2003년 추계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

고리 원자력발전소 3·4호기 성능시험절차서 전산화 Computerization of Performance Test Procedures in Kori NPP Unit 3&4

허균영, 이성진, 장순홍

한국과학기술원

대전광역시 유성구 구성동 373-1

이덕구

한국수력원자력(주) 고리원자력 제2발전소

부산광역시 기장군 장안읍 고리 216번지

이정운, 박재창

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

본 논문은 국내 웨스팅하우스 타입의 대표적인 모델인 고리 원자력발전소 3·4호기에서 수행되고 있는 성능시험의 현황을 살펴보고, 이와 관련하여 실제 현장에서 요구되는 문제점을 해결하는 소프트웨어의 개발에 대한 내용을 기술한다. 개발된 소프트웨어는 고리 원자력발전소 3·4호기에서 계획예방정비 전후로 수행되는 터빈사이클 정밀급 성능시험 절차서를 전산화한 프로그램이다. 현재까지 수행되어 오던 성능분석 업무와 일관성을 유지하기 위하여 데이터의 입력부터 보고서의 작성까지 모든 개발 단계에서의 요건을 실무자와 협의를 거쳐 도출하였다. 고리 원자력발전소 3·4호기의 하드웨어가 지원하는 한에서 그동안 수작업으로 진행되었던 모든 분석 과정을 전산화하였다. 전산 또는 특설된 계측기로부터 데이터를 받거나 사용자가 임의의 값을 입력하여 분석이 가능하다. 증기표를 비롯하여 각종 보정곡선 및 표 등이 내장되어 있고, 정밀급 성능분석이 가능하도록 미국기계학회 성능시험코드 6의 알고리즘이 구현되어 있다. 분석이 완료되면 정형화된 형태의 보고서가 만들어지며, 보고서는 일반 보고서, 요약보고서, 기기별 보고서, P&ID 형태의 차트로 구분되어 만들어 진다. 분석 결과는 일괄적으로 관리되고, 추이분석을 돕기 위하여 차트 관리자가 제공된다.

Abstract

This paper covers the current status of turbine cycle performance tests in Gori nuclear power plant (NPP) unit 3&4, a domestic representative Westinghouse model, and describes the software development which can solve some shortcomings related to performance tests. The software developed is for the computerization of the full-scale test procedure that is used in the performance test carried out before and after overhaul. In order to keep the consistency with previous performance analysis work, all the development requirements from data input to report generation were decided through the discussion with the staff in Efficiency Division. This software computerized all the processes that has been performed manually considering the hardware capability of Gori NPP unit 3&4. It is possible to analyze turbine cycle performance using the data from a plant computer, specially installed sensors, or user input values. All the necessary curves and tables including steam tables were embedded, and the algorithm of ASME performance test code 6 was implemented. After performance analysis, the formatted reports such as a general report, a summary report, a component-level report, and a P&ID chart are generated. The analysis results are managed collectively, and the chart manager for the support of trend analysis is provided.

I. 서 론

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.

저자는 터빈사이클의 정확한 감시 및 분석을 통해 이용률 향상을 꾀할 목적으로 수행되고 있는 원전계측제어시스템 개발사업단 과제의 일환으로 CE 타입의 국내 대표적인 발전소인 영광 원자력발전소 3·4호기 간이성능시험 및 주간효율점검 프로그램을 개발한 경험이 있다.[1] 여기에서의 얻은 경험을 바탕으로 국내에 있는 웨스팅하우스 타입의 대표적인 발전소인 고리 원자력발전소 3·4호기 정밀급 성능시험절차서를 전산화하는 연구를 수행하였다. 고리 원자력발전소 3·4호기는 가동년수가 비교적 많은 발전소이지만 터빈사이클에 설치된 계측기의 수가 많고, 계획예방정비 기간을 전후로 정밀급 시험을 수행하기 때문에 분석절차의 분량이 많고 복잡하다.

본 논문은 고리 원자력발전소 3·4호기에서 수행되는 성능시험의 현황과 그 특성을 기술하고, 성능시험절차서의 전산화는 어떤 요건과 방법론을 바탕으로 이루어졌는지에 대하여 설명한다. 제 2절에서는 성능시험절차서 전산화에 대한 개발 배경을 설명하고, 제 3절에서는 개발 현황 및 주요 기능에 대한 설명을 한다. 마지막으로 제 4절에서는 활용계획 등에 대하여 기술한다.

II. 개발 배경

II.1. 성능시험 현황

저자가 파악한 바로는 국내 대부분의 원자력발전소에는 발전소 컴퓨터에 터빈사이클의 성능을 분석하는 모듈이 포함되어 있다. [2] 그러나 터빈사이클 성능분석프로그램은 발전소가 설계될 당시에 만들어졌기 때문에, 가동년수가 오래된 발전소일수록 활용도가 떨어지고, 이 프로그램으로부터 나오는 결과물이 실제 효율 담당 부서에서 필요로 하는 결과물과는 차이가 있음을 발견하였다. 특히 최근에는 일반 PC의 성능이 오히려 발전소 컴퓨터의 성능보다 좋아지면서, 발전소 컴퓨터의 성능시험 데이터를 PC로 옮겨 사용자가 필요로 하는 형태로 분석하는 경우가 일반적인 성능분석의 형태인 것으로 조사되었다.

이러한 특징은 고리 원자력발전소 3·4호기에서도 동일하게 나타났다. 특히 고리 3·4호기의 경우 가동년수가 오래되었음에도 불구하고, 터빈사이클에 설치된 계측기의 수가 정밀급 성능시험을 수행하기에 충분하였다. 그리고 계측기 신뢰도가 충분치 않다고 자체 판단된 계측기들에 대해서는 성능시험시 계측기를 특설하여 측정함으로써 성능분석결과의 신뢰성을 높이고 있다. 고리 3·4호기에서는 특별한 이유가 없는 한, 계획예방정비 기간을 전후로 성능시험을 실시하고 있다. 이러한 성능시험은 발전소에서 매우 일반적인 것으로서 계획예방정비 기간 중에 실시된 정비 작업의 효과를 점검할 수 있는 방법이다. 결론적으로 고리 3·4호기는 주기초와 주기말에 한번씩, 주기당 총 두 차례 간이성능시험을 수행하고 있다.

그리고 성능시험시 데이터 취득은 예비시험에서 한 번, 본시험에서 두 번 취득하는 것이 일반적인 절차이다. 예비시험은 본시험에서의 데이터 취득을 위한 예비 조치를 위한 것이며, 본시험에서 두 번 데이터를 취득하는 것은 보다 안정된 발전소 상태에서 신뢰적인 데이터를 취득하기 위함이다. 한번의 데이터 취득은 일반적으로 두 시간동안 진행된다. 취득되는 변수의 종류에 따라 취득 주기가 다른데, 이는 현장에 구비된 성능시험 절차서 또는 미국기계학회(MECH)의 성능시험코드의 내용에 따르고 있다.

취득되는 변수의 수는 총 400여개 정도이며, 시험 시간 동안 취득된 값들은 평균으로 계산되어 실제 성능분석에 사용된다.

II.2. 성능분석 특징

고리 원자력발전소 3·4호기는 각각 1985년과 1986년에 준공된 발전소로 현재 약 20년 가까운 가동년수를 보이고 있다. 따라서 발전소 컴퓨터에 들어 있는 터빈사이클 성능분석프로그램은 당시의 최신 컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어 기술로 개발되었다 하더라도 많이 낙후된 것이 사실이다. 따라서 다양한 분석 결과를 제공하고 있지 못하고, 제공되는 분석 결과도 통신망을 이용하거나 하드카피 형태로 받기가 용이하지 않다.

현재 이러한 문제점을 해결하기 위하여 현장의 효율 담당 부서에서는 자체적으로 개발한 소프트웨어를 이용하여 성능분석을 수행하고 있다. 현장에서 사용 중인 소프트웨어는 마이크로소프트 엑셀을 기반으로 만들어졌으며, 정밀급 성능분석에 필요한 내용이 대부분 포함되어 있다. 프로그램은 크게 세 부분으로 구성되는데 데이터 입력 부분과 계산 부분, 그리고 보고서가 만들어지는 부분으로 구성되어 있다. 각 모듈별 특징을 살펴보면 다음과 같다.

○ 데이터 입력 부분

데이터 입력은 본래 터빈사이클에 영구적으로 설치된 계측기로부터 취득된 신호가 누적되는 발전소 컴퓨터, 임시로 설치하는 특설 계측기, 사용자 입력 등으로 구분된다. 성능시험시 본 시험을 두 차례 하기 때문에 발전소 컴퓨터와 특설 계측기로부터 취득되는 변수들은 각각 두 세트가 있다. 사용자 입력은 발전소 컴퓨터 또는 특설 계측기로 취득된 값인데 부정확한 것이 명확하거나 다른 특별한 이유로 인하여 설계값 또는 수동 취득한 값을 대신하여 넣어야 하는 경우에 사용되는 기능이다.

이것이 기존 성능분석 프로그램의 데이터 입력 부분의 기능인데, 데이터가 일괄적으로 관리되지 않아서 데이터 입력에 어려움이 있었다. 그리고 현재 고리 3·4호기의 하드웨어의 한계성 때문에 온라인으로 발전소 컴퓨터 또는 특설 계측기로부터의 신호를 받는 것은 불가능하였다. 따라서 취득된 신호는 일단 컴퓨터 파일로 만들어진 다음, 성능분석 프로그램에서 읽어들이 사용하는 방식을 취하고 있다.

○ 계산 부분

기존 성능분석 프로그램의 계산 부분은 성능분석절차서의 내용을 그대로 따르고 있다. 그러나 성능분석절차서에는 터빈 효율에 대한 계산 부분이 빠져 있기 때문에, 완전한 정밀급 계산 수행이 이루어지지 않는다고 있었다. 최근 터빈 효율 계산 모듈이 추가되기는 하였지만, 운용상의 문제 때문에 분석 결과를 비교하는데 있어 참고용으로만 활용하고 있었다. 또한 원자력발전소의 터빈사이클은 포화증기를 작동유체로 사용하기 때문에 터빈 효율의 계산이 Once-through로 이루어지지 않고, 반복계산(Iteration)을 수행하여야 한다. 이 부분에 대한 알고리즘이 명확하게 구현되지 않은 것으로 분석되었다.

기존 프로그램을 사용하여 성능분석을 하는데 있어 가장 시간이 많이 소요되는 부분은 엔탈피, 비체적 등 각종 유체 특성을 계산하는 과정으로 나타났다. 성능분석을 위해서는 대략 200여 지점에서의 유체 특성을 계산하여야 하는데, 자체적으로 개발한 프로그램에서는 증기표 모듈을 포함시키지 못하여 유체 특성의 계산을 수작업에 의존하고 있었다. 기타 복잡한 형태의 곡선이나 표 형식의 관련자료도 일부 전산화가 되어있지 않아, 수작업에 의존하여 입력하는 부분도 발견되었다.

그리고 전체적인 계산 모듈이 절차서의 내용을 정확하게 반영하고 있는지에 대한 검토도 이루어져야 할 것으로 판단되었다.

○ 보고서 작성 부분

기존의 프로그램에서 성능분석 이후 작성되는 보고서는 크게 분석결과를 나열하고 이에 대한 원인 및 정비결과를 기록하는 일반보고서, 주요 분석결과만을 정리하는 요약보고서, 각 기기별로 자세한 분석결과를 정리하는 기기별 보고서 등이었다. 이 보고서들은 현장에서 사용중인 성능분석절차서의 내용을 그대로 반영한 것이다. [3] 보고서의 포맷에 대해서 특별한 문제는 없었다. 그러나 성능시험이 한차례 수행되면 기존에 계산되었던 내용이 보고서의 지난 결과를 표시하는 공간으로 자동적으로 옮겨지는 기능이 없기 때문에 이 부분에 대해서는 수작업을 병행하고 있었다.

추가적으로 주요 기기별 성능분석이 수행되기 때문에 열평형도가 만들어질 수 있는데, 이를 표시할 P&ID 형태의 차트가 없는 것도 하나의 애로점으로 조사되었다.

III. 개발 현황 및 주요 기능

제 2절에서 살펴본 개발 배경에 따라, 현장 실무진들과의 협의를 통해 최종적인 개발 요건을 도출하였다. 가급적 기존의 업무 형태를 일관성있게 유지하는 것에 초점을 맞추었다. 하드웨어의 한계성을 감안하여 데이터 입력 부분을 개발하기로 하였으며, 분석과정과 보고서 생성 과정에서 최대한 수작업을 제거하도록 하였다.

프로그램은 현재 현장에서 실제 성능시험에서 취득된 데이터를 이용하여, 기존의 방법대로 분석한 것과 새로운 프로그램에서 분석한 것을 비교하여 차이점을 개선한 후, 최종 결과물이 전달되었다. 프로그램은 기존에 사용하던 성능분석 프로그램의 인터페이스를 유지하기 위하여 기존의 프로그램과 마찬가지로 마이크로소프트 엑셀 상에 구현하였다. 성능분석 절차 역시 현재 현장에서 사용하고 있는 절차를 그대로 준용함으로써 업무의 일관성을 유지하였다. 프로그램은 기능에 따라 20여장의 슈트로 구성되어 있는데, 크게 다음과 같이 분류될 수 있다. [4]

III.1. 데이터 입력

두 차례에 걸쳐 수행되는 본시험 데이터를 효과적으로 관리하기 위하여, 발전소 컴퓨터에서 얻은 자료를 관리하는 슈트, 특설 계측기로부터 얻은 자료를 관리하는 슈트가 각각 두 장씩 제공되고, 수입력 및 기타 입력을 위한 자료를 관리하는 슈트가 따로 제공된다. 이렇게 입력된 데이터들은 그림 1의 ‘데이터’ 슈트로 일괄적으로 정리되어진다. ‘데이터’ 슈트에서는 계기압 보정, 단위 변환, 실제로 계산에 사용될 변수의 선정 등과 같은 기능이 제공된다. 따라서 사용자는 성능분석에서 필요한 모든 데이터는 이 곳에서부터 얻을 수 있다. 원하는 경우 사용자는 ‘데이터’ 슈트에 임의의 값을 입력하여 성능분석을 수행해 볼 수 있으므로, 일종의 What-if 기능도 지원된다.

‘데이터’ 슈트에 있는 ‘데이터 이동’ 기능을 이용하면, 현재 계산된 결과들이 다음에 설명할 보고서들 속에 지난 자료가 적혀야 할 공간으로 자동 이동된다. 성능시험 데이터를 입력하기 전에 이 기능을 사용하게 되면, 지난 결과는 보고서의 적소에 위치하게 되고 이번 결과는 지난 결과 바로 옆에 기록되므로, 보고서 관리 효율이 편리하게 되었다.

현재 총 500여개의 항목이 구현되어 있으며, 필요한 경우 사용자는 계속 추가하여 이용할 수 있다. 그리고 현재 고리 3·4호기의 발전소 컴퓨터가 취득된 신호를 온라인으로 PC로 옮길 수 있는 하드웨어적인 성능이 부족하기 때문에 데이터의 온라인 취득 기능은 추후 발전소 컴퓨터 업그레이드 사업 이후에 구현하기로 하였다.

III.2. 계산 부분

계산 부분은 크게, 유체특성의 계산, 유량계산, 터빈사이클 계산, 기타 계산 등으로 구분된다. 그림 2에 보이는 것은 유체특성의 계산을 담당하는 ‘엔탈피’ 슈트의 모습이다. ‘데이터’ 슈트와 연결되어 터빈사이클 내 총 227개 지점에 대한 엔탈피 및 엔트로피 등의 유체특성을 계산하게 된다. 모든 계산은 내장된 증기표에 의하여 자동으로 수행된다. 터빈사이클 내의 각 지점은 과냉상태, 포화상태, 과열상태가 비교적 명확하기 때문에 온도와 압력, 그리고 건

도를 적절히 조합하여 계산을 수행할 수 있다. 포화상태인 경우는 포화수와 포화증기에 대한 엔탈피와 엔트로피가 같이 표기되어 활용성을 높였다.

다음으로는 유량계산이 수행된다. 대략 20여개 지점에 대한 유량계산이 수행되는데, 이 때의 유량계산은 해당 지점을 흐르는 유체의 온도와 압력, 그리고 계측기의 차압 등이 이용된다. 유량계산은 이후에 수행되는 여러 가지 계산에 중요한 역할을 하는데, 미치는 영향이 크기 때문에 정밀도가 요구된다. 유량 부분에 대해서는 측정되는 차압에 대한 신뢰성이 매우 높지는 않다는 현장의견을 반영하여 참고자료로만 사용하고, 실제 계산에는 발전소 컴퓨터에서 계산된 유량을 사용하기로 하였다.

유량계산이 끝나면 터빈사이클 분석 및 각 기기별 세부 분석이 수행된다. 터빈사이클 분석을 위하여 미국기계학회 성능시험코드 6의 알고리즘을 내장하였다. 터빈사이클의 분석이 끝나면 이와 연계된 다른 기기수준의 분석도 수행된다. 여기에는 사이클 수준의 계산인 계통격리, 열출력, 열소비율, 보정계산 결과 등이 해당되며, 기기 수준으로서는 터빈, 펌프, 복수기, 급수가열기, 재열기 등이 해당된다.

사이클뿐만 아니라 기기 수준의 계산도 같이 수행되므로, 전체 터빈사이클에 대한 열평형도의 작성이 가능하다. 그림 3은 분석결과를 P&ID 상에 표시해준 모습을 보여주고 있다. 계산과정에서는 기존 절차서에서 요구하는 모든 성능지표에 대한 분석이 수행되며, 결과는 고리 4호기 15주기초 성능시험시 취득된 데이터를 이용하여 검증하였다. 기존의 프로그램에서 분석한 결과와 대부분의 항목이 일치하였으며, 일부 항목이 약간의 차이를 보였는데 그 원인은 다음과 같았으며 모두 적절히 처리되었다.

- 기존에 사용하던 증기표와 새 증기표 모듈과의 정밀도 차이
- 보정곡선 또는 각종 그래프, 표 등을 읽는데 있어서의 오차
- 분석 과정에서의 일부 오류 등

III.3. 보고서 작성

모든 결과물은 하드카피 문서로 만들어져 보관되기 때문에, 가급적 사용자가 최소한의 작업만으로 분석 결과를 하드카피 문서로 만들 수 있도록 보고서가 자동으로 작성된다. 우선 전체 분석 결과 및 원인 등을 광범위하게 기술하는 일반 보고서, 주요 수치 결과만을 정리하는 요약보고서, 그리고 세부 계산 결과를 기술하는 보고서가 대략 10종류가 있다.

보고서의 내용 중에서 많은 부분을 차지하는 것이, 바로 이전에 수행된 성능시험 결과와의 비교이다. 이번에 개발된 프로그램에서는 앞서 데이터 입력 기능에서 언급하였듯이, 이전 분석 결과를 제 위치에 간단하게 옮겨주는 기능이 제공되기 때문에 사용자의 보고서 작성 부담이 줄어들었다.

또한 보고서 작성에서 중요하게 다루어지는 것이 추이분석이다. 일반적으로 현장에서는 대부분 성능지표들의 절대값보다는 이전 분석결과와의 증감을 더욱 중요하게 여기고 있다. 추이분석은 성능지표의 증감을 알기 위해 매우 유용한 방법이므로, 주요 변수에 대한 주기별 그래프는 보고서에서 중요한 위치를 차지한다.

그림 4는 주기별로 전체 분석결과를 하나의 쉬트로 모아 놓은 것이다. 이 기능은 데이터 입력 기능에서 '데이터 이동'을 사용하면 동시에 작동한다. 이렇게 모아진 데이터는 간단하게 차트 형태로 변환이 가능하다.

VI. 결론 및 토의

저자는 기존에 수행되었던 연구에서 국내 CE 타입의 대표적인 가동중 원자력발전소인 영광 3·4호기에 대한 성능분석 프로그램을 만들었던 경험이 있다. 이 당시 경험에 비추어, 국내 원자력발전소의 경우 성능시험 및 성능분석시 실무상의 많은 애로점이 있음을 확인하였다. 본 논문에서는 이러한 개발 경험을 바탕으로 국내 웨스팅하우스 타입의 대표적인 가동중 원자력발전소인 고리 3·4호기에서 수행되는 성능시험 현황과 성능분석의 특징을 살펴보았다. 고리 원자력발전소의 경우, 가동년수는 오래되었으나 계측기의 수가 비교적 풍부하고 기존에 사용하고 있던 성능분석 프로그램 역시 필요한 기능을 대부분 갖추고 있었다. 그러나 데이터 입력, 계산 부분, 그리고 보고서 작성 부분에 있어 개선해야 할 점들이 상당수 도출되었으며, 이는 현장의 실무진과 협의를 통해 결정되었다. 개발 소프트웨어는 마이크로소프트 엑셀을 기반으로 만들어졌으며, 검증은 실제 현장에서 수집된 데이터를 기존의 프로그램과 동일한 조건에서 수행하여 결과를 비교하였다. 검증결과 실제 성능분석에도 무리가 없다고 판단되었으며, 다음 성능시험부터는 시험 운영하기로 결정되었다.

현재로 CE 및 웨스팅하우스 타입의 원자력발전소에 대한 성능분석프로그램을 개발한 상태이므로, 추가적인 현장 요구사항이 있다면 유사 소프트웨어를 개발하는데 있어 도움이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

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

V. 참고문헌

1. 허균영 외 “영광 원자력발전소 3·4호기 간이성능시험 및 주간효율점검 프로그램의 개발”, 한국원자력학회 춘계학술발표회, 2002. 5.
2. 박재창 외 “원자력발전소 터빈사이클 성능분석 현황 조사와 성능평가 프로그램 개발”, KAERI/TR-2184/2002, 한국원자력연구소, 2002. 5.
3. “성능분석절차서 주기 51”, 한국수력원자력주식회사.
4. 박재창 외 “고리 원자력발전소 3, 4호기 터빈사이클 성능분석 전산화”, KAERI/TR-2363/2003, 한국원자력연구소, 2003, 1.
6. 한국전력기술주식회사 “원전 표준성능관리지침”, 1993. 4.
7. 허균영 외 “원자력발전소 터빈사이클 성능시험 현황과 개선책”, 계측제어기술 워크샵, 2001. 11.