

# 울진 3&4호기 CFMS 화면설계의 인간공학적 검토

정 광 태, 이 용 희

한국원자력연구소 인간공학연구팀

## ABSTRACT

CFMS (Critical Function Monitoring System)는 원자력발전소의 비상시에 운전원에게 보조정보를 제공하는 지원시스템이다. 본 연구에서는 원자력발전소 울진 3&4호기 CFMS의 화면설계에 대한 인간공학적 검토를 수행하였다. CFMS에 대한 규제 및 법규를 만족시키는 것과 CFMS 화면설계가 운전원에게 편의성을 제공할 수 있는지에 대한 인간공학적 타당성 평가의 사례를 제시하고자 한다.

본 연구에서는 인간공학적 검토의 공식적인 체계를 설정하기 위하여, CFMS 설계에서 필요한 인간공학 업무를 규정하고 수행절차를 기술하는 인간공학 프로그램 계획 (Human Factors Engineering Program Plan; HFEPP)과 설계평가의 방법과 업무 내용을 기술하는 확인 및 검증 프로그램 계획 (Human Factors Engineering Verification and Validation Plan; HFE V&V Plan)을 개발하였다.

CFMS 설계에 대한 인간공학적 확인 및 검증을 위하여 CFMS의 정보 가용성 (information availability)과 화면 적합성 (display suitability)을 확인하였다. 정보 가용성의 확인은 CFMS 설계 요건서에서 정의된 정보를 중심으로 한 필요정보의 목록과 CFMS 화면상에서 제공되는 정보의 목록을 비교함으로써 수행되었다. 화면 적합성의 확인은 검토항목 선정, 검토양식 개발, 전문가 검토, 실험검토 등의 과정을 통하여 수행되었다. 관련 규제 문건으로 부터 규제요건상 만족해야할 최소한의 검토항목을 선정하고 검토양식을 개발하였으며, 인간공학 전문가들의 주관적 평가를 통하여 수행되었다. 또한, 화면의 조작방식에 대한 상세검토를 수행하였다. 검토결과로부터 발견된 문제점들은 HED (Human Engineering Discrepancy) 목록으로 정리하여 설계에 반영하도록 하였다.

## 1. 서론

CFMS (Critical Function Monitoring System)는 원자력발전소 감시계통의 일부로서, 울진 3&4호기에 설치될 안전수치표시계통(Safety Parameter Display System; 이하 SPDS)이다. CFMS는 TMI-2 원전 사고이래로 가동중이거나 건설되는 모든 원전에 설치해야 할 SPDS의 규제요건에 따라 설계된다[1]. 따라서, CFMS는 비정상 및 비상상태 동안 발전소 안전상태를 평가하고 여러 가지 조치의 영향을 감시하는데 도움을 주는 것이다[4].

CFMS와 같은 운전원 지원시스템의 설계에서 운전원과의 상호작용을 개선하고 작업조건을 향상시켜 운전원 오류를 경감시키고, 궁극적으로 체계의 효율성과 안전성 제고에 기여하기 위해서는 체계적인 인간공학의 적용이 필요하다. CFMS의 설계에서도 운전원이 발전소의 안전 상태를 빠르고 정확하게 판단하는데 도움을 주기 위해 인간공학적 기준 및 지침들이 고려되어야 하고, 또한 이러한 기준 및 지침이 CFMS의 설계 과정중에 적당하게 고려되었는지 체계적으로 평가하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 최초의 한국형 표준원전인 울진 3,4 호기에 설치될 CFMS에 대한 확인 및 검증

(Verification and Validation)의 일환으로, 인간공학적 평가의 수행체계를 설정하고 화면설계에 대한 평가를 수행하였다.

## 2. CFMS 설계에서 인간공학 업무의 설정

CFMS 설계에서 인간공학의 체계적인 적용을 위해서 인간공학 프로그램 계획 (Human Factors Engineering Program Plan; 이하 HFEPP)을 초기단계에 개발하였다[17]. CFMS HFEPP는 CFMS의 설계과정에서 인간공학 업무의 범위와 절차를 명시한 중심적인 문건으로, CFMS 설계에 있어서의 인간공학 적용의 목표, 목표를 달성하기 위해 수행되는 기술적 프로그램뿐만 아니라, 인간공학팀의 구성과 기술적 프로그램을 달성하기 위한 관리구조 및 절차 등을 명시하였다. CFMS 설계에서 수행되는 인간공학 업무는 인간공학 계획 수립 및 프로그램 관리체계의 구성과 같은 계획업무, 운전경험 검토, 기능적 요구조건 분석 및 기능할당, 직무분석, 인간신뢰도 분석 등과 같은 분석 업무, HSI(Human System Interface) 설계, 사용 절차 및 훈련프로그램의 개발과 같은 설계구현 업무를 포함하는데, 모든 업무에서 반드시 확인 및 검증과정을 병행하여 수행하도록 하였다[2].

본 연구에서는 CFMS 설계에 대한 인간공학적 확인 및 검증 계획(안)을 업무의 초기단계에 HFEPP와 함께 개발하였다[16]. 인간공학적 확인 및 검증은 HFEPP 업무중에서 CFMS 설계에 대한 인간공학 이론의 적용 및 평가를 위하여 필수적인 업무로 HFEPP에 정의되었다. 확인 및 검증 계획에는 확인 및 검증의 적용범위, 수행조직, 설계절차에 따른 세부업무의 내용 및 수행 결과물 등을 기술하였다. 가용성, 적합성, 유효성과 같은 인간-기계 체계 평가의 세가지 개념적인 목표를 구체화하고[6], 이를 달성하기 위한 문서검토, 전문가 평가, 실험검토, 운전원 의견 평가, 실사 검토 등 다섯가지 방법론을 포함하였다. 표 1에서는 확인 및 검증 계획에 포함된 평가의 목표와 방법론의 상관관계를 요약한 것이다.

표 1. 확인 및 검증 업무의 수행을 위한 방법론

V&V Methods	가용성	적합성	유효성
문서검토 - 분석	◎	△	△
전문가 의견 - Checklist	△	◎	△
실험검토 - 시뮬레이터	△	○	◎
운전원 의견 - 인터뷰, WT/TT	○	○	○
실사검토 - PMS-DF	△	△	△

◎ : 주된 검토 , ○ : 지원 검토 △ : 보조 검토

확인 및 검증에서 도출되는 모든 검토 결과는 설계자의 의견과 해결방안의 구성에 앞서 인간공학 현안 추적 체계(Human Factors Engineering Issue Tracking System)을 통하여 종합관리한다. 현안 추적 체계에서는 중요한 문제점들을 종합하는 정보를 제공하여 최종 설치이전에 설계과정에서 해결방안을 구성할 수 있도록 유도한다. 그러나, 일부 근본적인 문제들에 대해서는 앞으로 국내에 건설되는 원자력발전소의 CFMS 및 안전수치 표시계통의 개선을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

### 3. CFMS 화면 설계의 인간공학적 평가

CFMS의 설계에 대한 확인 및 검증업무에서 수행되어야 하는 업무는 가용성 확인 (availability verification), 적합성 확인 (suitability verification), 통합적 검증 (integrated validation)이 있는데[6], 통합적 검증은 CFMS의 종합적인 유효성을 확인하는 유효성(effectiveness) 검증이라고도 한다. 본 연구에서는 CFMS의 정보 가용성과 화면설계 적합성의 확인 업무를 CFMS에 대한 확인 및 검증의 핵심 업무로 보아 다음과 같이 인간공학적 검토를 수행하였다.

#### ◦ 가용성 확인

가용성 확인에서는 규정된 운전원 직무의 목표를 달성하기 위하여 직무수행에 필요한 모든 하드웨어, 정보, 기능 등이 가용하며, 운전원의 직무수행을 지원하지 않는 부분이 있는지 확인하는 업무를 수행하였다. CFMS의 활용에 필요한 정보의 개별적인 항목을 도출하고, 화면에서 제시되는 정보의 항목들과 비교함으로써, 정보적인 측면에서 CFMS의 가용성을 검토하였다.

#### ◦ 적합성 확인

적합성 확인에서는 CFMS가 인간공학적 설계지침, 표준, 원리 등을 반영하여 CFMS와 관련된 운전원의 직무수행에 편리하게 설계되었는지 확인하는 업무를 수행하였다. 검토의 방법론으로 CFMS 설계에 대한 규제사항으로 부터 확인이 필요한 최소한의 검토항목을 도출하고 검토항목별 검토기준을 작성하여 인간공학적 점검목록을 작성하였다. 점검목록을 기준으로 운전경험자, 설계경험자, HCI 전문가 등 전문가들의 주관적 평가를 통하여 CFMS 화면설계에 대한 적합성 확인 업무를 수행하였다. 또한, 상호작용의 적합성 검토를 위하여 keyboard를 중심으로한 재래식으로 설계된 CFMS 화면의 이동방식을 상세하게 검토하여 작업의 부담과 오류의 가능성을 검토하였다.

#### ◦ 유효성 검증

유효성 검증업무에서는 운전원에게 요구되는 직무를 지원할 수 있도록 CFMS가 성공적으로 설계되었는지 평가한다. 즉 설계된 CFMS가 설계된 기능과 성능을 충분히 발휘하여, 최초의 설계개념에서 의도한 목적을 달성할 수 있는지를 종합적으로 확인하는 것이다.

이상과 같이 확인 및 검증업무에서 수행되는 가용성 확인, 적합성 확인, 유효성 검증의 결과물들은 모두 인간공학 현안 추적체계에 입력하여 해결방안이 구성될 때 까지 추적 관리한다. 이러한 현안의 추적 및 관리도 확인 검증 업무의 중요한 부분이며, 특히 인허가를 위해서 중요한 역할을 한다.

### 3.1 정보 가용성 검토

정보 가용성은 CFMS의 설계개념상으로 필요한 정보를 기준으로 실제 CFMS 화면상에서 제공되는

지 여부를 확인하는 것으로, 필요정보목록(List-R)과 제공정보목록(List-I) 등 두가지 정보의 목록을 작성하고 그 결과를 상호 비교하는 방법으로 수행하였다. 필요한 정보의 목록(List-R)은 규제요건(List-Reg)과 전체 제어실의 설계상으로 CFMS에서 제공되어야 할 정보로 정의된 것을 설계문건을 분석하여 설계문건상의 요건(List-D)을 파악하며, 직무분석(Task Analysis)을 통하여 운전절차서상에서 필요로 하는 정보의 목록(List-P)과 운전원들이 운전경험상에서 필요로 하는 정보의 항목(List-O)들을 수집하여 작성한다. 구현된 정보의 목록(List-I)은 CFMS에서 제공하기로 확정된 제공 정보의 목록으로, 설계단계에 따라 다르다. 초기 설계에서는 매우 개괄적으로 정의되나 설계가 구체화되어감에 따라 검증결과를 반영하여 설계의 가용성이 달성된다.

정보 가용성 검토에서 작성되는 다양한 정보목록을 요약하면 다음 표 2와 같다. List-R은 List-Reg, List-A, List-P, List-O의 결과를 반영하여 최종적으로 필요정보의 목록으로 종합되고, 그 결과가 CFMS 화면의 제시정보 목록인 List-I와 비교된다.

표 2. CFMS의 정보 가용성 검토를 위한 정보목록의 유형

정 보 목 록	주 제	성 격	내 용	
Requirement List-R	Requirement		CFMS 정보요건의 종합목록	
Requirement List-R	Requirement List-A	Alarm	경보요건	구현된 CFMS의 화면상으로 표시되는 정보의 목록
	Requirement List-D	Document	설계요건	CFMS의 설계요건상으로 제공정보로 정의된 정보의 목록
	Requirement List-P	Procedure	절차요건	CFMS를 활용하는 절차서에서 필요로 하는 정보의 목록
	Requirement List-O	Operation	경험적요건	CFMS를 활용하는 과정에서 운전경험상으로 필요한 보완정보의 목록
	Requirement List-Reg	Regulation	규제요건	CFMS의 규제요건에 관한 정보의 목록
Requirement List-I	Implemented	구현제공	구현된 CFMS의 화면상으로 표시되는 정보의 목록	

정보 가용성 검토의 검토범위 및 방법론은 다음과 같다.

- 개념설계의 검토  
개념설계의 검토에서는 CFM(Critical Function Monitoring)의 논리적 구성에 대한 타당성을 검토한다.
- 경보정보의 설계반영 확인  
경보정보의 설계 반영 확인은 계통설계의 타당성에 대한 검토로서 List-A와 List-R의 비교검토를 통하여 수행된다. 최종적으로는 List-I와 비교하여 확인한다.
- 요건서의 구현확인 :  
요건서의 구현확인인 PMS의 구현과정에 대한 검토로서, List-D와 List-I를 비교하여 확인한다.
- 운전경험 정보의 보완 검토

운전경험 정보는 운전절차서의 직무분석을 통한 소요정보의 재구성을 위하여 필요한 정보로, List-O에 의하여 List-P를 보완한다.

◦ 운전절차정보의 가용성 검토

비상운전의 우선절차 및 회복절차를 기준으로 작성되는 List-P와 List-I의 비교를 통하여 확인한다.

표 3은 현재 CFMS 설계에 대하여 정보가용성 확인 결과의 일부를 제시하고 있다. 예를들어 가용성 검토의 결과 현재 설계에서 CFMS 화면상에는 구현되지 않은 10여개의 정보 항목과 세부항목으로 80여개의 누락된 정보를 확인하여 보완하도록 하였다.

표 3. 정보가용성 검토의 결과 (일부)

Page	TAG	Input Parameter	Page #.	List-I code
210 Core Reactivity	(By I&CE)	CEA Bottom Contacts Status	210	2-1
	CV-FT-210Y	Boric Acid Makeup Flowrate	210,334	3-1
	(By I&CE)	CEDM Main Power Bus Under - Volt. Relay Sta.	210	1-2~3
	(By I&CE)	Startup Neutron Flux Level	210	4-2
	CV-LT-200, -201	Refueling Water Tank Level	210,331,333,334,351	3-5
	(By I&CE)	RCS Heat Up Rate	210,230,336,341,342,343	
	RC-TE-100	RCS Average Temperature	210,230,336 341,342,343	
	CV-RT-204	Process Rad. Monitor Rad.	210,333	3-6
	RC-TE-101	Pressurizer Water Temp.	210,230,336,341,342,343	
	RC-LT-110X, -110Y	Pressurizer Level	210,230,335,336	5-1~2
	(By I&CE)	Logarithmic Neutron Power	210,341,342	4-1
	CV-FT-202	Letdown Line Flowrate	210,230,333,335	3-4
	RC-TE-111X, -121X, -112HA, -122HB	Hot Leg Temperature	210,230,321,335,336	6-5~6
	RC-TE-111Y, -121Y, -115, -125	Cold Leg Temperature	210,230,321	6-1~4
	CV-AE-203	Boronometer Concentration	210,230,333	-
	CV-FT-212	Charging Pump Flowrate	210,230,333,335	3-2
	(By I&CE)	PDIL Deviation Alarm Stat.	210	3-3
	RC-PT-100X, -100Y	Pressurizer Pressure	210,230,335,336,341,342,343	1-3 5-3~4

### 3.2 화면의 적합성 확인

#### 1) 점검목록을 이용한 적합성 확인

CFMS 화면의 적합성 확인을 위한 점검목록은 두 단계로 구분하여 작성되었다. 우선, 인허가요건의 만족을 위해서 필요한 최소한의 검토항목을 기준으로 작성된 점검목록은 CFMS 설계에 관한 규제사항을 기술한 관련 문서들(NUREG-0737 Supp. 1 및 NUREG-0800)을 근거로 요건의 문구를 일일이 분할하여 작성하였다. 일부항목에 대해서는 NUREG-0700과 같은 세부 지침을 선택적으로 반영하여 작성하였다. 규제문건이나 지침 등의 특성상으로 상당히 많은 수의 중복된 점검목록이 작성되었으나 이를 축약하여 총 90여개 항목으로 구성된 점검목록을 개발하였다. 최소 점검목록은 내부적으로 상호 연관성을 포함하는 논리를 가지고 있다. 또한, 각 항목은 평가의 주체와 지원자를 미리 구분하여 업무할당을 명확히 하였다.

점검목록을 통한 적합성 확인은 인간공학에 관한 전문가, CFMS 설계자, 그리고 제어실에서의 운전

경력이 오래된 운전원으로 구성된 평가자 집단에 의하여 수행되었다. 평가는 평가에 필요한 각 분야의 구성원들이 함께 의견과 정보를 교환하는 Group Meeting형식으로 수행되었다. 평가를 통하여 최종적으로 화면설계의 인간공학적 부적합성을 나타내는 HED List가 작성되었다. 표 4는 그 결과의 일부를 나타낸다.

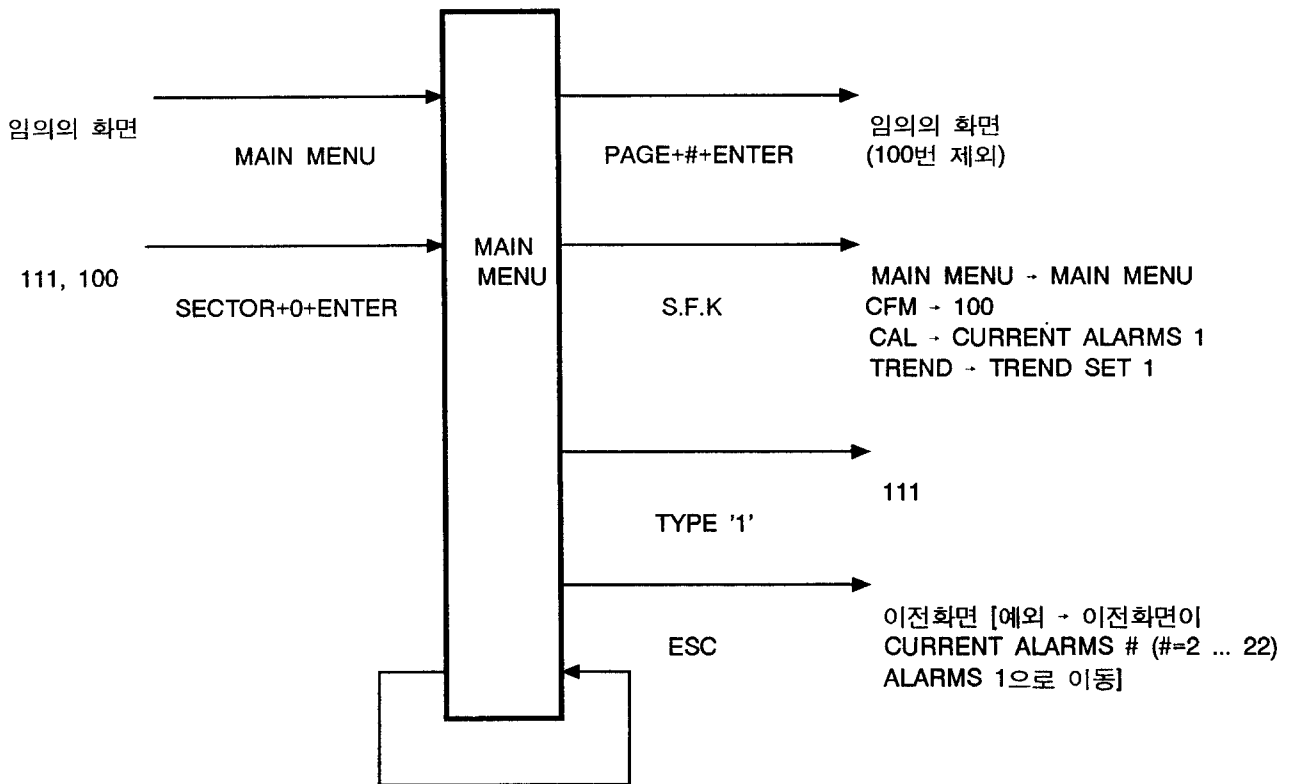
표 4. CFMS HED List (일부)

Scr. page	Screen name	Statement	HED
111	CFM directory	It should be easy to compare data from related plant functions.	- radioactivity control에 대한 감시화면이 없다 - 하위화면과 일치도에 문제있음
100	Critical Function Monitor	Generally, each element of the display should have a label or other readily understood identifier that specifically associates that display element with the variable it represents  The display should follow the readability guidelines	- 전체 CFMS 내에서 사용되고 있는 약어들의 일관성 유지 - label의 구성 format이 통일 되어야 한다. - navigation정보들을 grouping하여 일정한 위치에 배치 - sector no.의 식이 어렵다. - 객체+현상의 순서로 구성되어야 함  - 약어사용이 consistent하지 않다 - 문자 강조를 위해 flashing 사용할 때 readable하지 않다 - record 또는 label의 구성 format은 통일되어야 함
210	Core Reactivity	Generally, each element of the display should have a label or other readily understood identifier that specifically associates that display element with the variable it represents  The display should follow the readability guidelines  When color changes are used to indicate a change in functional or operating status, no more than three colors should be used, corresponding to two levels of change in severity of status.	- 전체 CFMS 내에서 사용되고 있는 약어들의 일관성 유지  - "yes"와 "no"에 사용된 자주색과 녹색은 일반적인 color에 대한 stereotype에 위배 - magenta가 두가지 의미로 쓰였을 수 있다 - yes/no의 color coding이 일관적 개념과 다르다
220	Core heat removal	It should be easy to compare data from related plant functions.  The information displayed on systems that display variables important to safety should be organized in formats that are easy for the control room operator to read and interpret.  Displays should include labels, symbols, or other ways of uniquely identifying each variable being displayed.  The display should follow the readability guidelines	- core heat removal의 동력원의 운전상태 표시 필요  - 그래프 라벨을 관련성에 따라 grouping  - identifier가 생략되어 있다  - 관련 정보들을 적절히 grouping해야 한다 - value의 exponential 표기형식이 consistent하지 않다

## 2) CFMS 화면조작 방식 상세검토

CFMS 화면의 조작방식의 검토는 각 화면간의 이동방식에 대하여 검토함으로써 화면의 적합성 여부를 결정하기 위한 것이다. 본 연구에서는 먼저 화면조작의 패턴을 파악하는 작업을 수행하였다.

CFMS의 화면은 38개로 3개의 수준을 가진 계층적인 구조로 구성되어 있다. 현재 사용된 하드웨어의 특성상으로 화면조작의 방식에 여러 가지 제약이 있어서 작업의 편의성과 오류 가능성을 검토해야 할 필요가 있었다. 본 연구에서 파악한 화면이동 (Navigation) 패턴의 개수는 6개 패턴으로 Main Menu, Level 1 (111화면), Level 1 (100 화면), Level 2 (210 화면), Level 2 (220-270 화면), Level 3 (3## 화면) 등 계층간에 이동방식이 상이한 것으로 파악되었다. 이는 정보구성의 비일관성과 함께 CFMS의 적합성을 저해할 가능성을 가진 요인으로 파악되었다. 그림 1은 본 연구의 검토결과인 6개의 이동패턴 중 다른 화면으로 부터 MAIN MENU로, 그리고 MAIN MENU로 부터 다른 화면으로 이동하는 방식에 대한 검토 결과이다.



- 영문, ., /, SPACE, TAB BACK, TAB, BACK SPACE, ALARM RESET, ESCAPE, ANN ACK, SELECT  
→ bypass
- PAGE+ENTER → ILLEGAL START
- SECTOR+ENTER → ILLEGAL START
- +, -, ., DELETE → ILLEGAL START
- SECTOR → SECTORING REQUESTS NOT ALLOWED HERE
- PRIOR PAGE → PRIOR PAGE REQUESTS NOT ALLOWED HERE
- NEXT PAGE → NEXT PAGE REQUESTS NOT ALLOWED HERE

그림 1. CFMS 화면의 이동방식 (Main Menu)

#### 4. 결론 및 추후 연구

본 연구에서는 CFMS 화면설계에 대한 인간공학적 확인 및 검증의 일환으로 화면설계에 대한 인간공학적 검토를 수행하였다. 인간공학적 확인 및 검증이란 안전수치 표시계통으로서 올진 3&4호기의 CFMS에 대한 인간공학적 타당성의 근거를 제공하는 것이나, 본 연구에서는 우선 CFMS의 인간공학적 확인 및 검증을 위한 기본적인 업무체계를 설정하고 일부항목에 대한 상세 검토를 수행하였다. CFMS의 검증에 필요한 가용성 확인, 적합성 확인, 유효성 검증 등 확인 및 검증 업무 중에서 가용성과 적합성에 대한 확인을 수행하였다. 또한 CFMS 화면간의 이동 패턴을 조사함으로써 Navigation 방식의 적합성을 검토하였다. 가용성과 적합성의 확인을 통하여 화면설계의 인간공학적 문제점을 종합한 HED 목록을 작성하여 설계자에게 제공하였으며, 설계자와의 협의를 통하여 설계에 반영할 수 있도록 하였다.

CFMS 화면설계의 인간공학적 검토를 위하여 본 연구팀에서는 현재 실험검토를 계획중이다. 실험검토에서는 화면의 정보구성과 화면간의 Navigation 방식의 적합성에 대한 종합적인 검토를 가능하게하는 실험계획을 구상하고 있다. 또한, CFMS와 유사한 설계의도로 개발되어 운전원의 의사결정을 돕기 위하여 현재 국내의 다른 원자력발전소에서 사용되는 Status Tree 방식과 비교할 예정이다.

본 연구에서는 CFMS 설계의 인간공학적 평가하기 위하여 필요한 인간공학 업무의 체계와 구체적인 실무 사례를 제시하였다. 울진 3&4호기는 물론 앞으로 계속되는 원전의 설계건설에서 체계적인 인간공학 반영을 가능하게 하였으며, 본 연구의 검토 결과는 인간공학 현안 추적 체계 (HFE-ITS)를 통하여 지속적으로 종합관리되므로, 앞으로 국내에 건설되는 원자력발전소의 CFMS 및 안전수치 표시계통의 개선에 대한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 5. 참고문헌

- [1] Clarification of TMI Action Plan Requirements, NUREG-0737, US NRC, 1983
- [2] Human Factors Engineering Program Review Model, NUREG-0711, US NRC, 1994.
- [3] Guidelines for Control Room Design Reviews, NUREG-0700, US NRC, 1981.
- [4] Standard Review Plan, NUREG-0800, US NRC, 1984.
- [5] Clarification of TMI action plan requirements, 1980.
- [6] IEEE Guide to Evaluation of Man-Machine Performance in Nuclear Power Generating Station Control Room and Other Peripheries, IEEE STD-845, 1988.
- [7] Guide for the application of HFE to systems, equipment and facilities of nuclear power generating stations, IEEE STD-1023, 1988.
- [8] Design for Control Rooms of Nuclear Power Plants, IEC-964, 1989.
- [9] A Status Report Regarding Industry Implementation of Safety Parameter Display Systems, NUREG-1342, US NRC, 1989.
- [10] Human Factors Acceptance Criteria for Safety Parameter Display System, US NRC, NUREG-0835, 1981.
- [11] HF Guide for Nuclear Power Plants Control Room Development, EPRI-NP-3659, 1984.
- [13] The allocation of functions in man-machine system, USNRC, NUREG-CR-2623, 1982.
- [14] Verification and Validation Report for the Critical Function Monitoring System for the Ulchin Nuclear Power Plant Units 3&4, 91791-IC-VR750-00, REV. 00, DDS-1, 1996.
- [15] NRC Action Plan developed as a result of the TMI-2 Accident, 1980.
- [16] CFMS 설계의 인간공학적 확인 및 검증 실행계획(안), 한국원자력연구소, 1996.
- [17] CFMS 설계의 인간공학 프로그램 계획(안), 한국원자력연구소, 1996.