

## Title

# Development of Management Guideline and the Procedure for Anthropometry Suitability Assessment: Control Room Design Factors in Nuclear Power Plant

## Subtitle

### Anthropometry Suitability Assessment

## ABSTRACT

**Objective:** The aim of this study is to development of management guideline and the procedure for anthropometry suitability assessment of the main control room (MCR) in nuclear power plants (NPPs).

**Background:** The condition of MCR should be suitable to the works of the crews in NPPs. The suitability of MCR closely depends on the anthropometric dimensions and ergonomic factors of the user population. Especially, the MCR workspace design in NPPs is important due to the close relationship with operating crews and their work fails. Many documents and criteria have recommended that anthropometry dimensions and their studies are one of the foremost processes of MCR design in NPPs. If not considering these factors properly, users can feel burdened about their works and the human errors that might happen.

**Method:** A procedure for anthropometry suitability assessment consists of 5 phases; 1) selection of the anthropometry suitability evaluation dimensions, 2) establish of measurement method according to evaluation dimensions, 3) establish of criteria for suitability evaluation diminution, 4) establish of rating scale and improvement methods according to evaluation dimensions, 5) assessment of final grade for evaluation dimensions. The management guideline for anthropometry suitability assessment was completed 10 contents; 1) director, 2) subject, 3) evaluation period, 4) measurement method and criteria, 5) selection of equipment, 6) measurement and evaluation, 7) suitability evaluation, 8) data sharing, 9) data storage, 10) management according to suitability grade.

**Results:** We propose a set of 17 anthropometry dimensions about size, cognitive/perceptual, action/behavior and their relationships with human errors about MCR design variables through case study. The selected 17 dimensions height, sitting height, eye height from floor, eye height above seat, arm length, functional reach, extended functional reach, radius reach, visual field, peripheral perception, hyperopia/myopia/astigmatism, color blindness, auditory acuity, finger dexterity, hand function, body angle, manual muscle test. We proposed criteria about 17 anthropometry dimensions for suitability evaluation and suggested improvement method according to evaluation dimensions.

**Conclusion:** The results of this study are possible to improve the human performance of the crew in the MCR.. These management guideline and procedure for anthropometry suitability assessment will be able to prevent human error due to inadequate anthropometry dimensions.

**Application:** The proposed set of anthropometry dimensions can be integrated into a managerial index for the anthropometric suitability of the operating crews for more careful countermeasures to human errors in NPPs.

## Keywords

Anthropometry, Main Control Room (MCR), Human Error, Suitability, Guideline, Nuclear Power Plants (NPPs)

## 1. Introduction

원자력발전소(이하 원전) 주제어실(main control room)은 운전원(crew)이 주어진 임무를 성공적으로 수행할 수 있도록 모든 설비가 효율적으로 설계되어야 한다. 또한 설계 시에는 운영 효율성, 연계기기와의 관계, 기기의 유지/보수 및 반/출입 등을 종합적으로 고려해야 한다(IAEA, 2000). 주제어실의 효율적 설계를 위해서는 기능적 배치뿐만 아니라 다양한 인간공학적 기능을 최적으로 만족해야 한다. 인간공학적 고려는 안전성 및 생산성에 필수적인 요소로써, 인간공학을 설계에 반영하기 위해서는 다양한 분석기법 및 실험이 관련 규제, 표준 및 지침에 중요하게 활용된다.

미국 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission; NRC)에서는 주제어실 설계, 선정 및 설치 시 고려해야 할 인간공학 지침인 Human-System Interface Design Review Guidelines(NUREC-0700)을 제시하고 이를 규제 문서로 활용하고 있다(NRC, 2011). 미국 전력연구소(Electric Power Research Institute; EPRI)에서도 주제어실 설계를 위한 인간공학 지침을 제공하고 있다(EPRI, 2004). 이외에도, IEEE-STD-1289 (1998) 등이 주제어실 설계를 위한 지침으로 사용되고 있다. 국내에서도 원전 주제어실 설계 시 기능 선택, 인간-기계 연계의 설계 고려 및 구성, 그리고 기능적 설계에 대한 확인 및 검증에 사용될 수 있는 한국산업규격을 제공한다(기술표준원, 2004). 또한 모 국내원전 설계회사에서는 인간공학 설계를 위한 지침인 Human Factors Engineering Guideline(HF-010)을 개발하여 사용하고 있다(KOPEC, 2006).

위의 규제 및 기준/지침 문서에서는 기본적 인간-시스템 인터페이스 요소(Basic HSI elements), 인간-시스템 인터페이스 시스템(HSI systems), 작업대와 작업공간(workstation and workplace design), 인간-시스템 인터페이스 지원(HSI support) 등의 항목에 대한 인간공학 지침을 제고하고 있다. 또한 이들 문서들에서는 주제어실의 모든 조건은 운전원에 적합해야 하며, 특히 최신 디지털 기술을 도입한 주제어실 제어반과 워크스테이션(workstation) 설계에서 직무수행의 성공을 위해 사용자 집단의 인체측정학(anthropometry) 및 인간공학 특성치에 부합해야 한다고 권고한다. 안전을 최우선으로 하고 있는 원전에서는 위와 같은 노력을 통하여 기계적인 신뢰도 확보와 함께 인적오류(human error)를 대비하고 있다.

설계상의 규제 및 기준 마련 연구와 더불어, 설계된 주제어실을 평가하기 위한 연구들도 인적오류를

방지하고자 하는 측면에서 활발히 진행되었다. Lee (2000)은 주제어실 설비 배치 설계 과정에서 도출된 현안 및 기본적 요구에 대한 적합성을 평가하는 실험을 실시하였다. 그 결과, 작업대 굴곡도, 작업대 수평부 전단부의 키보드 사용 높이, LDP 높이 및 기울기 등의 부분에서 설계상 개선이 필요하다고 하였다. Oh et al. (2002)는 제어실 설계요소 및 설계요소별 관련 인체 측정변수를 도출하여 기존 인구 인체측정 자료를 사용하여 2010년도 한국인 인체변수 예측치를 산정하였다. 이렇게 산정된 예측치를 반영하여, 인적오류 예방을 목적으로 설계요소 지침을 개발하는 연구를 진행하였다. Song and Lee (2004)의 연구에서는 주제어실 소프트웨어기 및 안전제어반에 대한 인간공학적 접합성에 대한 실험과 평가를 수행하고, 그 결과 및 도출된 인간공학 현안에 대한 해결방안을 제시하였다. Cha and Kim (2009) 디지털과 아날로그의 중간 형태인 하이브리드 환경하의 인간기계시스템 제어실 평가를 위한 인간공학 요소별 지침을 제시하는 연구를 수행하였다.

설계상 규제/기준 마련 및 설계 평가를 통한 인적오류 예방 방법 이외에도, 관리적인 측면에서 업무적합성을 평가하는 방법도 인적오류를 예방하고 업무 효율성을 제고하기 위한 방안으로 활용되고 있다. NRC에서 개발한 업무적합성 관리를 위한 법규(10CFR26, Fitness-For-Duty Program)와 ILO 기준이 원전종사자의 적합성을 평가하는데 가장 보편적으로 사용되고 있다. 이들 기준을 기반으로 국내 원자력법 시행령 제299조와 시행규칙 제115조에서도 종사자의 업무적합성 기술기준을 제시하여 활용토록 하고 있다. 적합성 판단 요소에는 건강진단, 정신건강, 약물 관리, 직무스테레스, 행동관찰, 종사자지원, 행정조치, 피로관리 등의 항목이 포함된다(Lee et al., 2011). 원전 이외에도 고신뢰도 대형 시스템으로 분류되는 항공 분야에서도 '항공신체검사증명' 제도를 운영하고 있으며, 체중, 키, 시청각기능, 운동능력을 비롯하여 기타 인체계통 항목을 관리 항목으로 제시하고 있다(Ministry of Land, 2013).

적합성 평가 자료는 인적오류 예방 측면에서 설계상의 개선뿐만 아니라 업무 관리를 위해서 중요하게 사용될 수 있다. 하지만 현재 원전에서 평가되고 있는 적합성 항목들은 정신적 적합성 항목에 치우쳐 있다. 하지만 연령증가 및 환경에 따른 인체적 능력 변화 때문에 발생할 수 있는 인적오류를 대비하기 위해서는 인체적 적합성 항목에 대한 평가가 동반되어야 한다. 또한 적합성을 평가하기 위한 절차 및 기준에 대하여 정확하게 제시되어야 할 필요성이 있다.

따라서, 본 연구에서는 원전에서 인적오류를 방지하기 위한 선제적 조치의 일환으로 1) 인체 적합성 평가 절차를 개발하고, 2) 개발한 인체 적합성 평가 절차를 원전발전소 주제어실에 적용하여 효율성을 평가하였다. 3) 마지막으로 인체 적합성 평가에 대한 관리 지침을 제안하였다.

## **2. A procedure for anthropometry suitability assessment**

인체 적합성 평가를 위한 전반적인 절차는 Figure 1과 같다. 인체 적합성 평가 절차는 1) 설계 변수와 관련된 인체 적합성 평가 항목 선정, 2) 선정된 평가 항목별 측정 방법 정립, 3) 항목별 적합성 평가 기준 마련, 4) 항목별 대응 조치 마련, 5) 체크리스트를 통한 항목별 평가 및 최종 등급 평가로 총 5단계로 구성된다.

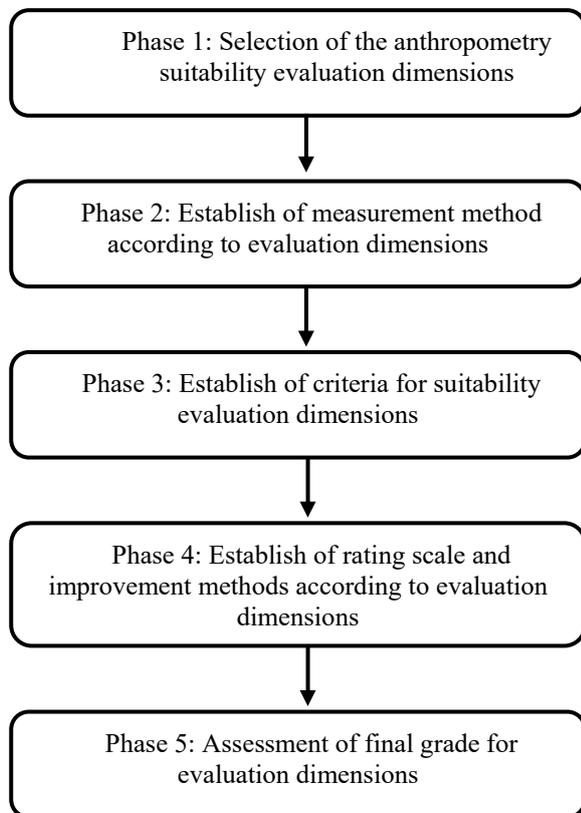


Figure 1. A procedure for anthropometry suitability assessment

### 2.1 Phase 1: Selection of the anthropometry suitability evaluation dimensions

특정 원전에서 종사자의 인체 적합성을 평가하기 위해서는 1) 적용하고자 하는 원전에서 설계 당시 사용했던 규제 문서 혹은 지침을 검토한다. 이를 통해 설계변수와 관련된 인체 평가 항목을 도출한다. 2) 1차적으로 도출된 항목에 대해서 원전 운영 전문가, 주제어실 설계 및 평가 전문가, 인간공학 전문가, 원자력 규제 전문가 등이 함께 FGI 또는 델파이 기법을 활용하여 평가를 거쳐 인적오류와 관련 있을 측정항목을 선정 및 검토해야 한다. 3) 추가적으로 연령, 성별, 기타 환경에 의해 추가되어야 할 항목에 대해서는 문헌조사를 실시한다. 4) 마지막으로 기존 인적오류 정지/고장 사고사례 검토를 통하여 관련된 핵심설비 변수 및 그와 관련된 인체 평가 항목을 추가한다.

### 2.2 Phase 2: Establish of measurement method according to evaluation dimensions

최종 도출된 인체 적합성 평가 항목에 대하여 실무자가 직접 측정 가능하도록 문헌조사를 통하여 관련 자료 및 장비를 마련해야 한다. 각 평가 항목별 동일한 기준으로 정확한 측정값을 얻기 위하여 측정 항목 정의, 측정자세, 측정기준, 측정방법 및 실무 등을 지침으로 제공한다. 추가적으로 측정에 대한 이해를 돕기 위한 사진 및 동영상을 추가한다.

### 2.3 Phase 3: Establish of criteria for suitability evaluation dimensions

측정 항목 별 적합성 기준을 설립하는 것은 인체 적합성 평가의 최종 등급화를 위해 가장 중요한 단계이다. 인체 치수 관련 변수의 경우에는 설비 및 기계/기구의 설계 당시 고려된 치수 및 범위를 기준으로 적합성 기준을 마련한다. 가령, 입식 콘솔의 높이를 설계 당시 국민 인구의 인체 치수 평균 기준치(red line)를 사용하고 허용 범위를 여성 5%에서 남성 95%로 설계되었다면, 현재 국민 인구의 인체 치수 기준(blue line)을 적용할 시 기준 치수에 차이(gap)가 발생한다(Figure 2). 따라서, 현재 제작된 설비에 대한 인체적합성을 평가하기 위해서는 설계 당시의 기준을 따라야 한다.

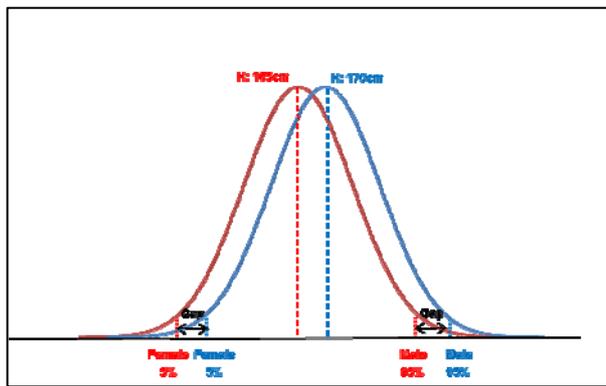


Figure 2. Criteria for anthropometry dimensions

인체 치수 이외의 인지/지각 및 행동/행위 등과 관련된 항목들의 기준 설립을 위해서는 측정 항목에 대하여 관련 문헌조사를 실시하여 적합한 기준을 마련해야 한다.

### 2.4 Phase 4: Establish of rating scale and improvement methods according to evaluation dimensions

원전에서의 인적오류 특히, 인체 부적합으로 인해 발생될 인적오류는 실제로 발생할 가능성이 낮은 희귀사건(rare event)이지만 시스템에 따라서 그 결과가 매우 심각 할 수 있다. 따라서 발생 확률이 낮은 항목들이라도 원전의 특성상 보수적인 평가가 필요하다(Lee, 2002). 따라서, 인체 적합성 평가의 개별 항목에 대하여 적합(S)과 부적합(U)의 2가지 척도를 사용하여 적합성 여부를 평가한다.

평가 대상자의 종합 인체 적합성 등급을 판정하기 위하여 항목별 인체 적합성을 평가한 후, 평가 항목 별 적용 가능한 대응조치의 형태를 반영한다. 평가 항목의 부적합 시 대응 가능한 조치는 크게 공학적 대응(Category-E)과 관리적 대응(Category-M)으로 구분하였다. 공학적 대응은 보조기계 및 기구의 사용, 설비의 일부 변경 등으로 인체 부적합 항목에 대하여 대응 가능한 경우에 해당한다. 관리적 대응은 1차 대응과 2차 대응으로 구분되는데, 1차 대응의 경우 체조/스트레칭, 치료, 감독 및 보조지원으로 인체 부적합 항목에 대하여 대응 가능한 경우에 해당하며, 2차 대응은 업무 재구성, 근무 변경 등이 해당된다.

### 2.5 Phase 5: Assessment of final grade for evaluation dimensions

인체 적합성의 실무적인 관리를 위하여 평가의 최종 등급은 I, II, III 등급으로 구분하였다(Table 1). I 등급은

모든 평가 항목이 적합한 것을 의미하며, II 등급은 공학적 대응으로 부적합을 해결하거나 오류발생을 대처할 수 있는 경우에 해당한다. I과 II 등급은 해당 업무에 적합함을 의미한다. III 등급은 공학적 대응으로는 부적합함을 예방할 수 없는 항목으로써, 해당 업무에 부적합을 의미한다. 이 경우에 해당하는 항목이 부적합 시에는 우선적으로 1차 관리적 대응을 행한 후, 재평가를 실시한다. 이후에도 해당 항목이 부적합을 나타낼 시에는 2차 관리적 대응으로 업무 재구성 및 근무 변경 등을 고려해야 한다.

Table 1. Level of anthropometry suitability

Level	Criteria	Suitability /possibility
I	All suitability	Suitability
II	Non-suitability of engineering improvement essential dimension	
III	Non-suitability of management improvement essential dimension	Non-suitability (In case of type 2)

### 3. Case study: Main Control Room in Nuclear Power Plant

본 연구에서 제시한 인체 적합성 평가 절차를 서론에서 언급했던 원전발전소 주제어실에 적용하여 절차의 효용성을 평가하였다.

#### 3.1 Phase 1: Selection of the anthropometry suitability evaluation dimensions

**Design variable and anthropometry dimensions:** Session 2.1에서 제시한 인체 적합성 평가 항목 선정 절차를 따랐다. 먼저, 원전 주제어실의 다양한 설비 중 인체 특성치를 가장 많이 적용하고 있는 제어반 패널과 워크스테이션을 대상으로 선정하였다. 대상 항목에 대한 설계변수 및 관련 인체 변수를 도출하기 위하여 미국 원자력규제위원회에서 제시한 인간공학 지침인 Human-System Interface Design Review Guidelines(NUREC-0700)을 검토하였다.

대상 항목은 입식콘솔, 좌식콘솔, 수직 패널이며, 세부 설계 변수 16 개와 그에 따른 인체 특성 변수 총 34 개(중복되는 인체 특성 변수를 제외하면 총 16 개)를 도출하였다(Table 2).

Table 2. Design variables and anthropometry dimensions for MCR

No	Type	Design variable	Anthropometry dimension
1	Stand-Up Console	Console Height	Arm length
2		Control Height	Height
3			Radius of reach
4		Benchboard Slope	Radius of reach
5		Maximum Distance of Controls	Extended functional reach

		from the Front Edge of the Console	
6		Display Height and Orientation	Eye height from floor
7			Visual field
8		Location of Frequently Monitored Displays	Visual field
9		Location of Infrequently Monitored Displays	Visual field
10		Equipment (Standing)	Stature
11			Eye height from floor
12			Functional reach
13			Finger tip height
14			Extended functional reach
15			Shoulder height
16			Elbow height
17		Equipment (Sitting)	Eye height above seat
18			Functional reach
19			Sitting height
20			Shoulder height above seat surface
21			Extended functional reach
22			Knee height
23			Buttock-popliteal length
24		Thigh clearance height	
25	Sit-Down Console	Console Height	Sitting height
26		Control Height	Radius of reach
27		Benchboard Slope	Functional reach
28		Display Height and Orientation	Visual field
29		Lateral Spread of Controls and Displays	Visual field
30	Extended functional reach		
31	Vertical Panels	Control Height	Stature
32			Arm length
33		Display Height	Visual field
34			Eye height from floor

**Questionnaire, FGI, Expert's advice, and Literature review:** Table 2의 1차 선정된 항목들 중 인적오류 측면에서 고려해야 할 항목을 파악하기 위하여 설문조사 및 FGI를 실시하였다. 설문대상은 원전

주제어실에서 근무한 경력이 있는 원전 운영 전문가 3인과 원전 주제어실 설계 및 평가 경력이 있는 인간공학 전문가 9인 등 총 12명이며, 평가 후 면담으로 정성적 의견을 수집하였다. 설문은 설계 치수 혹은 인체 특성 변수가 서로 부적합할 경우, 직무/업무 수행 중 인적오류 발생에 영향을 줄 가능성이 어느 정도인지를 상, 중, 하로 평가하도록 하였다. 인적오류와 관련성이 높은 인체 특성 변수를 선정하기 위하여 상, 중, 하로 평가된 전문가의 평점을 분석하였다. 평가 기준은 상, 중 빈도의 비율이 전체 70% 이상을 차지하는 항목을 우선 순위로 선정하는 것이다(1). 여기서, N은 평가 총수를 나타낸다.

$$\text{평가항목 비율(\%)} = (\text{상빈도} + \text{중빈도}) / N \times 100 \quad (1)$$

Table 2의 항목은 설계 변수와 관련된 인체 치수 항목만을 고려한 것이다. 하지만 인적오류는 사람의 인지/지각, 행동/행위 등의 각 단계에서 발생하는 과오이기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 원전 전문가 3인과 원자력 발전소 연구 1인, 원자력 규제 전문가 1인, 인간공학 전문가 3인을 대상으로 추가 항목 도출 및 검토를 수행하였다. 추가 항목 도출을 위해서는 디지털 기반 주제어실에서 고려해야 할 항목 및 인적오류 관리 측면에서 실무적인 적용성을 고려 하였다. 위와 같은 절차를 토대로 원전 주제어실에서 고려해야 할 인체 적합성 평가 항목을 인체치수, 인지/지각, 행동/행위로 분류하여 세부 항목을 선정하였다(Table 3).

Table 3. Anthropometry suitability evaluation dimensions in MCR

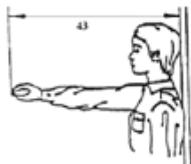
Categorize I	Categorize II	Evaluation dimension
Size	Height	Height
		Sitting height
	Eye height	Eye height from floor
		Eye height above seat
	Arm	Arm length
		Functional reach
		Extended functional reach
		Radius of reach
	Cognitive /perceptual	Visual and auditory
Peripheral perception		
Hyperopia/Myopia/Astigmatism		
Color blindness		
Auditory acuity		
Action /behavior	Hand and Finger	Finger dexterity
		Hand function
	Whole body	Body angle
	Muscle	Manual muscle test

최종적으로 인체 치수 관련 8 항목, 인지/지각 관련 5 항목, 행동/행위 관련 4 항목으로 총 17 항목을 원전 주제어실 인체 적합성 평가 항목으로 도출하였다.

### 3.2 Phase 2: Establish of measurement method according to evaluation dimensions

최종 도출된 인체 적합성 평가 항목에 대하여 실무자가 직접 측정 가능하도록 문헌조사를 통하여 관련 자료 및 필요 장비 항목을 정리하였다. 필요한 변수의 경우 각 평가 항목별 측정 항목 정의, 측정자세, 측정기준, 측정방법 및 실무 등을 지침으로 제공하였다. Table 4 는 기능적 뺨침 범위에 대한 정의, 측정자세, 측정 방법 및 관련 사진을 예로 나타낸 것이다.

Table 4. Measurement of the anthropometry dimensions (Example: Functional reach)

Anthropometry dimension	Functional reach
Define	The horizontal distance from the wall to the tip of the thumb
Posture	Anatomical standing posture
Measurement method	Measure with the subject's forward, and the index finger touching the tip of the thumb
Figure*	

\* Source: Stephen Pheasant (1996)

인체 치수와 관련된 항목은 Size Korea의 자료를 활용하였다(Size Korea, 2011). 기능적 뺨침 범위, 최대 팔 뺨침 범위, 그리고 회전 반경의 측정 방법은 Pheasant (1996)의 자료를 참고하였다. 시정각의 경우, 시야 측정은 페르스테르 시야계를 사용하며, 주변 지각은 Peripheral perception test를 실시하여 측정한다. 측정에 대한 방법 및 해석은 LaGrone et al. (1943)을 따른다. 원/근/난시 검사는 방사선 지표 검사를 따르며, 색각 이상검사는 적녹시 색맹검사표를 활용한다. 청력검사는 순음청력검사를 실시한다. 손가락 기민성(finger dexterity) 검사는 O'Connor 손가락 기민성 검사 방법(Corlett et al., 1971), 손 기능 검사는 Jebsen-Taylor의 Hand function test의 방법을 활용한다(Jebsen et al., 1969). 전신의 각도 측정을 위하여 ISO 1226에서 제시하는 측정 방법을 활용하며, 근육의 근력을 측정하기 위해서는 도수근력(MMT: Manual muscle test) 측정 방법을 활용한다(Magee, 2007).

### 3.3 Phase 3: Establish of criteria for suitability evaluation dimensions

인체 치수와 관련된 변수들의 적합성 기준은 NUREC-0700에서 주제어실 설계에 고려하도록 요구한 평가항목별 인체 기준치를 적용하였으며, 치수 이외에 인지/지각 및 행동/행위 변수는 3.2절에서 언급한 문헌을 토대로 기준을 설립하였다(Table 4).

인체 치수와 행동/행위의 경우 제시된 기준 범위 내에 측정치가 포함되면 적합한 것으로 평가되며, 원/근/난시, 색각이상, 청력의 경우에는 이상의 유무로 적합성을 평가한다. 손가락 기민성에 대한 적합성 기준은 기계조작이 가능한 표준점수 5.5이상으로 결정하였다(Corlett et al.,1971). 손 기능에 대한 적합성 기준은 Table 4와 같으며, 이는 한국성인의 정상범위를 기준으로 선정한 것이다(Kim et al., 1984). 전신의 각도에 대한 적합성 기준은 ISO 1226를 따른다. 도수근력(MMT: Manual muscle test) 의 적합성 기준은 G 등급(중력을 이기고, 최적의 저항을 이김)이상으로 결정하였다(Magee, 2007). 이는 원전의 특성상 보수적 평가를 위한 기준으로 힘을 발휘하기에 전혀 무리가 없는 정상 상태를 의미한다.

Table 4. Criteria for suitability evaluation dimensions

Categorize I	Categorize II	Evaluation dimension	Criteria
Size	Height	Height	F 5th %-ile ~ M 95th %-ile
		Sitting height	F 5th %-ile
	Eye height	Eye height from floor	F 5th %-ile ~ M 95th %-ile
		Eye height above seat	
	Arm	Arm length	F 5th %-ile ~ M 95th %-ile
		Functional reach	
		Extended functional reach	
Radius of reach			
Cognitive /perceptual	Visual and auditory	Visual field	Left/right: 35°/35°, Upper: 35° Under: 25°
		Peripheral perception	Left/right: 35°/35°, Upper: 35° Under: 25°
		Hyperopia/Myopia/Astigmatism	O, X
		Color blindness	O, X
		Auditory acuity	O, X
Action /behavior	Hand and Finger	Finger dexterity	Standard score: over 5.5
		Hand function	W: 9.0s
			T: 3.3s
			P: 5.6s
			SF: 7.3s
			SC: 3.1s
			PL: 3.0s
	PH: 2.9s		
	Whole body	Body angle	Neck: under 25° Trunk: under 60°
Muscle	Manual muscle test	Over G grade	

\* W: Writing, T: Turning over 3-by 5inch card, P: Picking up small object, SF: Simulated feeding, SC: Stacking checkers, PL: Picking up large light object, PH: Picking up large heavy objects

### 3.4 Phase 4: Establish of rating scale and improvement methods according to evaluation dimensions

3.2절에서 제시한 평가 항목별 측정방법을 토대로 평가대상자를 측정 한 후, 3.3절의 기준에 의하여 적합성 여부를 적합(S)과 부적합(U)의 2가지 척도로 평가한다. Table 3에서 도출한 주제어실 인체 적합성 평가 항목에 대하여 원전 인간공학 전문가의 의견을 토대로 각 항목별 가능한 대응조치를 공학적 대응과 관리적 대응으로 구분하였다(Table 5).

Table 5. Improvement method according to evaluation dimensions

No.	Evaluation dimension	Improvement method
1	Height	Engineering (Category-E)
2	Sitting height	
3	Eye height from floor	
4	Eye height above seat	
5	Arm length	
6	Functional reach	
7	Extended functional reach	
8	Radius of reach	
9	Visual field	
10	Peripheral perception	Management (Category-M)
11	Hyperopia/Myopia/Astigmatism	
12	Color blindness	
13	Auditory acuity	
14	Finger dexterity	
15	Hand function	
16	Body angle	
17	Manual muscle test	

### 4. Management guideline for anthropometry suitability assessment

본 연구에서 제안한 인체 적합성 평가 절차를 토대로 주제어실 운전원의 인체 적합성 관리 지침을 작성하여 인체적 부적합으로 발생할 수 있는 인적오류를 대처하고자 한다. 인체 적합성 관리 지침은 선발, 배치, 업무 관리 시 활용할 수 있도록 작성하였다. 지침의 내용에는 1) 책임, 2) 평가대상, 3) 평가시기, 4) 평가 항목에 대한 측정 방법 및 기준, 5) 측정 장비 선정, 6) 측정 및 평가 7) 항목별 기준에 따른 적합성 평가, 8) 자료의 공유, 9) 자료의 보관, 10) 인체 적합성 평가 등급에 따른 관리로 구분하였다(Table 6).

각 지침의 내용은 인체 적합성 관리 지침의 적용 시기에 따라 책임, 평가대상, 평가시기, 자료 공유의 범위 등에 차이가 있을 수 있다. 또한 본 지침을 적용하고자 하는 발전소의 특성을 반영하여 지침의 내용이 일부 변경될 수 있다.

Table 6. Contents of management guideline for the anthropometry suitability assessment

Content	Recruitment	Job arrangement	Job management
1. Director	- Human resources manager - Health and safety manager	- Human resources manager - Health and safety manager - Management supporter	- Human resources manager - Health and safety manager - Management supporter
2. Subject	- All applicant	- Qualified person in MCR - Job rotation and arrangement case	- All crews in MCR
3. Evaluation period	- With physical examination	- Planning the job rotation and arrangement	- Regular: once a year - Special: change the facilities/ accident occurrence - other: require of crew
4. Measurement method and criteria	- Followed by phase 2 & 3 (Reference)	- Followed phase 2 & 3 (Reference)	Followed phase 2 & 3 (Reference)
5. Selection of equipment	- Health and safety manager	- Health and safety manager	- Health and safety manager
6. Measurement and evaluation	- Health and safety manager	- Health and safety manager	- Health and safety manager
7. Suitability evaluation	- Followed by phase 3 & 4	- Followed phase 3 & 4	- Followed phase 3 & 4
8. Data sharing	- Human resources team - Health and safety team	- Human resources team - Health and safety team - Management support team	- Human resources team - Health and safety team - Management support team
9. Data storage	- Until retirement - With personal information - Human resources team	- Until retirement - With personal information and existing data - Human resources team	- Until retirement - With personal information and existing data - Human resources team
10. Management according to suitability grade	- Followed by phase 4	- Followed by phase 4	- Followed by phase 4

## 5. Discussions

본 연구에서는 원전 종사자를 위한 인체 적합성 평가 절차를 개발하여 이를 주제어실에 적용하여 그 효율성을 검토하였다. 또한 개발한 인체 적합성 평가 절차를 기반으로 주제어실 운전원의 인체 적합성을 관리하기 위한 지침의 일반적인 체계를 제안하였다.

본 인체 적합성 평가 절차 및 지침을 실제 원전에 적용하기 위해서는 연구에서 제안한 전체적인 체계를 따르되, 실제 적용 발전소의 전반적인 상황을 검토해야 한다. 첫째로, 적합성 평가 항목을 선정하기 위해서는 본 지침을 적용하려는 원전의 핵심설비, 기계/기구, 시스템을 검토하여 인간-시스템 상호작용(MSI)에서 적용해야 할 평가 항목을 도출해야 한다. 또한 기존 인적오류 정지/사고 사례 분석을 통하여 인간-시스템 상호작용(MSI)의 부적합으로 발생한 경우를 확인 및 검토해야 한다. 마지막으로, 1차적으로 선정된 항목에 대하여 운전원, 원전 설계 전문가 그리고 인간공학자의 의견을 반영하여 선정의 타당성을 검토해야 한다.

인체 적합성 평가 항목에 대한 측정 및 기준 마련은 적합여부를 결정하는 가장 중요한 단계이다. 따라서 측정 방법 및 평가 기준에 대한 정확한 기준과 정보를 제공하고 관리자를 대상으로 별도의 교육훈련을 동반해야 한다. 평가 항목에 대한 기준을 마련하기 위해서는 우선적으로 참고문헌 및 기타 자료의 충실한 검토가 필요하다. 그리고 원전 혹은 이와 유사한 분야의 데이터를 활용할 수 있도록 자료를 확보해야 한다.

선정한 인체 적합성 평가 항목에 대하여 실제 현장에서 적용 가능한 대응조치의 형태를 결정하기 위하여 대상 현장의 특성에 대한 인간공학적 조사가 동반되어야 한다. 현장 조사는 인간공학 전문가, 설계 전문가, 정비기술팀, 계통기술팀, 기계팀 등의 유지·보수, 개선 관련자가 함께 참여해야 한다.

본 연구에서 제안하는 인체 적합성 종합 등급은 단지 관리적인 편의를 위한 것으로 종사자의 인사적 평가나 선정 및 배치를 위한 필수적 정보는 아니면 우선시 될 수 없다. 그러나 주제어실에서 인적오류에 의한 정지/사고가 빈번히 발생하거나 인적오류 대처가 중요시 되는 직무 및 상황에서는 세부 항목에 따라 적절한 보완 조치를 적용하도록 연계하는 정보로 사용 가능하다. 또한 개별 현장에서는 종사자별로 주의해야 하는 특정 설비 및 관련된 특정 인체 특성 항목의 선정은 물론 적합성 불충분에 대한 대응조치를 전략적으로 다양하게 재구성 할 수 있을 것이다.

원전의 인적 오류를 예방하기 위하여 부서/배치 적합성 평가, 종사자 업무적합성 판단(FFD) 기준 개발, 디지털 기기 도입에 따른 인적 오류 평가 방법 기술개발 등의 다양한 노력들을 수행하였다(Lee et al., 2011). 하지만 본 연구에서 제안하고 있는 인체 적합성에 대한 항목은 아직까지 고려되지 못하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 인체 적합성 평가 절차 및 관리 지침은 원전에서 근무자의 인적 수행도를 향상 시킬 수 있으며, 최종적으로는 인체 특성상의 부적합으로 발생할 수 있는 희귀성(rare) 인적오류를 사전에 예방하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본 적합성 평가를 통해 수집한 자료는 직무능력 향상 프로그램(work hardening, work conditioning) 또는 교육훈련 프로그램 개발 시 유용하게 활용될 것이다.

본 연구에서는 원전 주제어실에서 발생한 기존 정지/사고 등의 사례분석 및 현장조사가 함께 이루어지지 못했다는 한계점을 가지고 있다. 또한 적합성 평가 항목 선정 시 조사대상자의 수가 다소 부족하다는 단점이 있다. 마지막으로 제안된 인체 적합성 평가 방법 및 지침을 일부 운전원을 대상으로 시험 적용하여 타당성을 확보해야 하는 보완점이 남아있다. 따라서 추후 연구과제로 본 인체 적합성 평가 절차 및

관리지침에 대한 검증을 진행 할 예정이다. 또한 주제어실 뿐만 아니라 다양한 직무 및 현장에 대하여 인체 적합성을 평가 및 관리하기 위한 관련 평가 항목 선정 및 기준 마련에 대한 연구를 수행할 예정이다.

## 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

Agency for Technology and Standards, *Design for Control rooms of Nuclear Power Plants*, KS C IEC 60964, 2004.

Cha, W.C. and Kim, N.C., A study of the Evaluation for the Control Room in Human Machine System Under Hybrid Environment, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 28(2), 1-8, 2009.

Corlett, E.N., Salvendy, G. and Seymour, W.D., Selecting operators for fine manual tasks: A study of the O'Connor finger dexterity test and the purdue pegboard, *Occupational Psychology*, 45(1), 57-65, 1971.

EPRI, *Human Factors Guidance for Control Room and Digital Human-System Interface Design and Modification – Guidelines for Planning, Specification, Design, Licensing, Implementation, Training, Operation, and Maintenance*, No. 1008122, 2004.

IAEA, *Safety of nuclear power plants: design, Safety Standards*, Series No. NS-R-1, 2000.

IEEE, *IEEE Guide for the Application of Human Factors Engineering in the Design of Computer-Based Monitoring and Control Displays for Nuclear Power Generating Stations*, IEEE-STD-1289, 1998.

ISO 1126: *Ergonomics-evaluation of static working posture* (12.00). Beuth, Berlin, 2000.

Jebsen, R.H., Taylor, N., Trieschmann, R.B., Trotter, M.J. and Howard, L.A., An objective and standardized test of hand function, *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 50(6), 311-319, 1969.

KOPEC, *Human Factors Engineering Guideline*, HF-010, 2006.

Kim, Y.H., Choi, M.S. and Kim, B.W., Assessment of hand function in normal Korean adults by Jebsen hand function test, *Annals of Rehabilitation Medicine*, 8(2), 1984.

LaGrone, C.W. and Holland, B.F., Accuracy of perception in peripheral vision in relation to dextrality, intelligence and reading ability, *The American Journal of Psychology*, 56(4), 592-598, 1943.

Lee, D.H., An experiment for top-down suitability verification for layout of Korea next generation reactor control room equipment, *Theses collection*, 18, 333-340, 2000.

Lee, Y.H., "Facilitating HRA through the Input from HIS Design", *2-nd OECD/NEA Workshop on Building the New HRA*, 2002.

Lee, Y.H., Jang, T.I., Lee, Y.H., Oh, Y.J., Kang, S.H. and Yun, J.H., Research Activities and Techniques for the Prevention of Human Errors during the Operation of Nuclear Power Plants, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 30(1), 75-86, 2011.

Magee, D.J., *Orthopedic physical assessment*, 5th ed, Saunders, 2007

Ministry Government Legislation, *Enforcement decree of the atomic energy act 299*(Medical examination), 2013.

Ministry Government Legislation, *Enforcement decree of the atomic energy regulation 115*(Medical examination), 2013.

Ministry of Land, *Infrastructure and Transport*, Aeromedical licensing system, 2013.

Pheasant, S., *Body space; anthropometry, ergonomics and the design of work*, 2nd Ed., Taylor & Francis, 1996.

Size Korea Home Page, <http://sizekorea.kats.go.kr> (retrieved Dec. 1, 2011).

Song, T.Y. and Lee, N.Y, A Study on Suitability Evaluation for Design of Soft Control and Safety Console in Advanced Control Room of Korea Nuclear Power Plants, *Journal of Chungnam Science*, 31, 45-54, 2004

URNRC, *10CFR26, Fitness-For-Duty (FFD) Program*, 2009.

URNRC, *Human-System Interface Design Review Guidelines*, NUREC- 0700, rev.2, 2011.