

Digital Human Simulation 을 활용한 방사성 폐기물 처리장 주제어실의 인간공학적 평가*

Ergonomic Evaluation of a Control Room Design of Radioactive Waste Facility using Digital Human Simulation

이백희**, 장윤**, 정기효**, 정일호***, 유희천**

** 포항공과대학교 기계산업공학부

*** 한국전력주식회사 계측제어기술처

ABSTRACT

방사성 폐기물 처리장(이하, 방폐장) 주제어실은 안전한 운용과 장시간 감시 작업으로 인한 운전원 피로를 예방할 수 있도록 인간공학적인 설계와 평가가 필요하다. 본 연구는 digital human simulation (DHS) 기법을 활용하여 국내 적용 예정인 방폐장 주제어실 개념 설계에 대한 인간공학적 평가와 개선 방향을 분석하였다. 본 연구의 DHS 평가에는 한국인 남성 20 ~ 50대를 90% 수용하는 가상인체모델 3명(5th, 50th, and 95th percentiles)과 향후 20년간 신장에 대한 추세변동(secular trend; 약 4 cm로 예측)을 반영하는 가상인체모델 1명(99th percentile)이 활용되었다. 방폐장 주제어실의 설계 적합성은 네 가지 측면(자세 안락도, 도달성, 시계성, 그리고 여유공간)의 인간공학적 평가와 원자력 시설 관련 지침인 NUREG-0700 규격 충족 여부를 종합적으로 고려하여 분석되었다. DHS 평가를 통해 설계 개선이 요구되는 것으로 파악된 설계항목에 대해서는 설계 개선 방안을 개발하고 개선 효과를 분석하였다. 본 연구를 통해 평가 및 개선된 방폐장 주제어실 개념설계는 방폐장 주제어실 개발 시 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

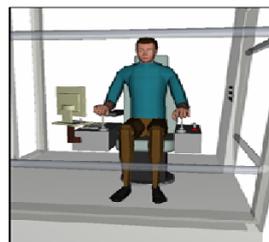
Keyword: Digital human simulation, 주제어실, 방사성 폐기물 처리장

1. 서 론

방사성 폐기물 처리장(이하, 방폐장)은 원자력발전소에서 발생하는 중·저준위 방사성 폐기물을 처리하는 시설이다. 우리나라는 향후 임시저장시설의 포화를 고려해 경상북도 경주시에 2012년까지 방폐장을 신설할 계획이다(한국방사성폐기물관리공단, 2009).

방폐장 주제어실은 운전원의 효과적인 감시 작업 수행과 장시간 작업 수행으로 인한 피로를 감소시켜 줄 수 있도록 설계 초기부터 인간공학적 고려가 필요하다. 주제어실의 인간공학적 설계는 장시간 지속적인 감시 작업으로 인한 운전원의 신체적 피로 경감, 그리고 안전사고 예방에 도움이 될 수 있다.

가상인체모델을 이용한 digital human simulation (DHS)은 작업 공간의 인간공학적 설계에 유용하게 활용되고 있다. 이상기 외(2005)와 박장운 외(2008)는 천장 크레인 운전공간 설계와 한국형 헬리콥터 조종실 설계에 대해 DHS를 활용한 인간공학적 평가를 통하여 개선이 요구되는 설계요소를 파악하고 개선 방안을 제시하였다(그림 1 참조).



(a) 이상기 외, 2005



(b) 박장운 외, 2008

그림 1. DHS를 활용한 인간공학적 평가 사례

* 본 논문은 2009년 한국전력주식회사 위탁연구과제의 지원을 받아 수행되었음.

본 연구는 DHS를 활용해 방폐장 주 제어실의 예비 설계(preliminary design)를 평가하고 개선 설계요소를 분석하였다. 먼저, DHS 평가를 위해 예비 설계에 대해 3차원 CAD 모델을 개발하였다. DHS 평가는 Jack®을 활용하여 이루어졌으며, 4명의 대표인체모델(5th, 50th, 95th, and 99th percentiles)이 생성되었다. 방폐장 주 제어실의 설계는 네 가지 인간공학적인 기준(자세 안락도, 도달성, 시계성, 그리고 여유공간)을 적용해 평가되었으며, 인간공학적인 평가 결과를 토대로 개선이 요구되는 설계요소와 개선 방향이 분석되었다.

2. 평가 방법

2.1 가상인체모델

DHS 평가를 위한 대표인체모델로서 설계대상인구의 90% 수용과 향후 20 년간의 추세변동을 고려하여 그림 2 와 같은 4 명이 선정되었다. 설계대상인구는 방폐장 운전원의 연령대와 성별을 고려해 20 ~ 50 대 남성($n = 1,992$)으로 설정되었으며, 2004 년 한국인 인체측정자료(Size Korea, 2004)의 90%를 수용하는 3 명의 대표인체모델(5th, 50th, 95th percentiles)이 선정되었다. 또한, 추세변동을 고려하기 위해 설계대상인구의 1979 년부터 2004 년까지의 신장 변화를 분석하여 95th percentile 인체모델의 신장보다 약 4 cm가 큰 99th percentile 인체모델이 추가로 선정되었다.

가상인체모델은 정의된 대표인체모델의 인체체크기 정보를 Jack 에 입력하여 생성되었다. 가상인체모델을 생성하기 위해서는 27 개 인체변수에 대한 크기를 입력해야 한다. 본 연구는 Size Korea 에서 제공되는 24 개의 치수는 직접 입력하고, 나머지 3 개(손 너비, 머리 길이, 엄지 손끝 길이)의 치수는 입력된 인체변수 값에 근간한 Jack 의 추정치를 사용하였다.

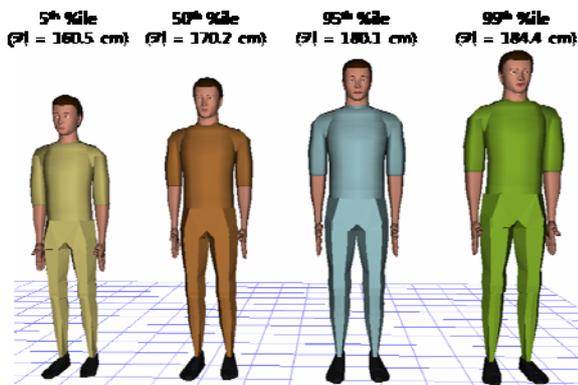


그림 2. Jack을 이용해 생성된 가상인체모델

2.2 평가 기준 자세

본 연구는 컴퓨터 작업 자세와 관련된 기존 연구를 참고하여 DHS 평가를 위한 운전원 감시 자세를 설정하였다. 본 연구는 방폐장 주 제어실 감시 작업과 특성이 유사한 컴퓨터 작업에 대한 기존 연구들(ANSI/HFES, 2007; Chaffin and Andersson, 1984; Grandjean et al., 1983)의 추천 자세를 참고하여 그림 3과 같은 평가 기준 자세를 설정하였다.

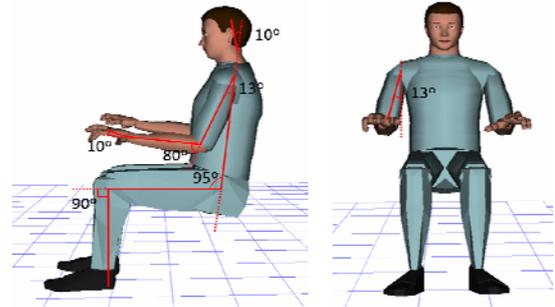


그림 3. 평가 기준 자세

2.3 인간공학적인 평가 기준

본 연구의 평가에는 네 가지 인간공학적인 평가 기준이 고려되었으며, 주 제어실 설계요소 별 평가 기준은 해당 설계요소의 특성을 고려해 표 1과 같이 설정되었다. 인간공학적인 평가 기준은 기존 DHS 평가 연구들(박장운 외, 2008; Bowman, 2001; Nelson, 2001)에서 활용된 자세 안락도, 도달성, 시계성, 그리고 여유공간으로 결정되었다. 또한, 평가 기준은 표 1과 같이 설계요소의 특성에 따라 선택적으로 적용되었다.

표 1. 설계요소와 평가 기준 연관관계 분석 예

순번	설계 요소	자세 안락도	도달성	시계성	여유 공간
1	Console	○	×	×	○
2	LDP	○	×	○	×
3	LCD	○	×	○	×
4	CCTV master control rack	○	○	×	×
5	Main fire control panel	○	○	×	×

방폐장 주 제어실의 설계 적합성 판단은 인간공학적인 평가 결과의 NUREG-0700 (O'Hara et al., 2002) 설계 지침충족 여부 분석을 통해 이루어졌다. NUREG-0700은 원자력발전소에 사용되는 각종 설계 요소에 대한 인간공학적인 설계 지침을 제공하고 있다.

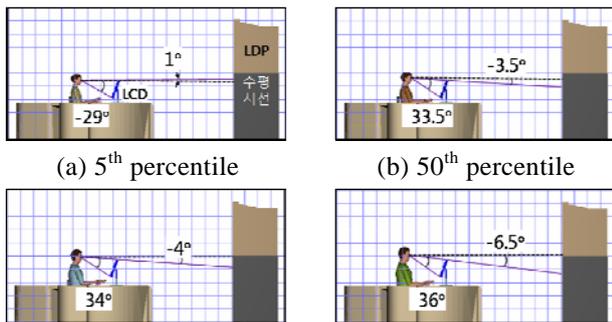
3. 평가 사례

본 연구는 방폐장 주제어실의 대표적인 세 가지 설계요소(console, LDP, LCD)에 대한 인간공학적 적합성 평가 결과를 일부 소개한다. 먼저, console의 최소여유공간은 가상인체모델 4명에 대해 1.6 ~ 6 cm로 분석되어 다리 움직임 공간을 충분히 제공할 수 있어야 한다는 NUREG-0700의 설계기준을 만족하는 것으로 파악되었다. 최소여유공간 크기는 다리와 console 간의 최단 거리로 계산되었으며 가상인체모델의 인체크기가 클수록 감소하는 경향이 있는 것으로 나타났다.



(a) 95th percentile (b) 99th percentile
그림 4. Console의 다리 여유공간 분석 결과

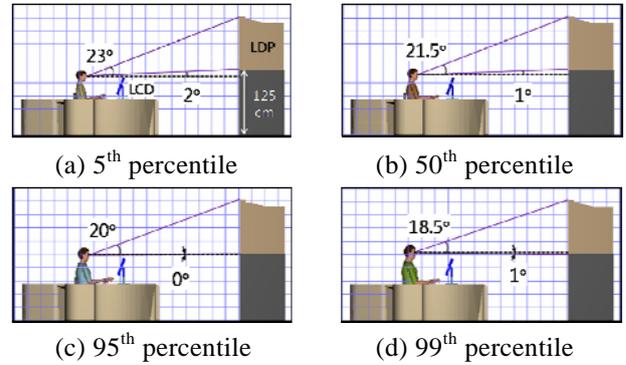
LCD 수직 시야 범위는 NUREG-0700의 설계기준을 만족하는 것으로 분석되었다. LCD 수직 시야 범위는 평가 기준 자세에서 가상인체모델이 LCD를 바라보는 시야 각도로 계산되었다. 그림 5에 나타난 것과 같이, 가상인체모델들의 LCD 수직 시야 범위는 -36 ~ 1°로 파악되어, NUREG-0700의 설계기준인 -40 ~ 20°를 만족하는 것으로 분석되었다.



(a) 5th percentile (b) 50th percentile
(c) 95th percentile (d) 99th percentile
그림 5. LCD 수직 시야 범위

LDP의 수직 시야는 그림 6과 같이 수평시선보다 높게 형성되어 장시간 감시 작업을 수행할 경우 자세가 불편할 수 있는 것으로 나타났다. 가상인체모델들의 LDP 수직 시야 범위는 -1 ~ 23°로 파악되었으며, 이는 전체 LDP 화면을 볼 수 있어야 한다는

NUREG-0700의 설계기준을 만족한다. 그러나, LDP 시야 각은 기존 문헌의 표시장치 권장 시야 각도(Grandjean et al., 1983: -26 ~ -2°; 김철중 외, 1991: -56 ~ -1°; NUREG-0700, 2002: -40 ~ 20°)를 크게 벗어나는 것으로 나타났다.



(a) 5th percentile (b) 50th percentile
(c) 95th percentile (d) 99th percentile
그림 6. LDP 수직 시야 범위

LDP 높이를 낮추어 수직 시야 각을 개선하기 위해서는 LCD 높이를 함께 낮춰야 하는 것으로 분석되었다. LDP 수직 시야는 LDP의 높이를 낮추어 개선될 수 있으나 그림 7에 나타난 것과 같이 LDP 높이를 낮출 경우 LCD에 의한 시야간섭이 발생 할 수 있다.

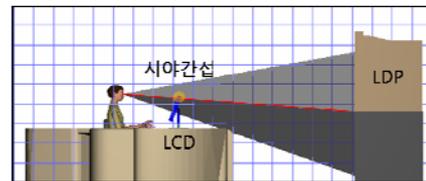
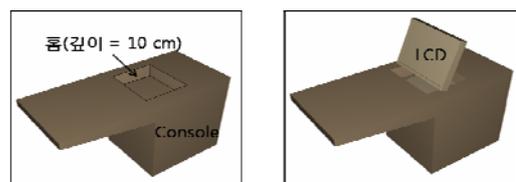


그림 7. LDP와 LCD의 시계성 연관관계

LCD에 의한 시야 간섭은 그림 8과 같이 console에 홈을 설치함으로써 효율적으로 제거될 수 있다. 깊이 10 cm인 홈 구비를 통해 LDP 수직 높이를 115 cm(기준: 125 cm)로 낮출 경우, 그림 9와 같이 LDP 수직 시야 범위는 -3 ~ 19°(기준: -1 ~ 23°)로 최대 4° 개선되는 것으로 파악되었다. 한편, LCD 설치 홈을 구비할 경우 LCD 수직 시야 범위는 -31 ~ -2.5°로 나타나 NUREG-0700의 설계기준(-40 ~ 20°)을 만족하는 것으로 파악되었다.



(a) LCD 설치 홈 (b) LCD 설치 모습
그림 8. Console의 LCD 설치 홈

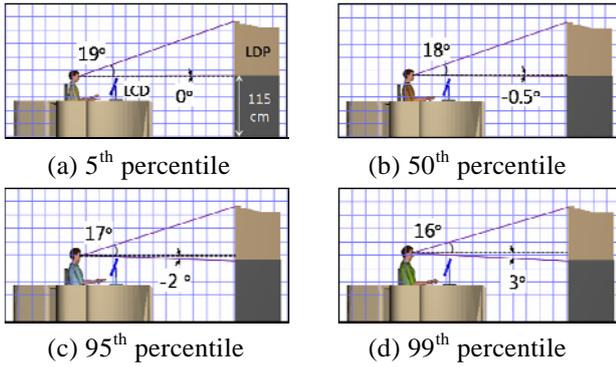


그림 9. 개선된 LDP의 수직 시야 범위

4. 결론 및 토의

본 연구는 Jack을 활용하여 방폐장 주제어실의 개념 설계에 대한 인간공학적인 평가와 NUREG-0700 설계기준 충족 여부를 분석하였다. 본 연구를 통해 평가 및 개선된 방폐장 주제어실 예비 설계는 방폐장 주제어실 구축 시 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

본 연구의 평가에는 한국인 인체크기 정보와 추세변동을 적용하여 생성된 가상인체모델들이 활용되었다. 대표인체모델은 방폐장 주제어실 운전원의 인구학적 특성을 고려하여 20 ~ 50대 남성의 90%를 수용하는 3명(5th ~ 95th percentiles)으로 정의되었다. 또한, 본 연구는 1979년부터 2004년까지의 한국인 신장 정보에 근거하여 향후 20년의 추세적 성장을 반영한 99th percentile 인체모델을 추가로 선정하여 분석하였다.

본 연구는 가상인체모델 생성 시 Size Korea에 누락된 3개 인체변수에 대해 Jack에서 제공하는 추정치를 사용하였으나, 이들 변수들은 다른 인체변수들과 통계적 연관관계가 높은 것으로 분석되었다. 사후 분석으로 US Army 인체측정자료(Gordon et al., 1988)를 이용하여 누락된 3개의 인체변수와 나머지 인체변수들에 대해 stepwise regression 분석을 수행한 결과($p_{in} = 0.05$, $p_{out} = 0.1$), 누락된 3개의 인체변수의 회귀식들이 높은 수정회귀계수($adj. R^2 = 0.52$, 손 너비; 0.83 , 머리 길이; 0.84 , 엄지손끝 길이)를 가지는 것으로 파악되었다.

본 연구는 기존 연구에서 제시한 computer workstation 작업 자세에 근간해 평가 기준 자세를 설정하였다. 그러나, 본 연구의 방폐장 주제어실은 두 개의 표시장치(LCD와 LDP)가 설치되어 있어 computer workstation과는 작업 자세가 상이할 수 있으므로 보다 적합한 평가를 위해서는 LCD와 LDP를 사용하는 작업 특성을 고려한 평가 기준 자세의 설정이 필요하다.

참고 문헌

- 김철중, 이남식, 김진호, 박세진, 박수찬, 박재희, 조현모, 이윤우, 이희운 (1991). *VDT Workstation의 인간공학적 설계 및 평가기술에 관한 연구*. 한국표준과학연구원, KRISS-93-061-IR.
- 박장운, 정기효, 이원섭, 강병길, 이정효, 엄주호, 박세권, 유희천 (2008). Digital Human Simulation을 통한 인간공학적 헬리콥터 조종실 설계 평가 방법 개발. *대한인간공학회 2008 춘계학술대회지*.
- 이상기, 이민정, 조영석, 권오채, 박정철, 유희천, 한성호 (2005). Digital human simulation을 통한 overhead crane의 인간공학적 설계 및 평가. *대한인간공학회 2005 춘계학술대회지*.
- 한국방사성폐기물관리공단(2009). 중·저준위 월성원자력환경관리센터 사업개요. Retrieved August 21, 2009 from <http://www.krmc.or.kr>.
- Size Korea (2004). 한국인 인체측정 통계자료. Retrieved September 26, 2009 from <http://sizekorea.kats.go.kr>.
- ANSI/HFES (2007). *Human Factors Engineering of Computer Workstations*. California, USA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Bowman D. (2001). Using digital human modeling in a virtual heavy vehicle development environment. In Chaffin, D. B. (Ed.), *Digital Human Modeling for Vehicle and Workplace Design*. Warrendale, PA: SAE International.
- Chaffin, D. B., and Andersson, G. (1984). *Occupational Biomechanics* (2nded.). New York, USA: WileyInterscience.
- Gordon, C. C., Bradtmiller, B., Churchill, T., Clauser, C., McConville, J., Tebbetts, I. and Walker, R. (1998). *1988 Anthropometric Survey of US Army Personnel: Methods and Summary Statistics* (Technical Report NATICK/TR-89/044). US Army Natick Research Center: Natick, MA.
- Grandjean, E. (1987). *Ergonomics in Computerized Offices*. Philadelphia, USA: Taylor & Francis.
- Grandjean, E., Hunting, W., and Pidermann, M. (1983). VDT workstation design: Preferred settings and their effects. *Human Factors*, 25,161-175.
- Nelson, C., (2001). Anthropometric Analyses of Crew Interfaces and Component Accessibility for the International Space Station. In Chaffin, D. B. (Ed.), *Digital Human Modeling for Vehicle and Workplace Design*. Warrendale, PA: SAE International.
- O'Hara, J. M., Brown, W. S., Lewis, P. M., and Persensky, J. J. (2002). *Human-System Interface Design Review Guidelines* (DC 20555-0001). U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research.