

원전의 안전성 제고를 위한 CFMS의 인간공학적 설계 검토

Human Factors Design Review of CFMS for Improving the Safety of Nuclear Power Plant

이 용 희* · 정 광 태**

Yong-Hee Lee · Kwang-Tae Jung

(1997년 9월 3일 접수, 1997년 12월 12일 채택)

ABSTRACT

In order to improve the safety of nuclear power plant, we performed a human factors review for the CFMS(Critical Function Monitoring system) design of nuclear power plant. Three works were performed in this study. In first work, we developed human factors engineering program plan(HFEPP) and human factors engineering verification and validation plan (HFE-V & V plan) to effectively perform CFMS design and review. In second work, we identified human engineering discrepancies(HEDs) for CFMS design through human factors design review and proposed those resolutions. In the third work, we developed the evaluation and management methodology for identified HEDs. Methodology developed in this study can be used in other complex system as well as in CFMS design review.

1. 서론

원자력발전소(이하, 원전) 주제어실에서 운전원의 오류는 원전사고의 주요 원인으로 인식되어 왔다¹⁾. 따라서, 원전의 안전성을 높이기 위하여 주제어실 운전원의 오류를 저감하기 위한 노력이 계속되어 왔다. 일반적으로 주제어실 운전

원은 원전의 감시계통(monitoring system)을 통하여 발전소의 안전상태에 대한 정보를 얻고, 이를 바탕으로 적절한 조치를 취한다. 그러므로, 비상상황에서 운전원에게 필요한 정보를 신속 정확하게 전달하는 것은 감시계통 설계에서 최우선적으로 고려되어야 하고, 이를 위해 감시계통의 설계에서 여러가지 인간공학적 원칙들이

* 한국원자력연구소 응용 MMS Lab.

** 한국기술교육대학교 산업디자인공학과

반영되어야 한다³⁾.

CFMS(Critical Function Monitoring System)도 원전의 감시 계통(monitoring system)의 일종이므로, 원전의 안전성을 높이기 위하여 여러 가지 인간공학적 원칙들이 설계에서 반영되어야 한다. 따라서, 본 연구는 CFMS 설계에 대한 인간공학적 검토를 통하여 부적합하게 설계된 부분을 찾고 그에 대한 개선사항을 제공함으로써, 장기적으로 원전의 안전성을 향상시키고자 하는데 목적이 있다.

연구의 내용은 크게 세가지로 구분된다. 첫번째는 CFMS의 설계 검토 업무를 체계적으로 수행하기 위한 설계 검토 방법론으로 개발된 인간공학적 프로그램 계획(Human Factors Engineering Program Plan; HFEPP)과 인간공학적 확인 및 검증(Human Factors Engineering Verification and Validation Plan; HFE-V & V Plan) 계획안이다. 두번째는 CFMS 설계에 대한 인간공학적 부적합성을 규명하는 문제이다. 인간공학설계 검토 업무로서 가용성 확인(availability verification), 적합성 확인(suitability verification), 그리고 통합적 검증(integrated validation)을 수행하였고, 이를 통하여 CFMS 설계의 부적합성을 규명하였다. 그리고 세번째는 검토를 통하여 규명된 CFMS 설계상의 인간공학적 결함들의 심각성 평가 및 관리에 관한 방법론을 개발하였다.

CFMS에 대한 설계 검토 업무는 본 연구에서 개발된 HFEPP와 HFE-V & V Plan에 근거하여 수행되었으며, 설계 검토 업무를 효과적으로 수행하기 위하여 문서검토, 전문가 검토, 실물 검토, 운전원 검토, 실험적 검토 등 다섯 가지의 업무를 수행하였다 (Table 1 참조). 문서검토는 설계문건과 운전 절차서, 산업체 표준 등을 기반하였고, 전문가 검토에서는 HCI(Human-Computer Interaction)전문가나 인간공학, 안전공학 및 산업디자인 전문가를 활용하였고, 실물검토에서는 PMS(Plant Monitoring System) 개발설비(Development Facility)를 이용하여 물리적 측면의 실사확인에 주력하였고, 운전원 검토에서는 운전 경험자나 사용자가 될 실제 대상 운전원을 대상으로 하였으며, 실험적 검토는 일부

주요 현안 항목에 대해 수행하였다. IEEE-STD-8458)에서 인간-기계 체계 평가 방법론으로 가용한 대부분의 방법론들이 동원되었다.

Table 1. Method for performing human factors design review

Review Methods	Availability	Suitability	Efficiency
Document - Analysis	◎	△	△
Specialist Opinion - Checklist	△	◎	△
Experiment Review - Simulator	△	○	◎
Operator Opinion - Interview, WT/TT	○	○	○
Facility Review - PMS-DF	△	△	△

◎ : Main Review, ○ : Supporting Review, △ : Assistant Review

또한, 검토 업무를 통하여 규명된 문제점들은 상당히 방대할 수 있기 때문에, 그들을 체계적으로 관리하고, 그들이 원전의 안전성에 미치는 심각성의 정도를 평가할 수 있는 방법론으로 설계 현안 관리 체계(Design Issue Management System; DIMS)를 개발하였다.

2. CFMS 설계 및 검토 방법론

본 연구에서 설계 검토 대상으로 선정된 시스템은 원전 감시 계통의 일부인 CFMS이다. 비록 CFMS가 감시계통의 일부분이라 하더라도 모든 인간공학 업무는 전체 업무를 정의하는 상위의 HFEPP를 기준으로 수행해야 하며, 다시 HFEPP를 기준으로 구성되는 HFE-V&V Plan을 기준으로 검토업무를 수행하여야 한다^{1,2)}. 이러한 필요성에 의하여 본 연구에서는 CFMS 설계 검토를 위한 별도의 HFEPP와 HFE-V & V Plan을 수립하였고, 이 방법론은 CFMS의 설계 검토 뿐만 아니라 다른 복잡한 시스템의 체계적 설계 검토를 위한 목적으로도 활용될 수 있을 것이다.

2.1 인간공학적 프로그램 계획(Human Factors Engineering Program Plan; HFEPP)

CFMS 설계 과정에서 인간공학적 이론을 적용하고자 하는 목적은 운전원이 사용하기 쉽고 오류발생 가능성이 적은, 그럼으로써 원전의 안

전성을 향상시킬 수 있는 CFMS를 개발하고자 하는 것이다¹⁾. 이러한 목적을 만족시키기 위해서는 CFMS 설계 과정에서 인간공학적 업무를 체계적으로 수행하기 위한 HFEP가 수립되어야 한다.

CFMS 설계에 대한 HFEP¹⁾는 CFMS의 설계 과정에서 업무의 근거와 범위를 명확히 하기 위한 가장 중심적이고 기본적인 문건으로, CFMS 설계에서의 인간공학 적용의 목적, 목적 달성을 위한 기술적 프로그램, 인간공학 설계팀 구성, 그리고 인간공학 적용을 위한 관리 및 조직 구조 등을 상세히 기술하였다.

본 논문에서는 HFEP에서 기술된 내용중 CFMS 설계 단계별 인간공학 업무에 대해서만 간단히 설명하고자 한다. HFEP에서는 계획수립(Planning), 분석(Analysis), 설계(Design), 평가(Evaluation)의 설계과정을 통하여 수행되어야 할 인간공학 업무를 Table 2와 같이 명시하였다.

Table 2. Human factors works in CFMS development

HFE Elements \ Phases	Planning	Analysis	Design	Evaluation
1. HFE Design Planning	✓			
2. Operating Experience Review		✓		
3. Function Analysis		✓		
4. Function Allocation		✓		
5. Task Analysis		✓		
6. Human Reliability Analysis		✓		
7. CFMS Design			✓	
8. Procedure Development			✓	
9. Training Development			✓	
10. Verification and Validation	✓	✓	✓	✓

각 단계에서 수행되어야 할 인간공학 업무를 간단히 설명하면 다음과 같다. 계획수립 단계에서는 인간공학 업무팀을 구성하고 CFMS 설계 과정 중에 수행되어 하는 인간공학 업무들의 계획을 수립하고 관리하기 위한 계획안을 작성한다. 이 단계에서는 일반적인 인간공학 프로그램 목표 및 범위, 인간공학 업무 수행 팀의 조직

및 역할, 인간공학 업무의 수행 절차, 인간공학 현안 관리 시스템의 작성 및 관리 등에 대한 구체적인 방법을 확정한다.

분석 단계에서는 CFMS의 설계 및 평가단계에서 필요한 인간공학 정보를 제시하기 위하여 필요한 업무들을 수행한다. 이 단계에서는 인간의 성능문제 및 직무 요구조건 등을 밝히고, 원전의 성능보고서 및 다른 문서의 검사, CFMS를 사용한 경험이 있는 운전원들을 통한 운전경험 검토(Operating Experience Review), 운전원 직무에 대한 CFMS 설계 요구 조건 및 성능 기준을 밝히기 위한 시스템 기능과 작업자 기능 및 직무분석, 그리고 작업자 계획 분석 등을 수행한다.

설계단계에서는 Human-System Interface Design, 절차서 개발, 훈련 프로그램 개발의 세가지 인간공학 업무를 수행한다. 그리고, 평가 단계에서는 설계된 CFMS가 인간공학적으로 적합하게 설계되었는지 확인 및 검증(Verification and Validation)하는 업무를 수행한다. 물론, 확인 및 검증 업무는 마지막 단계뿐만 아니라 다른 단계에서도 수행되어야 할 인간공학 업무이다.

확인 및 검증 업무를 효과적이고 체계적으로 수행하기 위해서는 CFMS 화면 설계에 대한 HFE-V & V Plan을 작성하여야 한다. CFMS 설계에 대한 확인 및 검증 업무의 수행을 통하여 인간공학적 결함(Human Engineering Discrepancy; HED)이 규명되고 문서화된다.

2.2 인간공학적 확인 및 검증 계획 (Human Factors Engineering Verification and Validation Plan; HFE-V&V Plan)

CFMS 설계에 대한 확인 및 검증 업무는 설계업무의 일환으로 수행되지만, 확인 및 검증 업무를 체계적으로 수행하기 위하여 별도의 HFE-V & V Plan이 작성되어야 한다. 본 연구에서 작성된 확인 및 검증 계획은 기존의 다른 시스템에 대한 계획안을 기준으로 작성되었으며, CFMS 설계 검토에 대한 업무의 고유성을 반영하였다. CFMS 설계에 대한 HFE-V & V Plan에서는 확인 및 검증 업무의 수행 목적, 수행절차, 수행 방법, 수행 기준, 수행조직의 운영,

인간공학적 설계 부적합성들의 처리방안 등에 대하여 실행방법을 상세히 기록하였다. 본 논문에서는 수행 업무에 대해서만 간단히 기술하고자 한다. CFMS 설계에 대한 확인 및 검증업무에서는 가용성 확인, 적합성 확인, 통합적 검증, 설계 현안의 유지 관리, HED 작성 관리의 업무를 수행한다.

2.2.1 CFMS 가용성 확인

가용성 확인은 운전원이 그들에게 부과된 직무와 행위의 목표를 성공적으로 달성하는데 필요한 CFMS의 모든 부분들이 가용한지 확인하고, 운전원의 직무 수행을 지원하지 않는 부분이 존재하는지 확인하는 것이다^{1,2)}.

CFMS의 가용성확인에서는 정보 가용성, 기능 가용성, 기기 가용성들의 업무를 수행해야 하는데, 이들 업무 중에서 주된 확인 및 검증 업무는 정보가용성에 대한 확인이다. 즉, CFMS의 목적은 비상시 운전원에게 발전소 상태에 대한 정보를 제공하는 것이 주 목적이므로, 제시되는 정보가 얼마나 가용한지 여부가 가장 중요한 문제이다.

2.2.2 적합성 확인

적합성 확인에서는 두가지의 업무가 수행되는데, CFMS 화면 요소의 적합성 확인과 화면 상호작용 방식의 적합성을 확인하는 업무가 수행된다. 화면 설계 적합성 확인에서는 CFMS가 인간공학적 설계지침, 표준, 원리 등을 반영하여 CFMS와 관련된 운전원의 직무수행에 편리하게 설계되었는지 확인하는 것이다. 검토의 방법론으로 CFMS 설계에 대한 규제사항으로 부터 확인이 필요한 최소한의 검토항목을 도출하고 검토항목별 검토기준을 작성하여 인간공학적 점검 목록을 작성한다. 점검목록을 기준으로 운전경험자, 설계경험자, HCI 전문가 등 전문가들의 주관적 평가를 통하여 CFMS 화면설계에 대한 적합성 확인 업무를 수행한다.

또한, 이동방식의 적합성 확인에서는 상호작용의 적합성 검토를 위하여 키보드를 중심으로 재래식으로 설계된 CFMS 화면의 이동방식을 상세하게 검토함으로써, 작업의 부담과 오류의 가능성을 검토한다.

2.2.3 유효성 검증

CFMS의 유효성 검증은 CFMS가 운전원에게 요구되는 직무를 성공적으로 지원할 수 있도록 설계되었는지 평가하는 것이다. 즉 설계된 CFMS가 의도된 기능과 성능을 충분히 발휘하여, 최초의 설계 개념에서 의도한 목적을 달성할 수 있는지를 종합적으로 확인하는 것이다.

CFMS가 운전원에게 요구되는 직무를 성공적으로 지원할 수 있도록 설계되었는지를 검증하기 위하여, 발전소의 운전절차, 시뮬레이터, 운전원 등을 대상으로 하여 종합적인 시험 평가를 수행해야 한다.

CFMS에 대한 유효성 검증은 CFMS가 주제어실의 일부이기 때문에, 주제어실에 대한 확인 및 검증과 분리되어 수행될 수는 없고, 검증 시나리오도 CFMS에 대한 독자적인 것을 구성할 수는 없다. CFMS에 대한 유효성 검증은 MCR(Main Control Room)에 대한 확인 및 검증과 연계하여 검증 시나리오를 통한 주제어실에서의 작업수행 중 CFMS가 관련된 부분들에 대해 CFMS가 적당하게 그 목적을 지원하는지를 검증한다.

2.2.4 인간공학 현안관리 체계

CFMS 설계에 관한 인간공학 현안관리 체계(Issue Management System; IMS)는 확인 및 검증을 위한 계획 수립에서 전체의 확인 및 검증 업무를 효과적으로 수행하기 위한 지원 도구이다. CFMS의 설계를 위한 예비분석 단계에서 수행되는 규제요건 분석, 설계 및 운전경험 검토를 통하여 구체적인 설계 현안들의 목록을 작성하여 설계업무를 지원한다. IMS는 이후, 기능 및 직무분석을 통하여 분석과정에서 요건을 추가하거나 설계 과정에서 현안들의 해소상황을 입력하여 지속적으로 설계를 평가하는 역할을 한다.

IMS에서 언급된 현안들은 검토과정을 통하여 그 해결 여부를 명백하게 확인 및 검증하고, 최종적으로 문제점으로 제기된 현안들에 대해서는 실험적 검토 등 별도의 작업을 통하여 검증되어야 한다. 그러나, 모든 설계현안들은 설계과정 중에 해결되거나 해결방안(Resolution Plan)이 수반되어야 한다.

2.2.5 HED 작성관리

확인 및 검증을 통하여 규명된 인간공학적 문제점들은 적당한 기록양식에 따라 작성되고 관리되어야 하며, 기록양식에는 문제점에 대한 간단한 설명과 해소방안 등이 명시되어야 한다. CFMS 설계과정에서 확인 및 검증을 통하여 규명되는 문제점들은 설계자에게 통보하여 해결하도록 하고, DIMS를 통하여 추적관리한다. 또한, 작성 관리되는 문제점 목록은 해당 CFMS의 개선뿐만 아니라, 후속기의 CFMS 설계를 위한 자료로 활용된다.

3. 검토의 내용 및 결과

CFMS 설계에 대한 평가 기준으로 가용성(availability), 적합성(suitability), 유효성(effectiveness)을 선정하였다. 세부적인 검토가 필요한 화면설계는 가용성과 적합성 측면을 검토하였으며, 일부 가능한 범위에서 전체적인 CFMS의 유효성 검토도 수행하였다.

검토 결과, CFMS 설계에 대해 약 66개의 인간공학적 문제점(Human Engineering Discrepancy; HED)들이 발견되었다. Table 3에 명시된 문제점들은 66개의 HED들 중 일부분으로 화면 검토를 통하여 밝혀진 HED들만 명시한 것이다. 그 외에도 정보 가용성 검토 결과로 밝혀진 16개 항목, 화면 상호 작용 검토 결과로 밝혀진 15 항목, 유효성 검증 결과로 밝혀진 6개 항목 등이 있다. CFMS 화면에 대한 인간공학 전문가들의 실제적 검토를 통하여 제기된 문제점들은 (1) 인간공학 전문가들의 재검토, (2) 운전 경험자 및 (3) CFMS 설계자의 검토를 통하여 최종적으로 결정되었다.

Table 3에 나타난 결과를 보면 화면 적합성 검토를 통하여 총 29개의 항목이 문제점으로 판정되었으며, 이는 다시 7개의 종류로 분류되었다. Display Format 및 Identifier/Label의 부문이 CFMS 설계에 가장 많은 문제점으로 지적된 것을 특징으로 꼽을 수 있다.

4. HED의 심각성 평가 및 관리

Table 3. Human factors problems of CFMS screen design

Problem grouping	Detailed problems
Display Format (6 items)	Data format (inadequate accuracy) Data format inconsistency Data format understandability Graphic representation inconsistency Enhanced coding (readability) Information coding complexity (shape & color)
Layout/Grouping (4 items)	Layout (related information) Layout (valve & flow line) Grouping of related information Grouping of navigation information
Record structure (2 items)	Record structure (semantic format) Record structure (svntactic format, spacing)
Symbology (2 items)	Symbology (employment of undefined symbol) Symbology (compatibility of symbol employment)
Identifier/Label (7 items)	Inconsistency of abbreviation employment Inconsistency of label employment Inconsistency of identifier/label position Missing identifier Incomplete identifier Incomplete information Readability of sector number
Color (4 items)	Type and number of used color Meaning of color coding Color coding conflict Inconsistency of color change employment
Variable/Function/ Navigation(4 items)	Mapping between level 1 & 2 Proximity of related function and information Navigation easiness of scattered information Indication of operating status

본 연구에서는 검토 결과로 밝혀진 문제점들의 설계 반영 여부에 대한 의사결정 과정을 지원하기 위하여 HED들의 인간공학적 심각성을 평가하였다. 밝혀진 HED들은 원전의 안전성에 미치는 심각성의 정도에 따라 “신속한 해결”, “가능한 신속한 해결”, “장기적 해결”의 세 그룹으로 분류되었다(Table 4 참조). 본 연구에서는 중요도 판정을 용이하게 하기 위하여 AHP(analytic hierarchy process)6)를 적용하였으며, 중요도 판정 기준으로 “human error”, “workload”, “resource requirement”, “training requirement”, “operator acceptability”을 선정하였으며

판정기준의 선정은 인간공학 전문가들의 협의에 의한 것이다.

또한, 본 연구에서는 제기된 HED들을 체계적으로 관리하기 위한 방법으로 인간공학 설계 현안 관리 체계(Design Issue Management System: DIMS)를 개발하였다. DIMS는 세 개의 부분으로 구성되어 있는데, CFMS 설계에 대한 인간공학적 요건을 담은 요건 데이터베이스, 현안들의 중요도를 평가하기 위한 중요도 평가 기능, 그리고 마지막으로 특정 현안을 효과적으로 추적할 수 있는 현안 추적 기능으로 구성되어 있다. Fig. 1은 DIMS의 요건 분석 기능의 한 화면이다.

5. 결론

본 연구에서는 원전의 안전성에 중요한 영향을 미치는 원전 감시계통의 설계 검토를 위한 방법론과 CFMS 설계의 인간공학적 검토에 대한 연구를 수행하였다. 검토의 대상으로 국내의 기술진에 의하여 설계된 울진 3, 4호기 CFMS 화면을 선정하였고, 그에 대한 검토 결과와 관리체계를 개발하였다.

CFMS의 설계 검토는 원전의 다른 계통의 검토와는 그 특성이 다름에도 불구하고 아직까지 검토의 방법론이 구체적으로 확립되지 않았았기 때문에 본 연구에서는 CFMS의 설계 검토를 목적으로 HFEPP와 HFE-V & V Plan을 개발하였다. 물론, 이 방법론은 CFMS 뿐만이 아니라 다른 감시계통의 설계 검토에도 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 CFMS의 설계 검토 결과로 약 66개의 인간공학적 문제점들을 규명하였는데, 몇몇 문제점들은 원전의 안전성에 심각한 문제를 초래할 수도 있는 것들이었다. 심각한 문제점들을 물론 시급하게 해결되어야 하지만, 그렇지 않은 문제점들도 원전의 안전성을 위해 장기적으로는 해결되어야 할 것이다.

본 연구에서 제기된 문제점들은 대부분 인간공학 전문가들의 검토를 통하여 밝혀진 것들이다. 따라서, 제기된 문제점들이 인간공학적 측면에서 부적합하게 설계된 것들임에도 불구하고,

Table 4. Severity evaluation of HED by human factors specialist

Ranking	HED list	Severity	Result
1	Information coding complexity	8.56	Quick resolution (5 items)
2	Color coding conflict	8.05	
3	Meaning of color coding	7.75	
4	Mapping between level 1 & 2	7.20	
5	Proximity of related information	7.10	
6	Layout (valve & flow line)	6.30	Resolution as quick as possible (19items)
7	Enhanced coing (readability)	6.25	
8	Missing identifier	6.20	
9	Grouping of related information	5.75	
10	Indication of operating status	5.60	
11	Layout (related information)	5.50	
12	Record structure (syntactic format, spacing)	5.35	
13	Navigation easiness of scattered information	5.35	
14	Data format understandability	4.75	
15	Inconsistency of abbreviation employment	4.70	
16	Inconsistency identifier/label position	5.55	
17	Readability of sector number	4.40	
18	Data format (inadequate accuracy)	4.10	
19	Type and number of used color	4.10	
20	Data format inconsistency	4.00	
21	Symbology (compatibility of symbol employment)	4.00	
22	Inconsistency of label employment	3.95	
23	Incomplete information	3.20	
24	symbology (employment of undefined symbol)	3.10	
25	Incomplete identifier	2.90	Long-term resolution (5items)
26	Graphic representation inconsistency	2.80	
27	Grouping of navigation information	2.75	
28	Record structure (semantic format)	2.75	
29	Inconsistency of color change employment	1.95	

원전 운전원들의 평가결과는 인간공학 전문가들과 다른 경우가 있었다. 이것은 아마 운전원들이 검토된 시스템에 이미 익숙해져 있기 때문일 것이다. 하지만, 인간공학적으로 부적합하게 설

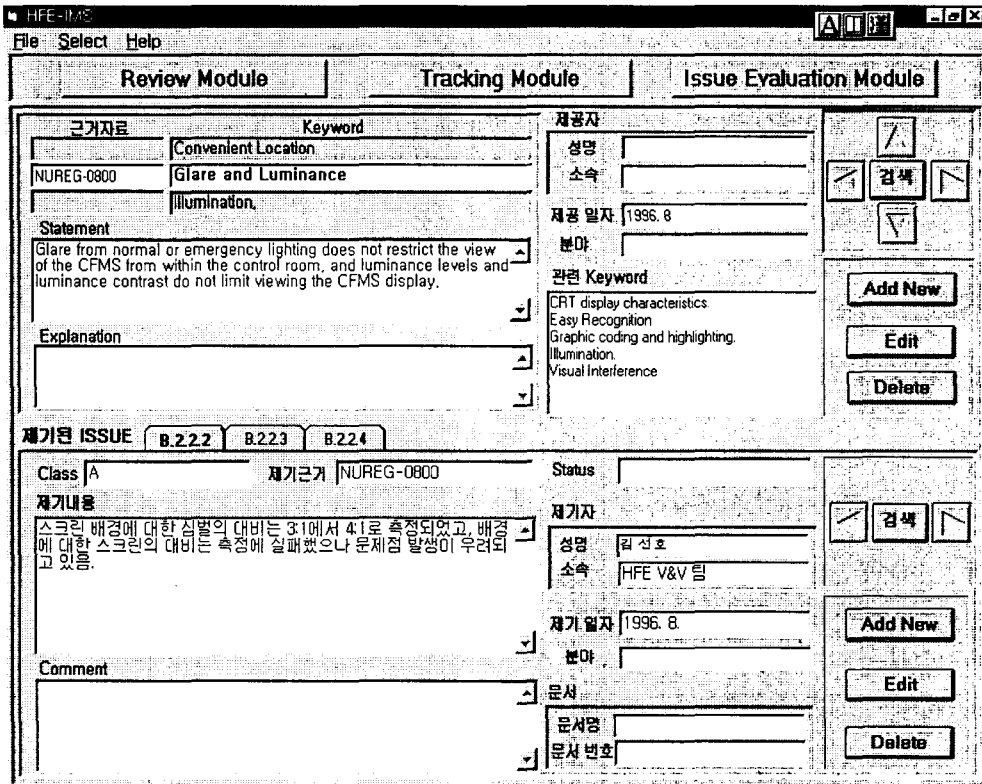


Fig. 1. Requirement analysis picture of DIMS

계된 부분은 원전의 비상시에는 어떤 결과를 초래할지 모른다. 결국 이러한 문제점들은 인간의 기대와는 다르게 설계된 것이기 때문이다. 따라서, 원전의 안전성을 높이기 위해서 이들 문제점들은 장기적으로는 결국 해결되어야 할 것이다.

CFMS에 대한 인간공학적 문제점들은 이들을 체계적으로 관리하고 평가하기 위하여 개발된 DIMS를 통하여 지속적으로 종합관리되므로, 앞으로 국내에 건설되는 원전의 CFMS 및 기타의 감시시스템의 인간공학적 설계를 기초자료로도 활용될 수 있을 것이다. 또한, 본 연구의 방법론들은 CFMS 뿐만 아니라 기타의 복잡한 시스템 (또는 제품)의 설계 및 평가를 위해서도 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- 1) 한국원자력연구소, 울진 3, 4호기 CFMS 화면 설계의 인간공학적 검토, KAERI/CR-027/96, 1996.
- 2) US NRC, "Human Factors Engineering Program Review Model, NUREG-0711", 1994.
- 3) US NRC, "Guidelines for Control Room Design Reviews, NUREG-0700", 1981.
- 4) US NRC, "Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants", NUREG-0800, 1984.
- 5) US NRC, "A Status Report Regarding Industry Implementation of Safety Parameter Display Systems", NUREG-1342, 1989.
- 6) T.L., Saaty, "Analytic Hierarchy Process", McGraw-Hill, 1980.

- 7) US NRC, "Human Factors Acceptance Criteria for Safety Parameter Display System", NUREG-0835, 1981.
- 8) IEEE-STD 845, "IEEE Guide to the Evalua-

tion of Man-Machine Performance in Nuclear Power Generating Station Control Room and other Peripheries", 1988.