2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

고리원전 3,4 호기의 열출력 측정시스템 개발

Development to the Measurement System of Thermal Power on Kori NPP 3&4

박범수, 전준기, 박명일, 이성림

한국전력공사
부산광역시 기장군 장안읍 고리 216 번지
tmoon@kepco.co.kr

요 약

원전의 열효율 측정방법을 DOS 기반으로 측정하는 방식에서 윈도우즈 익스플러러를 기반으로 하는 새로운 열출력 측정시스템으로 개발, 변경하여 고리 원전 3,4 호기에 적용한 결과를 제시하였다. 이 열출력 측정시스템은 현장에 설치된 14 가지의 열출력 관련 변수를 자동으로 취득하여 서버에 On-Line 으로 전송함으로써 서버에서 실시간으로 열출력을 감시할 수 있으며, 또한 일정시간(일일, 주간, 월별, 계절별, 주기별)에 따라 데이터베이스를 자동으로 구축할 수 있다. 기존의 발전소 운전변수 분석 프로그램인 POPAS(Plant Operation Parameter Analysis System)와 연계하여 개발함으로써 설비의 중복투자를 방지하였고, 열출력 측정을 실시간으로 감시하여 열효율 저하요인을 즉시 해결함으로써 원전의 경제성 향상에 기여하였다.

Abstract

The result of application to KORI nuclear power plants 3 &4 is proposed that the measurement method of thermal power on nuclear power plant is developed from the based on MS-DOS to the based on WINDOWS EXPLORER. The measurement system of thermal power could be monitored thermal power with real time because 14 parameters related to the thermal power are obtained automatically and are transferred to server by on-line. Also, the system could be automatically constructed the database in a certain period (i.e. a day, an week, a month, quarter and reactor cycle). It is eliminated to the excess investment because of developing in connection with POPAS (Plant Operation Parameter Analysis System) which is used for plant operator. The system is contributed to enhance the economical efficiency because operator immediately act to the cause of the descent of the thermal efficiency in real time.

1. 서론

원자력발전소의 열출력 측정방법은 화력발전소의 측정방법과는 약간 상이하다. 화력발전소의 경우 보일러의 연료소비율 측정에 의한 직접법과 증기발생기에서의 열효율을 측정하는 간접법의 두

가지 방법이 가능하지만 원자력발전소의 열출력 측정은 2 차계통에서의 열효율 측정에 의한 간접법만이 가능하다. 원자로심을 순환하는 원자로냉각재계통의 유량 측정방법은 엘보우를 이용하기 때문에 원자로심에서 발생한 열을 측정하기 곤란하며, 따라서 증기발생기 2 차측에서의 급수와 증기를 이용하여 열출력을 측정하고 있다.

최근까지만 하더라도 원자력발전소에서의 효율 개념은 화력발전소에 비하여 소홀히 취급하여온 것이 사실이다. 그러나 최근의 사회적, 문화적인 변화의 소용돌이에서 원자력발전소에서도 안전성과 경제성이라는 두 마리의 토끼를 잡기 위하여 한층 노력을 기울이고 있다. 기존의 안전성에 PSA(Probabilistic Safety Assessment) 및 PSR(Periodic Safety Review) 등을 통하여 원전의 안전성을 더욱 확고히 하고 있으며, 경제성을 높이기 위하여서 특히 원전의 열효율 향상에 힘쓰고 있다. 열효율을 향상시키기 위한 방법으로 고리원전 3,4 호기에서는 그동안 사용해온 열출력 측정시스템을 새롭게 개발하여 적용하였다. 새롭게 개발된 열출력 측정시스템은 무엇보다도 원전의 열출력 측정이 실시간 처리가 가능해져 출력 저하에 대한 잠재요인을 실시간으로 찾아내어 경제성 향상에 기여하였고, 기존의 발전소 운전변수 분석 프로그램인 POPAS(Plant Operation Parameter Analysis System)와 연계하여 개발함으로써 설비의 중복투자를 방지하였다.

2. 열출력 측정에 대한 이론적 배경

열역학적인 측면에서 볼 때 일정한 출력준위에서 운전되는 증기발생기의 2 차측 물은 정상 유체계(Steady-flow System)로 볼 수 있으며, 정상 유체계로서 증기발생기는 질량유체의 전달 및 열전달이 이루어진 열린 계통이다. 어떤 계통으로 들어오는 질량 유량률($\dot{m}_{feed}$)은 그 계통에서 나가는 질량 유량률($\dot{m}_{steam}$)과 같다. 또한 그 계통으로 들어오는 유체상태는 시간에 따라 변하지 않으며, 그 계통에서 나가는 유체상태 역시 시간에 따라 변하지 않는다. 그리고 계통내 각 지점의 특성이 시간에 따라 변하지 않고 계통의 총 에너지는 변하지 않으며 계통에서 나가고 들어오는 질량의 운동에너지 및 위치에너지에 있어서의 변화는 엔탈피 변화와 비교할 때 무시할 정도로 작다. 더욱이 증기발생기는 주위계통(Surrounding)과 어떠한 에너지도 일의 형태로 전달하지 않는다. 1)

따라서 정상 유체계에서의 유체의 질량 유동률($\dot{m}$)에 관한 연속방정식(Continuity Equation of Steady-state Flow)은 다음과 같다. 2)

$$\dot{m} = \frac{A_i V_i^2}{v_i} = \frac{A_e V_e^2}{v_e} = const.$$

여기서,

$\dot{m}$=유체의 질량 유동률(lbm/hr)

A=유체의 흐름방향에 수직인 단면적(ft^2)

V=유체의 속도(ft/hr)

v=유체의 비체적(ft^2/lbm)

개방계에 대한 열역학 제 1 법칙을 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i(k.e_i + p.e_i + u_i + P_i v_i) - \dot{m}_e(k.e_e + p.e_e + u_e + P_e v_e) = \frac{d}{dt}(K.E + P.e + U)_{system}$$

그리고 일반 에너지방정식을 단순화하기 위하여 비엔탈피의 개념을 정상 유체계에 적용시키면 다음과 같다.

$$\dot{Q} + \dot{m}_i(\frac{v_i^2}{2} + g\,z_i + u_i + P_i v_i) = \dot{W} + \dot{m}_e(\frac{v_e^2}{2} + g\,z_e + u_e + P_e v_e)$$

$$\dot{Q} + \dot{m}_i(\frac{v_i^2}{2} + g\,z_i + h_i) = \dot{W} + \dot{m}_e(\frac{v_e^2}{2} + g\,z_e + h_e)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}\left[(\frac{v_e^2}{2} - \frac{v_i^2}{2}) + (g\,z_e - g\,z_i) + (h_e - h_i)\right]$$

그런데 증기발생기에서 계(입구경계 및 출구경계)의 경계를 드나드는 질량과 관련된 운동에너지와 위치에너지의 변화는 엔탈피의 변화와 비교할 때 거의 무시된다. 따라서 이와 같은 정상유체에서의 가정을 근거로 하여 증기발생기 2 차측의 과정(Process)에 대한 열역학적 분석은 열역학 제 1 법칙을 사용하여 단순히 나타낼 수 있다. 3)

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}(h_e - h_i)$$

여기서,

$\dot{Q}$ =증기발생기 경계를 통하여 이루어지는 2 차측 물의 순수 열전달률(BTU/hr)

$\dot{m}$=증기발생기를 출입하는 2 차측 물의 질량 유량률(lbm/hr)

h_i=증기발생기로 들어오는 급수의 비엔탈피(BTU/lbm)

h_e=증기발생기에서 나가는 증기의 비엔탈피(BTU/lbm)

3. 열출력 측정시스템의 개발과정

3.1 고리원자력발전소 3,4 호기의 열출력 측정설비 개요

고리원자력발전소 3,4 호기의 상업운전은 각각 1985. 9. 30 일, 1986. 4. 29 일에 시작되었다. 상업운전 이후 최초로 사용한 열출력 측정시스템은 공급자(Westinghouse)에서 제공한 프로그램(PPPC: Primary Plant Performance Calculation)을 사용하여 왔으나, 입력변수의 계기 신뢰도 저하(정밀급의 정확도가 아님)로 사용의 불편을 느끼던 중 1989 년경 운영체제를 MS-DOS 기반으로 하는 BASIC 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 현장의 열출력 관련 변수중 일부를 On-line 으로 IMP/PC Adaptor 를 거쳐 A/D Converter Card 를 통해 PC 에 입력받아 프로그램 내에서 평균값을 산출하여 열출력을 자동 계산하도록 개발되어 공급자에서 제공한 프로그램보다 신뢰성이 높았다. 하지만 이 프로그램도 시대의 변화에 따라 새로운 열출력 측정프로그램의 개발을 필요로 하게 된다. 이 프로그램의 문제점들을 Hardware 와 Software 적인 측면에서 살펴보면 다음과 같다.

Hardware 적인 문제점을 살펴보면,

첫째, 시간의 경과에 따라 열출력 측정설비가 노후화되어 오차가 증가하게 되었다. 예를 들면 현장의 열출력 관련 변수가 일정하게 입력되더라도 IMP/PC Adaptor 및 A/D Converter Card 와 같은 열출력 측정설비의 오차 증가로 출력값이 Swing 하는 문제가 발생하게 되었다.

둘째, 열출력 측정용 현장 계기의 정확도(Accuracy)가 낮아 열출력 측정의 신뢰도가 낮다. 당시의 열출력 관련 변수, 예를 들면 주급수(Main Feedwater) 유량, 주급수 압력, 주급수 온도 등의 측정계기는 정확도 0.2%의 정밀급이었으나, 신형의 정밀급(정확도는 0.07%)에 비하여 정확도가 떨어졌다. 또한 증기발생기 취출수(Steam Generator Blowdown Liquid and Steam) 유량은 소내 전산기 값을 이용하여 비정밀급을 사용하였다.

셋째, 가장 실질적인 문제로 열출력 프로그램 Hardware 파손시 제작 능력 및 Spare 가 없다는 사실이다. 이 문제는 새로운 열출력 프로그램을 개발하게 만든 가장 근원적인 문제로 대두되게 된다.

Software 상의 문제점은,

첫째, 프로그램의 검증방법이 없다는 사실이다. 프로그램 개발 Source 및 개발 후의 성능분석 등의 이력관리가 되어있지 않았고, 프로그램 사용설명서 등 프로그램 이용에 대한 관리가 부족하였다. 이는 당시의 프로그램 개발이 회사 내에서 조직적으로 개발한 것이라기보다는 열출력 관련 담당자의 열출력 측정 애로에 의하여 스스로 프로그램을 개발하였기 때문이다.

둘째, 프로그램 사용자 측면에서의 편의성이 낮다는 점이다. 주급수 압력 및 주증기(Main Steam) 압력 등의 변수가 자동으로 입력되지 않고 현장에서 정밀급 계기(Heise Gauge)를 설치한 후, 그 값을 별도로 PC 에 입력하여야 하는 번거로움이 따랐다. 또한, 프로그램 사용단위가 영국 단위이어서 발전소에서 사용하는 MKS 단위와 일치하지 않아 변수 입력 시 단위변환이 요구되었고, 일부 변수들은 값이 Volt 단위로만 표기되어 실제 값을 알려고 할 때 재계산이 필요하게 되었다.

셋째, 프로그램 실행 중 잦은 Error 가 발생한다는 사실이다. 열출력 전용 PC 가 아닌 일반용 PC 를 같이 사용하여 프로그램 실행 Down 되는 경우가 자주 발생하였고, 관련 변수 중 단 하나의 변수라도 On-line 상태가 아닐 경우 전체의 프로그램이 정지되는 등의 불편함이 많았다.

이상과 같은 프로그램의 문제점을 개선하고자 2000 년 초에 새로운 열출력 측정프로그램의 개발에 대한 추진계획을 수립하여 프로그램을 개발, 검증하여 발전소에 적용하게 된다.

3.2 새로운 열출력 측정설비의 개선방향

열출력 측정설비의 개선방향을 다음과 같이 세가지 범주로 고려하였다. 첫째, POPAS 서버를 이용한 네트워크 및 데이터베이스를 구축하였으며, 둘째, POPAS 프로그램과 연계되도록 열출력 측정 프로그램을 개발하였고, 셋째, 열출력 측정설비 자체를 교체하였다. 즉, 현장 측정값이 Display 가능한 최신형 정밀 계측기로 교체하였고, 최신의 DAS(Data Acquisition System) 설비로 교체하였으며, 열출력 전용 PC 를 설치하였다.

열출력 측정설비 개선팀을 조직하여 각 팀별 업무 분장을 명확히 하여 과거와 같이 프로그램의 이력관리에 문제점이 발생하지 않도록 하였다. 조직은 프로그램 개선 및 검증 종합관리팀, 프로그램 검증 지원팀, 프로그램 개선팀, 프로그램 개발팀 및 측정설비 개선팀 등의 세부조직으로 분류하여 효율적인 업무수행이 가능하도록 하였다.

4 열출력 측정시스템 개요

4.1 시스템 개요

원자력 발전소 운전 및 열출력 측정과 관련된 생산자료를 입력, 가공, 분배, 저장 및 이용을 함에 있어 프로그램을 Window 운영체제에서 Network(LAN)을 구성하여 원격에서 측정 및 감시가 가능하도록 하였으며, 운전이력의 WEB DB 를 구성하여 분석 및 검색 등 이용자 편의기능을 증대시켜 정보의 공유화가 되도록 함으로써 원자로 출력의 100% 정격출력 유지를 통한 원자력발전소 이용률의 향상 및 효율 최적화로 원자력발전소의 경제성을 향상시켰다. 4)

4.2 주요 기능

4.2.1 원격감시 서버

- 자료 수집
- 열출력 측정 및 운전변수 감시
- 열출력 Data 검색
- 원격신호 전송
- Raw Data 수정

4.2.2 WEB 서버

- WEB DB 구성

  원격감시신호 1200 개(자동)

  운전원 OSR(On Site Report)

- 이력개발 검색

  ID, 신호명, 계기번호 등에 의한 검색/출력 기능

  시간, 파일명에 의한 검색/출력 기능

- 경향 분석

  Zooming 기능, Range 선택 기능

- MIMIC 구성(계층구조 3 계층)
- 보고서 출력

4.3 열출력 측정설비 시행항목

4.3.1 열출력 측정설비 운영체제 재구축

MODEM 을 이용하는 On-line 설비이며, Network 및 DB 구축이 안되어 필요에 따라 열출력 계산을 수행하는 방식에서 신형 DAS 와 서버를 구축하여 개선된 운영체제를 구축하였다. 이에 대한 자세한 설명은 4.4 항 시스템 구성도에서 설명한다.

4.3.2 열출력 프로그램 재개발

프로그램을 다음의 네 가지 특징을 가지고 재개발하였다.

첫째, 프로그램 운영체제를 MS-DOS 체제에서 WINDOWS 체제로 바꾸었다.

둘째, 기존의 개발된 프로그램(POPAS)과 열출력 측정 프로그램이 연계되도록 개발되었다.

셋째, 사용자 인터페이스를 향상시킨 점이다. 주급수 온도, 주급수 압력 및 주증기 압력 등의 기준변수를 정밀급 계측기로 설치하여 실시간으로 비교 가능하도록 프로그램을 개선하였으며, 서버의 열출력 계산결과의 DB 를 추이, 분석 가능하도록 곡선 Display 기능 등을 추가하였다. 또한 프로그램 사용단위에 있어서 입력 값이 영국단위 혹은 미국단위로 입력되더라도 출력단위를 필요한 단위로 출력할 수 있도록 하였으며, 열출력 계산결과를 연속적으로 Display 될 수 있도록 프로그램을 개발하였다.

마지막으로 변수 취득 및 계산결과의 신뢰성 분석기법을 도입하였다. 실시간으로 입력되는 변수의 평균값에서 일정범위를 벗어나거나 신호 미입력 변수에 대하여서는 열출력 계산 수행 시 이 변수들이 배제되거나 사용자에게 상황정보가 제공되도록 프로그램이 설계되었다. 또한 프로그램 계산 시 수동으로 계산할 수 있는 기능을 추가하여 자동 계산의 결과와 편차를 확인할 수 있도록 하였다.

4.3.3 열출력 측정설비 교체

구형의 DAS 를 신형의 정확도 0.1%미만의 DAS 로 교체하였다. 열출력 관련 현장에 설치된 계측기는 총 28 개의 계측기를 교체하였으며, 계측 변수 및 계산결과의 신뢰도 향상을 위해 정확도 0.07%인 정밀급으로 교체하였다. 계측기 자체의 측정값을 디지털로 표시되는 계측기로 하였으며, 현장 계측기 지시 값의 정확도를 비교하기 위한 기준 계기를 영구설비로 교체하였다.
이에 대한 자세한 설명은 표 4.1 에 나타나 있다.

Table 4.1 The Number of Instruments

Name of Instrument	Instrument Number	Quantity			Remarks
		K-3	K-4	Total	
Main Feed-water Flow	AE-FT476A/486A/496A	3	3	6	
Main Feed-water Press.	AE-PT151/251/351(Permanent) AE-PP151/251/351(Temporary)	3 0*	3 3	6 3	*이전주기 설치완료
Main Feed-water Temp.	AE-TE006/008/019	3	3	6	
Main Steam Press.	AB-PT101/201/301(Permanent) AB-PP101/201/301(Temporary)	3 0*	3 3	6 3	*이전주기 설치완료
Steam Generator Blow-down	BM-FT406/510	2	2	4	
Total		11	20	34	

4.4 시스템 구성도

시스템 구성은 DAS 설비를 통한 운전변수를 연속으로 취득하며, 서버를 이용한 네트워크 구축 및 계산결과의 DB 를 구축할 수 있다. 즉, 서버에서 Client PC 까지 LAN 망을 이용하여 네트워크를 구축하였고, 서버에서 일정시간(일일, 주간, 월별, 계절별, 주기별)에 따라 DB 가 자동으로 구축되며, Client PC 에서 서버의 DB 및 계산결과가 Display 가능하도록 하였다. 서버는 기존에 구축된 POPAS 서버를 사용하였다.

이에 대한 시스템의 구성도를 그림으로 보면 그림 4.1 및 그림 4.2 와 같다.

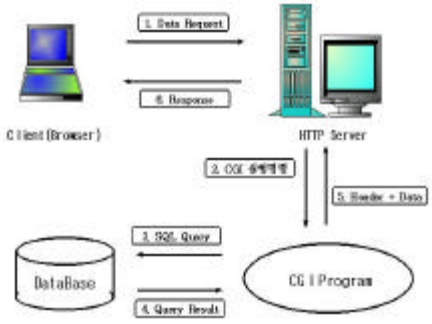

Fig. 4.1 Diagram of System

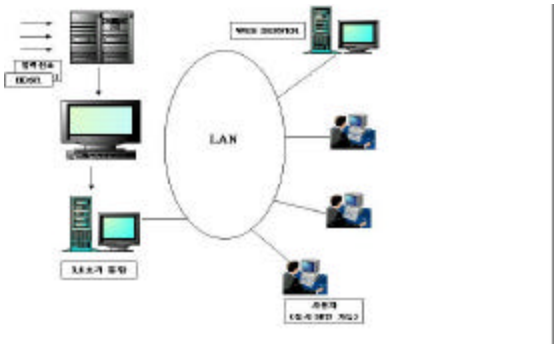

Fig. 4.2 Diagram of Network

4.5 시스템 사용설명

4.5.1 Graph 보기

그래프의 기능은 경향 분석기능, 측정기능, 감시기능의 모드가 있으며, 모든 기능에는 기본적으

로 DRAGDROP 기능이 포함되어 있다. DRAGDROP 기능이란 위 3 가지 어느 모드에서 마우스를 올려놓고 오른쪽 버튼을 누른 상태로 DRAG 를 한 후 마우스를 놓는 임의의 위치가 처음과 끝 점이 되어 이것이 경향분석모드로 넘어가 작업을 진행하는 것을 말한다. 필요한 모드를 선택한 후 시간 종류를 선택할 수 있는데, 시간은 10 초 데이터, 2 분 데이터, 1 시간 데이터 및 1 일 데이터로 구분되어 있다. 기본값으로 DB 에 저장되는 값은 10 초 데이터이며 필요한 경우 변경 가능하다. 또한 시간종류를 선택하는 방법은 모드에 따라 다르며, 경향분석을 선택한 경우에는 종류를 선택할 필요가 없다. 다음의 Fig. 4.3, Fig. 4.4 및 Fig. 4.5 는 각각 측정모드, 감시모드 및 경향분석모드를 선택했을 때 나타나는 화면이다.

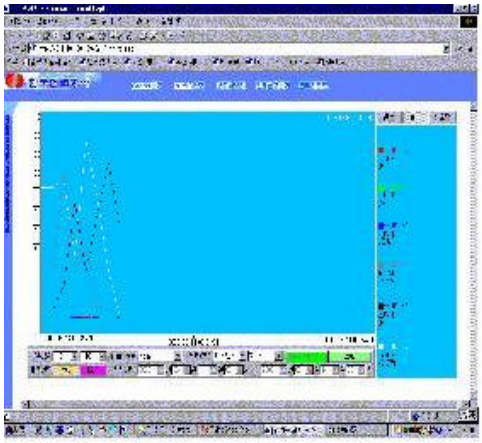

Fig. 4.3 Measurement Mode

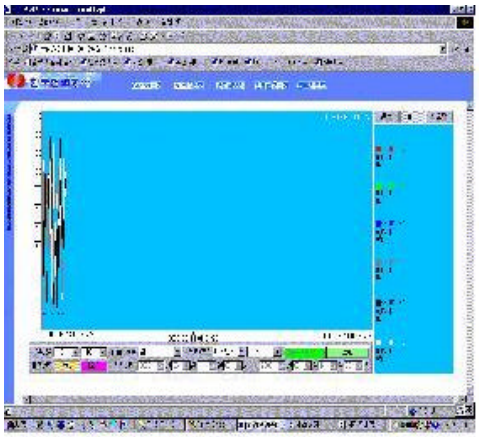

Fig. 4.4 Monitoring Mode

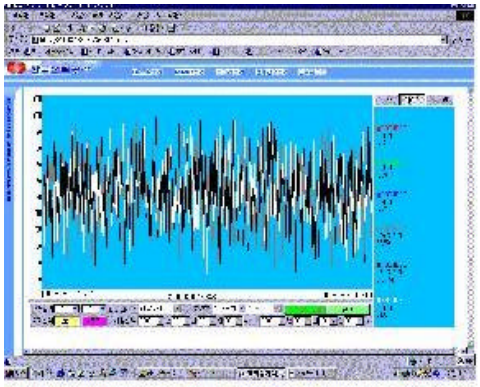

Fig. 4.5 Trending Mode

4.5.2 MIMIC 보기

MIMIC 의 기능은 현재시점부터의 측정과 감시를 실제 그림을 보면서 쉽게 알 수 있도록 하는데 있다. 열출력에 관련된 변수 이외의 각종 변수들을 해당 그림을 이용하여 볼 수 있다. 모드는 측정 및 감시의 두 가지 모드이며, 측정모드는 선택한 DB 에서 값을 읽어 선택한 간격만큼 해당 시간마다 DB 에 접근하여 값을 읽는다. 정해진 시간(Graph 보기의 시간종류와 동일하다.)이 되면 현재 읽어온 값들의 평균을 계산하고 열출력 관련 값들을 산출하여 화면상에 보여준다.

감시모드는 선택한 DB 에서 값을 읽어 선택한 간격만큼 해당 시간마다 DB 에 접근하여 값을 읽는다. 정해진 시간(Graph 보기의 시간종류와 동일하다.)이 되면 현재 읽어온 값들의 평균을 계산하고 열출력 관련 값들을 산출하여 화면상에 보여준 후 다시 처음의 상태로 되돌아가 위와 같은 작업을 반복한다.

다음 Fig. 4.6 과 Fig. 4.7 은 측정모드와 감시모드로 각각 실행을 한 경우 화면에 나타난 그림을 보

여준다.

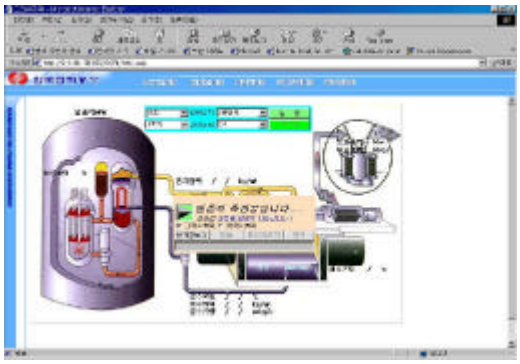

Fig. 4.6 Measurement Mode

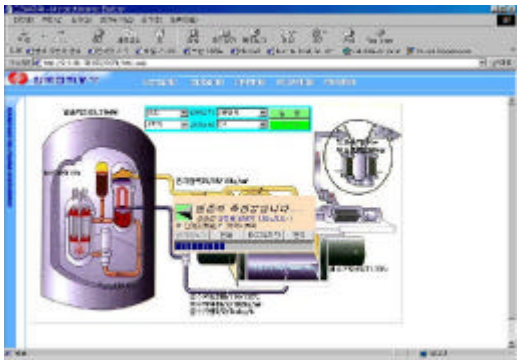

Fig. 4.7 Monitoring Mode

4.5.3 보고서 보기

보고서 보기는 출력할 조건과 입력 값을 이용하여 데이터를 가져와 보고서의 형식으로 보여주는 것으로 이는 Table 4.2 에 나타나 있다.

Table 4.2 Report of the Measurement of Thermal Power

고리3호기 열출력 측정 결과 기록표

측정기간 ~ 측정자 (인)

1. 급수

	LOOP1	LOOP2	LOOP3
차압(V)	4.937	4.937	9.858
차압(mmHg)	400	400	800
온도(℃)	290	114	122
압력(kg/㎠)	89	7	102
엔탈피(KJ/kg)	1895.5399	2353.7205	520.6778
유량(Mkg/h)	2	2	3

2.증기

	LOOP1	LOOP2	LOOP3
압력(kg/㎠)	25	55	18
엔탈피(KJ/kg)	2623.5991	2780.6576	2671.0921

3.취출수

	VENT	DRAIN	TOTAL	RATE
유량	16000Kg/h	45LPS	0.162	2.31%

4.증기발생기출력

	LOOP1	LOOP2	LOOP3
유량(MKJ/hr)	1332.52	767.19	6332.23

5. 열출력

열출력		원자로출력
2342.21MW		2332.21MW
8431.95		84.04%
NIS출력		18
발전기출력	유효전력	2
	무효전력	50

6.기타운전변수

	LOOP1	LOOP2	LOOP3
냉각재평균온도(℃)	72.5	18.5	13.5
복수기진공도(mmHg)	22	93	79
해수온도(IN/OUT)(℃)	49/31.33		

4.6 개발효과

- 최신의 Internet 기술의 접목을 통한 효과적인 자원 이용 및 안전성 확보
- 실시간의 정확한 통계정보 제공
- 수작업으로 처리하던 업무의 능률제고 및 효율적인 관리 지원

- 정보 공유 및 각종 통계자료의 즉시 제공
- 발전된 사용자 Interface 제공
- 브라우저의 종류에 관계없는 Intranet 지원
- 빨라진 자료처리로 인한 고부가가치 업무수행

5 결론

고리원자력발전소 3,4 호기에서의 열출력 측정방법은 이제까지 MS-DOS 기반하에서 현장에서 주어진 변수를 원격으로 전송하여 처리하는 방식과 기준변수를 수동으로 입력하는 방식이었으나, 새로 개발된 열출력 측정시스템은 Internet Explorer 기반하에서 동작되어 Client 서버가 구축된 어느 장소에서든지 열출력을 감시할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 특히 열출력 관련 변수가 현장에서 서버로 자동으로 실시간 처리되어 열출력 진단이 실시간으로 가능해졌으며, 기존의 운전변수 관리 프로그램인 POPAS 와 연계하여 개발된 장점을 가지고 있다. 따라서 기존의 열효율 향상기법보다 우수한 방법이 적용되어 열효율의 저감 시 즉시 대처가 가능하도록 한 것은 이 프로그램의 가장 큰 특징중의 하나라고 할 수 있다.

향 후에는 POPAS 프로그램의 입력 데이터와 NOPAS 프로그램의 데이터와의 공유가능성 여부, NOPAS 프로그램의 Source 개발 등을 검토하여 NOPAS 프로그램의 실시간 열출력 감시기능을 부여하도록 할 예정이다. 또한 타 원전 성능 및 효율관리 시스템과도 상호 비교하여 더욱 향상된 효율관리 기법을 적용할 예정이다.

참고문헌

1. 한국전력공사, 열유체 실무이론, 1988.
2. J. P. Holman, Heat Transfer (6^{th} edition), McGraw-Hill Book Co., 1986
3. J. R. Welty • R. E. Wilson • C. E. Wicks, Fundamental of Momentum Heat and Mass Transfer (2^{nd} edition), John Wiley & Sons Inc., 1976
4. 한국전력공사, 고리 3,4 호기 열출력 시스템 사용자 안내서, 2000