

신고리 1, 2호기 원자력발전소 주제어실 환경설계

변승남[†] · 김사길 · 류제혁

경희대학교 테크노공학대학 산업공학과

A Human-Environment Design for Main Control Rooms in SHIN-KORI 1·2 Nuclear Power Plants

Seong Nam Byun · Sa Kil Kim · Je Hyeok Ryu

Dept. of Industrial Engineering, College of Advanced Technology, Kyung Hee Univ., Seoul, 449-701

Human factors engineering design guidelines for main control rooms(MCR) in nuclear power plants(NPP) have been applied to optimize human-machine interface(HMI) between operators and their equipment on the basis of physical, physiological and cognitive aspects. However, the HMI design for MCR is not found to be sufficient to maximize operators' performance since the operators in the MCR experience excessive stress due to the environmental factors such as inappropriate interiors and illumination. Therefore, well-designed environment of the MCR may be equally important to improve human performance in the MCR.

The objectives of the study are two-fold: (1) to propose an interior design of SHIN-KORI 1·2 for pleasant and comfortable working environments, and (2) to design indirect lighting system to enhance visibility and productivity. The human factors engineering checklists were developed to examine whether or not the proposed human-environment design for SHIN-KORI 1·2 satisfies the regulations and guidelines presented by NUREG-0700 Revision 1. The implications of the human-environment design are discussed in detail.

Keyword: human-machine interface, human-environment interface, main control room

1. 서론

원자력발전소의 안전성은 각종 발전소시설의 신뢰성과 주제어실(main control room)에서 근무하는 운전원의 인적 수행도에 달려 있다. 운전원의 인적 수행도를 제고하기 위해 원자력 인간공학 분야에서는 주제어반(main control board)과 관련 시설의 설계개선을 인간공학적인 기능을 중심으로 수행하였다. 그러나 주제어실은 시스템 제어, 관리, 감시 등의 패널 및 복잡한 계기들로 그 환경은 매우 인공적이고 폐쇄성이 강하다. 따라서 장시간 동안 외부출입 없이 업무를 수행하는 운전원에게 있어 인적 수행도 향상 및 근무환경 개선을 위해 쾌적하고 안락한 공

간의 필요성이 제기되고 있다.

근무환경을 개선하기 위한 노력으로 주제어반의 색채연구가 수행되어 한국형 표준원전인 울진 5, 6호기와 영광 5, 6호기에 반영되었다(최경실 *et al.*, 1999). 주제어반 색채개선은 운전원들로부터 높은 평가를 받아 주제어실 환경개선의 효과를 입증하는 계기가 되었다. 그러나 개선이 주제어실 환경의 극히 일부에만 적용되어 환경개선에 따른 인적 수행도의 최적화라는 목적을 달성하기에는 한계가 있었다. 따라서 인적 수행도를 극대화하기 위해서는 신체적, 생리적, 심리적 쾌적성을 고려한 운전환경을 통해 편안하고 안락하며, 운전원 스스로 근무하고 싶어지는 환경을 제공하는 것이 요구되고 있다.

[†]연락처 : 변승남 교수, 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 경희대학교 산업공학과, Fax : 031-203-4004, E-mail : snbyun@khu.ac.kr

주제어실의 근무환경은 인테리어 및 조명 설계 요소에 따라 개선될 수 있다. 주제어실 조명환경에 있어 미국 원자력 규제 기관(U.S. NRC; Nuclear Regulatory Commission)에서는 NUREG-0700 R.1 지침을 통해 주제어실 내의 적정 조도수준을 일반적으로 500~1000 lux로 권장하고 있으며, 운전원의 시작업(visual task) 대상과 배경의 구역별 휘도비(luminance ratio)를 다음과 같이 권장하고 있다.

표 1. 최대 휘도비 권고치

Area	Luminance Ratio
Task area versus adjacent darker surroundings	3 : 1
Task area versus adjacent lighter surroundings	1 : 3
Task area versus more remote darker surfaces	10 : 1
Task area versus more remote lighter surfaces	1 : 10
Luminaires versus surfaces adjacent to them	20 : 1
Anywhere within normal field of view	1 : 40

또한, 미국 NRC의 반사휘광(reflected glare) 현상을 최소화할 수 있는 인테리어 마감재의 반사율 권고치는 다음과 같다.

표 2. 인테리어 마감재의 반사율

Surface	Permissible
Ceiling	60~95%
Upper Wall	40~60%
Lower Wall	15~20%
Instruments/Displays	80~100%
Cabinets/Consoles	20~40%
Floor	15~30%
Furniture	25~45%

이러한 미국의 지침은 우리나라 원자력발전소뿐만 아니라 미국형 원자력발전 방식을 따르고 있는 모든 나라에서 인간공학 적 규제요건으로 통용되고 있다.

그러나 국내 원전의 경우, NUREG 기준에 따라 설계되었으나 운영과정에서 운전원들의 시력감퇴나 피로증가 등의 근무 환경과 관련된 문제가 지속적으로 제기되고 있다. 이로 인해 운전원들은 주제어실 근무를 회피하려는 경향마저 보이는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 신고리 원자력발전소 1, 2호기 주제어실을 대상으로 운전원의 인적 수행도를 최적화하기 위해 인테리어 및 조명 설계를 인간-환경 인터페이스(HEI;

Human-Environment Interface) 개념으로 수행하였다. 또한 주제어실 환경설계에 대한 인간공학적 종합평가를 통해 인간공학적 규제요건에 대한 적합성 평가를 실시하였다.

2. 인간-환경 인터페이스(HEI) 개념

주제어실의 인간-환경 인터페이스 설계란 쾌적하고 편안한 작업환경을 조성하여 운전작업을 수행하고 있는 운전원의 인적 수행도가 최적화되도록 제어실 환경을 조성하는 개념이다. 즉, 운전원 중심의 제어반 설계를 인간-기계 인터페이스(HMI; Human-Machine Interfaces) 설계라면, 운전원 중심의 환경 설계를 인간-환경 인터페이스 설계라 할 수 있다(<그림 1>).

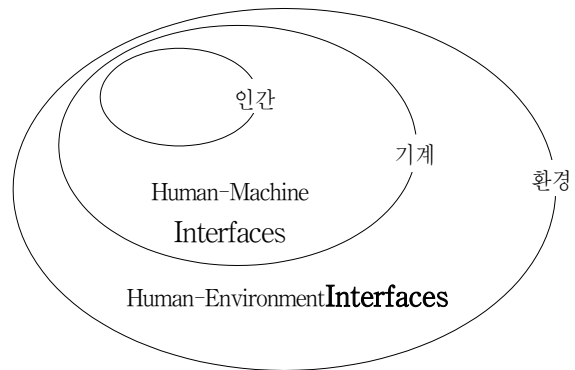


그림 1. 인간-환경 인터페이스 개념.

주제어실의 인간-환경 인터페이스 설계는 운전원의 인적 수행도를 최적화하기 위한 인간공학적 설계원칙을 기반으로 하여 쾌적하고 편안한 작업환경 조성을 위한 미적 개념을 도입하는 방법으로 수행된다(<그림 2>).

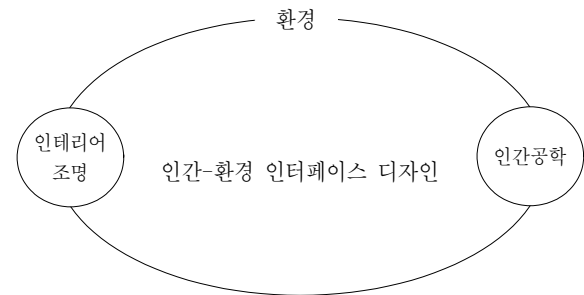


그림 2. 주제어실 환경 설계방법.

3. 연구방법 및 내용

본 연구는 주제어실 인테리어 환경 개선과 조명환경 개선을 중심으로 각각 다음과 같은 절차를 통해 진행되었다.

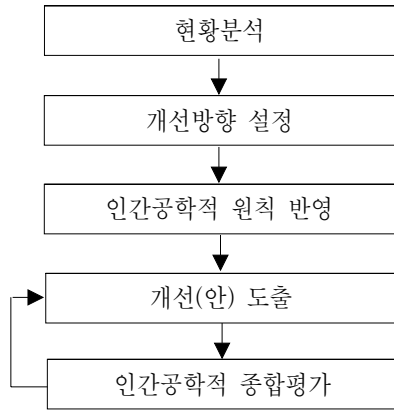


그림 3. 연구방법.

3.1 인테리어 환경개선

3.1.1 인테리어 현황분석

현재 가동중인 울진 원전 1~6호기를 대상으로 인테리어 현황분석을 실시하였다. 울진 1, 2호기 주제어실 인테리어 현황분석 결과는 다음과 같다.

- 공간의 독립성이 유지되고 있다.
- 청색은 전체적으로 차가운 느낌을 준다.
- 모든 면의 색상이 동일하여 하나의 덩어리 느낌을 준다.
- 후면 시창이 크게 개방되어 운전원의 심리적 부담이 야기된다.
- 책상 위 유리 사용으로 인한 시각적 피로를 유발시킨다.

또한 울진 3, 4호기의 주제어실 인테리어 현황분석 결과는 다음과 같다.

- 끊어짐 없는 수평적 천장으로 인해 광장에서 근무하는 것과 같은 심리적 불안감이 유발된다.
- 광천정은 시각적 초점의 대상이 없으므로 눈의 피로를 가져온다.
- 출입구의 위치가 벤치보드 후면에 위치하여 출입자의 동선이 길어 비효율성을 가져온다.

마지막으로 울진 5, 6호기의 주제어실 인테리어 현황분석 결과는 다음과 같다.

- 주제어실의 전체적 색상이 따뜻한 회색조이다.
- 바닥과 가구들의 색상이 동일계열로 시각적 단조로움을 야기한다.

이상의 현황분석 결과를 통해 인테리어 개선방향을 설정하였다.

3.1.2 인테리어 개선방향 설정

신고리 1, 2호기의 인테리어 개념은 최근 사회전반에 미치고 있는 인본주의 사상에 입각한 웰빙(Well-being)을 주개념으로 지속 가능한 디자인(Sustainable design), 감성 디자인(Emotional design)의 개념을 적용하였다.

- 웰빙(Well-Being); 신체적, 정신적 건강을 삶의 가치로 보는 개념으로 운전원들의 신체적, 정신적 건강을 고려하였다.
- 지속 가능한 디자인(Sustainable Design); 친환경성, 미래지향성을 근간으로 운전원 근무환경의 질을 높이고, 특히 인적 오류 (human error)를 줄일 수 있는 디자인을 말한다.
- 감성 디자인(Emotional Design); 인간의 오감을 고려한 개념으로 운전원과 주제어실 환경이 조화를 이뤄 편안하고 안락한 환경을 제공하기 위한 적용 개념이다.

위의 세 가지 기본개념을 적용한 주제어실 개선방향은 다음과 같다.

- 첫째, 운전작업을 고려하여 최적의 동선을 찾고,
- 둘째, 주제어실의 공간적 독립성을 구축하고,
- 셋째, 입구 및 통로를 시각적, 공간적으로 개선하고,
- 넷째, 수납공간을 확보하며,
- 다섯째, 인간공학적으로 설계된 쾌적한 근무환경을 마련한다.

3.1.3 인간공학적 인테리어 설계원칙 반영

주제어실 인테리어 설계를 위한 인간공학적 설계지침은 원전설계 요건을 중심으로 개발되었으며, 인간공학적 설계원칙을 바탕으로 설계(안)평가를 위한 체크리스트를 개발하여 적용하였다. 체크리스트는 다음 3.3절 <표 7>에서 예시하고 있다.

표 3. 인테리어 개선(안) 도출

	기존 문제점	개선(안)
Layout	거대한 공간느낌 형성으로 정서적 불안감 조성	물리적 공간 구분으로 안정감 제공
Wall	건축 마감 상태로 유지되어 미적 마감처리가 요구	벽면 색상 도입의 아트월(Art-Wall) 개념 적용
Ceiling	높이의 변화가 없으므로 공간적 단조로움	천장의 높낮이 및 조명방식의 차이로 공간구분
Window	과도하게 개방된 후면 시창으로 인한 운전원의 심리적 부담감	시창축소 및 특수유리 설치로 심리적 독립성 부여
Main Entrance	부적절한 출입문 위치로 인한 불필요한 동선	주제어실 내의 직접적 출입구로 불필요한 동선제거
Furniture	반사 글레어 현상과 수납공간의 결여	인간공학적 가구와 라운드 디자인의 적용
Material	따뜻하고 안정적 자연소재의 느낌 필요	자연소재 느낌의 재료와 악센트 컬러 사용

3.1.4 인테리어 개선(안) 도출

기존 원전의 인테리어 설계의 문제점을 기반으로 배치, 벽, 천장, 창문, 주출입구, 가구, 그리고 마감재 측면에서 개선(안)을 마련하였다(<표 3>).

① 평면설계

- 출입구: 주제어실 내 주출입구를 벤치보드 면부보다 주제어반 쪽으로 위치하여 원활한 동선유도와 시각적 안정감을 도모하였다.
- 기둥 벽체 매입장: 양쪽 기둥과 벤치보드 사이면을 활용하여 수납할 수 있는 불박이장과 공간을 구분하고 동선을 유도할 수 있는 벽을 세워 매입화된 벤치보드로 심리적 안정감을 도모하고, 보이지 않는 기둥 후면부는 선반형 보조수납형태로 상시로 쉽게 수납 가능하게 하며 라운드(round)화된 벽체 매입장으로 주제어실의 동선유입을 부드럽게 유도하였다.
- 가구계획: 사무가구는 이용자의 원활한 작업동선과 수납, 이동과 더불어 유기적이며 친환경적 디자인으로 기계적인 공간에서의 부드러운 업무환경을 제공하였다. 그리고 각 제어반의 관리가 용이하도록 사무가구를 배열하고 불박이가구의 적극적인 수납으로 주제어실 내 공간을 여유 있게 활용할 수 있도록 하였다. 또한 주제어실 내 장시간 업무 속에서 쉴 수 있는 간이 휴식공간을 입구 쪽 복도에 마련하였다.
- 바닥: 기존의 벤치보드 앞쪽의 바닥을 같은 재질로 패턴화하여 운전반의 작업영역을 구분하고 주동선을 징검다리 형태의 패턴화로 사무공간을 리듬 있는 감성적 공간으로 구성하였다.

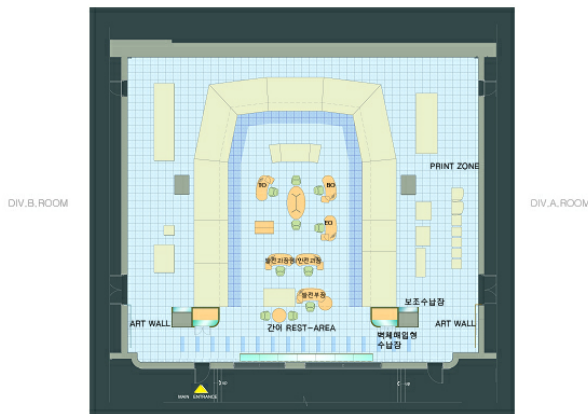


그림 4. 입면도.

② 입면설계

주제어실의 좌측, 우측, 그리고 정입면설계는 다음 그림과 같다.



그림 5. 좌측 입면도.

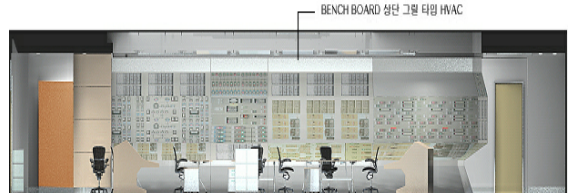


그림 6. 우측 입면도.



그림 7. 정입면도.

- 컬러 악센트 월(color accent wall): 주제어실의 주동선 끝부분인 양측 벽면을 컬러 아트월(art-wall)화하여 장시간 근무 환경 속에서의 **시지각적인** 생동감을 부여하며, 공간의 방향성을 인지시키도록 하였다.
- 기둥면: 기둥면과 벤치보드 옆면을 연결한 벽체 매입형 수납장은 동일하게 패넬로 마감하여, 외부에서는 수납장으로 인지되지 않도록 하였다.
- 운전원 콘솔 표면마감: 중앙의 기존 운전원 콘솔의 측면을 시트(3M Sheet)를 이용하여 기계적 이미지를 경감하고 전체 공간과 조화롭게 구성하였다.
- 마감재질: 주제어실 내의 인테리어는 천연느낌의 재료 사용으로 심리적으로 안정감을 띄우고 지속 가능한 공간으로서 시각적 피로감을 줄이도록 하였다.
- HVAC: 벤치보드 상단과 벽 사이에 HVAC 공간을 라인디퓨저 모양의 스틸그릴로 하여 공기의 원활한 순환과 시각적 아름다움을 고려하였다.

3.2 조명환경 개선

3.2.1 조명현황 분석

먼저 현재 가동중인 울진 1, 2호기와 3, 4호기의 조명현황을 조사 및 분석하였다. 조명방식, 조도, 휘도는 다음 <표 4> 및 <표 5>와 같다.

표 4. 울진 1, 2호기와 3, 4호기의 조도 및 휘도

		1, 2호기	3, 4호기
운전원	수평면	1000lux	700
			~1000lux
업무구역	연직면	650lux	300
			~500lux
계기 패널	수평면	800lux	700
			~890lux
	휘도	75cd/m ²	35
			~60cd/m ²
벽면	102cd/m ²	53cd/m ²	
바닥	109cd/m ²	135cd/m ²	

NUREG-0700 권고치와 비교했을 때 울진 1, 2호기 및 3, 4호기의 경우 그 기준을 만족시키지 못하고 있다. 이는 NUREG 기준에 맞게 설계되었다더라도 일부 조명기구의 노후화로 발생한 문제라고 판단된다. 특히 울진 3, 4호기의 경우 동일 작업면에서의 실측 조도가 650~1040 lux까지 다르게 측정되었다.

표 5. 울진 1, 2호기와 3, 4호기의 조명평가

구분	조명방식	평가
울진 1, 2호기	간접조명방식	균일한 조도분포 간접 글레어 제어
울진 3, 4호기	루버를 사용한 간접조명방식	천장 얼룩무늬 현상 작업면의 낮은 균제도 심리적 불안감

이상의 조명현황 분석결과 가장 두드러지게 나타난 문제는 루버형 직·간접 조명방식으로 인한 천장의 얼룩무늬 현상과 조도의 균제도가 떨어지는 것이다(<그림 8>).



그림 8. 울진 2발전소 주제어실.

3.2.2 조명환경 개선방향 설정

기존 호기의 루버를 사용한 간접조명은 운전원의 시작업 환경에 불안정한 요소를 포함하고 있다. 따라서 본 조명환경 개

선을 위한 연구는 이러한 시작업 저해요소를 효율적으로 제어할 수 있는 방법에 대해 초점을 맞추었으며, 조명환경 개선방향을 다음 네 가지로 모색하였다.

- 첫째, 생체 리듬과 시간 변화를 조화시키고,
- 둘째, 휘광현상을 제거하기 위한 간접조명 방식을 채택하고,
- 셋째, 업무특성에 따른 구획별 차등조도를 설정하여 공간을 구획하고,
- 넷째, 원자력산업의 이미지 제고를 위한 미적 설계방안을 모색한다.

또한 외부와의 단절된 운전환경을 개선하기 위해 인공천장 조명을 제안하였고, 계기의 판독성 향상 및 휘광현상의 방지를 위해 조도조절이 가능한(dimming system) 간접조명방식을 제안하였다.

3.2.3 인간공학적 조명설계 원칙 반영

인간공학적 조명설계 원칙은 크게 다음과 같다.

- 적정 조도의 설정
- 작업구역별 최대 휘도비
- 휘광현상(glare effect) 방지

주제어실의 조도는 NUREG/CR-5680과 NUREG-0700 7.3.3-1에서 제시하는 주제어실 권장 조도준위를 따르며, 기본적으로 주제어실의 조도 외에도 구역별 휘도비(NUREG-0700 7.3.3-4), 인테리어 마감재의 반사율(NUREG-0700 7.3.3-9)을 반영하였다. 휘광현상의 방지를 위해 광원을 시야의 직선 밖으로 배치하며, 주위 배경의 휘도를 감소시키고 시각대상 물체의 휘도를 증가시키는 인간공학적 조명설계 원칙들을 적용하였다.

3.2.4 조명설계(안) 도출

개선된 조명설계(안)는 다음 <표 6>과 같이 기존 문제점을 바탕으로 개선(안)을 마련하였다.

표 6. 조명설계 개선(안) 도출

주제어실 특성	문제점	개선(안)
파티션 없는 개방형 업무공간	집중력 저하와 불안정한 심리상태	공간구획
시대상물의 특이성(플라스틱 커버, CRT, VDU)	계기의 판독성 저하 간접 글레어 발생	간접조명방식 Dimming system
장시간 반복되는 업무유형 (자연광의 유입이 없는 밀폐된 공간)	일반적 생체리듬과 반하는 업무형태	인공천장
내방객의 참관이 허용되는 공간	이미지 홍보성 미비	미적 설계

① 공간구획 및 등기구 배치

작업면의 조도 균제도 향상과 각종 VDU(Visual Display Unit) 및 발광형 표시기의 관독성을 향상시킬 목적으로 주 제어실을 운전원 콘솔, 공용 데스크, 주 제어반(MCB), 수납, 보조 제어반의 5개 구역(zone)으로 구획하였다(<그림 9>). 또한 각 구역의 주요 시대상물과 업무행태에 따라 적정 조도기준을 설정하여 설계에 반영하였다(NUREC-0700, IESNA Lighting Handbook).

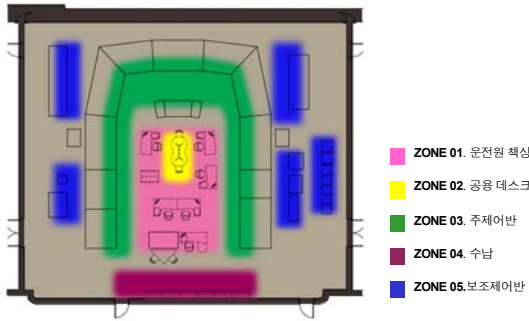


그림 9. 조명공간 구획도.

조명기구의 배치는 작업면의 조도 균제도를 높이고 시대상물에 따른 조도조절이 가능하도록 운전원 책상 및 주 제어반(MCB), 운전원 콘솔 등의 위치를 고려하였다. 또한 주 제어실 중앙의 공용 데스크를 중심으로 '口'자형의 배치구조를 가지고 있어 공간을 닫힌 공간으로 인식시키도록 배치하였다(<그림 10>).

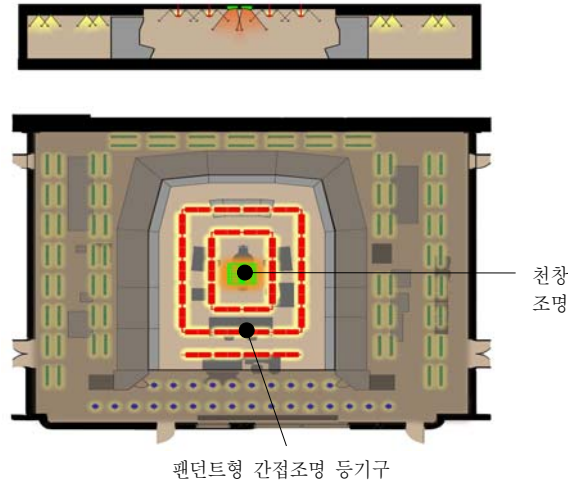


그림 10. 등기구 배치도(평면).

② 조명방식

간접조명방식을 적용하여 반사회광을 최소화하였으며(<그림 11>), 운전원이 직접 조도조절을 할 수 있도록 하는 Dimming system을 활용하여 개개인의 업무별 특성과 시각적 성향을 반영할 수 있게 하였다.

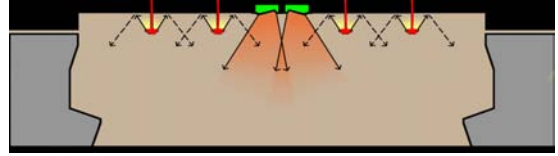


그림 11. 간접조명방식.

③ 인공천창 설계

빛의 색온도 차이를 이용한 인공천창은 자연의 빛환경을 제 공함으로써 운전원에게 시간의 변화를 느낄 수 있게 해 주며, 생체리듬에 부합하여 심리적 안정감과 집중력의 향상을 가져 온다. 다음 <그림 9>의 중앙에 위치한 등기구가 천창조명이 며, 'Sivra 4225' 기구를 사용하였다(<그림 12>).

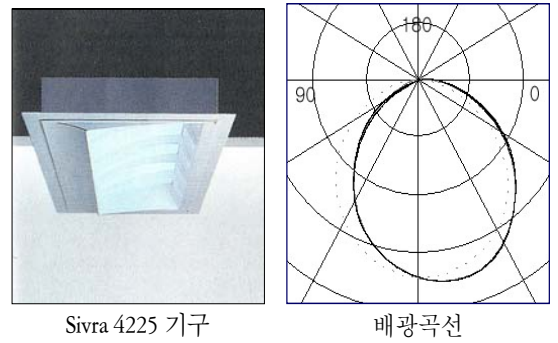


그림 12. 천창조명.

3.3 인테리어 및 조명설계(안)의 인간공학적 종합평가

인테리어 및 조명설계에 반영한 인간공학적 설계지침을 바탕으로 개발한 체크리스트를 통해 인간공학적 종합평가를 수행하였다.

다음 <표 7>은 체크리스트 평가의 예를 보여주고 있다.

또한 조명설계(안)의 조도와 휘도를 최적화하여 구현된 조명 효과를 시각적으로 확인하기 위해 Lightscape software를 이용하여 3D 조도 시뮬레이션을 수행한 결과(<그림 13>), 조명(안)의 조도수준은 다음 <표 8>과 같다.

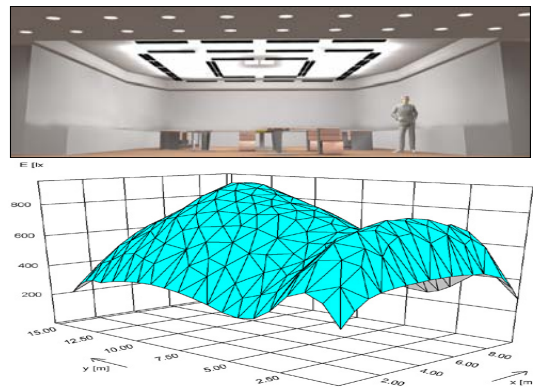


그림 13. 3D 조도 시뮬레이션.

표 7. 체크리스트 예

4.5 VDU의 판독성을 위해 VDU와 주변의 휘도비를 고려하여 조명설계를 계획하여야 한다.				
OK	✓	Discrepancy		N/A
평가내용 : • VDU와 주변의 휘도비를 NUREG-0700 R.1의 권고치에 따라 적용함. • VDU는 운전원 콘솔 중앙 상단에 위치한 CRT 모니터를 휘도비 점검대상으로 하였으며, 조명 시뮬레이션을 통한 VDU와 주위 휘도의 대비를 점검한 결과는 다음과 같음.				
최대 휘도비 권고치		조명(안)		
CRT*:버티컬보드 (3:1)		1.97 : 1		
CRT:벤치보드 (1:3)		1 : 0.59		
CRT:바닥 (10:1)		1.89 : 1		
CRT:데스크 (1:10)		1 : 1.26		
* Red 35 cd/m ² , Green 95 cd/m ² , White 125 cd/m ² , Blue 20 cd/m ² , Black 7 cd/m ²				

표 8. 조명(안)에 대한 구역별 조도수준

작업구역	권장조도, lux (NUREG-0700 R.1)	개선(안)
Primary operation area	215~538	300
Auxiliary panels	215~538	500
Scale indicator reading	215~538	300
Seated operator stations	538~1076	750
Reading printed papers	215~538	500
Writing and data recording	538~1076	750
Maintenance and writing	215~538	500
Emergency operation lighting	107 이상	-

시뮬레이션을 통해 도출된 조도수준은 NUREG-0700 R.1의 권장조도를 만족하고 있으며, 휘도비 역시 NUREG-0700 R.1의 권고치를 벗어나지 않고 있다(<표 9>).

또한, 반사 휘광현상을 최소화 할 수 있도록 인테리어 마감재의 반사율을 평가한 결과 NUREG-0700의 권장수준에서 벗어나지 않았다(<표 10>).

표 9. 조명(안)의 휘도비

최대 휘도비 권고치	결과 휘도비
Task area versus adjacent darker surroundings (3:1)	1.17 : 1
Task area versus adjacent lighter surroundings(1:3)	1 : 1.17
Task area versus more remote darker surfaces(10:1)	1.74 : 1
Task area versus more remote lighter surfaces(1:10)	1 : 4.80
Luminaires versus surfaces adjacent to them (20:1)	9.42 : 1
Anywhere within normal field of view(1:40)	1 : 16.89

표 10. 조명(안)의 반사율

표면	반사율 권고치	개선(안)
천장	60~95%	75%
위쪽 벽	40~60%	50%
아래쪽 벽	15~20%	20%
계기 및 표시기	80~100%	80%
캐비닛 및 콘솔	20~40%	20%
바닥	15~30%	20%
가구	25~45%	30%

마지막으로 인테리어 개선(안)와 조명개선(안)을 바탕으로 인간공학적 적합성 검증을 위한 종합 시뮬레이션을 수행하였다. 종합 시뮬레이션은 2차원 CAD 도면을 바탕으로 3차원 형상으로 구현하는 방식으로 수행하였다. 3차원 형상의 구현은 Discreet 사가 개발한 Visual Studio 3D max 6.0을 사용하였으며, 3D 애니메이션으로 구현된 최종 개선(안)에 대한 인간공학적 종합평가를 수행하였다.

종합 시뮬레이션에 대한 인간공학적 종합평가는 체크리스트 재평가를 통해 실시되었다. 체크리스트 재평가는 3D 시뮬레이션 영상을 인간공학의 동작분석(motion analysis)기법을 활용하여 주요 영상 프레임을 결정하고 주요 영상 프레임에 대한 인간공학적 설계요건을 검토하는 방법으로 수행하였다. 다음 <그림 14>는 인간공학적 종합평가에 사용된 3D 시뮬레이션 영상의 한 동작이다.

종합 시뮬레이션을 통한 인간공학적 종합평가 결과는 체크리스트 해당 항목 모두를 만족하였고(<표 11>), 이는 주제어실 환경개선(안)이 인간공학적 설계요건을 만족하는 결과로 판단된다.



그림 14. 환경설계 개선(안) - 좌측면 투시도.

표 11. 체크리스트 재평가 결과

평가항목	항목 수	OK	Discre-pancy	N/A
MCR 설계 일반	8	8	0	0
환경 디자인 전반	4	2	0	2
인테리어 설계	40	28	0	12
조명설계	12	11	0	1
계	64	49	0	15

4. 결론

주제어실 환경설계는 인간-환경 인터페이스(Human- Environment Interface) 개념을 바탕으로 작업환경 개선을 통한 운전원의 인적 수행도를 최적화하며, 미적 설계개념의 도입으로 보다 쾌적하고 편안한 근무환경을 제공하는 데 그 목적을 두고 있다. 따라서 본 연구는 인테리어 설계, 조명설계, 그리고 인테리어와 조명을 포함한 주제어실 환경설계(안)에 대한 인간공학적 종합평가를 수행하였다. 주제어실 환경설계(안)은 미국의 원자력 규제기관(NRC)에서 요구하는 인간공학적 평가요건을 모두 만족하고 있으며, 가동중인 주제어실 환경보다 다음과 같은 개선효과가 있을 것으로 기대한다.

첫째, 친환경적 인테리어 설계개념의 도입으로 쾌적하고 안정된 실내공간을 연출하여 운전원의 피로감을 최소화한다. 둘째, 운전작업 요건과 인체계측 자료를 적용한 최소 동선설계 및 보조동선과의 연계성 설계를 주제어실 가구배치에 적용하여 운전원 중심의 주제어실 설계원칙을 부각시키고 있으며, 운전중 발생 가능한 인적 오류를 최소화한다. 셋째, 친환경적 조명설계를 통해 빛의 온도가 외부환경에 맞게 자동 조절되어 운전원의 생체리듬에 따른 운전환경을 제공함으로써 운전원의 신체적, 정신적 스트레스로 인한 운전실수를 예방한다. 마지막으로, 조명설계에 있어 운전 구역별로 조도 균제도를 유지하며 공간을 구획하여 공간 패턴의 변화와 편안하고 안락한 공간을 제공함으로써 계측기의 판독성을 향상시키고 눈의 피로를 최

소화한다.

이상과 같은 개선효과는 원자력발전소 주제어실 설계에 있어 인간공학과 미적 개념을 도입함으로써 가능하였다(<그림 15>).

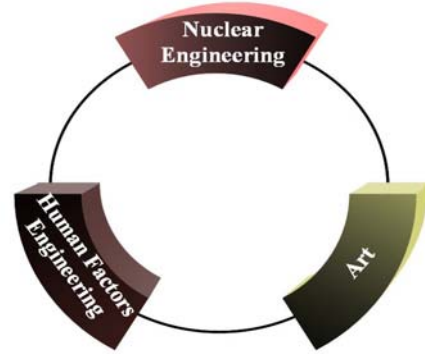


그림 15. 인간공학과 미적 설계.

주제어실의 환경설계는 원자력산업이 친환경적 산업으로 국내외적 위상을 높이는 데 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

ANSI(1988), American National Standard for Human Factors Engineering of Visual Display Terminal Workstations, *American National Standards Institution, ANSI/HFS 100*.

Catherine M. Burns *et al.*(2000), A participant-observer study of ergonomics in engineering design: how constraints drive design process, *Applied Ergonomics*, 31, 73-82.

Earl L. Smith *et al.*(2001), Continuous Ambient Lighting and Eye Growth in Primates, *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 42(6), 1146-1152.

EPRI(1984), Human Factors Guide for Nuclear Power Plant Control Room Development, *Electric Power Research Institute, EPRI NP-3659*

Gong-Xia, Yang(1985), A case study for the design of visual environment of a control room in power plant, *Lighting Research & Technology*, 17(2), 84- 88.

IEC(1989), Design for Control Rooms of Nuclear Power Plants, *International Electrotechnical Commission, CEI-IEC 964*.

IEC(1993), Nuclear power plants, Control rooms-Operator controls, *International Electrotechnical Commission, CEI-IEC 1227*.

IEC(1995), Nuclear power plants, Main control rooms-V&V of design, *International Electrotechnical Commission, CEI-IEC 1771*.

IEEE(1998), IEEE Guide for the Application of Human Factors Engineering in the design of Computer-based Monitoring and Control Display for Nuclear Power Generating Stations, *IEEE Power Engineering Society, IEEE Std 1289*.

IES(1981), Lighting Handbook-Lighting Design, Application Volume, *Illuminating Engineering Society*.

IESNA(2000), Lighting Handbook 9th edition, *Illuminating Society of North America*.

John Willy & Sons(2002), Architectural Lighting Design -Gary Steffy, *INC*.

K.C. Parsons(1995), Ergonomics and International Standards, *Applied Ergonomics*, 26(4), 239-247.

NASA(1995), Man-System Integration Standards, *The National Aeronautics and Space Administration, NASA-STD-3000, Revision B*.

P.R. Boyce(1997), Lighting the graveyard shift: The influence of a daylight-simulating skylight on the task performance and mood of night-shift workers, *Lighting Research & Technology*, 29(3), 105-203.

U.S. DoD(1997), Human Engineering, *Department of Defence, MIL-STD-1472F*, Washington, D.C.

U.S. NRC(1996a), Human-System Interface Design Review Guidelines, *Nuclear Regulatory Commission, NUREG-0700 Rev.1*, Washington, D.C.

U.S. NRC(2002), Human-System Interface Design Review Guidelines, *Nuclear Regulatory Commission, NUREG-0700 Rev.2*, Washington, D.C.

U.S. NRC, Standard Review Plan, Human Factors Engineering, *Nuclear Regulatory Commission, NUREG-0800*, Washington, D.C.

U.S. NRC, Standard Review Plan, Fire Protection Program BTP CMEB 9.5.1-Guidelines for Fire Protection for Nuclear Power Plants, *Nuclear Regulatory Commission*.

김근경(2000), 진산원전 3단계 주제어실(MCR) 설계 개선, 진산 원전 건설기술정보..

김진숙 외(1995), 실내 조명의 패턴변화에 따른 밝기감 평가 실험, *Research Institute of Industrial Technology*, 10(1), 73-79.

김 훈(2001), 주제어실 조명설계 최적화를 위한 기술자문 최종 보고서.

류부형(2001), 영광5,6호기 주제어실 조도설계 기술검토 자문 보고서, 한국원자력안전기술원.

유재인 외(1988), 조명방법이 Contrast Sensivity Function에 미치는 영향, *대한안과학회지*, 29(1).

이상구(1975), 눈과 조명, *Journal of Occup. Med.*, 14(4), 17-21.

최경실, 변승남(1999), 표준원전 주제어반 색채검토 보고서, *이화여자 대학교 색채디자인 연구소*.

최승영 외(1996), 발전소 주제어실의 조명환경에 관한 조사 연구, *대한 건축학회 학술대회 논문집*, 16(1).

한국전력기술주식회사, 설계개선 과제 검토서 - 주제어실 조명설계 최적화.

한국원자력연구소, Integrated Human Factors Design Guidelines for Workstation with Visual Display Units - Environment.



변승남

서울대학교 산업공학 학사
 서울대학교 산업공학 석사
 University of Michigan-Ann Arbor 산업공학 박사
 현재: 경희대학교 산업공학과 교수
 관심분야: 제조물책임, 원자력 안전, 근골격계 질환



류제혁

경희대학교 산업공학 학사
 현재: 경희대학교 산업공학과 석사과정
 관심분야: 인지공학, 공학심리학



김사길

경희대학교 산업공학 학사
 경희대학교 산업공학 석사
 현재: 경희대학교 산업공학과 박사과정
 관심분야: 제조물책임, 제품안전