

인간 공학적 원전 시뮬레이터

오 인 석

한국원자력연구소 MMIS랩 선임연구원



원 자력 발전은 지난 40년 동안 전세계적으로 지금까지 발전 방식의 주종을 이루어 온 화석 연료 및 수력과 같은 재래식 전원엔 버금갈 정도로 성장해 왔다.

우리 나라도 78년 4월 29일 처음으로 고리 원자력발전소 1호기가 상업 운전을 시작하며 걸음마를 시작한 이후, 현재는 11기의 원자력발전소가 가동중에 있으며 우리 나라 발전량의 36%를 담당하고 있다.

그리고 2002년까지 7기가 추가적으로 가동되도록 계획되어 있어 21세기 초에는 명실 상부한 원자력 선진국이 되는 데 이의를 제기할 사람은 아무도 없을 것이다.

원자력발전소는 미국의 우주 왕복선 챌린저호를 구성하고 있는 부품 수보다도 훨씬 많은 수백만개의 부품이 유기적으로 결합된 시스템으로, 인간의 손에 의해 지금까지 개발된 급세기의 가장 복잡하고 거대한 시스템으로 일컬어지고 있다.

원자력발전소의 운영 초기에 이러한 거대하고 복잡한 원자력발전소의 신뢰성 및 안전성 제고를 위한 주된

연구 및 기술 개발은, 발전 설비의 자동화와 주요 안전 계통의 안전 여유도 확보 및 발전소 주공정 기계 계통 등의 관심 분야에서만 이루어져 왔고, 발전소 운영의 주체가 되는 인간에 대해서는 상대적으로 등한시되어 왔다.

그러나 일찍이 75년에 '원전의 안전성을 위협하는 최대 요인은 인적 요인'이라는 경고가 원자력발전소 안전성 평가 보고서인 「WASH-1400」에 발표되었으나, 발표 당시에는 원자력계의 관심을 끌지 못하였다.

그러다가 79년에 미국의 드라마일 아일랜드(TMI) 원전 사고의 주요 원인 중 하나가 운전원의 실수였음이 밝혀지고부터 원자력발전소의 인적 요인에 대해 높은 관심을 보이게 되었다.

미국의 TMI 사고에 이어 86년 옛 소련의 체르노빌 원전 사고의 주요 원인 중 하나도 인적 요인이 개입되었음이 밝혀짐에 따라, 인적 요인에 대한 관심이 더욱 고조되어 인간 공학에 대한 연구가 매우 활발해졌다.

원자력발전소의 고장이나 사고의 상당수는 운전원의 실수 때문이다. 국내 원전의 경우 불시 정지의 약 30%가 인적 오류이고, 미국·독일·일본의 경우도 30~50%에 이른다. 이같은 인적 오류는 곧 인간 공학적 운전 시뮬레이터를 통해 어느 정도 막을 수 있다.

설비와 사람(운전원)과의 자연스런 상호 작용이 이루어질 수 있는 인간 공학적 운전 및 실험 설비인 이른바 「인간 공학적 원자력 발전용 시뮬레이터(HMS)」가 국내외 연구진 합동으로 개발되었다.

한국원자력연구소는 92년부터 5년간 총 18억원의 연구비를 들여 삼성전자(주) 및 미국 GSE사와 더불어 신형 원자력발전소에서 운전원들이 효율적으로 운전할 수 있도록 첨단 운전 제어반으로 구성된 통합 실험 시뮬레이터 설비를 개발하였다.

개발 경위 및 절차

최근의 원자력발전소는 단위 용량의 증대, 계측 제어 시스템의 기능 추가 및 자동화의 증가 및 안전성 강화를 위한 안전 설비의 보강 등으로 더욱 복잡해지는 추세에 있다.

그리고 인간-기계 연계 체계(MMIS Man-Machine Interface System) 설계도 디지털 기술의 도입과 컴퓨터 구동을 기반으로 하는 VDU(Visual Display Unit) 중심의 첨단 HMI 기기 설계 중심으로 양상이 변화함에 따라, 작업 공간도 질적·양적으로 변화하였으며 이에 따라 운전원의 역할에도 큰 변화를 초래하였다.

따라서 원전 운전원의 작업 성능에 대한 인간 공학적 재평가의 필요성이 대두되었다.

이에 따라 인간 공학 관련 규제 요건에서는 인간 공학적 원리에 토대를 둔 시스템 설계를 요구하고 있으며, 설계 결과에 대한 인간 공학적 확인 및 검증, 평가 결과를 제시하라고 요구하고 있다.

국내에서 현재 추진중인 차세대 원자로와 액체 금속로의 MMIS 설계에서는 컴퓨터 중심의 제어 및 정보 처리, 그리고 제어실 설계에 VDU 중심의 첨단 HMI 기기의 채택 등이 고려되고 있으며, 아울러 지금까지 적용되지 않았던 기술들이 새롭게 적용될 전망이다.

하지만 새로운 기기 및 기술의 도입은 원자력 분야에서 요구하는 안전성 및 신뢰성의 보증이 확인되지 않는 한 수용되기 곤란한 현실적 제약이 존재한다.

물론 원자력발전소의 안전성과 신뢰성 확보 측면에서 내진 및 EMI 요건 등 기기 자체의 품질 특성이 규제나 인허가 요건이 만족되는 것도 중요하지만, 운전원과 상호 작용이 가장 많이 발생하는 중앙 제어실 HMI(Human Machine Interface) 설계시에 인간 공학적 관점에서 각 설계요소뿐만 아니라, 시스템의 운영 주체인 운전원의 작업 부하 및 수행도를 사전에 평가하여, 인적 오류를 유발할 수 있는 잠재 요인을 사전에 제거하고 운전원의 작업 성능을 향상시켜, 발전소의 운전 효율성 및 안전성을 향상시킬 수 있도록 설계되어야 한다.

한국원자력연구소 MMIS랩 인간공학연구팀에서 개발한 인간 공학적 원전 제어 시뮬레이터(약칭 Human Machine Simulator)는 국내 원자력 산업에서도 인간 공학 연구의 필요성에 따라 정부 주도 중장기 과제로도 출되어 수행되었다.

인간 공학적 원전 제어 시뮬레이터는 원자력발전소에서 인적 요인과 가장 밀접한 관련이 있는 HMI 설계에서 운전원의 수행도 및 운전 효율성을 검증하고, 개별적인 설계 요소에 대해 인간 공학적 기준이 올바르게

적용되었는지를 평가하기 위해 개발된 인간 공학적 통합 실험 설비(ITF Integrated Test Facility)의 핵심 부분으로 한국 표준형 원전을 모델로 하고 인간 공학을 반영한 VDU 중심의 첨단 HMI 기기로 구성되었다.

우선 인간 공학적 원전 제어 시뮬레이터 개발 초기 단계에는 원자력 분야에서 인간 공학적인 주요 현안이 되고 인간 공학적으로 평가가 되어야 하는 범위를 파악하기 위하여, 규제 측면에서 요구하는 인간 공학적 평가 항목 분석, 사업자 요건서(EPRI-URD) 검토를 통한 MMIS 설계시의 신기술 반영 요건 분석, 그리고 인간 공학적 평가 사례 분석을 통해 VDU 중심의 원전 제어실 설계시 인간 공학적 관점에서 중요하게 고려되어야 하는 설계 변수를 중심으로 평가 항목을 도출하였다.

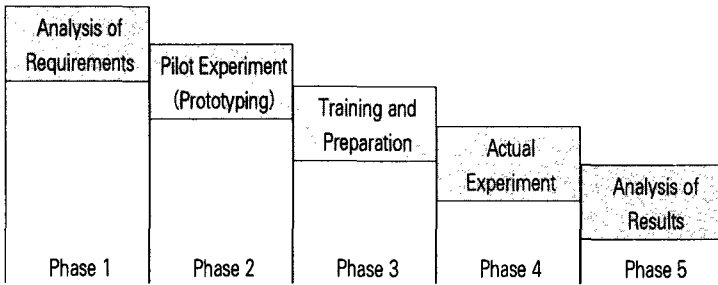
그리고 현재 선진국에서 개발중인 차세대 제어실(NUPLEX 80+, AP-600, CANDU-3, N4, APWR, ISACS)이 갖는 특징을 분석하고 공통 특징을 규명하였다.

〈표 1〉에서 알 수 있듯이 차세대 제어실은 1인 내지 2인이 운전 가능하도록 VDU 기반의 컴팩터한 제어반으로 구성되어 있어, 운전원의 신체적 부담을 줄이는 효과를 기대할 수 있다.

또한 인공지능 또는 전문가 시스템을 이용한 운전원 지원 시스템 및 진산화된 정보 시스템의 개발 그리고

〈표 1〉 차세대 주제어실의 비교

특 징	차세대 원자로	AP-600	NUPLEX 80+	N4	ISACS	APWR	CANDU
		WH	CE	EdF	HRP	Japan	AECL
컴팩터한 운전원 작업반		VDU 기반 중심	혼합형	VDU 기반 중심	VDU 기반 중심	VDU 기반 중심	VDU 기반 중심
대형 운전 정보 표시 화면 사용		3개의 화면	IPSO	2개의 화면	-	4개의 화면	4개의 화면
전산화된 경보 시스템		사용함	사용함	사용함	사용함	사용함	사용함
정보의 순항 방식		직무 기반	기능 기반	기능 기반	기능 기반	기능 기반	직무 기반
운전원 구성		2	2	2	-	1	1
지능형 운전 지원 시스템 사용		사용함	사용함	사용함	사용함	사용함	사용함
정보의 중복 사용 여부		중복 사용	중복 사용	중복 사용	-	중복 사용	-



〈그림 1〉 APTEA 실험 패러다임

발전소의 전반적인 운전 상황을 보여주는 대형 정보 표시 화면의 채택 등으로, 운전원의 정신 작업 부하를 감소시키고 운전원의 운전 편의성을 제고시키려 하고 있다.

그러나 VDU 중심의 컴팩터한 제어반은 CRT 화면상에 정보를 순차적으로 표시하는 표현 방법(serial representation)을 사용하게 되므로, 정보 구조, 정보 순항(information navigation) 및 정보의 표현 방법 등과 같은 새로운 인간 공학적 현안(issue)이 대두되었다.

인간 공학적 원전 제어 시뮬레이터는 각국의 차세대 제어실의 공통적인

특징을 반영하였으며, 또한 VDU 기반의 HMI를 채택함으로써 나타난 새로운 인간 공학적 현안을 해결하기 위해 정보의 계층적 표현 방법의 채택 및 정보 순항을 위한 가능한 모든 방법이 고려되었다.

HMS 특징

인간 공학적 원전 제어 시뮬레이터의 특징은 차세대 원전 제어반 설계 시 인간 공학적 실험 평가를 통해 보다 향상된 제어반 설계를 할 수 있다는 데 있다.

인간 공학 실험 평가의 단계는 다

음과 같이 5단계의 패러다임으로 구성된다.

실험 수행시 실제 실험 수행 기간은 실험 준비 및 환경을 설치하는 2, 3단계와 실험 데이터의 분석 단계인 5단계에서 전체 실험 기간의 85%가 소요된다.

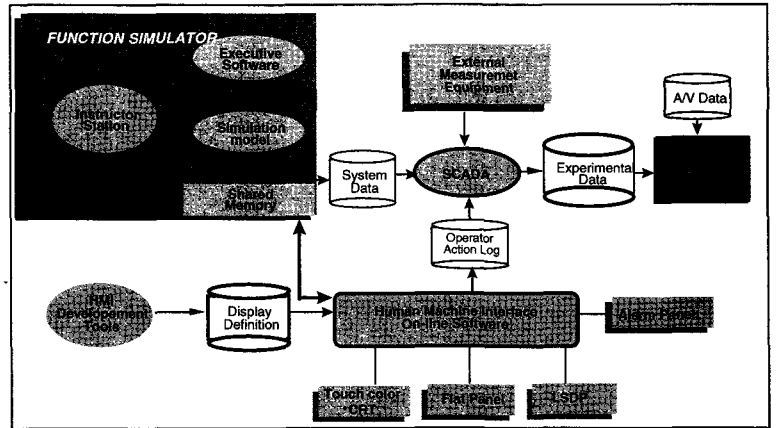
따라서 인간 공학적 평가 실험을 위해 무엇보다도 중요한 것은 평가하고자 하는 실험 변수(VDU 기반의 중요 실험 변수는 정보 구조, 정보 순항 및 정보의 표현 방법 등과 같은 새로운 인간 공학적 현안)의 설계 변경 및 설정된 가설에 의해 요구되는 모든 실험 데이터의 수집과 효율적인 분석이 용이하도록 하여 실험 평가 기간을 단축하는 것이다.

그리고 가능한 실제 환경과 같은 작업 조건을 운전원에게 제시하여 실험 결과의 유효성을 확보할 수 있도록 해야 한다.

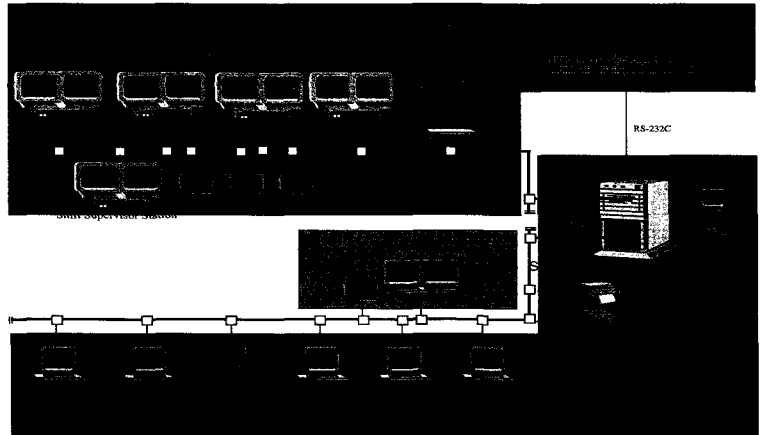
이러한 요건이 반영된 인간 공학적 원전 제어 시뮬레이터의 구조는 〈그림 2〉와 같으며, 다음과 같은 특징을

가지고 있다.

- 한국 표준형 가압 경수로 원자력 발전소 전규모 모의
- 펌프·밸브 및 제어기와 같은 각종 기기의 오동작 및 고장(component malfunction)을 포함한 500여개의 시스템 malfunction 모의 가능
- VDU 기반의 HMI 기기를 사용한 사용자 인터페이스 구성
- 객체 지향(object-oriented) 그래픽 데이터를 사용한 화면 설계의 유연성 확보
- 외부 하드웨어 패널 및 기개발된 운전원 지원 시스템과 같은 다른 소프트웨어와 쉽게 연결하여 시스템을 확장할 수 있는 시스템 설계의 확장성(expandibility) 확보
- 각종 인간 공학 측정 장비인 생체 신호 측정 장비, 시선 추적 장비 및 영상/음성 기록 장비로부터 수집되는 개별 데이터의 통합 수집 및 수집 데이터와 시뮬레이션 시간과의 동기화 기능(SCADA 기능)
- 동시에 두 개의 다른 시뮬레이션 모델 구동 가능(실험 수행의 효율성을 높이기 위해 각각 다른 초기 조건의 원전 모델 시뮬레이션이 가능)
- 운전원의 운전 행위 기록
- 실험 자료 종합 분석 시스템(DAEXESS Data Analysis and



〈그림 2〉 인간 공학적 원전 제어 시뮬레이터 구조



〈그림 3〉 하드웨어 구성

Experiment Evaluation Supporting System)에 의한 실험 자료의 종합 분석 및 평가 기능

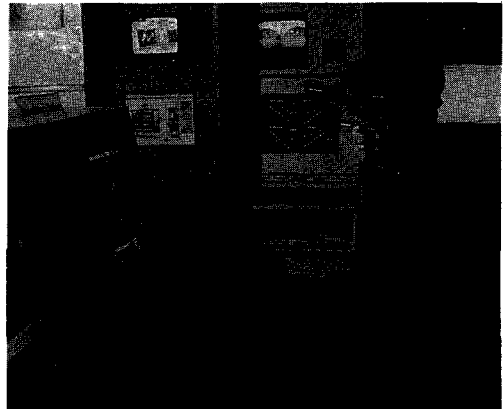
HMS의 하드웨어 구성

인간 공학적 원전 제어 시뮬레이터의 전체 구성은 〈그림 3〉과 같이 주

실험실(Main Test Room)의 운전원 제어반에 6대의 터치 스크린 21인치 컬러 CRT, 6개의 3-버튼 마우스/트랙볼/키보드, 주요 안전 변수를 집약적으로 표시해 주는 2대의 평판 패널(FPDU Flat Panel Display Unit), 208개의 Annunciator 창 및 운전원 제어반 앞 중앙 상단에 발전소의 주



HMS 내부



시선 추적 장비를 장착하고 운전중 수행하고 있는 모습

요 개관 정보를 보여주는 대형 정보 화면(LSDP Large Scale Display Panel)으로 구성되어 있다.

감독자 제어반에는 2대의 터치 스크린 21인치 컬러 CRT와 1대의 평판 패널로 구성된 제어반이 있다.

그리고 아울러 운전원의 행동 특성을 관찰할 수 있는 폐쇄 회로 텔레비전 카메라와 마이크, 운전원의 생체 신호를 수집하여 정신 작업 부하를 분석할 수 있는 생체 신호 측정 장치 및 운전원 시선 추적 장치 등의 실험 장비가 있다.

보조 실험실에는 주실험실의 감독자 제어반과 같은 제어반이 있다.

이 제어반은 실험자실의 엔지니어 스테이션(engineer station)과 연계되어 주실험실에서의 운전 조작 및 실험과는 별도로 소규모 인간 공학 실험을 수행할 수 있으며, 새로운 화면 설계와 발전소 모델을 개발하고 시험하는 것이 가능하여 실험실 활용

의 극대화를 이룰 수 있도록 하였다.

실험 계획 및 준비, 실험 진행, 실험 데이터 분석 그리고 시뮬레이터를 운영하는 실험자 제어실(Experimenter Control Room)에는 실험 목적에 맞는 malfunction의 주입, 발전소 현장 제어반의 기능을 대신하는 원격 제어 기능(remote function) 및 시뮬레이터의 효율적인 운영을 위해 필요한 여러 가지 감독자 기능을 수행할 수 있도록 21인치 컬러 CRT 2대로 구성된 인스트럭터 스테이션(instructor station), 발전소의 모델 개발 및 화면 설계 작업을 수행할 수 있는 엔지니어 스테이션(engineer station), 실험 자료 종합 분석 시스템, 원전 시뮬레이션 코드와 관련한 소프트웨어 및 주변 기기를 포함하는 주전산기 시스템 그리고 주실험실의 CCTV 카메라 및 마이크를 관장하는 영상/음성 제어 시스템이 있다.

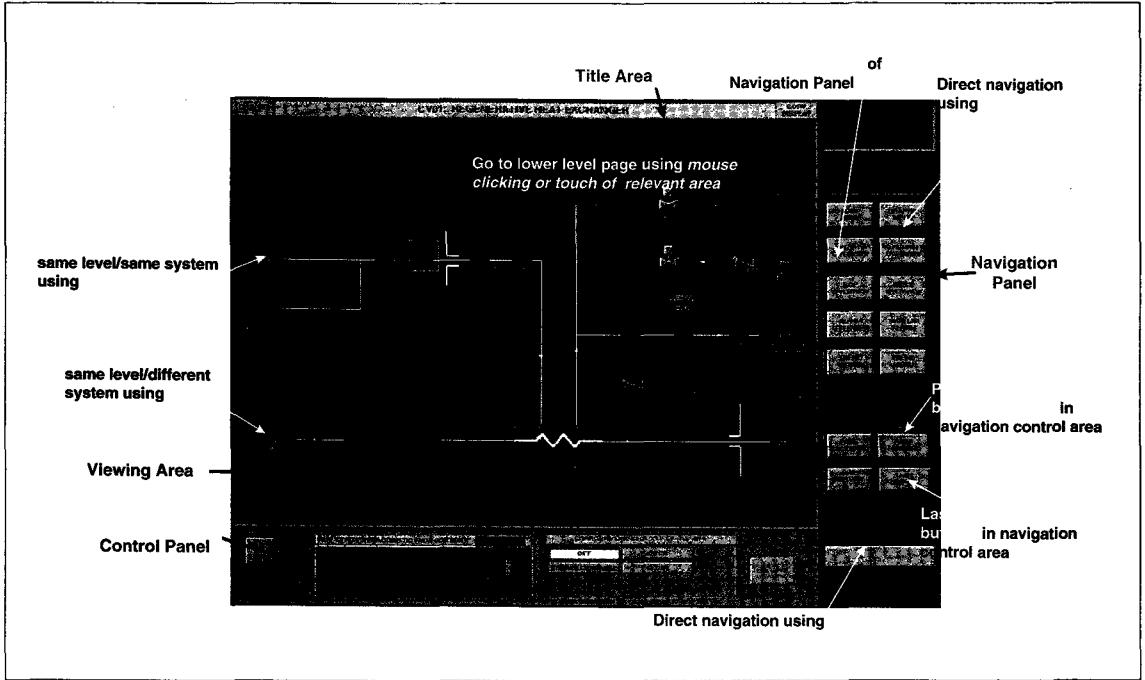
HMS 화면 설계

VDU 기반의 제어반에서 무엇보다 중요한 것은 운전원이 필요한 정보에 쉽게 접근할 수 있도록 하기 위한 화면 정보의 구성과 화면 순항(navigation) 방법이다.

화면 정보는 원전 시스템 계통도(P&ID)를 기반으로 하여 다음과 같이 4개의 계층으로 구성되어 있다.

- 계층 0 : 발전소 개관 정보
- 계층 1 : 1차 계통, 2차 계통, 반응도 제어 화면, alarm overview
- 계층 2 : 24페이지의 부계통
- 계층 3 : 약 150페이지의 상세 화면

계통도를 기반으로 표시할 수 없는 화면 즉, 원자로 보호 계통의 정보 표시 화면이나 터빈·발전기 제어 등을 위한 화면 등과 같은 화면에는, 운전원이 적절한 제어 기능을 수행할 수 있도록 시스템 운전에 필요한 정보



(그림 4) 화면 설계의 예

및 제어기가 동시에 설계되어 있다.

그러나 계통도를 기반으로 설계된 화면에서 밸브나 펌프와 같은 기기의 제어는 최하위 계층의 상세 화면에서만 수행할 수 있도록 하였다.

그리고 주요 변수의 추이를 표시하는 추이 정보 표시 화면, alarm overview 화면의 하위 상세 경보 및 경보의 이력을 보여주는 경보 이력 상태 표시 화면(tabular alarm) 화면이 있다.

추이 정보 표시 화면은 규제 요건이 요구하는 추이 정보의 변수명이 표시되어 있는 영역으로, 사용자가 임의로 변수명을 변경할 수 없는 변

경 보호 영역과 운전원이 발전소의 상태에 따라 필요한 변수들을 미리 설정하여 선택할 수 있는 사용자 사용 영역으로 구분하여, 운전원의 운전 효율성 및 정보 감시 편의성을 향상시킬 수 있도록 하였다.

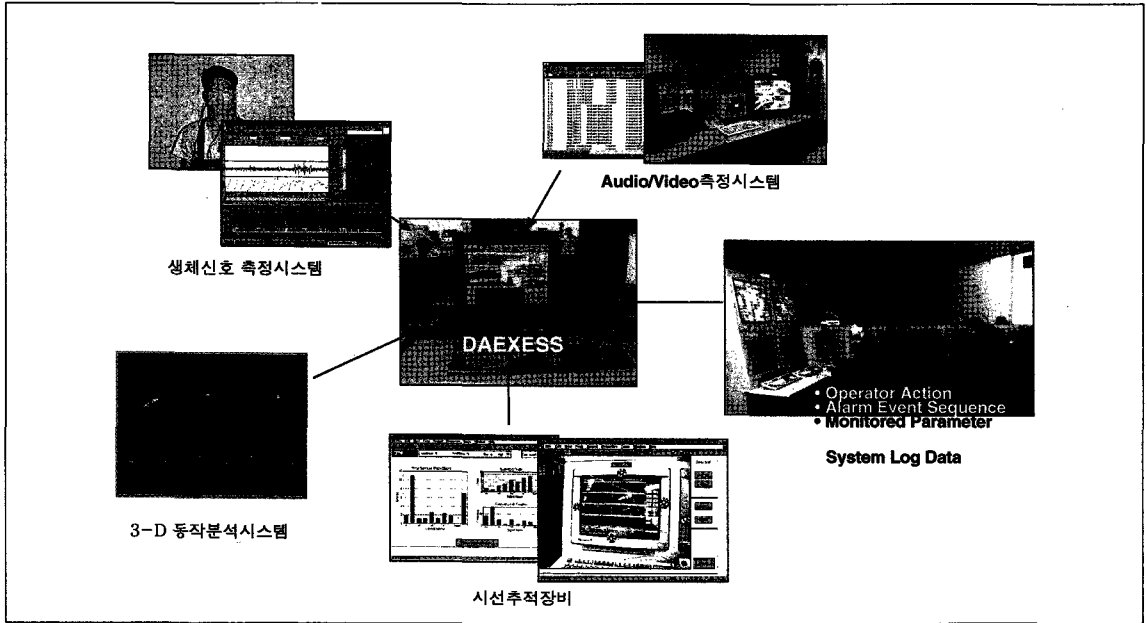
화면 구성은 (그림 4)에서 보는 바와 같이 title area, navigation panel, viewing area 및 control panel의 4개 영역으로 구성되어 있다.

여기서 운전원이 정보를 찾기 위한 화면 순항은 마우스·키보드 및 손가락의 터치를 사용할 수 있으며, 다음과 같은 여러 가지의 순항 방법을 사

용하여 원하는 정보에 쉽게 접근할 수 있도록 하였다.

이와 같이 정보 순항을 위해 모든 가능한 수단 및 방법이 제공된 것을 이용해 추후 실제 제어반 설계시 정보 순항 방법 선정을 위해 인간 공학적인 실험 평가를 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

- Navigation panel상의 계층 1의 메뉴 버튼
- 전체 화면이 표시되는 navigation panel상의 그래픽 메뉴를 통한 직접 순항
- Viewing area의 그래픽 화면상에서 마우스 클릭을 사용한 직접



(그림 5) DAEXESS의 통합 자료 수집

순항

- Off-page connector 사용
- 화면 클릭을 통한 관련 계통의 하부 상세 화면으로 이동
- 키보드 명령어를 사용한 직접 순항
- Navigation panel상의 page forward, page backward 버튼
- Navigation panel상의 last display/history 버튼

인간 공학 실험 분석 시스템

인간 공학 실험 측정 데이터를 통합적으로 분석하고 평가하기 위한 인간 공학 실험 분석 시스템(DAEXESS)

은 인간 공학 실험 측정 데이터를 그동안 수작업 처리 및 개별적으로 처리되는 모든 과정을 통합하여 데이터를 수집하여, 각종 데이터 분석 그래프 처리, 데이터 조회뿐만 아니라 동영상 및 음성 데이터까지 모든 데이터의 처리 및 분석을 한 시스템에서 통합 처리하도록 SAS 통계 소프트웨어를 이용하여 구축하였다.

또한 사용자를 고려하여 GUI 환경을 기본으로 채택하여 쉽게 화면에 친숙하도록 시스템을 설계 구축하였다.

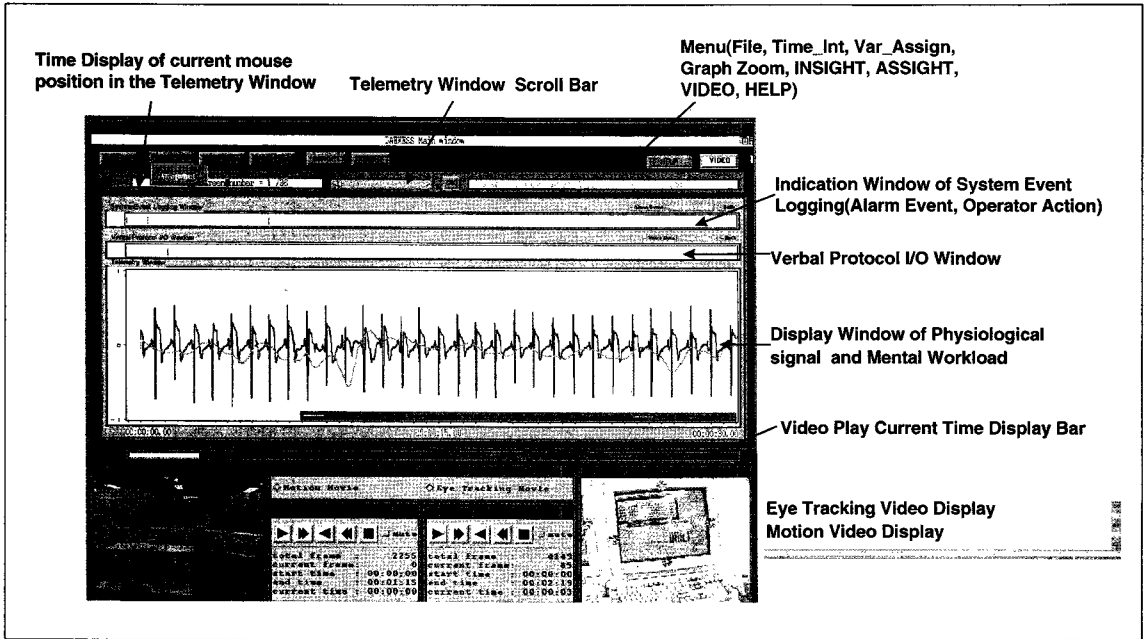
실험중에 시선 추적 장비, 생체 신호 측정 시스템을 운전원에게 착용시켜, 시선 추적 장비로부터는 운전원

의 정보 주시 시간, 정보 탐색 경로 및 정보 주시 빈도 등의 데이터와 생체 신호 측정 시스템으로부터는 운전원의 심리적 및 생리적 반응에 따라 변화하는 생체 신호를 수집한다.

또한 주전산기 시스템 내의 HMI 및 인스트럭터 스테이션(instructor station)의 소프트웨어는 운전원의 운전 행위, alarm event 및 주요 발전소 변수 등과 같은 시스템 데이터를 기록한다.

여기서 시스템 데이터는 시뮬레이션 클릭을 기반으로 저장되지만, 각 실험 장비의 데이터는 자체의 시스템 클릭으로 저장된다.

실험 분석의 효율성을 높이기 위해



〈그림 6〉 DAEXESS 주화면

이들 데이터는 시뮬레이션 클릭으로 변환되고 모든 시간이 동기화된다.

시간 동기화가 완료된 각 데이터는 DAEXESS 컴퓨터로 네트워크를 통하여 통합 수집되고 DAEXESS를 통해 분석한다.

종합적으로 분석된 자료로부터 운전원의 작업 양태, 반응 시간, 오류 행위 및 작업 부하 등이 평가될 수 있다.

활용 방안

VDU 기반의 시뮬레이터는 선진 각국에서 현재 개발중인 첨단 제어실의 특징을 반영하여 개발되었으며, 사람을 대상으로 시스템을 평가하는

인간 공학 실험 특성을 고려하여 실험 변수 설계나 실험 데이터의 효율적인 분석을 수행할 수 있도록 개발되었다.

이러한 시뮬레이터를 이용하여 운전 전에 필요한 정보의 구성과 표현에 관한 연구 및 정보 표현과 연계된 제어 방식과 같은 설계 요소별 연구뿐만 아니라, 무엇보다도 이러한 통합 설비는 현재 추진되고 있는 액체 금속로 및 차세대 원자로 같은 신형 원전의 운전 제어반 HMI 설계의 설계 도구(rapid prototyping)로 바로 활용될 수 있을 것으로 전망된다.

또한 원자력 규제 기관에서 첨단 제어실 설계시 새로운 규제 요건으로

요구하고 있는 인간 공학적 설계, 인간 공학적 확인 및 검증을 수행하는 test bed로 활용할 수 있다.

그리고 운전원의 인지적 작업 부하를 줄이기 위해 계속 개발되고 있는 운전원 운전 지원 시스템의 설계 및 평가, VDU 기반의 HMI 설계 기준 및 지침 개발 및 평가, 그리고 인적 오류 원인을 규명하기 위한 오류 검증 시험, 운전 절차서의 개발 등에 활용될 수 있다.

아울러 한국 표준형 원전의 전계통에 대한 모의가 가능하므로 원전 안전성 관련 각종 소프트웨어 연구 및 운전원의 계통 교육에도 활용될 수 있을 것으로 전망하고 있다. ☼