

原子力發電 소프트웨어技術

- 中央制御室設計에서의 人間工學適用과 評價 -

原子力發電所의 中央制御室은 플랜트의 運轉制御, 監視管理가 이루어지는 중심이므로 화력발전 및 각 산업에서의 실적을 바탕으로 人間工學을 적용한 설계가 이루어지고 있다. 그러나 본격적으로 人間工學의 도입이 실시된 것은 최근이며 특히 CRT를 사용한 新型制御盤의 개발은 주목할만한 하다.

다음은 PWR 新型制御盤의 개발에서 人間工學適用과 評價에 대한 소개이다.

1. 背景

原子力發電所에서는 中央集中監視制御方式이 기준이며 중앙제어실에 다수의 制御盤을 집중시켜 이들을 유기적으로 배열하여 안전하게 운전되고 있다. 그러나 플랜트를 구성하는 機器의 수가 많고 또한, 이들 機器의 상호관계가 복잡하므로 運轉監視·制御의 情報處理系統은 다른 산업에 비해 人間-機械의 관련성(man-machine interphase)이 높게 평가되고 있다. 또 多重防護設計概念은 대단히 많은 파라미터를 中央制御盤에 표시하는 것이 요구되므로 이것도 人間-機械의 관련성을 복잡하게 하고 있다.

TMI-2事故에서는 이와같은 人間-機械의 관련된 복잡함과 그 필요성을 새삼스럽게 재인식시킨 것이다. 이 사고를 계기로 해서 人間工學의 적용이 原電設計에 지적되어 적극적으로 中央制御室設計에 시도되기 시작했다.

특히 新型制御盤의 개발에서는 CRT의 대폭採用, 機能分割 등의 새로운 특징을 가지고 있으므로 人間工學은 체계적이고 또한 단계적으로 적용, 평가되고 있다. 이에 本稿에서는 일본의 5개 電力會社와 미스비시原子力工業(株)

등에서 공동개발한 中央制御盤의 개발에 人間工學을 적용해서 평가한 내용을 중심으로 소개한다.

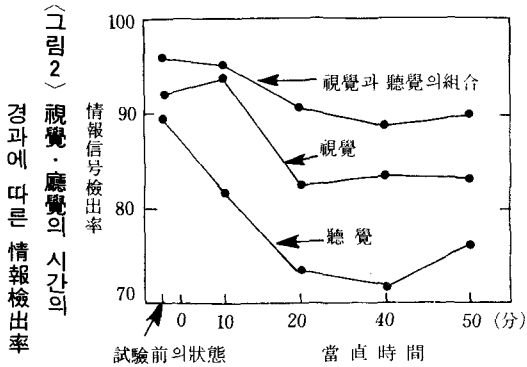
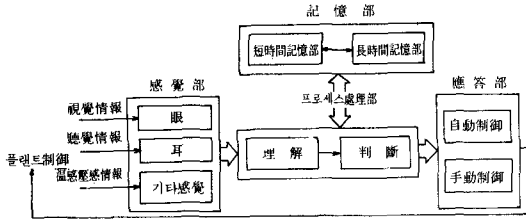
2. 人間工學의 役割

人間工學은 發電所從業員·公衆의 안전 확보, 신뢰성 향상, 規制와의 適合性, 保守性의 향상 등을 목적으로 원자력발전소의 설계에 최근 도입되었다.

美國에서는 1960년대에 Hagan & May社가 중심이 되어 導入을 제창했으나 큰 진전을 보지 못했고 1970년도에는 WASH-1400에서 「人間の 誤操作이 플랜트의 安全性에 중대한 영향을 미칠 가능성이 있다」라는 지적이 있었으나 人間工學의 도입이 본격적으로 검토되기 시작한 것은 TMI事故後이다.

NRC가 중심이 되어 TMI發電所의 人間工學의 評價, 中央制御室設計의 人間工學適用에 대한 가이드라인, 評價方法(NUREG-0700), 人間の 過誤率評價(NUREG-1278)등이 정리되어 개발되기 시작하였다. 일반적으로 플랜트制御에서 종사자의 행동은 그림 1에서와 같이 인간은

〈그림 1〉 플랜트制御中 行動모델



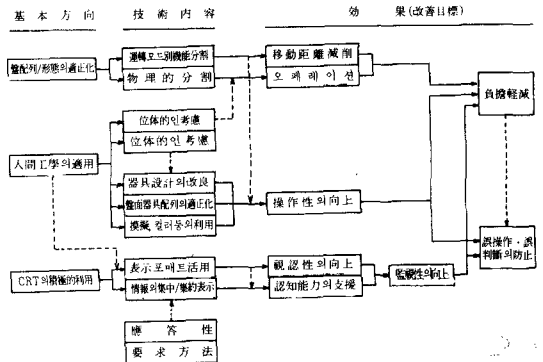
눈·귀 등의 5感으로 정보를 입수하여(監視), 知覺·判斷後(判斷), 필요한 操作(操作)을 실시하고 있다.

이 프로세스는 시간이 경과함과 함께 그 正確度가 일반적으로 저하하는데(그림 2), 人間工學은 이때에도 監視·判斷·操作을 할 수 있도록 人間の 行動原理, 思考原理에 따르는 설계를 적용시키는 것이다. 그러나 人間工學의 요구를 그대로 적용시킬 경우 시스템설계의 요구사항, H/W의仕様 등 여러가지 제약이 있으므로 각각의 요구사항에 대한 融合點을 찾아내고 이들의 制約, 問題點을 해결해야 할 필요가 있다.

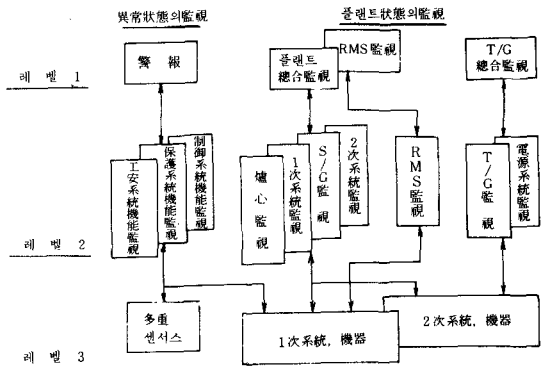
3. 開發目標의 設定

新型中央制御監視시스템의 개선목표는 플랜트의 安全性, 信賴性을 높이기 위해 운전 조작 및 監視의 기능을 강화하고 그림 3 과 같이 負擔輕減과 誤操作, 誤判斷의 방지를 설계의 목표로 했다. 이것을 실현하기 위한 基本設計는

〈그림 3〉 改善의 基本方向과 改善效果



〈그림 4〉 CRT 畫面體系 및 構造

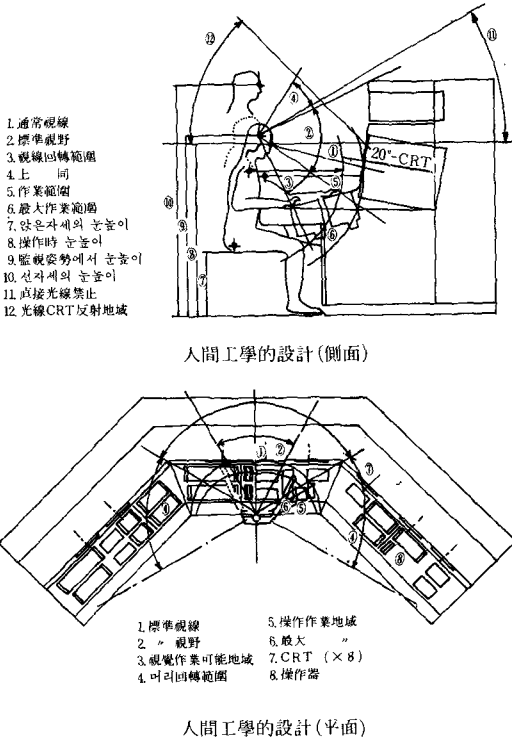


현재까지의 플랜트설계, 운전경험 및 TMI事故의 교훈 등을 감안해서 다음과 같이 했다.

① 中央制御盤의 배치는 운전상 가장 사용빈도가 높은 운전을 중심으로 主制御盤과 補助盤으로 분할하고 制御盤에 설치하는 스위치, 計器類는 각종 운전모드와 操作·監視의 중요성, 긴급성을 고려하여 배치하고 일부 分割라인을 적용한다. 主制御盤의 정보표시는 CRT를 主로 하여 조작·감시면적을 縮小化시켜 통상운전은 한사람으로 대응가능토록 한다.

(2) CRT로서 표시되는 정보는 관련정보를 그룹화하여 그림 4 에서와 같은 레벨로 분류하여 플랜트異常의 조기발견을 가능케 한다. 또 畫面은 한번의 조작을 원칙으로 하며 운전상황에 따라서 우선도가 높은 정보는 자동적으로 표시되

〈그림 5〉 主制御盤의 人間工學的設計



人間工學的設計(側面)

人間工學的設計(平面)

어 쉽게 화면에 나타날 수 있게 한다.

(3) 制御盤形狀·사이즈, 盤面配列 및 CRT畫面設計 등에는 人間工學적 설계방법을 받아들여 人間の 特性에 맞는 설계로 하여 操作性, 監視性 등의 향상을 도모한다. 특히 主制御盤은 앉은 자세에서 1인조작으로 가능하게 하기 위해 身體計測値를 다음의 조건하에서 반영시킨다(그림 5).

- 監視制御員의 計測値(JEM·1980)나 기타의 데이터에서 각각의 치수를 만족케 하는 형태로 할 것.
- CRT의 中心線은 앉은 監視制御員의 通常視線에 가깝게 할 것.
- 主制御盤의 平面圖는 통상시의 1人運轉을 만족시킬 것.

(4) 操作모듈이나 램프, 記錄計 등의 형상과 制御盤配置는 조작감시의 잘못을 적게할 목적으로 色彩·操作方向·配置·사이즈·銘板 등의

人間工學적 요소를 적용한다.

(5) 中央制御室은 플랜트의 중추신경이 되는 곳이므로 운전원이 장시간의 감시업무에서도 피로나 스트레스를 느끼지 않게 하기 위해 다음과 같은 배려를 한다.

- CRT의 視認性을 높이기 위해 직접광선, 눈부심, 기구에 의한 亂反射光 등을 억제하고 조명의 정도를 낮추며 실내설비의 색채, 천장조명설비의 배치 등에 주의한다.
- 運轉員의 이동거리가 길고 복잡하지 않도록 制御盤配置를 고려한다. 또한 운전전에 직접 관계되지 않는 設備는 中央制御室 밖으로 이동시킨다.
- 中央制御室의 각 제어반, 천장, 벽 등의 색채가 종합인테리어로서 조화있게 하기 위해 色彩心理學을 고려한 디자인으로 한다.

4. OSD과 模擬檢證

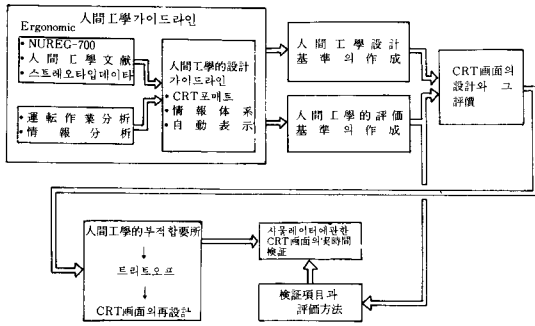
制御盤의 기본방침에 관한 요구사항의 분석, 情報의 重要度分類·整理綜合을 행하여 각종 운전모드에서의 OSD(Operational Sequence Diagram)評價 등의 檢討를 거쳐 原型사이즈로 檢證했다. 이 검증은 起動停止時, 通常運轉時, 異常時, 事故時의 대표적인 운전모드를 模擬하여

- 監視, 判斷, 操作, 確認을 용이하게 할 수 있는가
 - 通常運轉中 1인인 운전원이 앉은 자리에서 監視操作이 가능한가
- 의 檢證評價가 행해졌다. 이 결과 당초 설정한 개념으로 소기의 機能이 달성되었다는 판단이 얻어져 制御盤配列, 操作性 등에 대해서는 N-UREG-0700베이스의 평가요령으로서 검증되었다.

5. 人間工學의 適用 및 評價

기본개념이 완성된 단계에서 人間工學을 적용하여 그 도입상황을 평가하는 것이 효율적이

〈그림 6〉 人間工學適用 및 評價프로세스



므로 다음과 같은 프로세스로서 人間工學의 적용과 평가를 실시하고 있다(그림6 參照).

(1) 人間工學設計가이드라인 作成

人間工學은 인간의 행동양식에 따르는 것(Ergonomic)과 정보의 認知·判斷 등의 사고방식에 따르는 것(Cognitive)으로 나눈어진다. 이 행동양식에 대해서는 NUREG-0700, 일본 국내문헌 등에서 기본가이드라인이 작성되었다. 또한 선천적인 것과 교육·훈련에 의한 후천적인 요인이 부가된 스트레오타입데이터를 작성하여 위의 가이드라인이 반영시켰다(5.1項 參照).

또 사고양식에 의한 플랜트모드에 따른 필요정보와 그 認識形態가 운전원의 사고 방식과는 일치시켜줄 필요가 있으며, 情報分析, 運轉作業分析 등을 실시하여 정보의 표시방법을 정리했다(5.2項 參照). 이들의 데이터를 바탕으로 CRT포맷, 情報體系, 요구방법 등의 가이드라인과 CRT표시기능에 적용했다(5.3項參照).

(2) 人間工學的 評價技術의 작성과 평가

人間工學에 관련되는 정보라이브러리 등에 의의 CRT表示機能에 관련된 기준을 抽出하고 다시 人間공학전문가, 시스템설계자, 운전경험자 등 전문가들의 협의를 거쳐 人間工學評價 基準을 정리했다. 그다음에 CRT畫面寫眞, 실물과 같은 크기 原型타입制御盤을 사용, 평가하였다.

(3) 부적합 人間工學的 要素의 재검토

위의 평가결과 人間工學的으로 부적합한 要

素는 시스템설계와 人間공학설계에 따라 협의를 거쳐 해결책이 검토되어 각 분야의 요망사항을 가능한 반영시켜 再設計하였다.

(4) CRT機能의 實時間檢証

재설계된 CRT機能을 原型타입制御盤과 시뮬레이터를 연계시켜 實時間檢証하여 시스템설계 및 人間공학 양쪽의 요구사항을 포함시킨 것을 檢証했다. 이와같은 평가에 의해 잠재적 설계의 문제점해결이 도모되었다.

5.1 立體的인 調査와 設計로의 反映

指示計, 操作器 등 制御盤設置機器에는 운전원의 여러가지 면을 충분히 반영시키는 것이 잠재적인 문제점을 해결하기 위해 중요한 것이다. 특히 신규설비의 도입 등 설계변경시 이점에 대해 충분한 배려를 해야만 할 것이다. 이와같은 것으로서 앙케이트방식에 의해 각종 코드, 制御盤器具設計 등의 분야에 대해 조사하여 이들의 요구사항을 판단할 수 있게 하였다.

약 200명(운전원, 엔지니어 각 100명)을 대상으로 자료를 수집하고 이들의 신뢰성수준 95%의 區間을 구해 이중 신뢰하한이 50%를 넘는 것에 대해 요구사항이 존재한다고 판단했다.

5.2 CRT表示시스템의 人間工學 適用

CRT를 운전에서 사용하고 또한 보다 적절한 정보를 제공하기 위해서는 각종 운전상황이나 플랜트상황에 따른 정보분석이 필요하다. 분석된 정보는 각각의 상황에 따라 그룹으로 나뉘어지고 體系化되어 畫面으로 작성, 정리되는데 그중에서도 畫面作成에 있어서 표시형태는 운전원의 경험에 따른 정보의 認知形態에 일치하도록 여러가지 人間공학상의 배려가 행해지고 있다.

5.3 CRT表示畫面の 設計基準

운전원의 監視制御特性 및 畫面設計에 일관성을 가지게 하며 CRT表示畫面的 정보를 정확히 파악하기 위해 CRT表示畫面的 설계기준을 정리했다. 이 설계기준에서는 다음의 조건을 만

족시키도록 배려되었다.

① CRT裝置가 인간공학적으로 최적의 視認條件이 될 것,

② 누구나 알기 쉽도록 畫面이 構成되어 있을 것,

③ 운전원의 작업목적에 따라 최적의 화면구성요소가 준비되어 데이터는 운전원이 사용하기 쉬운 형태로 제시될 것,

④ 文字·文章이나 표, 그래프 및 系統圖 등의 화면구성요소는 높은 視認性(對象의 형태나 세부가 認知되고 뚜렷하게 지각되는 정도)을 가질 것,

⑤ 表示의 모양과 색채가 변할 수 있는 CRT裝置의 특징을 활용해서 視認性和 誘目性을 지각했을 때의 주의를 끄는 정도)를 고려한 컬러코드와 과거부터 지적되어왔던 심볼情報타입(正常과 異常의 區別 등)과 機器의 상태(開閉狀態 등)에 대해서는 표시의 혼란이 없도록 할 것 등이다.

6. 異常時·事故時의 總合實時間檢証

制御盤의 機能分割, CRT의 情報體系, 制御盤形態, 配列 등을 종합적으로 평가하기 위해 異常時·事故時 등의 운전모드에서 대표적인 10여개 項目의 운전모드를 선정하여 시뮬레이터와 原型타입制御盤을 연계시켜 운전원이 참가하여 實時間檢証을 실시하여 制御盤機能, CRT機能의 기술적과제를 평가, 해결했다. 한편 檢証中の 운전원스트레스·疲勞데이터를 수집하여 CRT가 운전원에 주는 영향도 평가되었다.

6.1 檢証評價方法

앞에서 언급된 改善目標, 基本設計概念에 따라 설계가 충분히 효과적인가를 定量的으로 파악하기 위해 運轉操作性·監視性, 疲勞·스트레스 등의 면에서 檢証評價方法이 정리되었다.

事故時에 운전원의 주요한 업무는

① 플랜트의 이상상황, 사고상황의 파악과 확인,

② 原因의 추정,

③ 對應操作과 그후 플랜트상황의 감시 등이다.

이때 운전원에 대해 정보제공매체인 CRT가上記 ①~③의 작업에 대해 어떻게 유효한 檢証評價를 하는가를 다음과 같이 정했다.

i) CRT에 의한 異常時·事故時의 監視性, 操作性의 향상을 檢証하기 위한 검증사항과 선정방침 및 선정작업을 실시했다. 선정은 평가대상시스템의 範圍, 發生頻度, 原因/操作의 難易度 등을 고려해서 CRT化에 따르는 過誤率低減效果의 定量評價에서 대상으로 하는 사항과의 整合性을 도모했다.

ii) 위에서 선정한 사항에 대해 각 데스크에서 운전원의 작업내용분석 및 플랜트상황을 파악하기 위한 정보분석을 실시하여 檢証評價用 運轉要領에 포함시켰다.

iii) CRT의 활용에 의한 효과를 평가하기 위해 CRT畫面의 情報量, 요구방법 및 應答性 등의 평가항목을 정했으며 判斷過程分析法, OS-D法 또는 간단한 장치를 사용한 테스트 등의 평가방법을 정했다.

● 앙케이트法

NUREG-0700의 檢証項目을 베이스로 작성하고 앙케이트형식으로 집약하여 얻어진 결과에서 標準偏差나 平均值를 구하여 설계개선효과를 파악한다.

● 判斷過程分析法

音聲記錄, 시뮬레이터記錄, 비디오記錄 데이터에서 플랜트異常時 운전원의 판단과정에 대한 다이어그램을 작성하여 설계자의 의도와 운전자가 의도와와의 차이나 誤操作·誤判斷의 유무를 분석, 평가한다.

● work-through法

비디오記錄데이터에서 각 운전모드에서의 운전원의 이동횟수와 이동거리를 분석하여 在來式 制御盤과 비교함으로써 부담경감의 유무를

평가한다.

●테스트법

CRT에 표시되는 플랜트정보의 周期나 表示色에 대해서 몇가지 케이스의 테스트를 실시하여 운전상 적절한가를 분석, 평가한다.

6.2 評價結果

(1) CRT表示시스템

●양케이트의 분석결과에서 CRT의 集約表示機能의 유효성은 상황에 관계없이 거의 모든 운전원들이 인정하였다.

●판단과 분석데이터에서 개개의 화면이 가진 의미의 교육과 화면의 배열에 대한서의 훈련의 중요성이 새삼스럽게 인식되었는데, 운전원이 가진 지식이나 경험을 평가, 분석하여 화면정보에 포함시키는 것이 異常의 豫測이나 徵候를 알 수 있는 정보로서 유용하다는 것이 확인되었다.

●특정 모드에서 운전원이 보고싶다고 생각하는 화면과 자동표시화면의 중복의 문제가 있었으나 화면설계의 재검토로서 해결되었다.

(2) 制御盤機能分割

制御盤機能分割, 앉은 자세에서 運轉監視, 在來式 制御盤과 같은 기능에 대해서는 OSD, 양케이트 등의 분석결과 다음과 같은 사항이 드러났다.

●通常時에서의 감시조작이 운전원이 앉은 위치에서 충분히 행할 수 있으며, 常時監視範圍는 在來式 制御盤의 1/4~1/5이 된다.

●異常時·事故時에 制御盤사이의 移動, 運轉員間의 意志傳達, CRT情報와 安全機器의 운전 확인 등에는 문제가 없었다.

●全體的으로 운전원의 이동거리가 단축되어 在來式 制御盤에 비해 通常運轉에서 1/4로, 異常時·事故時 運轉에서 1/3이 되었다.

(3) 運轉員數

停止狀態에서 出力進轉까지 한사람의 운전원으로 異常時·事故時의 운전이 3인(班長, 一

次系統運轉員, 二次系統運轉員)으로 가능하다는 것이 확인되었다.

6.3 疲勞·스트레스의 檢証과 評價

人間工學的 設計方法의 적용에 의해 CRT畫面의 視認性을 향상시키고 疲勞·스트레스의 低減을 도모하고 있는데, 그 효과를 평가하기 위해 疲勞레벨의 측정과 양케이트를 실시하여 疲勞의 요인분석 및 평가를 하였다.

疲勞는 지각·반응 레벨의 疲勞와 認知·思考 레벨의 疲勞 두가지로 나누어지는데, 疲勞度의 測定으로 選擇反應時間을 응용하여 認知프로세스를 포함하는 조건과 포함하지 않는 조건에 대해 측정을 하여 經時的變化를 분석했다. 또 피로는 만성적 피로감과 급성부담감 두가지 徵候를 가지므로 疲勞要因分析으로 잠재적인 피로 요인과 想定되는 항목에 대해서 두가지 관점에서 양케이트를 실시해서 役割別分析 및 피로요인의 카레고리를 정하였다. 그 결과 疲勞·스트레스는 CRT화면의 視認性向上을 위해 人間工學을 체계적으로 도입함으로써 해결이 가능하게 되었다. 그러나 판단이나 예측 등에 관한 疲勞·스트레스의 평가는 데이터의 수집이 분석 방법을 포함해서 앞으로의 검토과제로 남아 있다.

7. 人間の 信賴性向上評價

CRT에 의한 정보의 集中化·集約化와 CRT 화면설계로의 人間工學的 設計方法의 도입에 의해 新型制御盤에서 운전원의 誤操作·誤判斷防止가 어느정도 효과가 있는가를 인간의 過誤率의 低減觀點에서 평가했다.

이 평가는 NUREG-1278, 2254의 방법과 데이터를 바탕으로 주요한 운전요령을 대상으로 新型制御盤과 在來式 制御盤의 각각에 비해 잠재적 휴먼에러율을 試算하여 尙대比較하였다. 그 결과 新型制御盤의 특징인 CRT를 많이 사용하는 監視主體의 운전절차는 크게 저감효과가 얻어지고 있다.