

A Study on the Operator Performance According to the Drastic Change of Illumination Level and Lighting Environment of Control Room in Nuclear Power Plants

Kwang Hyeon Shin, Yong Hee Lee

I&C and Human Factors Division, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Daejeon, 305-353

ABSTRACT

Objective: This study describes the change of operator performance in drastic change of illumination level, and proposes an alternative method to cope with it. **Background:** The control standard of illumination for nuclear power plants(NPPs) is based on the set of limit criteria for maintaining a specific illumination level. However, there is a possibility to cause human errors according to the psychological and physiological influences to operators in the situation of drastic change of illumination such as SBO(Station Black Out), so a basic study is necessary to review the current approach. **Method:** We assessed the visual fatigue, subjective work load and task performance according to the three illumination situations(Normal Illumination, Emergency Illumination, and Drastic Change of Illumination). **Result:** Research finding shows that there are not significant differences in task performance between normal illumination (1,000lx level) and emergency illumination (100lx level), only if beyond the dark adaptation limit. However, subjective work load on mental demand and visual fatigue show a potential challenge to visual performance in drastic change of illumination. **Conclusion/Application:** Several trials can complement this challenge in NPPs by applying 3-way communication, enhancing readability of procedures, and managing the visual factors affecting the operators' performance through a Visual Environment Management Program including visual health aspects, etc.

Keywords: Visual performance, Human error, Illumination, Nuclear power plant

1. Visual Performance and Illumination

작업 환경에서 조명은 각 조건의 상태에 따라 작업자의 심리적, 생리적 상태에 영향을 미치는 요인 중 하나로 작업자의 인지적, 시각적 작업 수행도 결과에 영향을 미친다. 특히 조명은 시각에 집적적인 영향을 주어 시각 피로로 인한 인적오류 발생의 중요한 원인이 된다. 조명은 단순히 물리적인 측면인 조도(illuminance) 및 휘도(luminance) 이

외에도 균제 정도 및 배광, 눈부심, SPD(surge protector device), 깜박임(flicker), 조명시스템, 일광 및 창문, 제어 등 다양한 조건들을 포함한다. 또 이 조건들이 가시성 및 각성 정도, 스트레스 유발, 주의, 정서 등에 영향을 미치어, 최종적으로 작업자의 작업 수행도 및 직무 오류율(error rate)에 영향을 미치게 된다. Figure 1은 조명 환경과 작업 수행도의 연관관계를 개괄적으로 표현한 개념모형의 예를 보여 준다.

조명과 행동 관련 선행연구(Figure 2)에서는 시각적 최소

Corresponding Author: Yong Hee Lee. I&C and Human Factors Division, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Daejeon, 305-353.
Mobile: +82-10-5500-7958, E-mail: yhlee@kaeri.re.kr

Copyright©2013 by Ergonomics Society of Korea(pISSN:1229-1684 eISSN:2093-8462). All right reserved.

©This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. <http://www.esk.or.kr>

요구사항만 만족된다면 직무자의 행동 변화에 약 1~3% 정도의 직접적인 영향을 보이지만, 직무자의 행동 변화에 나머지 요인으로 작용하는 심리적, 생리적 상태에 영향을 주기 때문에, 조명 환경의 적절한 유지를 강조하였다.

완책을 제시하고자 한다.

2. Lighting Changes of Control Room in Nuclear Power Plants

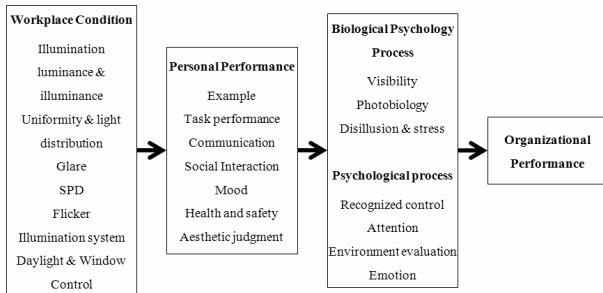


Figure 1. A conceptual model of lighting and human performance(Veitch, 2001)

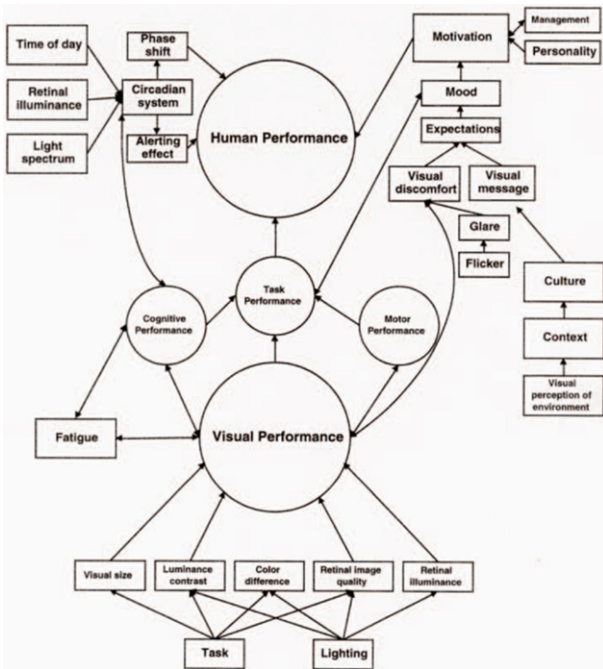


Figure 2. A conceptual framework setting out the three routes whereby lighting conditions can influence human performance (ref.; EPRI 1006415, 2001)

그 중에서 심리적인 상태는 특정 상황에서 직무자의 행동을 결정하기 때문에 원전 비상 상황과 같이 심리적 부담이 발생하는 경우에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 원전 주제어실의 조도 수준 상실 상황에서 발생하는 중사자의 시각적 수행도를 측정하여 생리적, 심리적인 변화와 보

원자력발전과 같이 고신뢰도 산업에서는 작업 수행도를 매우 높은 수준을 유지하고 인적오류 발생 원인을 제거하기 위해서 다양한 노력을 기울이고 있으며 올바른 작업 환경의 유지 또한 중요한 부분을 차지하고 있다. 특히 주제어실 (main control room)에서 조명 환경은 매우 중요한 요인으로 관리되고 있다. 특히 최근 주제어실은 시각기반 작업을 위해 발광형 계측기 및 디지털 기기인 시각 피로가 가중되므로, 이러한 시각 피로 방지를 위하여 조명 관리에 여러 노력을 기울이고 있다. 그 중에서 직접적으로 조도 수준을 정기적으로 관리하고 있다. 운전원이 최적의 시각 환경을 확보하기 위하여 주제어실의 조도 수준은 NUREG-0700 (Table 1), EPRI NP-3659 등에서 요구하는 정상 상황에서는 약 500~1,000lx, 비상 상황에서는 약 100lx를 유지하고 있으며, 정상 조명은 정기적인 조도 측정과 비상 조명은 작동 여부를 정기적으로 관리하고 있다. 주제어실의 적정 조도는 일반산업에서 요구하는 것(KOSHA CODE-H-6-2003, KOSHA GUIDE-G-23)에서 기술하는 것보다 높은 단계의 조도 수준을 유지하고 있다. 이는 안전 중심의 특징을 가지는 원자력 분야에서 낮은 조도 수준에서 발생하는 시각 직무 유해 요인을 차단하기 위함이다.

Table 1. Current criteria of illumination levels for NPPs (NUREG-0700.Rev.2, 2003)

Work area or type of task	Task illuminance level (in footcandles)
Panels, primary operating area	50
Auxiliary panels	50
Scale indicator reading	50
Seated operator stations	100
Reading:	
- Handwritten(pencil)	100
- Printed or typed	50
- VDU	10
Writing and data recording	100
Maintenance and wiring areas	50
Emergency operating lighting	10

*Adapted from NUREG/CR-5680, Tables 6.2 and 6.3

이러한 원전 주 제어실의 조도 수준은 운영기준에 따라 일정하게 유지되었을 때 시각적 직무의 원활한 수행을 보장할 수 있다. 하지만 완전전원상실(Station Black Out: SBO) 사고와 같이 조도 수준이 정상 조명(1,000lx)에서 비상 조명(100lx)으로 급격하게 전환되었을 때에는 조명 환경 변화에 대한 운전원의 시각적 수행도에 대한 변화를 아직 충분히 고려하는 방안은 마련되지 않았다.

전원상실과 같은 비상 상황에서는 운전원들은 안전하게 원전 정지를 위한 비상 업무를 수행하게 된다. 이때의 조도 수준은 약 100lx 정도로 비상등에 의하여 유지되고 있다. 100lx의 조명 수준은 시각 직무에 필요한 최소 조도는 만족하지만 비상 상황에서 발생하는 심리적 부담감, 조도 수준(1,000~100lx)의 급격한 전환에서 발생하는 생리적, 심리적 변화는 직무 수행도에 영향을 미치며 인적오류가 발생할 가능성이 있다. 따라서 조도 상실 상황에서 운전원의 직무 수행도 변화에 대한 연구가 필요하다.

급격한 조도 상실 상황에서 직무 수행도 변화에 대한 연구를 수행하기 위해서는 직무 수행도에 영향을 미치는 요소들을 고려해야 한다. 우선 조도 상실로 인한 운전원의 생리적인 변화(시각 피로, 암순응 등)와 심리적인 변화(스트레스, 부담, 긴장 등)의 발생을 고려할 수 있다.

생리적 변화는 대표적으로 암순응(dark adaptation)현상이 있다. 암순응이란 밝은 조명에서 적응된 인간의 눈이 조명이 제거되었을 때 원추체와 간상체의 역활전환 과정을 거치면서 어두운 환경에 적응하는 생리적인 현상이다. 암순응은 Figure 3과 같이 암순응 곡선으로 설명된다. 첫 번째 단계는 민감도가 급격히 회복되며 망막의 원추체(cones) 민감성에 의존하는 단계이며 두 번째 단계는 민감도가 완만히 회복되는 단계로 망막의 간상체(rods) 민감성에 의존한다(Figure 5). 기존 암순응의 효과에 대한 연구는 낮은 조도 수준에서 발생하는 암순응 효과에 관한 연구 결과로 급격한

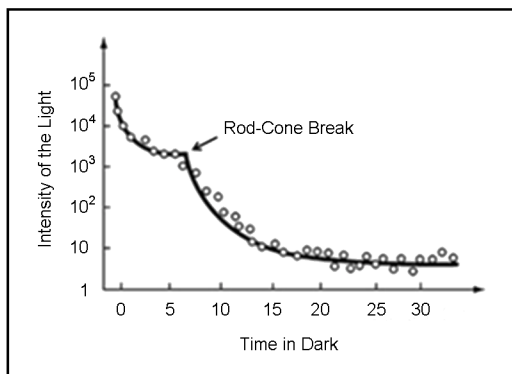


Figure 3. Dark adaptation time according to the intensity of the light(Rushton, 1961)

조도 상실 수준에 대한 암순응 효과는 연구되지 않았다.

또한 조도 상실에 따라 발생하는 심리적 변화에 대한 사전 관측에서, 기본적으로 조도 수준에 의한 커뮤니케이션의 억제, 스트레스의 증가, 시각 피로의 증가 등이 발생한다는 것을 면담 및 관찰로 확인하였다.

3. Research Scope and A Method Applied

본 연구는 원전 주 제어실에서 급격한 조명 환경 변화(조도 상실)가 직무 수행도에 미치는 영향을 운전원의 생리적, 심리적 측면에서 실험적으로 측정하고 분석하였다. 실험적으로 정상 조명(1,000lx)과 비상 조명(100lx), 조도 상실 상황(1,000lx→100lx)에서 각각 직무 수행도 및 주관적 직무 부하, 시각 피로 정도 등을 측정하였다.

실험 직무는 원전에서 발생 가능한 교류전원 상실 사고(Station Black Out) 상황을 가정하여, 해당 상황에 대응하는 직무 절차의 핵심시각업무를 두 가지로 설계하였다.

직무 세부 내용은 다음과 같다. 우선 TR(Text Reading) 직무는 비상운전절차서(Emergency Operating Procedure)를 해석하는 직무를 가정하여 실제 월성 1호기 EOP 절차서(글자체: 돋움체, 글자 크기: 10 point)의 글자체로 작성된 문서를 해석하는 직무로 설계하였다. Table 2와 같이 주어진 문장에서 글자 순서가 뒤바뀌어 있는 단어의 개수가 몇 개인지를 찾아서 주관식으로 답을 표기하였다.

Table 2. Experiment task: (1) TR (text reading) task (sample)

음파는 발음체가 일으킨 진동이 주변의 입자들을 움직여서 생기게 된다. 그 결과, 진동이 일어날 때마다 압축과 감압 반응이 연쇄적으로 일어난다. 이때 압력의 파동은 움직이는 용수철이 늘어났다 줄어 들었다 하는 것처럼 평행 방향으로 움직이는 데, 이것을 가리켜 종파라고 한다. 주파수는 이러한 압력이 1초 동안 진동을 일으키는 횟수이며, 파장은 최대 압력을 받는 지점 사이의 길이이다. 주파수가 높을수록 음조도 높으며, 주파수가 낮을수록 음조도 낮다.

TS(Table Search) 직무는 운전원 간의 커뮤니케이션이 포함된 직무를 가정하여 2인 1조로 실험하였다. 대상 직무는 EOP 절차서의 운전 조치사항에서 일반적으로 수행되는 직무 절차로 정의하였다. 직무 절차는 SRO(절차서 해석 및 해당 계측기 확인 지시)-RO(지시 수행 및 보고)-SRO(보고 해석 및 다음 직무 수행)으로 이루어지는 것(보일러 압력 안정)을 대상으로 하였다(Figure 4). 본 연구에서는 해당 직무 절차를 수행하면서 계측기 확인 직무를 난수표 해석 직

무로 대처하였다. 실험 순서는 실험진행자 A가 피실험자 B에게 해당 난수표의 배열에 있는 수치를 요청한다. 그러면 피실험자 B는 해당 난수표의 수치를 확인하여 실험진행자 A에게 보고하고 피실험자 A는 수치를 기록하였다. 조도 수준은 주제어실 운전원 책상 표면을 기준으로 NUREG-0700에서 정의하는 (1) 정상 조도 수준 1,000lx 유지, (2) 비상 조도 수준 100lx 유지, (3) 조도 상실 수준(1,000lx → >100lx) 등으로 구분하였다.

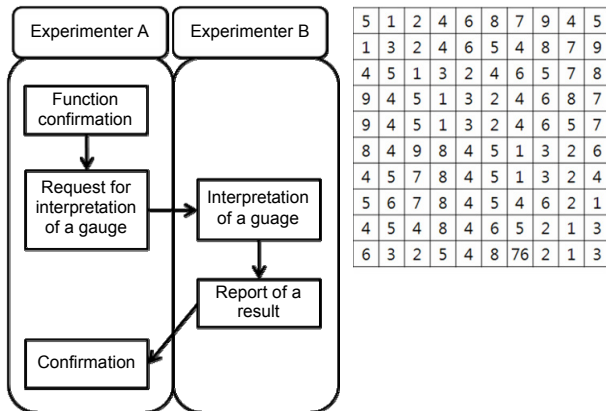


Figure 4. Experiment task: (2) TS(Table Search)

피실험자는 시각 장애 및 질환 병력이 없는 정상 또는 교정 시력이 1.0 이상인 20~30대 남녀 4명을 대상으로 실험을 실시하였다. 실험 횟수는 TR 직무는 피실험자 4명에 대하여 각각 실험을 실시하였으며, TS 직무는 2인 1조 실험으로, 실험진행자가 A 직무를 수행하며 피실험자는 B 직무를 수행하는 방법으로 실험을 진행하였다.

측정 항목은 운전원의 직무 수행도를 알아보기 위하여 직무의 정답률과 직무 수행 시간을 측정하였으며 주관적 직무 부하 및 시각 피로를 측정하기 위하여 NASA-TLX 설문을 측정하였다. 또한 시각 피로에 대한 주관적 측정을 위하여 눈부심, 눈의 충혈, 글자의 흐릿함, 어지러움, 시선의 무기력, 눈의 신체적 이상, 전반적 시각 피로, 조명 환경 만족도로 구성되어 측정하였다(Table 3).

하지만 예비 실험에서 서론에서 확인하고자 했던 (3) 조도 상실 수준(1,000lx → >100lx)에 대하여 암순응 및 직무 수행도 변화에 차이가 나타나지 않았다. 따라서 본 실험에서는 Task 1에서만 암순응을 매개변수로 선정하여 조도 수준을 암순응 발생 조도 수준(1,000lx → >20lx)을 추가하여 인위적으로 암순응을 발생시켜 직무 수행도 및 주관적 부담 정도를 측정하였다. Task 2에서는 (1), (2) 조도 수준에 대하여 실험을 진행하였다.

Table 3. A survey sheet on subjective visual fatigue(a part)

평가 요소	개념	평가 지표		점수 (100점만점)
눈부심	과제 수행 동안 눈부심을 얼마나 느껴졌는가?	낮음	높음	
눈의 충혈	과제 수행 동안 눈의 충혈이 얼마나 느껴졌는가?	낮음	높음	
글자의 흐릿함	과제 수행에서 글자의 흐릿함이 느껴졌는가?	낮음	높음	
어지러움	과제 수행동안 조명으로 인한 어지러움이 느껴졌는가?	낮음	높음	
시선의 무기력	과제 수행동안 시선이 무기력하거나 무감각하였는가?	낮음	높음	
눈의 신체적 이상	과제 수행동안 눈에 이상이 느껴졌는가?	낮음	높음	
전반적 시각피로	과제 수행 후에 전반적인 시각 피로가 어느정도 느껴졌는가?	낮음	높음	
조명 환경 만족도	과제 수행에서 조명 환경은 만족하는가?	낮음	높음	

4. Experimental Results

본 실험에서는 조도 수준 변화(1,000, 100, 20lx) 및 암순응 발생 정도에 따른 직무 수행도(정답률, 수행 시간) 및 운전원의 주관적 직무 부하(NASA-TLX), 시각 피로(설문지 기반) 등을 측정하였다.

4.1 Task performance

직무 정답률은 정상 조명(1,000lx)과 비상 조명(100lx) 간에 유의한 차이가 나타나지 않았으며 비상 조명 환경에서 정답률이 약간 더 높은 결과가 나타났다. 또한 TR 직무에서 조도 상실 수준에서는 직무 정답률이 50% 정도로 크게 하락하는 결과가 관찰되었으며 각 조명 수준 간의 유의한 차이는 발견되지 않았다. TS 직무에서는 비상 조명에서의 직무 정답률이 99%에 가깝게 측정되었는데 이는 실험 진행 순서(정상 조명 → 비상 조명 → 조도 상실)에 따른 학습 효과에 의한 결과로 나타난다(Table 4, Figure 5).

직무 수행 시간은 TR 직무와 TS 직무 모두에서 조명 수준 간에 유의한 차이가 나타났다. 앞서 직무 정답률과 동일하게 직무 수행 시간에서도 정상 조명보다는 비상 조명에서 직무 수행 시간이 짧게 나타났다. 조도 상실 수준에서는 정상 조명과 비상 조명에서보다 직무 수행 시간이 약 50% 정도 증가되는 것으로 나타났다(Table 5, Figure 6).

Table 4. ANOVA table for task performances to the illumination levels

Task	Illumination levles	Correct answer(%)	p-value
Text reading	1,000lx	85±04	0.23
	100lx	88±08	
	1,000 → 20lx	50±13	
Table search	1,000lx	88±18	0.06*
	100lx	99±01	

M ± SD *p<.10

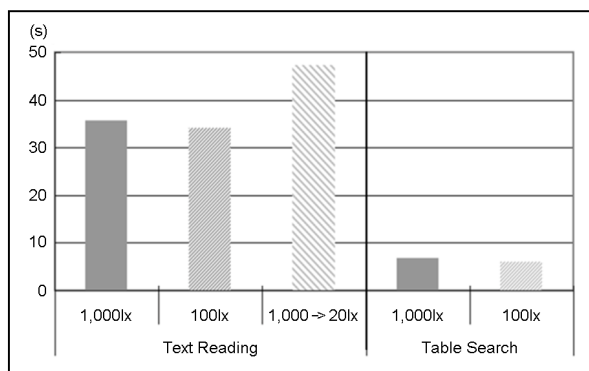


Figure 5. Task performances to the illumination levels

Table 5. ANOVA for task time to the illumination levels

Task	Illumination levels	Task time(s)	p-value
Text reading	1,000lx	35.69±12.02	0.03**
	100lx	34.05±11.20	
	1,000 → 20lx	47.25±18.70	
Table search	1,000lx	6.78±2.35	0.03**
	100lx	5.93±2.48	

M ± SD **p<.05

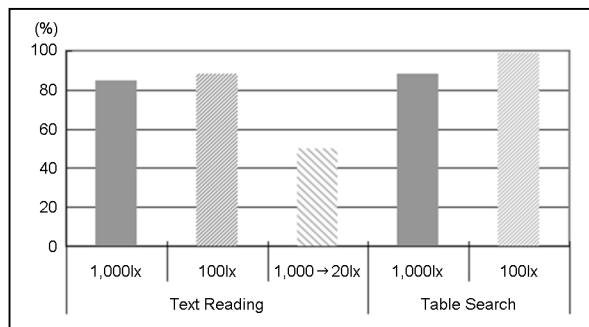


Figure 6. Task performance time to the illumination levels

4.2 Assessment of subjective loads

조도 수준의 변화에 따른 주관적 부하의 측정은 실험 직무 수행에 대한 NASA-TLX 평가와 앞에서 설명한 시각 피로 관련 주관적 설문을 이용하여 평가하였다.

NASA-TLX 평가 결과는 다음과 같다. TR(Table Reading) 직무에서는 조도 수준에 대한 주관적 부담은 2가지 형태로 나타났다. 우선 조도 수준이 낮아질수록 정신적 요구, 신체적 요구, 노력 수준, 좌절 수준 항목에서 높은 점수가 나타났으며, 시간적 요구 및 수행도에서는 반대의 결과가 나타났다. 이는 직무 수행도에서 정상 조명과 비상 조명 간의 차이가 나타나지 않았지만 주관적 부하 측정에서는 조도 수준이 낮아질수록 직무 부하가 높은 것으로 나타났다. 분산 분석 결과 전체 항목에 대한 조도 수준간 주관적 직무 부하에는 유의한 차이가 관찰되지 않았다(Table 6, Figure 7).

Table 6. ANOVA for NASA-TLX to the Text Reading task

	Illumination level			p-value
	1,000lx	100lx	1,000lx → 20lx	
Mental demand	75.00±6.86	77.27±14.43	84.54±17.40	0.60
Physical demand	33.18±35.29	36.36±33.35	47.72±40.74	0.84
Time demand	67.72±12.97	55.45±17.72	47.27±31.17	0.45
Performance	75.45±14.58	65.45±16.06	61.36±24.45	0.57
Effort level	79.09±9.90	80.00±9.50	83.18±13.55	0.86
Frustration level	48.18±18.92	60.45±14.19	79.54±16.35	0.07*

M ± SD *p<.10

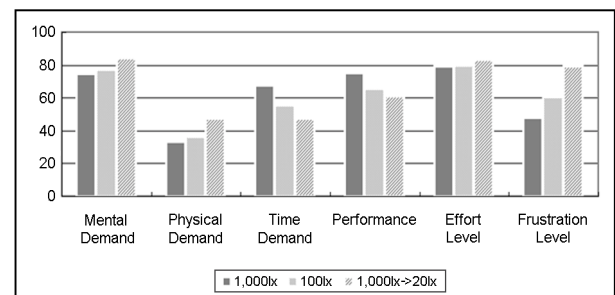


Figure 7. NASA-TLX to the Text Reading task

TS(Table Search) 직무에서는 정상 조명과 비상 조명 간의 유의한 차이가 나타나지는 않았다. 이는 실험 직무 특성 상 어느 정도 시각 확보가 가능한 환경에서 글자 해석 직무보다는 계기판 해석 직위가 더 낮은 직무 부하를 가진다고 해석할 수 있다(Table 7, Figure 8).

Table 7. ANOVA for NASA-TLX to the *Table Searching* task

	Illumination level		p-value
	1,000lx	100lx	
Mental demand	67.72±27.51	65.91±28.06	0.93
Physical demand	79.09±17.40	79.54±14.34	0.97
Time demand	63.18±30.69	45.45±17.31	0.35
Performance	74.09±19.03	72.72±10.80	0.91
Effort level	79.09±14.88	76.36±6.99	0.82
Frustration level	57.72±21.73	56.81±15.09	0.95

M ± SD

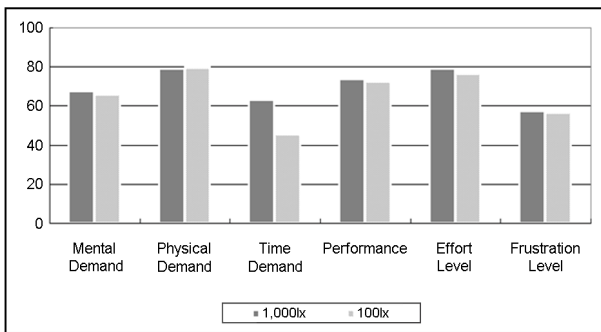


Figure 8. NASA-TLX to the *Table Searching* task

TS(Table Searching) 직무에서는 정상 조명과 비상 조명 간의 유의한 차이가 나타나지는 않았다. 이는 실험 직무 특성 상 어느 정도 시각 확보가 가능한 환경에서 글자 해석 직무보다는 계기판 해석 직위가 더 낮은 직무 부하를 가진다고 해석할 수 있다.

주관적 시각 피로 관련 설문조사 기반의 평가 결과는 다음과 같다. TR 직무에서는 눈부심 항목에서 정상 조명이 가장 높게 나타났으며 그 이외에 글자의 흐릿함, 시선의 무기력, 눈의 신체적 이상, 전반적 시각 피로, 조명 환경 만족도 항목에서는 암순응 발생 조명이 가장 시각 피로가 높게 나타났다. 또한 일부 항목에서는 정상 조명이 비상 조명보다 시각 피로가 높게 나타난 것이 확인되었는데 이는 실험 조명 환경(조명 기구, 휘도, 반사율)과 실제 조명에 의한 시각 피로가 함께 나타나는 결과로 판단된다(Table 8, Figure 9).

Table 8. ANOVA for subjective visual fatigue to the *Text Reading* task

측정 항목	조도 수준			p-value
	1,000lx	100lx	1,000lx->20lx	
눈부심	54.99 ± 32.83	17.27 ± 12.37	7.27 ± 7.71	0.02**
눈의 충혈	49.54 ± 32.36	25.90 ± 15.09	59.54 ± 42.57	0.36
글자의 흐릿함	24.09 ± 23.62	44.09 ± 34.98	79.09 ± 23.21	0.06*
어지러움	32.27 ± 25.64	38.63 ± 29.14	32.27 ± 45.64	0.96
시선의 무기력	28.18 ± 22.92	38.18 ± 30.09	69.09 ± 33.78	0.18
눈의 신체적 이상	33.18 ± 38.49	35.91 ± 26.27	76.81 ± 27.02	0.14
전반적 시각피로	49.09 ± 30.46	41.36 ± 15.87	78.63 ± 21.32	0.11
조명환경 만족도	45.45 ± 21.25	48.18 ± 36.79	7.72 ± 9.66	0.09*

M ± SD *p<.10, **p<.05

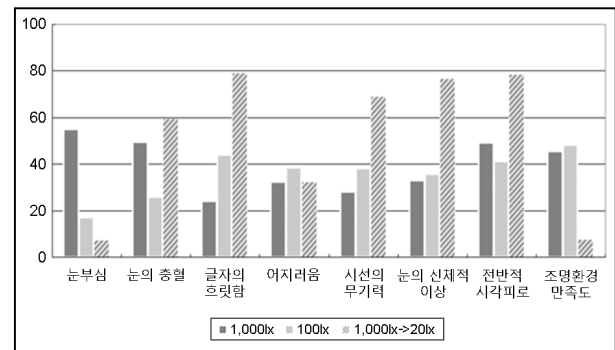


Figure 9. Subjective visual fatigue to the *Text Reading* task

TS 직무의 주관적 시각 피로 분석 결과는 다음과 같다. TS 직무는 정상 조명과 비상 조명에서의 차이가 글자의 흐릿함, 시선의 무기력, 눈의 신체적 이상 항목에서 TR 직무와는 상이한 결과가 나타났다. 이는 직무 특성(시선의 이동, 표적지와의 거리)등에 영향을 받는 것으로 판단된다(Table 9, Figure 10).

본 실험 결과는 실험 환경에서의 단순 직무라는 점을 반영한 것으로 판단되며, 실제 비상 상황 발생 시에 나타나는 스트레스 및 심리적 부담감으로 인하여 직무 수행도의 차이는 더욱 클 것으로 예상된다.

Table 9. ANOVA for subjective visual fatigue to the Table Searching task

측정 항목	조도 수준		p-value
	1,000lx	100lx	
눈부심	69.08±20.62	18.63±18.44	0.01**
눈의 충혈	59.09±16.89	25.00±21.63	0.05**
글자의 흐릿함	52.72±26.00	46.36±28.11	0.75
어지러움	55.00±27.50	43.18±31.11	0.59
시선의 무기력	40.45±28.61	35.00±22.68	0.78
눈의 신체적 이상	49.54±26.32	37.73±26.27	0.55
전반적 시각피로	62.73±22.24	42.27±30.43	0.32
조명환경 만족도	49.54±25.55	55.91±33.69	0.77

M ± SD **p<.05

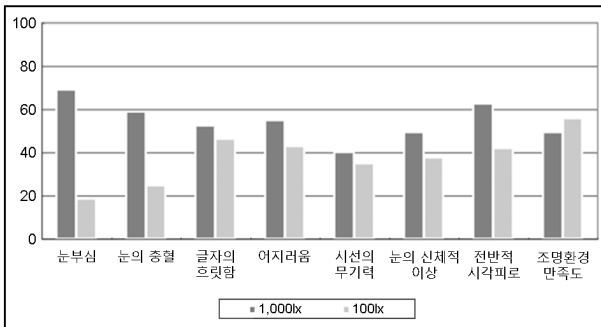


Figure 10. Subjective visual fatigue to the Table Searching task

5. Conclusions and Discussions

조명은 시각 직무 수행도에 영향을 미치는 중요한 요소 중의 하나이다. 특히 원자력발전소의 경우에는 조명의 여러 가지 요소 중에서 밝기를 나타내는 조도를 관리함으로써 시각적 불편함으로 발생하는 인적오류를 방지하고 있다. 본 연구에서는 일정하게 유지되는 조도 수준에서 급격한 조도 상실이 발생하였을 때 직무 수행도에 미치는 영향을 분석하였다.

분석 결과 실험에서는 정상 조명과 비상 조명 간의 조도 수준(1,000lx, 100lx)에서는 직무 수행도에서 통계적 차이가 발견되지는 않았다. 오히려 비상 조명에서 직무 수행도가 더 높게 나타났다. 이유는 (1) 실제 주제어실과 같은 환경에서 발생하는 변수(심리적 부담감, 조명 기구에 의한 차이)에 대한 제한적인 실험 방법과 (2) 실제 조도 수준의 차이가 직무 수행에 영향을 줄 정도로 큰 차이가 나타나지 않았으며 오히려 실험 순서(정상 조명->비상 조명)에 따른 학습 효과

가 나타난 것으로 판단된다.

(2)의 결과는 두 가지 가능성으로 판단된다. 첫 번째는 실험 직무의 난이도가 조도를 평가하기에 적절하지 않은 것이다. 하지만 본 연구는 원전 주제어실 작업자를 대상으로 하여 대표 직무로 실험을 수행하였기 때문에 직무의 난이도는 적절한 것으로 판단되었다. 두 번째는 직무 수행도에 영향을 주는 인자로서 조도 수준이 그 영향이 미비한 것이다. 이는 본 연구에서 피실험자의 수가 그 결과를 대표하기에는 부족한 점이 있기 때문에 선행연구를 확인해 보았다. 우선 After Smith의 연구 결과(Figure 11)에서 성별과 문서 상태에 대하여 연령별 직무 수행도를 측정해본 결과 100lx 이상의 조도에서는 직무 수행도 변화가 거의 발생하지 않는다는 것을 확인하였다. 또한 다른 여러 연구에서 조도와 직무 수행도 간의 실험을 실시한 결과, 조도 및 휘도, 대비 등을 변경하여 실험한 작업에서는 통계적으로 유의한 변화가 나타나지 않았다. 이는 서론에서 언급하였듯이 조명에 의한 작업 수행도의 차이가 1~3% 정도가 설명된다는 점과 일치한다.

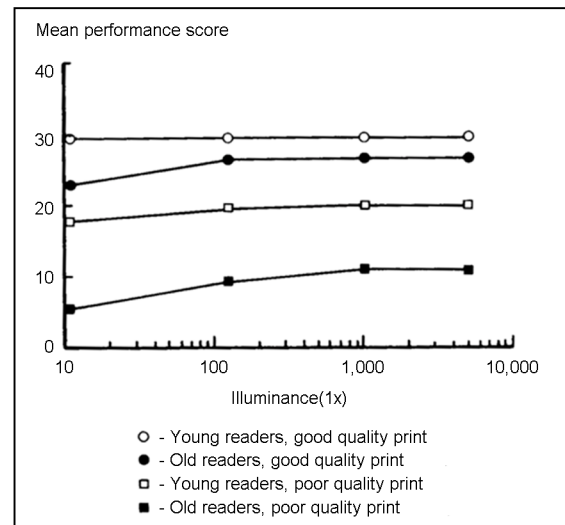


Figure 11. Mean performance score for proof reading good and poor quality text, plotted against illuminances for young(18~22 years) and older(49~62 years) subjects(After Smith and Rea, 1978).

시각 피로 설문 조사에서 정상 조명에서 눈부심 등 시각 환경 만족도가 낮아지는 결과는 다음의 연구 결과와 일치한다. After Muck(Figure 12) 등은 조명 수준 변화에 따른 테이블 위의 번호 식별 실험 및 주관적 평가에서 일정 이상 조도에서 식별 시간의 차이는 거의 없으며, 높은 조도에서 조명의 주관적 불편도가 나타났다고 발견했다.

이러한 결과는 조도 수준이 시각 수행도에 영향을 주는 것

은 분명하지만 어느 정도 시야 확보가 가능한 상태에서는 직접적인 영향보다 시각 수행도의 인적오류 가능성을 결정하는 다른 많은 요인(작업 환경, 심리 상태, 조직 문화) 등과 함께 고려가 필요한 것으로 나타난다. 일례로 조도 상실 상황에서와 같이 특정한 상황에서 발생하는 엄청난 심리적 부담감과 작업 환경의 변화(조도 상실, 그림자 발생, 경보 발생) 등으로 인하여 인적오류가 발생할 요인이 높아진다.

특히 그림자 효과는 광원이 집중 배치가 되었을 때 인적오류 유발 위험 요소로 판정된다. 본 연구에서 간단한 실험 결과 작업자 후방에서 3개의 광원으로 100lx를 만족하는 환경에서는 작업자 그림자에서 약 65lx의 조도가 측정되었지만, 동일한 조도 환경에서 광원을 1개로 줄였을 때에는 약 9lx의 조도가 측정되어 그림자 안에서 암순응 효과가 나타나는 것을 확인하였다.

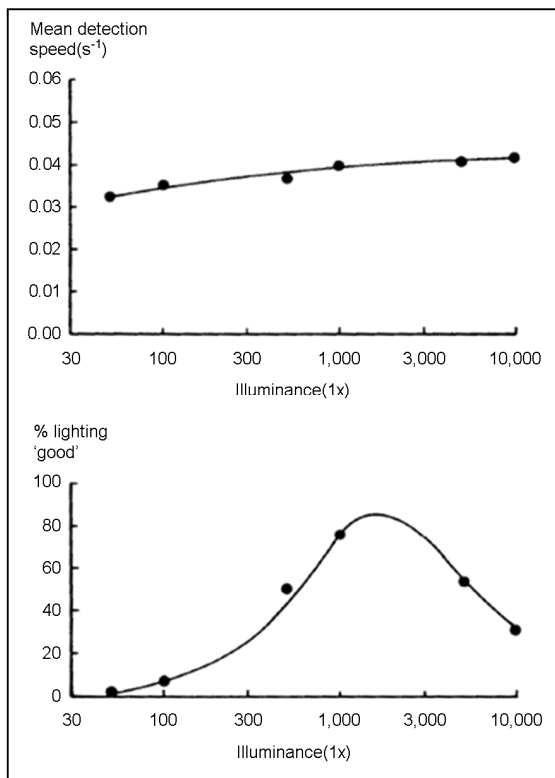


Figure 12. Mean detection speeds for locating a specified number among others at different illuminances and the percentage of subjects doing the task who considered the lighting "good" at each illuminance(After Muck and Bodmann, 1961).

이에 대한 보완책은 조도 상실 수준에서 적용할 수 있는 가시성을 높인 절차서를 도입하여 시각적 해석 오류를 예방하거나, 3Way-Communication 기법을 적용한 반복 확인으

로 심리적 부담감을 줄이는 등 인적오류 예방조치가 필요하다. 그러나 궁극적으로는 물리적 제한 기준이 아니라 종사자의 시각적 반응 특성을 기준으로 하는 종합적인 시각 환경 관리 프로그램을 구축하는 것이다.

원전에서 인간공학적 시각 관리 프로그램으로 필요한 고려사항은 다음과 같다. 첫째, 종사자 시각 피로 측정 및 평가 체계 구축으로 조도, 휘도, 눈부심, 깜박임 등 모든 시각적 영향 요소들을 종사자의 시각 영향(주관적 의견 포함) 측면에서 측정 평가해야 한다. 둘째, 시각 변화에 따른 피로 및 스트레스로 인한 인적오류 가능성의 지속적인 측정 및 평가 관리가 필요하다. 원전의 종사자 유형별로 시각 환경 및 정보 전달 매체 차이에 따른 주기적인 시각 수행도 측정 및 관리를 통하여 시각적 요인에 따른 인적오류를 사전에 대처하도록 한다. 이는 종사자의 개인적 건강과 연령에 따른 변화 등을 포함해야 할 것이다. 마지막으로 시각 능력에 영향을 주는 요소에 대한 설계 관리가 필요하다. 조명 기구와 작업 환경 설계 관리에서 조도의 변화에 따른 시각 수행도에의 영향에 대한 측정 및 평가를 설계에 포함하도록 보완하여, 기존의 절대적 수준치 만족 여부로 관리하는 것이 아니라 보다 상세한 고려가 가능한 기준 및 지침을 적용해야 한다.

시각 인지가 기본적으로 확보된 상황에서 조명은 직무 수행도에 약 1~3% 정도의 영향만을 보이지만, 원전과 같이 고신뢰도를 유지해야 되는 경우에는 인적오류 예방을 위하여 물리적인 환경 이상으로 통제 가능한 모든 요인들을 충분히 관리하고 있음을 보장해야 한다. 따라서 추후 완전전원상실과 같이 발생 확률이 극단적으로 낮은 비상 상황에서 조명과 같은 급격한 상황 변화에 따른 운전원의 반응 평가 및 보완조치를 개발할 필요가 있다.

Acknowledgements

This research was supported by the nuclear energy research and development project(Grant. 2012M2A8A-4004256) funded by the Ministry of Education, Science and Technology.

References

- EPRI, *Light and Human Performance II*, EPRI 1006415, 2001.
- Kim, Y.G., A Study of a Decay Parameter for the Dark Adaptation Function on the retina, *Journal of Korean Ophthalmic Optics Society*, Vol.5, No.2, 2000.
- Muck, E. and Bodmann, H.W., *Die bedeutung des beleuchtungsiveaus*

bei praktische sehtatigkeit, Lichttechnik, 13, 502, 1961.

- Pak. H.S. et al., A Consideration and Prospects of Psychological Research on Lighting, *Korean Journal of Psychology: General*, Vol.30, No.1, pp.23-43, 2011.
- Park. Y.S. et al., A Visual Fatigue Evaluation Method for Visual Inspection Tasks and Environment, *Spring Joint Conference of ESK & KOSES*, 2005.
- Park, et al., Effects of Illumination and Target Size on Time-To-Detect while Recovering Dark Adaptation, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, Vol.28, No.4, pp.71-76, November, 2009.
- Shin, K.H. and Lee, Y.H., An Ergonomic Evaluation of the Illumination Level and the Management Plan to Improve the Working Environment of Nuclear Power Plants, *Transactions of the Korean Nuclear Society Fall Meeting*, 2011.
- Smith, S.W. and Rea, M.S., Proof-reading under different levels of illumination, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 8, pp.47-52, 1978.
- Ruston, W.A.H., Rhodopsin measurement and dark-adaptation in a subject deficient in cone vision, *Journal of Physiology*, 156, 193, 1961.

Yong Hee Lee: yhlee@kaeri.re.kr

Highest degree: Ms, Department of Industrial Engineering, Seoul National University

Position title: Section Head, I&C and Human Factors Division, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)

Areas of interest: Human-Machine Interface, Human Error, Cognitive System Engineering

Date Received : 2013-01-15

Date Revised : 2013-01-31

Date Accepted : 2013-01-31

Author listings

Kwang Hyeon Shin: shin9330@kaeri.re.kr

Highest degree: Ms, Department of Industrial Engineering, Dong-Eui University

Position title: Researcher, I&C and Human Factors Division, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)

Areas of interest: Human Error, Biomechanics, Cognitive System Engineering