

차세대 원전 주 제어실 설계 기본개념의 인지공학적 평가

정경훈*, 윤완철**, 함동한**

* 전력연구원 신형원전개발센터
** 한국과학기술원 산업공학과

Abstract

Since most human activities in a nuclear power plant are performed in the main control room (MCR), it is important to have its design well human-engineered, both physically and cognitively. Much research efforts have been given for better, operator-centered designs of human-machine interface in MCR capitalizing today's advanced information technology. Korea is among those who are actively expediting such research for the next-generation nuclear plants.

This paper analyzes two forerunners among the emerging MCR designs, namely Nuplex 80+ and N4, from the perspective of cognitive systems engineering. Since the two show some fundamental differences in their design concepts, the principles with their pros and cons must be enumerated to benefit our own design of new control rooms. This paper also lists many other decision-making points that emerged due to the new availability of cognitively flexible design as they should also be considered based on cognitive engineering principles. The future scope and directions of related research are suggested.

1. 서론

우리나라의 경우 천연자원이 부족한 상황에서 증가하는 전력의 수요를 충당하기 위해 원자력에 대한 의존도가 날로 높아지고 있다. 현재 10여개 이상의 원자력발전소가 가동중에 있고, 앞으로도 추가적인 원자력발전소의 건설을 추진중에 있다. 원자력산업의 비중이 높은 우리나라에서는 원자력발전소의 효율적이고 경제적인 운영이 더욱 요구된다.

원전의 안전성 및 경제성에 영향을 미치는 중요한 요인 중 하나가 운전원의 직무수행도입은 여러 자료와 보고에 의해 입증된 바 있다 [1, 5]. 운전원은 주 제어실 (main control room) 내에서 대부분의 직무를 수행하게 된다. 운전원과 발전소 내부와의 상호작용이 직접적으로 일어나는 것은 주 제어실의 MMIS (Man-Machine Interface System)를 통해서다. MMIS는 운전원에게 발전소 내부상태에 대한 정보를 제공하고, 의사결정 및 문제해결에 대한 지원정보를 제공하며, 운전원

의 명령조작을 발전소 내부에 전달하는 매개체 역할을 한다.

그런데 미국의 TMI 및 구 소련의 Chernobyl 원전 사고의 경험은 기존 원전의 주 제어실 MMIS가 운전원에게 부적절한 작업 환경을 제공하고 있음을 시사하였다 [3, 6, 10]. 이런 이유로 원자력분야의 선진국들은 새로운 개념의 차세대 원전 주 제어실을 설계했거나 설계추진 중에 있다. 우리나라도 차세대 원전 설계를 G7과제에 포함시켜 추진하면서 주 제어실 MMIS 개선에 많은 노력을 기울이고 있다 [1, 3].

기존 주 제어실에 비해 차세대 주 제어실이 갖는 특징은 새로운 정보기술을 적극적으로 이용한다는 점이다 [2, 4-5, 7]. 터치 스크린, CRT, 평면화면판넬 (Flat Display Panel) 및 고속 통신설비등이 대표적인 예이다. 또 하나의 중요한 특징은 운전원의 직무조건 및 상황을 고려한 운전원 중심적인 설계를 추구한다는 점이다 [2, 4, 7]. 이는 과거의 원전사고의 경험으로부터 얻은 교훈을 바탕으로 운전원의 능력 및 한계, 직무의 특성 및 요건등이 주 제어실 MMIS 설계에 반영되고 있음을 의미한다.

고도로 자동화되어 있는 원전에서 운전원이 담당하는 직무는 많은 부분 정보처리와 인지적인 문제해결을 요구한다 [8-9]. 따라서 주 제어실을 인간과 기계 (컴퓨터)로 이루어진 정보시스템 내지는 인지시스템으로 파악해서 인지공학적으로 연구할 필요성이 대두된다. 인지공학은 운전원 중심적인 설계에 기본적인 배경지식을 제공해 줄 수 있다.

우리나라도 차세대 주 제어실 MMIS 설계 과정에서 인지공학적 연구의 필요성을 인식하고 있다. 이런 상황에서 인지공학적 원리의 적용이 이루어진 외국의 사례를 분석적으로 검토하는 것은 많은 도움이 된다. 차세대 주 제어실 MMIS를 설계하면서 새로운 정보기술을 이용하여 어떻게 인지공학적 원리를 적용했는가를 분석하는 것은 필수적인 경험적 지식을 축적하는 지름길이 될 수 있다. 현재 설계과정에서 인지공학을 적극적으로 적용한 사례로 미국 ABB-CE의 Nuplex80+ 및 프랑스EdF의 N4를 들 수 있다.

본 논문에서는 한국의 차세대 주 제어실 MMIS의 설계원칙에 대해 고찰하고 이용될 가능성이 높은 정보기술에 대해 알아본다. 다음으로 차세대 주 제어실 MMIS 설계에 고려해야 할 인지공학적 사항을 도출하고 이를 바탕으로 외국의 사례들 (Nuplex80+ 및 N4)을 분석한다. 끝으로 한국의 차세대 주 제어실 MMIS 설계과정에서 고려해야 할 인지공학적 사항에 대한 고찰이 이루어진다.

2. 차세대 주제어실의 특징

2-1. 차세대 주제어실의 설계원칙

한국의 차세대 주제어실 MMIS의 개발전략은 새로운 정보기술의 효율적 이용과 운전원 지원 시스템의 강화를 통해 운전의 용이성을 추구하고 동시에 각종 규제요건을 만족시키는 데 있다 [1-4]. 이런 전략하에 차세대 주제어실 MMIS 설계의 기본원칙을 정하고 있으며, 대표적으로 다음과 같다.

- 인지/인간공학 원리를 적용한다.
- 인적오류의 발생가능성을 감소시킨다.
- 중복, 다양성의 원리를 통해 MMIS의 신뢰도를 향상시킨다.
- 운전원 직무분석을 기반으로 MMIS를 설계한다.
- 고장허용 설계 및 MMIS 개선을 통해 안전성과 가용성을 높이고, 주요기능에 대한 구현화를 실현한다.
- MMIS를 개선하는 데 사용되는 신기술은 검증된 신기술을 사용하여 규제요건을 만족한다.
- 안전성을 높이기 위해 운전원의 과도한 정보부담을 줄이고, 경보 및 표시체통의 인지/인간공학 적용을 도입한다.

종합하면 한국의 차세대 주제어실 MMIS는 보편적인 시스템공학적 설계과정에 입각하면서 동시에 운전원의 편의를 최대한으로 도모한 설계를 추구한다고 할 수 있다.

2-2. 차세대 주제어실의 신기술 이용

현재 여러 국가에서 개발되었거나 개발중인 차세대 주제어실 MMIS는 새로운 정보기술 이용면에서 공통점을 지니고 있다. 이 공통점은 차세대 주제어실 MMIS의 방향을 제시하고 있으며 그 중 대표적인 것들은 다음과 같다 [1-4, 7].

(1) 대형정보화면

IPSO (Integrated Process Status Overview), 대형표시기 (large-scale displays), 대형미믹판넬 (large mimic panel)로 불리우는 대형정보화면은 운전원이 발전소 상황을 개괄적으로 빨리 파악할 수 있도록 한다. 화면의 일부는 주요 변수의 추이, 전산화된 절차서, 진단지원 등에 이용된다.

(2) 단순화된 운전원작업반

일반적으로 단순화된 운전원작업반은 다수의 CRT와 평면표시판넬로 구성되어 있으며, 발전소의 작동상황을 나타내는 변수들을 운전원이 감시하고 제어할 수 있도록 해주는 매개체 역할을 한다. 기존의 것과 크게 달라진 점은 감시 및 제어기능이 통합되어 있어서 운전원의 수행결과를 확인하는 속도가 단축되었다는 점과 공간의 축소로 신체적인 작업부하 감소 등의 효과가 있다는 것이다. 또 터치스크린도 많이 이용되고 있다.

(3) 기능적 조직화를 이룬 경보체계

경보의 불균형 내지는 범람문제를 해결하기 위해 전산화 및 구조화된 경보체계를 구축하여 운전원이 긴급한 경보를 쉽게 인식할 수 있게 해주고, 경보의 주원인과 파생원인을 구별할 수 있도록 각종 지원체계를 제공하고 있다. 이에 는 경보의 표시순서를 나타내주거나

고장이 있는 기능부터 기기까지 하향식의 경보를 제공해주는 것 등이 포함된다.

(4) 운전원작업반에서의 정보탐색

대부분의 원전에서는 운전원이 발전소의 공정상태를 쉽게 파악하기 있도록 발전소의 기능이나 기기등의 구분으로 계층적인 형태를 이용해 시스템 상태를 표시하고 있다. 이런 시스템적 접근법은 비상상황시 발전소를 정상상태로 환원시키기 위한 의사결정을 용이하게 한다는 장점을 지니고 있다. 반면 프랑스 N4의 경우는 운전원이 수행하는 특정직무에 대해 필요한 직무를 표시하는 직무기반중심의 접근법을 취하고 있다. 이는 앞의 시스템적 접근법보다 화면탐색을 적게한다는 장점을 지니고 있다.

(5) 운전원 지원시스템

정보기술의 발달로 고장의 진단/복구작업에서 운전원의 인지적인 부담감을 덜어주기 위한 많은 지능형 지원시스템이 개발되어 왔다. 지능형 운전지원이란 주로 전산화된 비정상 운전절차서나 고장진단 및 운전절차서에 포함되어 있지 않은 사항에 대한 지식기반 지원체계를 일컫는다.

(6) 정보의 중복

신호다중화 (multiplex)기술은 발전소 공정정보의 신뢰성을 향상시키며 발전소를 제어하는 데 필요한 정보를 중복하여 제공할 수 있다. 예로서 발전소 전원상실시 평면표시판넬에 의하여 발전소를 제어할 수 있으며, 대형정보화면으로도 주요변수를 감시할 수 있다.

(7) 고속통신망

고속의 자료전송망을 효과적으로 이용해 기능 및 직무의 분산화를 이루어가고 있다. 분산화된 구조는 가용성 및 신뢰성의 향상을 가져올 수 있다.

(8) 새로운 운전원 조직

대부분의 차세대 주제어실에서는 1인의 운전원과 분리된 운전원작업반에서 발전소 공정을 감시하는 1인의 감독자로 조직이 구성되어 있다. 안전이 요구되는 상황에서는 경우에 따라서 추가적인 안전담당요원이 배치된다.

3. Nuplex80+와 N4의 검토

외국의 차세대 주제어실 MMIS 설계의 사례를 소개한다. 이들은 위의 기술들을 이용하면서 인지공학적인 원리를 적용한 운전원 중심적인 설계를 지향하였다.

(1) Nuplex80+

Nuplex80+는 MMIS를 하나의 인지시스템으로 간주하고 있다 [4]. 이는 MMIS를 해석, 계획, 실행의 과정을 통해 발전소 작동조건을 표현을 이용한다는 것으로 보고 있는 것이다. 운전원과 발전소 내부와 이루어지는 상호작용의 기본적인 구조는 critical function이라는 개념을 이용해 파악된다. 중요한 구성소로는 IPSO, CFMS (Critical Function Monitoring System), 주제어반, 보조제어판넬이다. 주제어반은 CRT, DIAS (Discrete Indicator and Alarm System), Control, Dedicated Switch로 구성되어 있다.

IPSO는 대형의 동적판넬로서 발전소 공정 및 기능에 대한 개괄적인 정보를 제공한다. CFMS는 중요기능의 상태를 인식하거나 이 기능을 수행하기 위한 성공적인 수행경로를 결정하는데 도움을 주는 알고리즘이 구현된

		Nuplex80+	N4
대형정보 화면	공통점	- 기기 및 계통상태 정보제공 - 작업반을 통해 접근가능	좌동
	차이점 및 특징	- 중요 발전소 기능 감시 정보 (CFMS)제공 - 성공경로에 대한 가용성 표시 - 비교적 간결, 세부적이지 못함	- 색의 과다한 이용 - 보조판넬의 설치 (비상시 이용) - 비교적 세부적인 정보를 제공
	비교불가	- 동적 정보를 제공하지 못함	- 경보체계 결여
운전원 작업반 및 제어기	공통점	- 제어 및 관련정보는 동일화면에 제공 - 터치스크린 화면	좌동
	차이점 및 특징	- 시스템 지향적 정보 순항 (navigation) - CFMS의 제공 (3수준의 계층화된 화면 제공) - SS/ NSS의 구별	- 직무 지향적 정보 순항 (navigation) - 전산화된 절차서 (운전, 경보)
경보체계	공통점	- 우선순위화/집단화 기법 이용 - 경보의 진행순서 제공	좌동
	차이점 및 특징		- 색의 차별화를 통한 경보제공
운전지원 정보 및 자동화 수준	공통점	- 운전수행내용의 정보제공 - 비정상시 정보표시기는 정상상황 시의 것과 동일	좌동
	차이점 및 특징	- CFMS를 통한 운전지원 - 비전산화된 절차서 및 경보 - 적절한 자동화 (어느 범위 내에서 운전원 개입을 허용)	- 전산화된 절차서 (운전, 경보) - 고도의 자동화 수준 (가급적 운전원 개입 방지)
운전원 조직	차이점 및 특징	- 1인의 운전원 - 1인의 감독자	- 1인의 운전원 및 1인의 보조원 - 1인의 감독자 - 비상시 1인의 안전기사

표 1. 주제어실 구성요소로 비교한 Nuplex80+와 N4

시스템이다. CFMS의 인터페이스는 단순한 3수준의 계층화된 화면으로 구성되어 있다. 최상위 수준의 화면에는 반응도 제어, 격납용기 격리등과 같은 중요기능 상태정보를 제공한다. 중간 수준의 화면에는 여러 중요기능을 수행하기 위한 성공 수행경로의 가용상태의 정보가 제공된다. 최하위 수준의 화면에는 운전원에 의하여 선택된 경로의 정보가 제공된다. 주제어반의 CRT에 제공되는 정보를 이용하기 위해 navigation을 해야하는데 접근이 용이하도록 정보가 계층적으로 구성되어 있다. SS (Safety System)과 NSS (Non-Safety System)를 구별해서 정보를 제공하는 것도 특징이다.

(2) N4

N4의 기본적인 설계원칙은 다음과 같다 [2].

- 단순화된 운전원작업반에서 2인의 운전원이 감시 및 제어
- 정상, 비정상 상황에서 유사한 운전수단의 이용

- 정보표시는 구체적인 직무 및 발전소 상황에 적용되도록 함
- 제어 및 관련된 정보는 통합해서 함께 제공
- 강력하고 체계적인 경보시스템 구성
- 모든 운영상황에 대해 전산화된 절차서 제공
- 운전지원시스템은 운전원작업반에 통합해서 제공

주제어실의 구성요소는 4개의 동일한 VDU와 발전소 기기의 상태 및 주요 계통정보를 제공해 주는 하나의 대형판넬 (large mimic panel)로 구성되어 있다. 기존의 보조판넬 (back-up panel)은 대형판넬 하부에 위치하며 발전소 공정전산기의 고장 발생시 안전하게 정지시키기 위해 이용된다. N4의 중요한 특징은 어떤 직무를 수행하기 위해 필요한 정보를 모두 포함한 독립화면을 제공한다는 점이다. 아울러 운전원으로 하여금 운전원작업반에서 제공되는 전산화된 절차서에 따라서 운전하도록 한다는 점도 특징이다. N4는 운전원을 발전소 공정상에 하나의 통합된 요소로 간주하며, 운전원은 특정의 직무를 수행하도록

시스템에 의해 지시되고 예외적인 경우에만 운전원 스스로의 문제해결에 의해 직무를 수행하도록 되어있다. 표 1은 주제어실의 구성 요소별로 Nuplex80+와 N4를 비교하고 있다. 두 MMIS의 큰 차이점은 작업반에서 제공되는 정보가 Nuplex80+에서는 시스템의 기능을 중심으로 제공되는 반면, N4에서는 운전원의 해당직무를 중심으로 정보가 제공된다는 것이다. 이 방법들이 정상 상황 및 비정상 상황에서 어떤 문제를 발생시킬 수 있는지는 매우 중요한 검토사항으로서 후에 언급된다. 또한 N4의 자동화 수준이 상대적으로 높아 운전원의 문제해결 및 의사결정의 기회를 가급적 감소시킨다는 전략인 반면, Nuplex80+는 적절한 수준까지 운전원의 참여를 유도한다는 점이 다르다. 가령 운전 절차서의 전산화 유무가 좋은 예이다. 그러나 두 MMIS는 단기 기억 장소의 인지적 부담 감소, 주의의 효율적 배분, 스트레스트로부터의 영향 최소화, 장기 기억 장소 스키마의 효율적 이용의 지원, 문제해결 및 의사결정시 범할 수 있는 오류에 대한 지원책 제공 등 운전원의 인지적 정보처리과정을 고려해서 설계에 반영하려 했다는 공통점을 지니고 있다.

4. 인지공학적 고려사항

현재까지의 자료를 바탕으로 한국의 차세대 주제어실 MMIS 설계과정에서 반드시 고려되어야 할 인지공학적 사항에 대해 고찰해본다.

운전원작업반에서 운전원의 직무수행도를 감소시키지 않으면서 비정상 상황에서 효율적인 대응을 할 수 있게 하려면 자동화의 수준을 어느 정도로 하는 것이 좋은지에 대한 연구가 있어야 한다. 자동화의 수준을 높이면 정상상황에서는 운전원의 직무부담이 감소하는 장점이 있는 반면, 비정상 상황에서는 시스템에 대한 지식을 제대로 이용하지 못하는 현상을 초래한다. 이와 함께 작업반에서 제시되는 정보의 구조 내지는 구성을 어떻게 할 것인가에 대해서도 연구가 있어야 한다.

대형정보화면에서는 어느 상세 수준까지 정보를 제공할 것인가 하는 문제와 어느 정도의 중요도를 갖는 운전정보를 제공해야 하는 문제가 제기된다. 상당히 상세한 수준의 정보는 전체적인 상황파악에는 불리할 수 있으나 비정상 상황에서는 유용한 시스템 정보를 제공해줄 수 있다는 장점을 지니고 있다. 운전원이 대형정보화면을 보고 시스템에 대한 상태파악을 빠르고 정확하게 할 수 있도록 EID(Ecological Interface Design) 개념을 적용한 인터페이스 연구도 필요하다. 운전원작업반에서 제공되는 정보와 어떤 관계를 갖게 하는 것이 적합한지도 고려해야 하는 중요한 문제이다.

차세대 MMIS에서 많이 경험하게 될 정보의 순항(navigation) 문제의 경우 정보를 시스템 중심으로 설계할 것인지 혹은 직무중심으로 설계할 것인지에 대한 연구가 필수적으로 요구된다. 직무중심으로 설계가 되면 정상 상황에서는 필요한 정보를 쉽게 취득할 수 있지만 비정상 상황에서는 정보취득에 인지적 부담감이 증가하여 진단등의 작업을 어렵게 만들 가능성이 크다. 예측 안된 비정상 상황에서는 운전원이 작업지식보다는 시스템에 대한 지식을 활용하려 할 것이기 때문이다. 이

문제는 적절한 자동화 수준 및 지원시스템과 연계해서 폭넓은 연구가 요구된다.

운전지원시스템의 설계에 있어 지원정도를 어느 정도로 하고 이를 이용할 수 있는 운전원에 대한 훈련 내용 및 수준을 어느 정도를 하는 것이 효과적인지에 대해서도 고려해야 한다. 그리고 무엇보다도 어느 기능을 지원해야 하는지에 대한 연구는 필수적인 선결 연구과제라 할 수 있겠다. 아울러 우선순위화 기법 및 집단화 기법에 기반한 정보체계의 구성에 대해서도 고려해야 할 필요성이 있다.

5. 결론

본 논문에서는 인지공학을 적용할 한국의 차세대 원전 주제어실 MMIS 설계에 좋은 경험적 자료를 제공해 줄 수 있는 Nuplex80+ 및 N4의 설계를 검토하였다. 사례들을 통해 이용가능성이 높은 정보기술 및 이들의 효과적 이용을 위한 인지공학적 고려사항을 도출하였다.

앞으로 주제어실 MMIS 설계에 적용될 수 있는 인지공학적 원리를 더욱 구체적으로 하여 인지공학적 적용사항 및 검증사항에 대한 도출이 이루어질 것이다. 아울러 지적되는 문제들에 대한 보완책 및 이론적, 실험적으로 제시하려는 인지공학적 연구가 지속되어야 한다.

References

- [1] 한국전력공사 기술연구원, "차세대 인간 기계연계계통 개념설계", Technical Report : RRX-XXX-001.
- [2] 한국전력공사 기술연구원, "불란서 N4형 발전소 주제어실 설계기술조사", 1994.
- [3] KAERI, "상위수준의 MMIS 설계개념요건 개발 for 인간-기계 연계 설계 평가", Technical Report : RR5-642-002.
- [4] ABB-CE, "Nuplex80+ Advanced Control Complex", NGR Experts Seminar Material, Aug. 1994.
- [5] C. Wickens, "Engineering Psychology and Human Performance", HarperCollins Publishers, 2nd Ed., 1992.
- [6] E.D. Murphy and C.M. Mitchell, "Cognitive attributes : implications for display design in supervisory control systems", Int. J. of Man-Machine Studies, Vol. 25, pp. 411-438, 1986.
- [7] Institute of Atomic Energy Kyoto University, "Technical Reports of the Institute of Atomic Energy Kyoto University", Report No. 214, Feb. 1994.
- [8] J. Rasmussen, "Information Processing and Human-Machine Interaction : An Approach to Cognitive Engineering", North-Holland, 1986.
- [9] Lisanne Bainbridge, "Ironies of Automation", Automatica, Vol. 19, No. 6, pp. 775-779, 1983.
- [10] NUREG-0700, "Human-System Interface Design Review Guideline", 1995.