

원전 계측제어 시험검증설비 개발 및 응용

권기춘, 박원만, 송순자

한국원자력연구소
305-353, 대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

앞으로 건설되는 원전의 계측제어계통은 디지털 기술로 설계될 전망이다. 그러나 디지털 기술을 원전 계측제어계통에 적용하는데 있어서 디지털 기술이 원전의 안전성이나 신뢰도에 영향을 미치지 않는다는 사실을 보증하여야 하며, 디지털계통의 기능과 성능에 대한 확인/검증은 원전에 설치되기 전에 수행되어야 한다. 계측제어 시험검증설비의 목적은 새롭게 개발되는 디지털 제어 및 보호 알고리즘, 경보축약 알고리즘 또는 운전지원계통등의 성능을 검증하기 위함이다. 시험검증설비의 소프트웨어는 웨스팅하우스형 993 MWe 가압경수로를 모델링한 수학적 모델링과 시험검증설비를 운용하기 위하여 필요한 종합운용프로그램으로 구성된다. 하드웨어는 공학용 워크스테이션, 시험용 패널, 개발되는 계통과의 인터페이스를 위한 VXI 인터페이스 모듈, 그리고 공용메모리의 값을 시험대상 시작품으로 전송하는 Ethernet 모듈등으로 구성된다. 사용자 인터페이스로 할덴 원자로 프로젝트에서 개발된 Picasso-3 그래픽 도구를 이용한 화면과 60개의 주요변수의 값을 CRT에 표시하는 기능을 제공한다. 계측제어 시험검증설비를 응용한 계측제어계통 시작품은 정상운전 및 과도상태에서 적절한 시험결과를 제공하였다.

1. 서론

현재 운전되고 있는 대부분 원전의 계측제어계통은 아날로그 기술로 건설되어 노후화에 따른 잦은 고장과 높은 유지보수 비용 부담에 직면해 있다. 반면에 디지털 기술은 많은 양의 정보처리, 계통 신뢰도의 향상, 새로운 기능의 추가에 대한 유연성, 주기점검의 자동화, 자가진단, 그리고 표준화 및 모듈화된 기기 사용에 따른 유지보수 비용의 감소등 많은 장점을 제공하고 있다. 따라서 앞으로 건설되는 원전에는 안전성, 가용성 및 운전성 향상을 위하여 디지털 기술이 적용될 전망이다[1]. 그러나 디지털 기술을 원전에 적용함에 있어 디지털 기술이 원전의 안전성이나 신뢰도에 영향을 미치지 않는다는 사실을 보증하여야 한다. 계측제어 시험검증설비의 목적은 새롭게 개발되는 디지털 제어나 보호 알고리즘, 경보축약 알고리즘 또는 인공지능기술을 응용한 운전지원계통의 성능등을 검증하기 위함이다. 특히 노후화된 계측제어계통을 최근에 개발된 디지털 계측제어계통으로 대체하는 경우, 설치시 어려움이 발생하거나 설치후 예상대로 작동하지 않을 경우 큰 어려움에 처하게 된다. 따라서 디지털 계측제어계통의 기능 및 성능에 대한 확인/검증은 원전에 설치하기 전에 수행되어야 한다[2].

최근에 개발되는 계측제어계통에 적용되는 기술이 고도화, 지능화되어 가면서 계측제어계통의 기능이 종합적이고(integrated), 지능적이며(intelligent), 다양해(diverse)지고 있다. 이러한 다양한 기능을 시험 및 검증하기 위해서 요구되는 신호들은 신호의 종류에 따라 연속적이고, 실시간으로 처리되어야한다. 계측제어계통은 다양한 기능을 포괄하는 통합적 종합기술이며, 이들 기능을 시험 및 검증하기 위해 요구되는 원전의 신호도 다양하게 제공되어야 한다. 이러한 신호들을 원전으로부터 직접 제공받는 것은 불가능하므로 모의화된 원전의 신호들을 다양한 인터페이스를 통해 제공하는 시험검증설비가 필수적이다. 미전력연구소(EPRI)의 사용자설계요건 제 10장 인간-기계연

계체계(Man-Machine Interface System, MMIS)에서도 디지털 기술을 원전에 적용하기 위해서는 공정제어 계통이나 발전소 보호계통 개발 초기부터 입출력 신호의 유무를 확인하고, prototype을 제작하여 계통 자체의 성능을 확인하고, 이를 동적 모사(dynamic simulation)가 가능한 시뮬레이터나 전규모(full-scope) 시뮬레이터와 통합(integration)하여 그 계통의 안전성 및 신뢰성을 확실히 시험 및 검증하고 난 후에 실제 원전에 적용하도록 요구하고 있다. 또한 MMIS 설계절차(design process)는 디지털 컴퓨터기반의 동적 모델을 가져야 하고, 각각의 제어계통을 포함하는 전 플랜트 응답을 제공하도록 하고 있다[3].

제안하는 시험검증설비는 하드웨어 공통모드고장 시험이나 소프트웨어 확인/검증에 활용하기에는 약점을 갖고 있으나, 소프트웨어 확인/검증의 한 단계인 계통 기능의 동적시험에는 활용할 수 있다. OECD 할덴원자로프로젝트의 Nokia Reactor Simulator (NORS), 미국 ORNL의 Advanced Liquid Metal Reactor Power Block Simulator, 프랑스 EdF의 N4를 위한 S3C 등의 시험검증설비가 개발되어 운용되고 있다.

2. 시험검증설비 개발

시험검증설비는 크게 하드웨어 설비, 소프트웨어 모듈 그리고 사용자 그래픽 인터페이스를 포함하는 입출력 인터페이스로 구성되며, 전체 구성도는 그림 1과 같다.

2.1 하드웨어

주요 하드웨어 설비는 VME eXtensions for Instrumentation (VXI) 버스와 소형 시험판넬이며, VXI 버스는 호스트 컴퓨터와 개발하는 시스템 또는 시험판넬간의 인터페이스를 제공한다. VXI는 다중공급자의 개발구조로 모듈형태의 계측장비를 산업표준(IEEE 1155)으로 제공하는 개방형구조를 지향하고 있다. 이 VXI 버스구조의 특징으로는 기존의 산업표준으로 널리 사용되던 GPIB (General Purpose Interface Bus) 인터페이스의 전송속도를 개선하였다. 그리고 기존에 사용되던 VME버스에서 해결하지 못한 방사 및 전도 잡음의 수준을 정의하여 계측장치내부의 전자기적 간섭을 정의하도록 하였다.

시험검증설비의 입출력장치는 아날로그 입력(0-10V) 160개, 아날로그 출력(0-10V, 0-20mA) 56개, 디지털 입력 176개, 디지털 출력 176개 및 점점출력 32개로 구성되어 있으며, 입출력장치의 신호를 직접 측정할 수 있는 오실로스코프 및 디지털 멀티미터 각 1대로 구성되었다. 시험검증설비의 주요 하드웨어 기능으로는 입출력되는 비정상신호의 검출, 예상되는 영역을 벗어나는 과도한 신호 검출 및 이상신호의 간단한 진단기능이 포함된다. 이들 기능은 VXI제조업체에서 제공하는 도구인 C-SCPI(Compiled Standard Commands for Programmable Instruments)를 이용하여 "C" 언어로 구현하였다.

시험판넬은 LED표시장치, 푸쉬버튼, 토글스위치 및 여러가지 기능 키로 구성되어 있다. 이 시험판넬은 입출력장치에서 주요변수의 표시와 시험검증설비의 간단한 입력장치로 활용할 수 있다.

2.2 소프트웨어

시험검증설비의 주요 소프트웨어는 실시간으로 수학적 모델링 프로그램을 구동하는 프로세스 모델링 프로그램, 사용자의 각종명령을 처리해주는 종합운용 프로그램, 주요변수 CRT 표시 및 Ethernet 인터페이스 모듈등이다. 모든 프로그램은 공유메모리(Shared Memory)를 통하여 실시간으로 많은 양의 데이터를 효율적으로 처리한다. 공유메모리는 여러 프로세스 사이의 통신을 가장 효율적으로 처리할 수 있는 방법으로 공유메모리내의 특정 논리적 주소 부분을 공유블럭으로 설정해 놓으면 다른 프로세스가 이 영역의 자원을 액세스할 수 있게 된다.

2.2.1 프로세스 모델링

시험검증설비는 웨스팅하우스 3 loop, 993 MWe 가압경수로를 참조모델로 하여 주로 고리

3.4호기를 기본모델로 하여 모델링하였으며, 원자력연구소 연수원에 설치된 소형 원전 모의장치의 모델링 코드를 사용하였다.

프로세스 프로그램은 정적(static) 부분과 동적(dynamic)부분으로 나누어지며, 정적부분은 동적부분의 계산을 시작하기 전에 100% 전출력 초기조건과 각종 기기 설정값을 입력받기 위하여 한 번만 수행된다. 동적부분은 실시간 동작을 모의화하기 위하여 매 0.2초 마다 한 번씩 수행된다. 수학적 모델링 프로그램이 수행되는 유닉스(UNIX) 운영체제하에서는 완벽한 실시간 수행이 원칙적으로 불가능하다. 그러나 유닉스의 system call의 스케줄링 기능을 이용하여 시험검증설비에서 요구되는 수준의 구현이 가능하다. 시험검증설비는 개발된 prototype을 시험하기 위한 과도상태나 사고상태를 재현할 있도록 미리 정의된 79개의 오동작을 삽입할 수 있는 기능을 제공한다.

2.2.2 종합운용 프로그램

종합운용 프로그램은 시험검증설비를 운용하는데 필요한 모든 명령어를 처리한다. 주요 명령어의 기능은 다음과 같다.

- Run : 정지된 동적 프로세스 모델링 프로그램이 실시간으로 실행하도록 하는 명령어.
- Freeze : 실행중인 동적 프로세스 모델링 프로그램을 정지시키는 명령어.
- One Step : 동적 프로세스 모델링 프로그램을 한 번만 수행하도록 하는 명령어. 빨리 진행되는 특정 기능을 시험하기 위하여 한단계 한단계씩 수행할 때 사용하면 편리하다.
- Store : 특정 운전조건을 나중에 사용하기 위하여 디스크 파일 형태로 저장하는 명령어. 이 경우 생성할 수 있는 파일의 수에는 제한이 없다.
- Get : 디스크 파일 형태로 저장된 특정 운전조건을 불러오는 명령어로 시험을 위한 초기 조건이 생성된다.
- Display : CRT에 표시되는 특정 변수명을 변경하는 명령어
- Change : CRT에 표시되는 특정 변수의 값을 임의의 값으로 변경할 수 있는 명령어
- Malfunction : 미리 정의된 오동작을 삽입하고, 삽입된 오동작의 상태를 확인할 수 있다.
- Print global : 모든 전역변수를 특정 파일의 형태로 출력하는 명령어

2.3 인터페이스 모듈

인터페이스 모듈은 VXI 모듈, CRT 변수표시 모듈, 개발된 Prototype 그리고 그래픽 사용자 인터페이스 (Graphic User Interface, GUI)와의 인터페이스를 포함한다. 이 모든 인터페이스는 공유메모리를 통하여 이루어진다. 서로 다른 프로세스와의 통신은 Inter Process Communication (IPC)으로 불리며, 메시지 큐, 세마포어, 공유메모리를 이용하는 방법등이 있다. 이 중에서 실시간 실행을 위해서는 같은 논리적 메모리공간을 공유하는 공유메모리를 이용하는 방법이 가장 빠르고 효율적이다. 같은 호스트 컴퓨터내에서는 공유메모리를 이용하여 프로세스간 통신이 가능하나, 다른 호스트에서 개발된 Prototype과의 통신을 위해서는 공유메모리내의 데이터를 Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP)를 이용하여 전송하게 된다.

CRT 변수표시 모듈은 X-Terminal 상에 60개 변수의 현재값을 표시하고 있으며, 종합운용 프로그램에서 변수명 전체 또는 일부의 수정이 가능하고, 변수값을 임의의 값으로 지정할 수 있다.

그래픽 사용자 인터페이스 모듈은 Picasso-3 그래픽 도구를 이용하여 개발되었다. Picasso-3는 분산처리환경하에서 객체지향개념을 지원하는 그래픽관리시스템으로 할덴 원자로 프로젝트에서 개발되었다. 이 모듈에서는 프로세스 mimic, 각종 기기의 현재 상태와 주요변수의 현재 값을 표시한다. Picasso-3를 이용한 그래픽 사용자 인터페이스 모듈은 크게 Picasso-3 응용 모듈, 데이터 인터페이스 그리고 시험검증설비등 3부분으로 나누어진다. 시험검증설비와 Picasso-3와의 통신은 공유메모리를 통하여 이루어지고, control, rtm(run time manager), s/wbus 사이의 통신은 Picasso-3에서 제공하는 내부통신을 이용한다. 그래픽 사용자 인터페이스 모듈내의 모든 프로세스

는 control에 의해서 관리되며, Picasso-3와 시험검증설비사이의 통신에 의한 데이터의 일관성을 유지하기 위해서 특정한 데이터베이스(pdat)를 사용한다. Picasso-3에 의해서 생성된 pdat의 정보는 rtm 프로세스로 보내지며, rtm 프로세스에서 최종적으로 시험검증설비로부터 받은 데이터를 화면으로 보내게 된다[4]. 그래픽 사용자 인터페이스 모듈의 데이터 인터페이스 방법을 그림 2에 나타내었다.

3. 시험검증설비 응용

3.1 자동기동시스템

자동기동시스템 (Automatic Startup Intelligent Control System, ASICS)은 감독자계통과 각 모드별 제어를 위한 분산제어계통으로 구성된다. 감독자계통은 분산제어계통을 제어하기 위한 슈퍼바이저 프로그램과 종합운전절차와 운전원의 경험으로부터 설계된 지식베이스로 구성되며, 실시간 전문가시스템 개발도구인 G2를 이용하여 구현되었다. 분산제어계통은 일차 가열 I 모드, 일차 가열 II 모드, 임계제어모드 및 이차제어모드등 네 종류의 자동모드와 운전유지대를 가지며, 각 모드는 각각의 제어를 갖는다. 운전유지대는 각 자동제어모드를 시작하기전의 점검기능과 운전원이 필요한 조치를 취할 수 있도록 프로세스의 진행을 일시 정지시킬 수 있는 기능이 있다. 이와 같은 ASICS의 기능과 성능을 시험하기 위하여 시험검증설비로부터 입력신호를 받아 ASICS에서 적절한 제어신호를 발생시켜 이를 다시 시험검증설비로 보내게 된다. 그림 3은 시험검증설비와 연결된 ASICS의 블록 다이어그램이다.

3.2 동적 경보시스템

동적 경보시스템은 경보, 프로세스 감시 그리고 진단을 통합하여 인간-기계연계체계의 운전성을 향상시키기 위한 Alarm and Diagnosis-Integrated Operator Support System (ADIOS)의 한 부분으로 실시간 전문가시스템 개발도구인 G2를 이용하여 구현되었다. 동적경보시스템은 처음에는 자신의 고유 우선순위를 갖고 있으나, 발전소 운전모드, 기기상태, 다중설정치 또는 다른 방법에 의하여 우선순위가 변화되는 개념으로 설계되었다. 운전성을 제외한 기능상의 유효성을 시험하기 위하여 시험검증설비가 사용되었다. 시험검증설비에서 오동작을 삽입하여 생성된 시험 데이터는 공유메모리로부터 G2에서 제공하는 G2 Standard Interface (GSI)를 통하여 동적 경보시스템으로 전달된다. 시험검증설비와 연결된 동적 경보시스템을 그림 4에 나타내었다.

3.3 사고진단시스템

인공지능을 응용한 사고진단시스템은 시간에 따라 입력되는 주요변수 또는 기기의 운전상태에 따라 사고 또는 과도상태의 종류를 인식하는 시스템이다. 제안된 사고진단시스템은 자기조직화 지도 (Self-Organizing Map)와 시간적인 특성과 공간적인 특성을 효과적으로 모델링할 수 있는 이중 확률 모델인 은닉 마르코프 모델 (Hidden Markov Model)을 인식 수단으로 이용하여 구현되었다. 시험검증설비는 사고상태 또는 과도상태의 시험 데이터를 모의화하여 사고진단시스템의 기능과 성능을 시험하는데 사용되었다. 그림 5는 시험검증설비와 연결된 사고진단시스템의 블록 다이어그램이다. 사고진단시스템은 같은 호스트에서 구현되었으므로 공유메모리내의 모의화변수 값을 3초에 한 번씩 읽어와서 진단하도록 하였다.

3.4 지능형 논리추적시스템

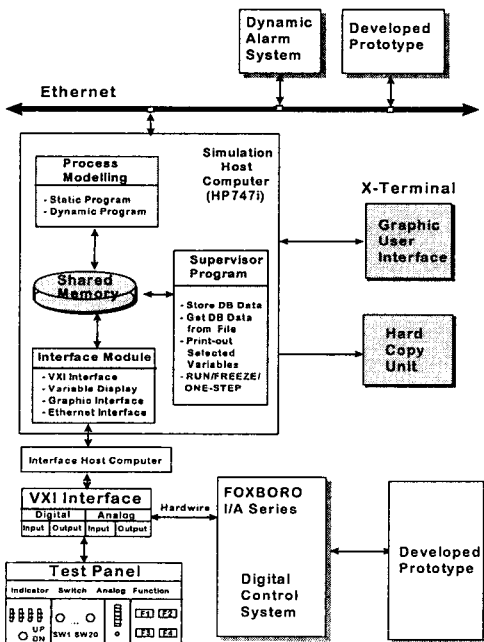
지능형 논리추적시스템 (Intelligent Logic Tracing System, ILTS)은 발전소 논리도면을 그래픽으로 처리하여 화면상에 표시한 다음, 해석대상의 논리 상태를 논리적 경로와 진단결과로 표시하는 시스템이다. 게이트와 같은 논리소자의 상태가 화면상에 표시되고, 실시간으로 논리상태가 갱신된다. ILTS는 시험검증설비의 공유메모리와 연결되어 시험되었으며, 논리추적시스템과의 연결 블록 다이어그램은 그림 6과 같다.

4. 결론

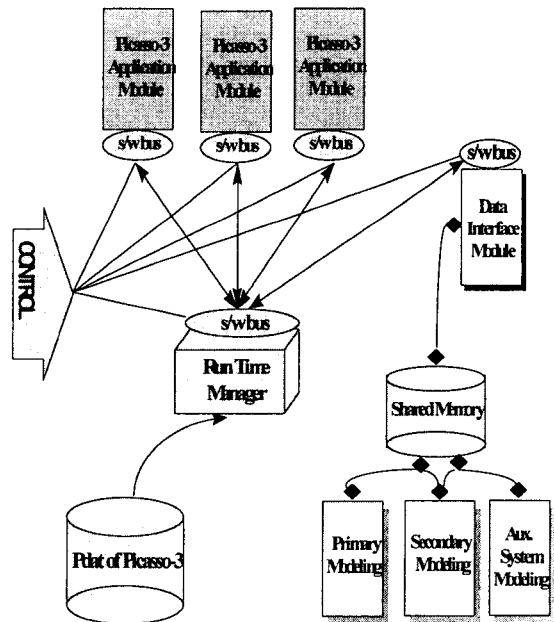
새롭게 개발되는 디지털 계측제어계통 뿐만아니라 기존 계측제어계통의 성능향상시 그 기능과 성능을 시험 및 검증하기 위하여 시험검증설비의 개발이 필요하다. 미국 EPRI의 URD에서도 MMIS 설계시 동적 모델이나 제한된 목적의 시뮬레이터를 활용할 것을 권고하고 있다. 개발된 시험검증설비는 자동기동시스템, 동적 경보시스템, 사고진단시스템 그리고 지능형 논리추적시스템을 시험 및 검증하는데 사용되었으며, 그 평가결과는 시험검증설비의 성능이 충분함을 보여주었다. 시험검증설비로 현재 디지털 계측제어의 기술 현안인 공통모드고장이나 소프트웨어 확인/검증 문제를 해결하기에는 어려우나 필요시 시험검증설비의 변경도 고려된다.

참 고 문 헌

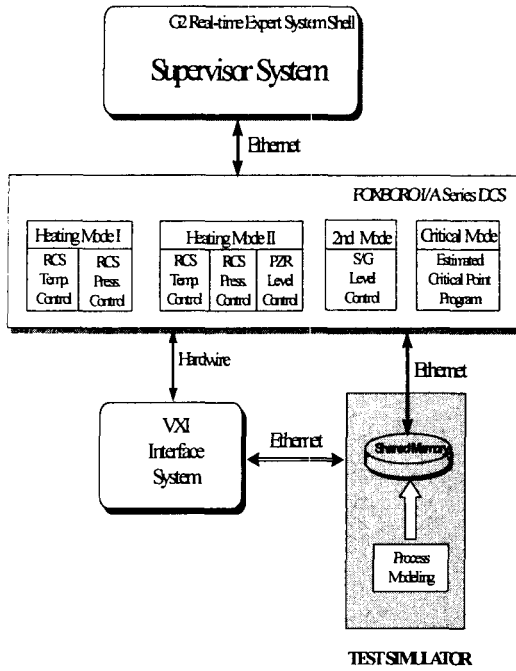
- [1] K. C. Kwon, et al., Proposed Plan for the Development of Advanced Instrumentation and Control Technology in Korea, IAEA Technical Committee Meeting on Advanced C&I Systems in NPPs, Espoo, Finland, June 20-23, 1994.
- [2] Mikell Lord, Simulator Testing of Digital Control Systems, Nuclear News, pp.35-38, Sep. 1994.
- [3] EPRI, Advanced Light Water Reactor Requirements Document, Chapter 10, June 1990.
- [4] OECD HRP, The Picasso-3 User Interface Management System Users Guide, Sep. 1996.
- [5] Von C. Campbell, Customer-Driven Development of a New High-Performance Data Acquisition System, Hewlett-Packard Journal, pp.6-8, Oct. 1994.
- [6] K. C. Kwon, et al., KAERI Training Simulator Process Description, July, 1988.
- [7] C. H. Jung, et al., Development of Automatic Startup Intelligent Control System for PWR Plant, Cognitive Systems Engineering in Process Control, Kyoto, Japan, pp. 51-56, Nov. 12-15, 1996.
- [8] D. Y. Lee, et al., An Implementation of Alarm and Diagnosis-Integrated Operator Support System, Cognitive Systems Engineering in Process Control, Kyoto, Japan, Nov. pp. 63-70, 12-15, 1996.
- [9] K. C. Kwon, A Stochastic Approach with Hidden Markov Model for Accident Diagnosis in Nuclear Power Plants, submitted to IEA/AIE97, Atlanta, Georgia, USA, June 10-13, 1997.
- [10] S. P. Lyu, A Study of Logic Display to Monitor the States of Logic Elements, NPIC&HMIT96, The Penn. State Univ., USA, pp.429-436, May 6-9, 1996.



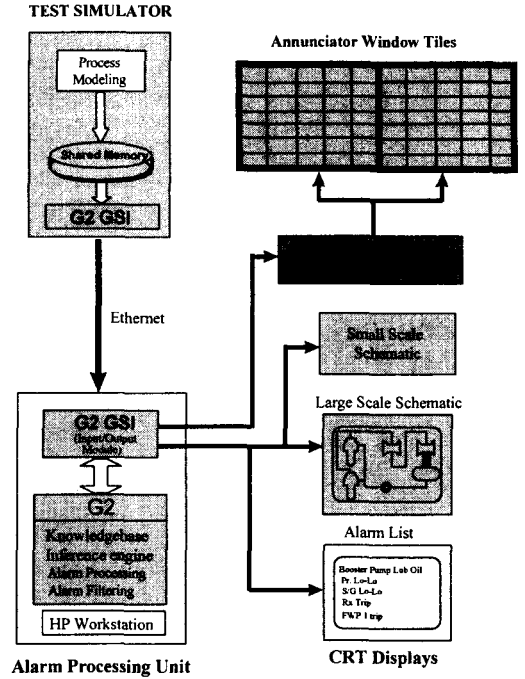
<그림 1> 시험검증설비 구성도



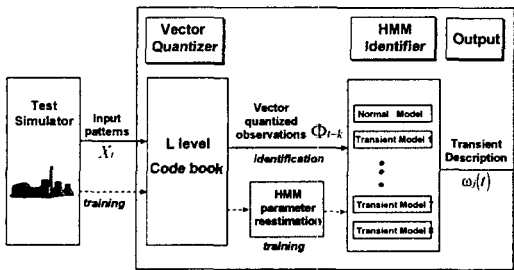
<그림 2> Picasso-3 인터페이스 방법



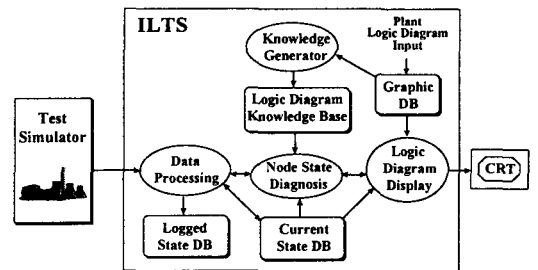
<그림 3> 자동기동시스템과 시험검증설비



<그림 4> 동적경보시스템과 시험검증설비



<그림 5> 사고진단시스템과 시험검증설비



<그림 6> 논리추적시스템과 시험검증설비