

Ergonomic Evaluation of the Large Display Panel in the APR1400 Nuclear Power Plant

June-Seung Lee (GraceLeeJS@khnp.co.kr)

Man Machine Interface Group, Central Research Institute of KHNP, Daejeon, 305-343

ABSTRACT

Objective: The aim of this study is to evaluate the large display panel (LDP) in the main control room (MCR) of APR1400 nuclear power plant. A LDP presents the operational information that MCR crew members have to perceive immediately during urgent situations. **Background:** A LDP can provide the shared situation awareness to MCR crew members, support their pattern recognition, and finally improve their team performance. Therefore, a LDP has to be deliberately designed on the basis of ergonomics and in consideration of teamwork. At the same time, its design concept and technical specification should follow the requirements of the license regulations on LDP. **Method:** By reviewing the related regulation requirements, display methods & approaches, and various ergonomic guidelines on LDP, the LDP of APR1400 was evaluated ergonomically. **Results:** APR1400 has a traditional P&ID mimic type LDP. It has strong points in the aspects of supporting metal models and improving pattern recognition. However, it shows weak points on the volume and display format of dynamic information in order to assist MCR crew members to mitigate the events in abnormal situations. **Conclusion:** The LDP of APR1400 needs some design improvements about display methods and approach.

Keywords: Ergonomic evaluation, Large display panel, Main control room, APR1400, Nuclear power plant

1. Introduction

APR-1400 원전은 디지털기반의 계측제어시스템과 첨단 주제어실을 갖추고 있다. 주제어실 전면에 대형정보표시판 (Large Display Panel, 이하 LDP)이 위치한다. 주제어실에 근무하는 1개 운전조(Crew)는 5명으로 구성되며 운전원 1명당 컴퓨터와 모니터로 구성된 1세트의 워크스테이션이 제공된다. 이러한 운전원 콘솔은 2열로 배치되는데, LDP와 가까운 앞 열에는 원자로운전원(Reactor Operator), 터빈운전원(Turbine Operator), 배전운전원(Electrical Operator) 등 3명이, 뒤 열에는 발전팀장(Shift Supervisor), 안전담당(Shift Technical Adviser) 등 2명이 위치한다[1]. 5명의 운전조는 각자의 워크스테이션의 모니터를 통해 각종 발전소 운전정보를 개별적으로 볼 수 있지만, 별도의 탐색(Navigation) 없이 전면의 LDP에 한차례 눈길을 주므로써 발전소 전체 상태를 파악하거나 비정상 사건, 비상사고 상황의 발생 및 그 원인을 즉각 인지할 수 있다. 궁극적으로 운전조는 LDP를 통해 공동의 상황인식과 긴밀한 의사교환을 함으로써 고도의 팀워크를 발휘할 수 있다[2]. 따라서, 잘 설계된 LDP는

주제어실 근무자의 인지적 부하를 경감시키고, 상황인식과 팀워크를 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 문헌조사를 통해 LDP와 관련된 인허가 요건을 살펴보고, 다양한 LDP 화면표시 기법들을 조사하여 APR-1400 LDP 화면표시의 성격과 수준을 파악하고, LDP와 관련된 인간공학지침을 기반으로 현행 APR-1400 LDP에 대한 인간공학 평가를 하고자 한다. 평가항목 중 인체공학적, 환경적 항목(책상과 의자의 높이, 소음과 조도 등)은 해당 원전의 인허가과정에서 충분히 검토되었음을 감안하여 제외하고, 오로지 인지공학적 항목들을 중심으로 비정상사건 및 비상사고 대응, 공동의 상황인식 등 LDP 본래의 목적과 역할에 얼마나 부합하는지 현행 LDP의 유용성을 평가해보고자 한다.

2. Requirements of Regulation on LDP

디지털 기반의 첨단 주제어실에는 주제어실 근무자들이 운전조(Crew)의 직무를 수행하는데 필요한 최소한의 완전

한 한 세트의 '인간기계 연계장치(Human-system Interface, 이하 HSIs)' 일명, '최소재고목록(Minimum Inventory)'이라 불리는 경보, 지시 및 제어장치가 있어야 한다[3]. 인허가 요건 상에는 인허가 신청자(원자력발전회사)로 하여금 주제어실 근무자가 최소재고목록의 HSIs를 어떤 방식으로 접근하도록 구현되는 것이 적합한 지에 대한 기준을 정하고 '고정 위치 연속표시(SDCV; Spatially Dedicated Continuous Visible)', '원클릭 표시(One-step accessible)', '탐색 표시>Selectable)' 등 3가지 형태 중 하나를 선택하여 설계하도록 되어있다[4]. '고정위치연속표시(SDCV)'란 특정 HIS가 불필요한 상황을 포함한 모든 운전조건에서 보여야 한다는 의미는 아니고, 필요한 상황에서 언제든지 연속적으로 보인다면 그 기준을 만족한다고 해석할 수 있다[5]. LDP와 안전제어반(Safety Console; 다수의 디지털 기반 워크스테이션이 동시에 고장났을 때 발전소를 안전정지 시킬 수 있도록 재래식 조작스 위치를 갖춘 후비보호 설비로써 주제어실내에 위치)은 SDCV를 구현하기 위한 설비이다. SDCV로 구현되어야 하는 HSIs의 유형을 요약 정리하면 Table 1과 같다[6].

Table 1. HSIs Categories that should be displayed as SDCV

○ 안전해석상 반드시 수행되어야 하는 수동조치
- 즉각적인 수동조치를 요구하는 경보
- 수동조치전 상태를 파악하기 위한 주요 운전변수
- 수동조치후 필수안전기능 불만족 경보
○ 필수안전기능 상태 감시 및 자동동작 공학적안전 설비(ESF)에 대한 후비보호 제어
- 필수안전기능을 감시하는 주요 운전변수
- 필수안전기능이 위협되고 있음을 알려주는 경보
- 심층방어벽의 건전성 및 안전계통 성능 관련 경보
- 안전계통 작동관련 운전변수 및 작동실패 경보
○ 공통유형고장(CCF)에 대응하기 위한 '심층방어 및 다양성(D3)' 관련 경보
- 즉각적인 수동조치가 필요함을 알려주는 경보
- 필수안전기능을 감시하는 주요 운전변수
○ 필수안전기능 제어를 위한 우선적인 수동조치
- 수동조치 이후 필수안전기능의 불만족 경보
○ 방사능 유출에 관한 사고후 감시
- 방사능 유출을 나타내는 사고후 감시변수의 경보
○ 발전소 안전변수의 감시(SPDS)
- 발전소 안전변수의 경보 (제한치 초과 등)
- 선제적인 안전조치를 요구하는 경보

SDCV에 해당하는 HSIs의 특징은 '시급성(Time Critical)' 또는 '필수안전기능에 위협(Threat to Critical Safety Function)'에 관련된 것이라 할 수 있다.

3. Display Methods & Approaches on LDP

LDP 주요 역할 중 하나인 '상황인식(Situation Awareness)'이란 "제한된 시간적, 공간적 환경 속에서 (직무수행에 필요한) 요소들(Elements)을 인식하고, 그 의미를 이해하고, 가까운 미래의 그 상태를 예측하는 것"이다. 이러한 상황인식에는 3가지 종류가 있는데, 첫째로, 운전조 각자의 직무수행에 필요한 요소들에 대한 상황인식의 종합적인 결합상태를 '팀 상황인식(Team SA)'이라 하고, 팀(운전조) 구성원 각자의 상황인식 실패는 팀 전체의 상황인식 실패로 귀결된다. 반면에 '공유적 상황인식(Shared SA)'이란 공유적 상황인식의 요건에 따라 팀 구성원이 동일한 상황인식을 하는 상태를 말한다. 이러한 공유적 상황인식을 통해 팀원 모두는 '현재 무슨 일이 일어나고 있는지, 다음 차례에는 어떤 일이 일어날 지, 다른 팀원이 수행하고 있는 조치는 어떤 의미가 있는지'에 대해 동일하게 이해하여 팀원간의 효율적인 업무 협조가 가능하다. 마지막으로 '공존적 상황인식(Compatible SA; Distributed SA)'이란 구성원 각자가 자기만의 독특한 상황인식을 하되 의사교환(Communication)을 통해 양립하고 조화되는 상황인식을 하는 상태를 말하며, 공간적으로 위치가 떨어져 있거나 기술부서, 행정부서 등 기능이 다른 부서간의 상황인식이 필요할 경우에도 유용하다[7]. 이 3가지 상황인식 중에 일반적으로 주제어실 LDP는 '공유적 상황인식(Shared SA)'을 하도록 설계된다.

LDP 화면의 계통간, 설비간의 구획의 구분 및 중요성의 구별은 주로 색(Color)을 이용한 컬러 코딩(Color Coding)을 통해 이루어진다. 색의 3가지 구성요소는 색상(Hue), 채도(Saturation), 명도(Lightness)인데, 채도가 높을수록 본래의 색상에 가깝고, 명도가 높을수록 흰색에 가깝게 된다. 컬러코딩의 주요 원칙 중 몇 가지를 살펴보면[8], 같은 계층(Layer: 화면표시내의 요소들을 직무의 중요성에 따라 분석하여 등급화(Ranking)한 것)은 유사한 명도의 색과 동일한 채도의 색을 사용해야 한다. 또한, 가독성은 텍스트(Text)와 배경의 명도의 차이에만 의존하며, 색상 또는 채도의 대비는 가독성과는 무관하다. 이러한 컬러코딩을 통해 다수의 계통들을 구별하는 설계 순서는 (1)배경색을 다르게 하여 계통간의 경계를 표시, (2)직무영역과 미믹(Mimic) 등 계통의 기초 정보를 표시, (3)기기명칭, 단위 등 정적(Static) 정보를 표시, (4)수치, 그래픽 등 동적(Dynamic) 정보를 표시, (5)경보가 표시되도록 한다. Figure 1은 이러한 예를 나타낸다[8].

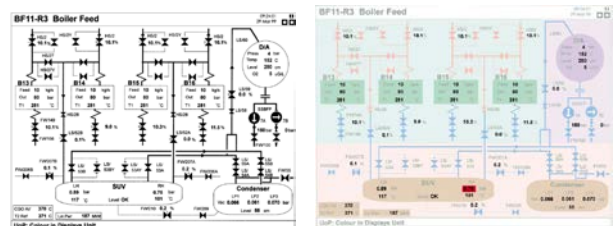


Figure 1. An Example of color coding for several systems

주제어실내에 1개의 대형정보표시반(LDP)과 다수의 ‘중형 발전소부분표시반(Part-plant Overview Displays)’를 제공하여 개별 운전원의 워크스테이션 모니터에 표시되는 수백종의 P&ID(배관 및 계측도면) 형식의 계통 미믹(Mimic)과 조합하여 함께 보면서 운전하도록 하는 방식을 ‘다 계층접근(Multi-layered approach)’ 방식이라 한다[9]. 한편, LDP 화면 표시 형식 중 가장 전통적인 것은 표시하고자 하는 계통을 P&ID(배관 및 계측도면) 형식의 미믹(Mimic)으로 표시하는 것이다. 이외에도 ‘밀집 정보설계(IRD; Information Rich Design)과 ‘생태학적 연계설계(EID; Ecological Interface Design) 등의 표현 형식이 있다. Figure 2는 스웨덴 Holden 인간기계연구소의 HAMIab 중수로 시뮬레이터(HAMBO)의 LDP(IRD 형식)의 국부적 화면표시의 예를 나타낸다[10].

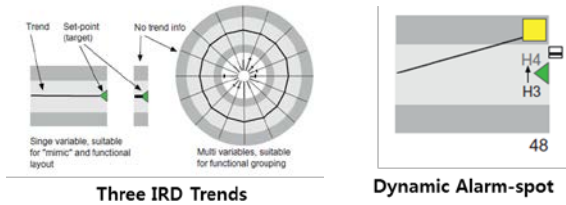


Figure 2. Examples of displays of IRD in HAMBO

Figure 2의 왼쪽 그림은 3가지 형태의 운전변수 추이곡선(Trend)을, 오른쪽은 추이곡선의 운전변수가 경보치를 초과했을 때 노란색 경보표식이 나타남을 보여주고 있다.

4. Ergonomic Evaluation on APR1400 LDP

LDP에 대한 인간공학 평가에 적용할 수 있는 인간공학 지침 중에 미국 원자력규제위원회(NRC) NUREG-0700[11], 스웨덴 Holden 인간기계연구소의 HWR-796[12] 등이 있다. NUREG-0700은 주제어실 뿐만 아니라 원전에서 사용되는 대부분의 HSI에 적용할 수 있는 포괄적인 지침인데 비해, HWR-796은 LDP에 대해서만 적용하기 위해 전 세계 주요 인간공학지침에서 발췌된 총 93개 항목의 지침이다. 이외에도 석유산업계의 LDP 설계, 운전 경험을 총 55개의 항목으로 기록한 HWR-933[13]을 참조하였다. HWR-933은 비록 원전과 다른 정유공장의 사례들을 제시하고 있지만 통찰력(Insight)이 넘치는 다양한 표시형태의 사용전략을 제시한다. 주제어실 운전조(Crew)의 업무(Job)에 관해서는 국내외 연구논문들을 중심으로 문헌조사를 하였고, 비정상 및 비상 상황시의 주제어실 직무를 분석하기 위해 APR1400 원전인 신고리3,4호기의 중요 비정상 및 비상 절차를 검토하였다. Figure 3은 본 연구절차를 나타낸다.

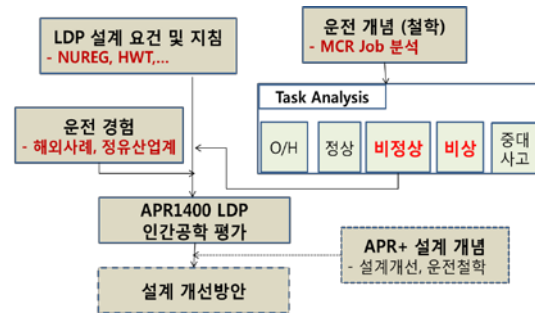


Figure 3. Research Process of this Thesis

현행 APR1400 원전의 LDP는 전통적인 방식인 P&ID 형식의 미믹(Mimic)이다. 이러한 미믹 형식의 장점은 운전원의 ‘심적 모형(Mental Model)’을 지원하고 ‘패턴인식(Pattern Recognition)’을 제공한다. 또한, 미믹을 통해 계통간, 기기간의 물리적, 기능적 상관관계가 시각적으로 제공됨으로 미숙련자들에게 효과적이다. 그러나, 역설적으로 숙련자들에게는 P&ID 형식의 미믹은 무의미하거나 비효율적이다. 계통의 배열, 계통간의 연관관계를 표시하는 정적(Static) 정보의 양은 무척 많은데 반해, 상황별 사건 수습에 필요한 동적(Dynamic) 정보는 상대적으로 부족하다. 또한 P&ID 미믹 상에 표시되는 온도, 압력 등 물리적 상태 지시의 숫자 값(Numbers)은 인지공학적으로 볼 때 이에 대한 별도의 해석이 필요하다. APR1400 LDP에 대한 인간공학 평가(인지공학, 환경적 항목 제외) 결과, SDCV에 관련된 인허가 요건은 충실히 만족하고 있고, 정상출력 운전모드의 발전소 상태는 한눈에 파악하기에 만족스러웠으나, Table 2와 같이 몇 가지 미흡한 사항이 도출되었다.

Table 2. The items needed improvement from the results of ergonomic evaluation on APR1400 LDP

- 정적 표시부분
 - 안전계통과 정상운전계통의 계통간 구분이 어려움
 - 전체적으로 화면 구성이 너무 뻑뻑하고, 특정 부분에서는 지나치게 복잡함 (예: Figure 4)
 - 출력운전모드에 특화 (저온정지모드 유용성 감소)
- 동적 표시부분
 - 많은 운전변수를 숫자로 표시하여 의미 이해 부족
 - 비정상발생시 표시미흡으로 실마리(Cue) 잡기 곤란
 - 비상시 안전계통의 상태 및 유로변경 파악 곤란

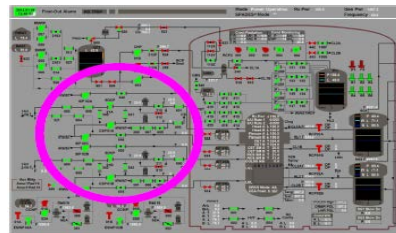


Figure 4. An example(red circle) of display complexity on LDP

Figure 4의 붉은색 원(Circle)으로 표시된 부분은 3개 계통이 복잡하게 연결되어 있으므로 각 계통의 유로 및 운전 상태를 파악하기 어렵다. 3개중 2개 계통은 비상사고시 작동하는 안전주입계통(SI)과 격납건물살수계통(CV)이고, 다른 1개 계통은 고온정지(Hot Shut-down) 운전모드 이하에서만 운전되는 정지냉각계통(SDC)이다. 3개 계통 모두 정상 출력운전(Power operation) 중에서는 사용되지 않는다.

5. Conclusion

APR1400 LDP는 전통적인 방식인 P&ID형 미믹(Mimic)형 식이어서 사용자의 심적 모형과 패턴인식을 지원하므로 숙련과정 중에 있는 사람들에게는 무척 유용하다. 그러나, ‘밀집정보설계(IRD)’ 등 비교적 근래에 개발된 LDP 표시형식에 비해 동적 정보가 부족하고, 운전변수가 대부분 숫자(Number)로 표시되어 있어 인지적인 측면에서 부담이 있다. 또한, 제한된 LDP 화면에 많은 계통의 세세한 부분까지 표시하여 복잡한 느낌을 주고, 계통간 식별이 어렵다. 이러한 미흡항목의 개선방안으로는 우선, 계통간 식별을 강화하기 위한 ‘영역구분(Zoning)’과 계통의 중요성과 사용빈도를 고려한 ‘계층화(Layering)’ 컬러코딩의 적용을 들 수 있다. 또한, 운전변수의 숫자 표시를 줄이는 대신 ‘소형 추세곡선(Mini-trend)’과 ‘바(Bar)/파이(Pie) 그래프’를 늘리고, 경보 표시형태도 경보 설정치까지 표시하는 방향으로 개선하는 것이 바람직하다. 나아가, 운전모드별, 발전소 상황별 여러 개의 ‘발전소 부분표시판(Part-plant Overview Displays)’을 제공하여 LDP와 함께 사용하는 방식의 도입도 고려해 볼 수 있다. 현재, LDP 사용자(신고리3,4호기 주제어실 근무자)에 대한 LDP 사용실태 설문조사가 진행되고 있다. 이러한 설문조사가 본 연구과 함께 진행되었다면 금상첨화였겠지만 뒤늦게나마 설문조사 결과가 나오면 본 연구 결과와 함께 구체적인 LDP 개선방안의 기초 자료로 활용할 예정이다.

References

[1] Korea Hydro & Nuclear Power Co., "Shin-kori #3, 4 Final Analysis Safety Report (Chapter 18)"
 [2] Erica Harefors, "Use of large screen displays in nuclear control room", UPPSALA University; May, 2008.
 [3] NUREG-0800, *Standard Review Plan*, US Nuclear Regulatory Commission, Washington DC.
 [4] DI&C-ISG-05(Rev.1), *Task Working Group#5: Highly-Integrated Control Room-Human Factors Issues (HICR-HF) Interim Staff*

Guidance, US Nuclear Regulatory Commission, Washington DC; 2008.
 [5] Nuclear Automation Engineering, LLC, *Optimization of the Safety Console Design for APR+*; Mar. 2011
 [6] EPRI-1015089, *Guidance for Identifying and Implementing Human-System Interfaces Needed to Supplement Computer-Based Workstations in the Main Control Room*; Nov. 2010
 [7] Mohsen Naderpour, Salman Nazir, Jie Lu, "The role of situation awareness in accidents of large-scale technological systems", *Process Safety and Environmental Protection*; 2015
 [8] D.L. Van Laar, "Psychological and cartographic principles for the production of visual layering effects in computer displays", *Displays* 22(2001), 125~135
 [9] Christer Nihwiing, Jon Kvaalem, *Innovative HIS Concepts-Rational and Design Solution(HWR-936)*, OECD Halen Reactor Project, 2011.
 [10] Magnhild Kaarstad and Stine Strand, *Large Screen Displays – a Usability Study of Three Different Designs (HWR-1025)*, OECD Halen Reactor Project; 2011.
 [11] NUREG-0700(Rev.2), *Human-System Interface Design Review Guidelines*, US Nuclear Regulatory Commission, Washington DC; 2002.
 [12] Steve Collier, *Human Factors Guideline for Large Screen Displays (HWR-796)*, OECD Halen Reactor Project; 2005
 [13] Oystein Veland, al., *Design Patterns for Large Screen Displays: Lessons Learned from the Petroleum Industry (HWR-933)*, OECD Halen Reactor Project; 2010