

# Fuzzy Set Theory와 AHP를 적용한 CFMS 화면설계의 인간공학적 평가

정광태, 이용희

한국원자력연구소 인간공학연구팀

## ABSTRACT

CFMS(Critical Function Monitoring System)는 원자력발전소에서 비상시 제어실 운전원에게 원전의 안전상태에 대한 정보를 제공하는 기능을 갖는데, 원전의 안전성을 위해 인간공학적 확인 및 검증(V&V)이 요구된다. 본 연구에서는 CFMS 화면설계의 인간공학적 평가를 위하여, 원전의 안전성에 대한 평가항목들의 상대적 중요도를 구하고 최종적으로 설계의 적합성을 평가하는 방법론을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 CFMS 화면설계의 평가항목 및 평가기준 확립, 원전에서 인적오류발생 가능성에 대한 평가항목의 상대적 중요도 결정, 분석하고자 하는 CFMS 화면에 대한 각 평가항목들의 인간공학적 설계의 적합성 평가로 구성된다. CFMS의 인간공학적 평가를 위한 방법론으로 Fuzzy Set Theory와 AHP(Analytic Hierarchical Process) 기법을 적용한 방법론을 제시하였다. 최종적으로는 전문가의 평가를 통하여 국내 건설되는 원전의 실제적인 문제에 적용하고자 한다.

## 1. 서론

원자력발전소(이하, 원전) 주제어실에서 운전원의 오류는 원전사고의 주요 요인으로 인식되어 왔다. 원전에서 운전원의 오류를 유발하는 많은 원인들이 존재하지만, 특히 이상상태 및 비상운전 상태에서 운전원에게 제시되는 정보의 신뢰성과 부적합성이 중요한 문제의 하나로 제기되어 왔다. 이러한 필요성에 따라, 비상상태에서 원전의 안전상태를 평가할 수 있는 안전변수 표시계통 (SPDS ; Safety Parameter Display System)이 개발되어 기존의 시스템에 추가로 설치되었다[7].

SPDS는 원전의 비정상 및 비상 운전상태에서 제어실 운전원이 원전의 안전상태를 판단하고, 안전성과 효율성 측면에서 가장 중요한 노심손상을 방지하기 위해 교정조치를 취해야 하는지를 판단하는데 도움을 주려는 목적으로 설치된다. 따라서 SPDS는 제어실 운전원이 원전의 안전상태를 신속하고 확실하게 판단할 수 있도록 적절한 인간공학적 개념을 고려하여 설계되어야 한다[5].

이러한 필요성에 의하여 미국을 비롯한 선진국에서는 SPDS의 계획 및 설계 단계로 부터 확인 및 검증(V&V; Verification and Validation) 단계까지의 전 과정에서 인간공학적 원칙을 반영하려고 노력하였다. 국내에서도 이러한 필요성을 인식하여 SPDS의 설계 및 검토에서 인간공학적 원칙을 적용하려고 하고 있다.

CFMS (Critical Function Monitoring System)는 울진 3, 4호기의 주제어실에 설치되어 사용될 SPDS로, 설계에서의 인간공학적 고려사항의 반영여부에 대한 검토가 중요한 문제로 대두되고 있다. 따라서 본 연구는 CFMS의 화면설계에 대한 인간공학적 평가를 목적으로 하는데, 이것은 인간-시스템 인

터페이스 (HSI ; Human-System Interface) 설계 검토절차: 계획수립, 기능 및 직무분석, HSI 설계 V&V, HED (human engineering deficiency) 해결의 전체 과정 중 HSI 설계 V&V 단계의 일부에 해당된다.

일반적으로 원전의 안전성 (인적오류) 측면에서 CFMS 화면설계 항목들의 중요성은 동일하지 않기 때문에 그들의 중요성을 밝히고 그것을 화면설계의 인간공학적 평가에서 이용하는 것은 효과적인 연구 수행에 도움을 줄 것이다. 또한 특정한 CFMS에서 각 평가항목들이 인간공학적으로 얼마나 적합하게 설계되었는가의 평가는 모호함을 수반할 수 있기 때문에 평가에서의 모호함을 효과적으로 다룰 수 있는 방법을 이용하는 것도 평가에서의 객관성을 유지하는 좋은 방법이 될 것이다.

이러한 개념에 근거하여 본 연구에서는 평가항목들의 중요성을 효과적으로 구하기 위한 방법으로 분석계층과정 (AHP; Analytic Hierarchical Process)[3]을 적용하고, 각 항목들에 대한 인간공학적 설계의 적합성 정도를 효과적으로 평가하기 위하여 퍼지이론[4]을 적용하기 위한 방법론을 제시하고자 한다. 최종적으로는 전문가의 평가를 통하여 이 방법론을 실제 CFMS의 평가에 적용하고자 한다.

## 2. CFMS 화면의 인간공학적 설계 검토

CFMS는 CRT (cathode ray tube) 화면을 통해 운전원에게 필요한 정보를 제공하는 시스템으로, 운전원의 행위가 신뢰성 있고 높은 수행도를 유지하게 하기 위해서는 HSI를 고려하여 설계하여야 한다 [7]. 일반적인 HSI 설계 검토 절차는 다음과 같은 네개의 주요한 단계를 통하여 수행된다.

### 1) 계획수립 단계

HSI 설계 검토에 대한 검토 목표 및 범위, 검토 팀, 관리과정 및 절차, 그리고 기술적 프로그램 등을 정의하는 단계이다.

### 2) 예비분석단계

HSI 설계에 대한 V&V의 기술적 근거와 기준을 제공하는 단계로, HSI 가 평가되어야 하는 인간의 성능 문제 및 직무 요구조건을 밝힌다. 다음과 같은 세가지의 분석이 수행되어야 한다.

- 작업경험 검토  
발전소 성능보고서 및 다른 문서의 검사, HSI 에 관련된 인간수행도 문제를 밝히기 위한 작업자의 조사를 포함하는 작업경험의 검토
- 기능 및 직무분석  
작업자 직무에 대한 HSI 요구조건 및 성능기준을 밝히기 위한 시스템 기능과 작업자 기능 및 직무의 검토
- HSI 목록 및 특성화  
기존 또는 계획된 HSI 의 특성, 기능, 그리고 성능설명을 포함하는 HSI의 목록

### 3) HSI설계 V&V단계

이 단계의 목적은 HED 가 적당하게 규명되고 문서화되어 있는지를 확인하는 것이다. 이를 위해 다음의 분석을 수행하는 것이 필요하다.

- HSI 작업지원 확인  
HSI 가 모든 작업자 직무 요구조건의 수행에 적합하게 설계되었는지 확인
- HFE 설계 확인  
HSI 가 인간의 능력과 한계를 고려하여 설계되고 실행되는지를 확인
- 통합 시스템 검증  
통합된 HSI설계 및 그것의 실행이 모든 직무 수행 요구조건을 달성할 수 있는지 입증

#### 4) HED 해결 단계

원전 안전성의 측면에서의 중요성을 고려하여 HED를 평가하고 중요한 HED를 해결하는 개선방안을 수립하며, 그 결과를 반영하였는지를 입증하는 단계이다.

일반적인 화면설계의 인간공학적 검토에 있어 중요한 것은 평가항목을 어떻게 결정하느냐 하는 것이다. 아직까지 원자력분야에서 CFMS의 인간공학설계 평가에서 사용될 수 있는 몇가지의 지침들이 개발되었는데, 이들 자료들이 평가항목 결정의 중요한 근거로 사용된다. 본 연구에서 평가항목을 결정하는데 사용될 절차는 다음과 같다.

##### 가) 관련된 인간공학적 문헌의 조사

기존에 개발되었던 NUREG-0700, NUREG-0835, NUREG-0696 등과 같은 SPDS 설계 검토 지침 문헌을 일차자료로, 인간공학 핸드북 및 교재 등을 이차자료로, 연구논문, 연구보고서, 학술회의 발표논문 등을 기타 자료로 분류하여 일차자료부터 평가항목 결정의 근거로 사용한다. 그리고 경험적 연구 (사례연구 및 분야 전문가들에 대한 설문조사/인터뷰), 실험적 연구 등을 통하여 불확실한 항목에 대해서는 그 타당성을 검증한다.

##### 나) 검토지침 초안 작성

문헌조사 방법론을 통하여 참고자료들로부터 평가항목 및 지침의 초안을 작성한다. 비슷한 항목들의 결합, 중복되는 항목들의 제거, 복합된 항목의 분해 등을 통하여 평가항목 및 지침에 대한 초안을 작성한다.

##### 다) 평가항목 및 지침의 상세한 검토

평가항목 및 지침의 타당성 연구를 위하여 각 항목의 초안에 대한 기술적 근거, 원전에 대한 항목의 적절성, 그리고 안전성 검토에 대한 항목의 적절성을 평가한다. 그리고 이 과정을 통하여 평가항목 및 지침을 최종 확정한다.

### 3. 평가항목의 상대적 중요성을 결정하기 위한 AHP의 적용

CFMS는 결국 모든 정보를 CRT(cathode ray tube) 화면을 통하여 운전원에게 제시하기 때문에 CFMS 화면의 설계에 있어 인간공학적 고려사항을 반영하는 것은 상당히 중요하다. 일반적으로 CRT 화면을 설계할 때 표시기나 표시문자의 형태, 크기, 색채, 밝기, 표시방법, 설치장소 등과 같은 항목들에 주의를 기울여야 하는데, 화면설계자는 이들을 어떻게 설계하는 것이 인간과의 인터페이스를 좋게 할 수 있는가를 고려해야 한다[9].

CFMS 화면 설계의 인간공학적 검토에서 고려되어야 하는 인간공학설계항목 (즉, 평가항목)들을 결정하였다면 그들의 상대적 중요성을 평가하는 작업이 필요하다. 그것은 평가되어야 할 항목들의 수가 많기 때문에 시간이나 비용상의 문제에 의하여 그 항목들을 모두 검토한다는 것이 때로는 불가능하고, 또한 화면설계시에 각 항목들 사이에 상충되는 면이 있을 수 있기 때문이다. 이 경우 평가항목들의 상대적 중요성을 안다면 중요성이 높은 항목에 우선권(priority)을 부여하여 먼저 고려할 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 AHP를 적용하여 각 평가항목들의 상대적 중요성을 결정하는 방법론을 제안한다. 여기서 원전의 안전성 (인적오류) 측면에서 각 평가항목의 상대적 중요성을 평가하게 되는데, 수준 1에는 각 항목들의 평가기준이 위치하고 수준 2에는 평가항목들이 위치한다. 상대적 중요도를 구하기 위한 문제의 구조는 그림 1과 같다.

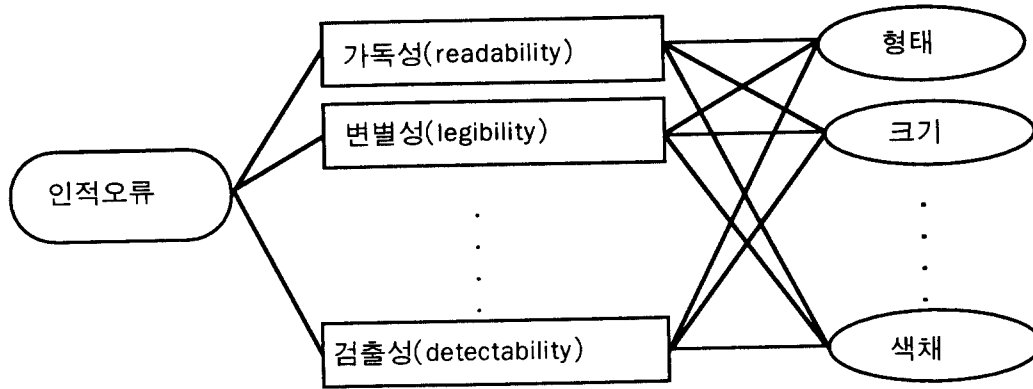


그림 1. CFMS 화면설계 항목들의 중요도를 구하기 위한 문제의 계층적 구조

#### 4. CFMS 화면설계의 인간공학적 적합성 평가

CFMS 화면설계에 있어 각 평가항목들이 인간공학적으로 얼마나 적합하게 설계되었는가를 평가하는 문제는 모호함과 평가자의 주관성이 개재될 수 있다. 많은 경우 평가항목의 적합성을 명확하게 제시할 수 없기 때문이다. 본 연구에서는 퍼지이론을 적용하여 이러한 모호함을 해결하고자 한다. 평가에서 사용될 모호집합(fuzzy set)은 표 1과 같다.

표 1. 언어평점에 사용될 모호집합

언어평점	소속함수	형태	핵
아주좋다	[5,6,6,6]	삼각형	6
어느정도 좋다	[4,5,5,6]	삼각형	5
조금 좋다	[3,4,4,5]	삼각형	4
중간	[2,3,3,4]	삼각형	3
조금 나쁘다	[1,2,2,3]	삼각형	2
어느정도 나쁘다	[0,1,1,2]	삼각형	1
아주 나쁘다	[0,0,0,1]	삼각형	0

CFMS 화면설계에 대한 인간공학적 평가에서 표 1의 언어평점을 이용하여 각 평가항목에 대한 설계의 적합성을 평가한다. 그리고 각 항목들의 평가점수를 종합하여 CFMS 화면설계에 대한 하나의 평점으로 나타낼 필요가 있는 경우에는 각 항목들의 상대적 중요도와 소속함수를 결합하여 구한 결과를 언어근사를 통하여 하나의 언어평점으로 나타낼 수 있다[2].

#### 5. 가설적 예제 및 결론

본 연구에서 제시된 방법론은 올진 3,4호기 CFMS 화면설계의 인간공학적 검토 과제의 효과적 수행을 위한 방법론으로 고려하고자 하는 것이다. 과제의 수행단계가 아직 초기이기 때문에 화면설계 검

토를 위한 기준 및 항목이 확정되지 않은 관계로 실제적 문제への 적용은 본 연구에서 수행하지 못하였다. 대신 간단한 예제로 방법론의 적용을 대신하고자 한다.

표 2는 CFMS 화면설계에 대한 인간공학적 평가에 본 연구에서 제안한 방법론을 적용한 결과를 나타내고 있다. 각 평가항목들의 상대적 가중치는 AHP를 통하여 구한 것이고 각 항목들에 대한 인간공학설계의 적합성은 언어평점을 사용하여 구한 것이다. 이들 결과들은 모두 전문가의 평가를 통하여 얻어진 결과들이어야 그 타당성이 있을 것이다.

표 2 . CFMS 화면설계의 인간공학적 평가에 대한 가설적 예제

평가항목	상대적 가중치	설계의 적합성
형태	0.10	어느정도 좋다
크기	0.15	아주 좋다
색채	0.10	아주 나쁘다
밝기	0.20	보통이다
.	.	.
.	.	.
종합	1.00	조금 좋다

표 2에서 설계의 적합성에 대한 종합평점은 각 항목들의 평가된 점수를 가중평균하여 구한 결과를 언어근사한 것이다. 이 평점은 평가된 CFMS 화면 설계의 적합성의 정도를 전체적으로 표현한 결과이다. 본 연구에서 제시된 방법론은 추후에 CFMS 화면설계의 검토를 위한 평가항목과 기준을 확정된 후 실제적 문제에 적용될 것이다.

### 참고문헌

- [1] Aczel, J. and Satty, T., "Procedures for synthesizing Ratio Judgements", J. of Mathematical Psychology, Vol. 27, 1983, 93-112
- [2] Park, K.S. and Kim, J.S., "Fuzzy Weighted-Checklist with Linguistic Variables", IEEE Trans. on Reliability, Vol. 39(3), 1990, 1-5.
- [3] Saaty, T., "A scaling method for priorities in hierarchical structures", J. Mathematical Psychology, Jun, 1977.
- [4] Zadeh, L., "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning", Information Science, vol 8, 1975, pp 199-249 (Part 1), 301-357 (Part 2), & vol 9, 1975, pp 43-80 (Part 3).
- [5] Human Factors Acceptance Criteria for Safety Parameter Display Systems, NUREG-0835, Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., 1981.
- [6] Human Factors Engineering Program Review Model, NUREG-0711, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., 1994.
- [7] Guidelines for Control Room Design Reviews, NUREG-0700, Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., 1981.
- [8] 박경수, 인간공학 : 작업경제학, 영지문화사, 1992.
- [9] 조암, 도해 에르고노믹스, 한국공업표준협회, 1990.

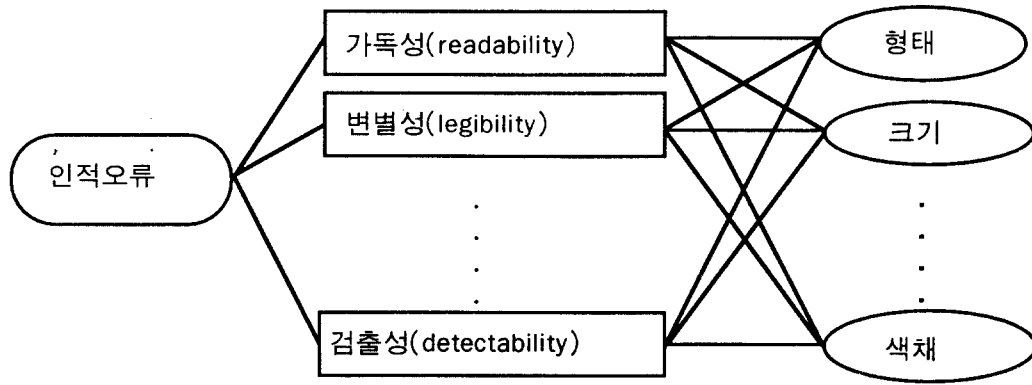


그림 1. CFMS 화면설계 항목들의 중요도를 구하기 위한 문제의 계층적 구조

표 1. 언어평점에 사용될 모호집합

언어평점	소속함수	형태	핵
아주좋다	[5,6,6,6]	삼각형	6
어느정도 좋다	[4,5,5,6]	삼각형	5
조금 좋다	[3,4,4,5]	삼각형	4
중간	[2,3,3,4]	삼각형	3
조금 나쁘다	[1,2,2,3]	삼각형	2
어느정도 나쁘다	[0,1,1,2]	삼각형	1
아주 나쁘다	[0,0,0,1]	삼각형	0

표 2. CFMS 화면설계의 인간공학적 평가에 대한 가설적 예제

평가항목	상대적 가중치	설계의 적합성
형태	0.10	어느정도 좋다
크기	0.15	아주 좋다
색채	0.10	아주 나쁘다
밝기	0.20	보통이다
.	.	.
.	.	.
종합	1.00	조금 좋다