. 만일 현재 성능분석이 수행된 발전소의 외기 조건, 주요 운전 변수, 주요 기기의 상태 등이 기준이 되는 성능상태에서 그것과 다르다면, 성능분석의 결과를 단순히 비교해서는 올바른 분석이라 할 수 없다. 이런 경우 현재의 성능분석 결과에 외기 조건, 주요 운전 변수, 주요 기기의 상태의 차이가 성능분석 결과에 미치는 영향을 보정해 준다면 가능할 것이다. 즉 성능분석과 관련된 여러 요소가 터빈사이클의 성능, 예컨대 전기출력이나 열소비율에 미치는 영향을 터빈사이클의 제작사가 미리 분석하여 이에 대한 정보를 정리한 그래프가 보정곡선이다. 결론적으로 보정곡선은 터빈사이클의 주요 운전 변수와 전체 사이클의 성능 사이의 민감도 곡선이라고 할 수 있겠다. 보정곡선은 터빈사이클의 운전 변수와 전체 사이클의 성능 사이의 관계를 나타내 준다는 점에서 여러 가지 방법으로 사용될 수 있다. 가령 복수기의 배압이 설계 배압보다 낮은 경우 일반적으로 발전소 출력이 높아지는 것으로 알려져 있다. 그러나 실제로 어느 정도의 출력이 높아지는 것인지를 알기 위해서는 터빈사이클에 대한 전체적인 해석을 수행하여야 한다. 만일 보정곡선 중에서 복수기 배압과 발전소 출력에 대한 것이 있다면 다소 부정확하기는 하지만 개략적인 출력증감을 확인할 수 있을 것이다.

보정곡선 계산기능은 이러한 배경에서 구현되었다. 현재 영광 3, 4호기에는 터빈 주공급자인 General Electric에서 제공한 보정곡선 12개가 있다. 각 보정곡선은 12개의 주요 운전 변수와 터빈사이클의 대표적인 성능지표인 전기출력과 열소비율 사이의 관계를 제공한다. 보정곡선 계산기는 사용자가 현재 운전값을 입력하면 설계값과의 차이를 비교하여 보정곡선을 기반으로 출력증감과 열소비율증감을 계산한다. 그림 9는 실제 보정곡선 중에 하나인 고압급수가열기 중단온도차에 따른 전기출력 보정곡선을 보여주고 있으며, 이 그래프들은 프로그램 내에서 사용자가 확인할 수 있도록 구현되었다. 그림 10은 보정곡선 계산기능의 모습을 나타내고 있다.

하지만 보정곡선은 개별적으로 사용되는 경우, 정확한 민감도 분석이 되는 것은 아니라는 점을 간과해서는 안된다. 실제로 설계출력과 현재출력이 차이를 보이고 있는 경우, 보정곡선에 의하여 각 변수별로 출력증감을 계산하여 합하면 정확하게 일치하지는 않는다. 그 까닭은 보정곡선 변수들 사이의 상관관계를 보정곡선에서는 제공하고 있지 않기 때문이다. 따라

서 보정곡선 계산기로부터 얻어진 출력증감 결과 역시 다소 개략적인 정보를 제공한다고 봐야할 것이다. 그러나 보정곡선은 유지·보수 작업을 수행하는데 있어 우선 순위를 정하거나 보수 작업을 수행함으로써 얻어지는 출력이득과 보수 비용의 경제성 분석을 수행하는데 있어 유용한 도구가 될 것으로 판단된다.

V. 결론 및 토의

본 논문에서는 원자력발전소에서의 성능분석 현황을 간단하게 살펴보고, 발전소 컴퓨터에 내장되어 있는 성능분석 프로그램 모듈이 실제 효율 담당 부서에서 수행하는 업무와 다소 다른 점을 파악하였다. 이러한 차이로부터 발생하는 업무 부하를 줄이고, 터빈사이클 주요 성능변수의 추이분석을 통하여 보다 효율적이고 신뢰적인 성능분석 업무가 되도록 보조해 주며, 보정곡선을 자유롭게 응용할 수 있도록 제공하여 유지·보수 작업을 수행하는데 있어 의사 결정의 도구로서 활용하도록 해 주는 소프트웨어를 개발하였다.

영광 원자력발전소 3·4호기를 대상으로 하였으며, 실제의 성능분석 업무와 일관성을 유지하고 그 동안 축적된 성능분석의 결과물을 계속적으로 사용할 수 있도록 현장 요구 사항을 반영하였다. 두 차례에 걸쳐 개발된 프로그램이 현장에 제공되었으며, 사용 경험으로 도출된 추가적인 요구사항을 피드백 받아 수정작업을 거쳤다.

국내 다른 발전소에서도 이와 비슷한 상황이 있는지를 확인하고, 현장 요구사항이 있다면 이번 개발 경험을 바탕으로 유사 소프트웨어를 개발하는 연구가 지속될 수 있기를 기대한다.

마지막으로 본 연구를 수행하면서 국내 원자력발전소의 성능분석 현황을 두루 살펴보고 얻은 결과로서 성능분석 업무에서 현재 가장 현안이 되고 있는 문제는 데이터가 정확한 위치에서 측정이 되고 있지 않다는 점과 기기별 성능저하가 전체 발전소 출력에 미치는 영향이 어느 정도인지에 대한 정보가 부족하다는 것으로 파악되었다. 유체상태를 알고 싶은 위치와 실제 계측기가 달린 위치 사이에서의 유체의 압력강하와 열손실을 고려하여 계측값을 교정하고 난 다음 성능분석을 수행하여야 하는데, 현재는 아무런 보정없이 사용함으로써 계산 불확실성이 상당히 커진다는 것이 전자의 내용이다. 후자는 현재로서도 어떤 기기에 성능저하가 나타났다는 것은 성능분석 절차에 따라 계산을 수행하면 알 수가 있는데, 이것이 전체 발전소 출력에 어느 정도 영향을 미치는지를 모르기 때문에 보수 여부 및 스케줄 등을 세우기 어렵다는 것이다. 특히 이차계통 주요 배관의 우회밸브 또는 안전밸브 등에서 높은 질의 증기가 새어나감으로써 효율 감소가 생기는 것은 알고 있지만, 출력감소에 대한 양적 관계는 파악하지 못하고 있는 것이 현실이다. 향후 이런 문제점에 대한 연구를 계속적으로 수행한다면 현재 개발된 프로그램의 유용성 및 신뢰성을 높이는 데 도움이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 원전계측제어시스템 개발사업단 과제의 일환으로 수행되었으며, 과학기술부로부터 재정적인 지원을 받았습니다.

VI. 참고문헌

1. 한국전력공사 영광원자력본부 “영광 원자력발전소 3·4호기 인수성능시험 보고서”, 1995.
2. 한국전력기술주식회사 “원전 표준성능관리지침”, 1993. 4.
3. 한국원자력연구소 “한국형 표준원전 계통실무”, KAERI/GP-108/96, 1996.
4. 허균영 외 “원자력발전소 터빈사이클 성능시험 현황과 개선책”, 계측제어기술 워크샵, 2001. 11.

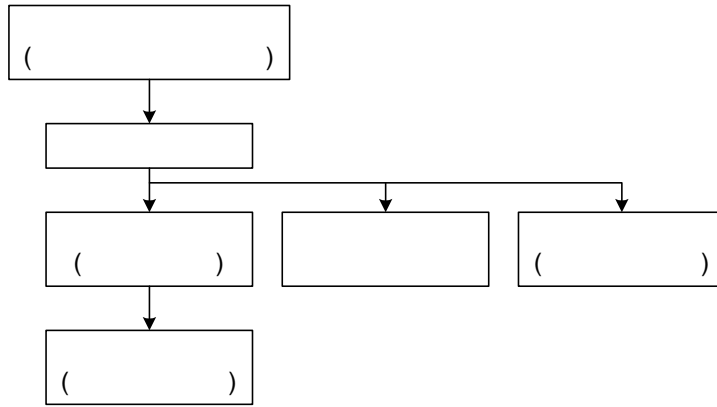


그림 1. 성능분석 프로그램 데이터 흐름도

항목	입력 단위	PAR NO	입력값	입력값
DATE	YY-MM-DD		2001-10-27	2002-0-00
TIME	HO:IR-MIN		4:01 PM	11:11 PM
SECONDARY CALDRIMETRIC POWER	PCT	CU2B9CL	98.78	98.78
S/S 1 ENERGY REMOVAL RATE	kw/hr	CU2E61	1.217E+09	
S/S 2 ENERGY REMOVAL RATE	kw/hr	CU2E62	1.217E+09	
S/S 1 D/S MASS FLOW RATE	kg/hr	CU2E61	0.00000000	

그림 2. 성능분석을 위한 데이터 입력

성능분석 선택사항 [X]

분석대상 일시: 2001-10-27

비교대상 1*: 95-04-21 (기준값)

비교대상 2**: [바로 이전 시험] 선택

계산

* 인수성능시험과 비교되며 보고서 1에 표시됩니다.
** 보고서 2에 표시됩니다.

그림 3. 성능분석 옵션 설정

주간 효율관리 보고 견적용역 및 보편 참조비용 계산서

1. 견적용역의 주요단위 (단위: 원) 및 보편 참조비용 (단위: 원)의 견적(단위: 원)

구분	단위	단위	단위	단위	단위	단위
1. 견적용역의 주요단위	원	원	원	원	원	원
2. 보편 참조비용	원	원	원	원	원	원

그림 4. 성능분석 계산결과 화면

기기 성능 점검표

구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분

그림 5. 기기성능 점검표 화면

별관 원자력발전소 3호기 주간효율관리 결과 요약

구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분	구분	구분

그림 6. 성능분석후 보고서 자동 작성 화면

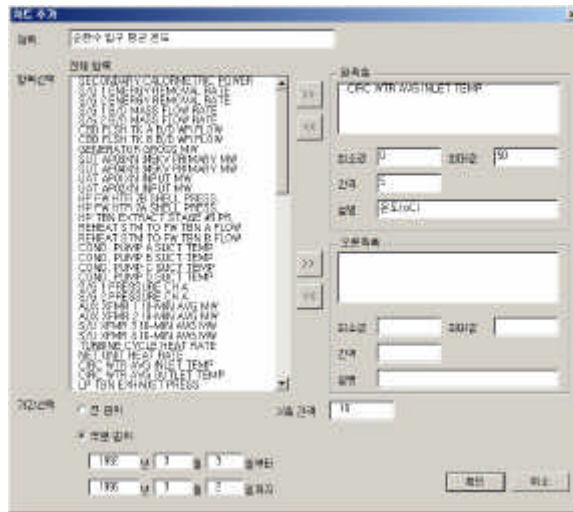


그림 7. 차트 관리자 화면

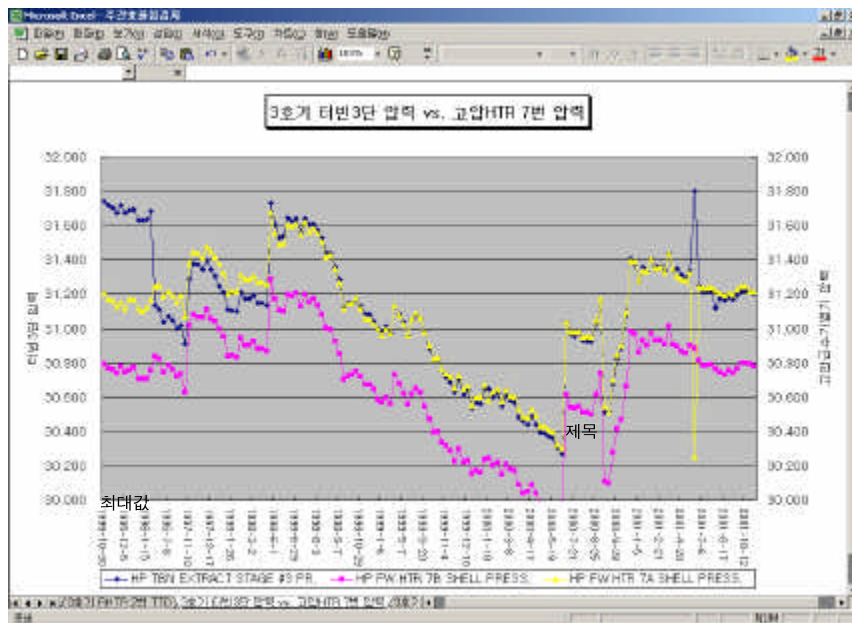


그림 8. 차트관리자로 만들어진 추이분석용 차트

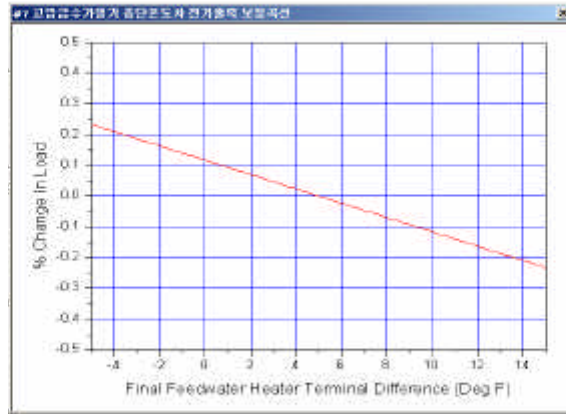


그림 9. 영광 원자력발전소 3·4호기 보정곡선 예

항목	단위	설계치	입력	출력보정인자	출력증감(MW)
전계 출력	MW	1043.15	1001.1		
주증기유량 비율	vwd%	70~100	98.5		
고압급수가열기 #1 온도오프차	oC	2.78	2.96	1.0000	0.081
고압급수가열기 #2 온도오프차	oC	5.58			
고압급수가열기 #2 드롭관 압력강하율	%	5.8			
급수펌프에 의한 열량피 증가	kcal/kg	1.91			
급수펌프 터빈오프의 증기유량	kg/hr	78735			
복수기 과열각	oC	0.0			
증기발전기 휘발유량	%	0.2			
터빈전단 주증기 압력	kg/cm2A	72.768			
터빈전단 주증기 습분	%	0.45			
복수기 진공도	mmHgA	36.1			
MW 열효율	%	100.0			
교측 증기유량	-	1.1			

* : 터빈별 입력값 미리 입력한 값을 사용하기 때문에 오차가 발생함
 ** : 교측증기유량에 의한 출력보정은 자동으로 이루어짐

계산

그림 10. 보정곡선 계산기 화면