

Usability Study on Error-Free Interfaces in terms of Optimized Navigation and Manipulation in Digitalized Control Room of Nuclear Power Plants

Sa Kil Kim, Hyun Chul Lee, Jung Taek Kim, Jang Soo Lee

I&C and Human Factors Division, Korea Atomic Research Institute, Daejeon, Korea

ABSTRACT

Objective: The aim of this study is to propose error-free interfaces in terms of optimized navigation and manipulation in digitalized control room of nuclear power plants such as APR-1400 in Korea. **Background:** Digital-based control rooms of nuclear power plant have adapted to not only Korea nuclear industry but also other countries' it. This is because that digital information and configurations provide many well-known advantages to the operators in the control room. In the control room, advanced interface technologies were induced to realize more compact and safer control room. However, these new technologies were not proven in terms of human errors in nuclear industry yet so that many researchers have concerned about the unanticipated human errors in condition of using new digital interfaces. The representative concerns are three fold; navigation, manipulation, shared situation. **Method:** We developed three types of error-free interface prototypes considering navigation manipulation, and shared situation. To validate the effectiveness of error-free interfaces, we performed usability test by using the System Usability Scale (SUS). The test was performed by 22 operation experts after using the developed interfaces. **Results:** In terms of navigation and manipulation, we found that their usability was acceptable in nuclear industry. However, in terms of the task monitoring function for sharing situation among operators, we could not find acceptance of usability. **Conclusion:** We proposed three types of error-free interfaces in digitalized control room. Through the usability test of them, we found the effectiveness partially. **Application:** We will adapt two types of error-free interfaces to the real nuclear power plant project soon.

Keywords: Error-free interfaces, Usability, System Usability Scale, Navigation, Manipulation, Control room

1. Introduction

컴퓨터 기술 및 Information Technology (IT) 기술이 보편화 됨에 따라 원자력발전소에서도 기존의 아날로그 방식의 I&C 시스템들이 디지털 시스템으로 대체되고 있는 상황이다. 이러한 추세에 맞추어 우리나라에서도 최초로 전면적으로 디지털 기술을 도입한 APR1400가 최초 신고리 3,4호기에 상업운전을 앞두고 있다. 그러나 APR1400 운전원 인터페이스는 기존 아날로그 발전소와 구분되는 디지털 환경하에서 작동하며, 이에 따라 여러 전문가들은 디지털 제어실 환경에서 새롭게 예상되는 소프트웨어 오류, 정보순환 오류, 운전원간 상황인식의 공유 오류 등의 인간공학 현안이 존재함을 지적하여왔다.

국내 KSNP (Korea Standard Nuclear Plant) 및 APR1400 원전 설계에서 인허가에서 요구하는 인간공

학프로그램계획(HFEPP: human factors engineering program plan)을 설정하고, 그에 따라 인적오류(human error) 대비를 포함한 인간공학적 분석은 물론 인간공학적 확인 및 검증(V&V)이 수행되고 있으나, 디지털화된 MMIS (Man-Machine Interface System)설계의 인적오류를 예방하는 인터페이스 기법을 개발하거나 직접 설계에 적용하는 사례는 찾아보기 어려운 현실이다.

미국 NRC (Nuclear Regulatory Commission)는 ORNL/INL/BNL 및 MIT 등을 통하여 원전에 디지털 기술이 적용되면서 발생하는 인간공학적 현안을 지속적으로 정리하여 원전 사업자가 대응하도록 요구하고 있다. 미국 전력연구원(EPRI)는 원전의 계속운전을 위한 설비개선 과정에서 NRC가 제시한 인간공학 요건 및 지침에 따라 디지털화된 제어실 설계를 실현하기 위한 방대한 분량의 실무지침(EPRI 1008121)을 제시한 바 있다. 또한 미국 NRC는 BNL을 통하여 전산절차서, 소프트웨어기, 대형정보화면 등 디지털 기술

의 도입에 따른 인터페이스의 변화 및 관련 인간공학 현안을 정리하여 이를 인허가에서 고려해야 할 중요한 항목으로 제시하고 있다.

국제공동 연구기관인 OECD/Halden에서는 다양한 방식의 디지털 인터페이스를 개발하여 원전 운전원의 수행도를 개선하고 운전성을 향상시키는 실험연구 및 설계개발 연구를 지속하고 있다. OECD/Halden에서는 기존의 흐름도 및 미믹(mimic) 중심의 표시방식과는 달리 특정 단위직무를 지원하는 화면(Task-Based Display), 기능할당 및 기능분석 결과를 활용한 기능 중심의 화면(Function-Oriented Display) 등을 개발하였으며, 신속한 상황인식 및 정확한 거동 파악 분석이 가능하도록 생태학적 인터페이스 설계(Ecological Interface Design) 등과 같이 새로운 인터페이스를 다수 개발하여 운전원의 수행도를 향상시키기 위한 연구를 수행하고 있다. 특히 Halden에서는 디지털 환경에서의 운전원 반응을 기준으로 실험을 통해 설계를 검증하는 실험실(HAMMLAB)을 운영하는데, 운전원의 작업부하 및 인적오류를 포함한 수행도를 실험적으로 측정하고 이를 기반으로 다양하게 개발된 지원 기능 및 인터페이스의 효과 및 영향을 평가하는 기반연구를 병행하고 있다.

OECD/Halden 프로젝트에서는 디지털 제어실 환경하에서 운전원간 의사소통을 지원하기 위한 방안으로 LSD(Large Screen Display)와 운전원 화면에 현재 제어하고 있는 기기를 표시해 주거나, 원자로 운전원(RO)와 터빈운전원(TO)의 워크스테이션 위에 모니터를 추가하여 각 운전원이 작업하고 있는 화면의 내용을 감독운전원(SRO)에게 제공하는 등을 제안하고 이를 실험적으로 평가하여 운전원들이 선호함을 확인하였다.

일본 Kashiwazaki-Kariwa 6호기는 최근 건설당시 가장 최신의 디지털 기술을 도입하여 대형정보화면 및 VDU 기반의 주제어실 환경을 실현한 ABWR이었으나, BTC(BWR Training Center)를 중심으로 ABWR 주제어실에서의 운전경험을 반영하여 운전성 개선을 위한 MMI 설계개선이 진행 중이다.

현재까지 사용 원전에 설치된 최고의 디지털 주제어실은 일본 최초의 ABWR인 Kashiwazaki-Kariwa 6,7 호기로, 대형정보반, VUD 기반의 작업환경, 전산화된 운전절차 등을 도입하였다. 또한 시뮬레이터를 통하여 그 동안의 운전 경험을 반영한 지속적인 운전성 개선을 추진하고 있다. 하지만 해당 전력사 자체로 실무적인 측면에서의 개선에 머물러 있어서, 디지털 환경 도입에 따른 새로운 인적오류 가능성에 대한 대비 등 적극적인 기술개발은 기대하기 어려운 상황이다.

국내의 원전 디지털 인터페이스는 APR1400 등 원전 설계에서 전체 주제어실 설계를 종합하는 KEPSCO E&C에서 주도하고 있으나, 인적오류 방지와 같은 구체적인 설계 개선은 전산 용역사 또는 인터페이스 기기의 제작사에서 이루어져야 하는 상황이며, 해당 기업들의 자체적인 인적오류 대응 연구개발 역량에 한계가 분명한 상황이다. 특히 디지털 인터페이스

의 특성상 개선 및 개발 결과의 타당성 확보가 용이하지 않아 인적오류를 포함한 인간공학적 실험평가가 수반되지 않을 경우에는 인허가를 위한 근거자료를 제시하기에 한계가 있으므로, 일정한 수준의 개선안을 제시하여 산업체의 자체적인 응용을 유도하는 것이 바람직하다.

본 연구는 국내 APR1400의 소프트웨어기, 디스플레이 시스템, 의사소통 등에서 발생한 인간공학 현안에 대한 해결 차원에서 인적오류 방지를 위한 적절한 운전원 지원방안이 필요함을 밝혀냈다. 따라서 인적오류 방지 측면에서 운전원 지원을 위한 화면인터페이스 프로토타입을 설계하고 구현하였다. 또한 개발된 프로토타입의 인적오류 방지 효과를 사용성(usability) 측면에서 검증하였다. 사용성은 인적오류 방지효과를 대변할 수는 없지만, 사용성을 평가하는 주요 항목으로 오류발생 가능성에 대한 사용자의 직관적인 판단을 포함하고 있어 사용성이 높을수록 오류방지 효과가 높다고 볼 수 있다.

2. Method

2.1 인적오류 방지용 인터페이스 개발

본 연구에서 제안하고 있는 인적오류 방지용 인터페이스는 다음 세 가지 측면으로 요약된다.

- 정보순항(navigation) 인터페이스
(N-1) 도착지를 팝업으로 미리 보여주는 인터페이스

- 조작(manipulation) 오류방지 인터페이스

- (M-1) 실행버튼과 제어이력을 제공하는 인터페이스
- (M-2) 조치내용을 음성으로 제공하는 인터페이스
- (M-3) 제어권한에 대한 경고를 제공하는 인터페이스

- 작업 확인(verification) 인터페이스

- (V-1) 제어이력을 제공하여 타운전원 작업내용을 보여주는 인터페이스
- (V-2) 감독자용 작업확인 인터페이스

2.1.1 정보순항 인터페이스

- (N-1) 도착지를 팝업으로 미리 보여주는 인터페이스

운전원이 IPS(정보처리시스템) 화면상에서 다른 화면으로 이동하여야 하는 경우 미믹(mimic) 상에 제공되는 버튼을 눌러 이동할 수 있다. 버튼에는 이동할 목적지 화면에 대한 약어가 표시되어 있어서 이동할 목적지에 대한 정보를 제공하고 있으나, 약어로는 정확히 운전원이 도달하고자 하는 화면인지 불분명할 수 있다. 본 인터페이스는 이동할 화면을 축소하여 팝업으로 보여줌으로써 운전원에게 목적지에

대한 정보를 충분히 전달하여 운전원의 정보순항 오류를 방지하는 것으로 목적으로 한다.

운전원이 정보순항 버튼 위에 마우스 포인터를 위치시키고 일정시간 포인터를 움직이지 않으면, 그 버튼을 눌러 도달할 수 있는 화면을 버튼 근처에 팝업으로 작게 축소하여 보여준다(그림 1). 이러한 거동은 MS 오피스의 메뉴영역에서 유사성을 쉽게 발견할 수 있다. 포인터가 버튼을 벗어나거나 클릭되면 팝업은 즉시 사라진다. 팝업은 버튼의 위치에 따라 버튼의 상하좌우에 적당히 위치하여 팝업화면이 완전히 보일 수 있도록 하여야 한다. 팝업화면은 버튼을 가려서는 안된다.

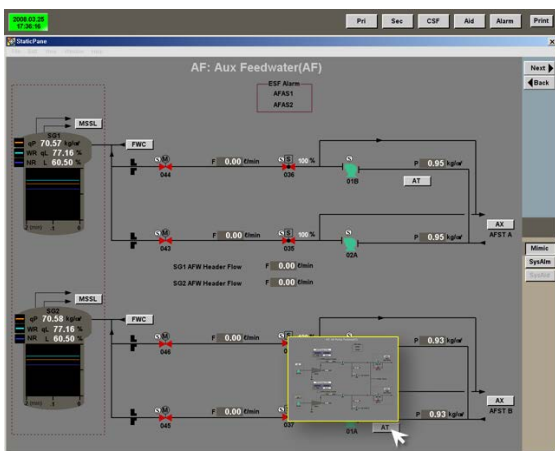


그림 1. 마우스 포인터가 이동할 화면을 나타내는 버튼(AT)에 위치하고 있어서 목적지 화면(AT 계통)이 팝업으로 나타나 있다.

2.1.2 조작오류방지 인터페이스

(M-1) 실행버튼과 제어이력을 제공하는 인터페이스
 운전원이 IPS 화면상에서 기기를 단순 제어하는 경우 미믹 위에 팝업되는 화면에 표시된 버튼을 눌러 제어할 수 있다. 버튼을 누른 것만으로 제어신호를 발생시키므로 신중하지 못한 신호를 발생시킬 가능성이 있으므로, 실행버튼을 두어 제어행위를 스스로 확인할 수 있는 기회를 제공하여 궁극적으로 오조작을 방지하고자 한다. 또한 해당 기기에 대한 제어이력을 운전원이 조회할 수 있도록 하여, 타 운전원의 작업내용을 확인할 수 있게 하여 운전작업에 대한 공통된 인식을 지원한다.

새로운 제어화면은 기존의 제어화면과 달리 실행(Execute)버튼과 연결선이 추가된다(그림 2). 제어화면이 나타날 때에는 제어내용을 선택할 수 있는 버튼만이 활성화되고 실행버튼과 연결선은 모두 비활성화되어 있는 상태이다. 제어화면을 띄운 상태에서 운전원이 제어내용에 따라 버튼을 선택하여 누르면, 실행버튼이 활성화되면서 선택한 버튼과 실행버튼 사이의 연결선이 활성화된다. 실행버튼을 누르면 제어신호가 발생되고 제어화면은 사라진다.

또한 새로운 제어화면에는 해당 기기의 제어이력을 선택적으로 조회할 수 있는 버튼을 제공한다. 이 버튼은 제어화면의 우측이나 좌측 혹은 하단에 위치하여 운전원이 눌렀을 때 제어이력을 리스트형식으로 보여주는 폴다운 형식의 화면을 생성시킨다(그림 3). 버튼은 화면이 생성되는 방향에 따라 화살표를 표시하며 화면이 열렸을 때에는 화살표의 방향이 반대로 표시되어 열린 화면을 닫을 수 있음을 나타낸다. 제어화면의 상단에 위치한 종료버튼을 누르면 제어이력 화면이 열림과 닫힘에 무관하게 제어화면이 종료되어야 한다. 제어이력조회는 제어버튼 선택과는 무관하게 항상 가능하여야 한다.

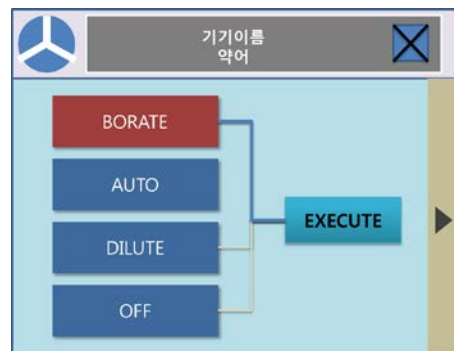


그림 2. “AUTO”를 누르면 실행버튼이 활성화되고 BORATE 버튼과 실행버튼까지의 연결선이 이어진다.

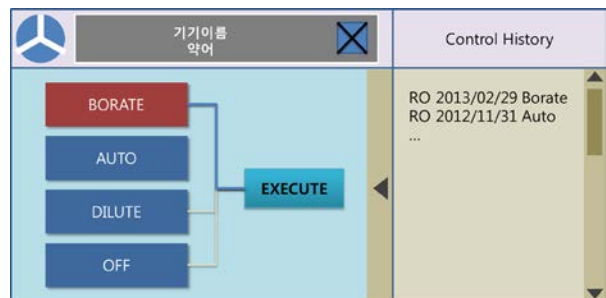


그림 3. 마우스 입력 방식의 비안전등급 기기의 제어이력을 조회할 수 있는 버튼(▶)을 누르면 위와 같이 우측에 확장된 화면이 나타난다. 화면의 우측에는 기기이력을 시간의 역순으로 텍스트형식으로 출력한 리스트가 나타난다. 버튼의 모양은 삼각형의 모양이 변경(◀)되어 나타난다. 여기서 삼각형버튼(◀)을 누르면 확장된 화면은 닫힌다. 제어이력조회는 제어버튼 선택과는 무관하게 항상 가능하다.

(M-2) 조치내용을 음성으로 제공하는 인터페이스

운전원이 IPS 화면상에서 기기를 단순 제어하는 경우 미믹 위에 팝업되는 화면에 표시된 버튼을 눌러 제어할 수 있다. 새로운 제어화면에서 실행버튼을 눌러야 제어신호를 발생시킨다. 제어신호의 발생과

함께 제어행위에 대한 음성정보를 제공하여 운전원의 제어행위를 운전원이 확실히 확인할 수 있도록 하고자 한다.

새로운 제어화면은 기존의 제어화면과 달리 실행(Execute)버튼과 연결선이 추가된다. 새로운 제어화면은 다음과 같다. 제어화면을 띄운 상태에서 운전원이 제어내용에 따라 버튼을 선택하여 누르면, 조치내용이 음성으로 표현되고, 실행버튼이 활성화되면서 선택한 버튼과 실행버튼 사이의 연결선이 활성화된다. 실행버튼을 누르면 제어신호가 발생되고 제어화면은 사라진다. 음성은 “지금 (RO/TO)가 (**벨브/**펌프)를 (Open/ Close/ On/ Off/ ..)합니다.” 의 형식으로 발생한다.

(M-3) 제어권한에 대한 경고를 제공하는 인터페이스
 운전원이 IPS 화면 상에서 기기를 단순 제어하는 경우 미믹 위에 팝업되는 화면에 표시된 버튼을 눌러 제어할 수 있다. 하지만 운전원 워크스테이션에 따라 RO 혹은 TO만이 제어해야 하는 혹은 담당하는 기기가 있으며, TO가 제어권한을 가지는 기기를 RO가 제어하는 경우 TO는 운전상황을 정확히 판단하기 힘들게 된다. 제어권한을 위반하는 제어행위를 시도하는 경우 경고화면을 표시하여 제어권한이 온전히 유지되어 운전상황을 정확히 인식할 수 있도록 하고자 한다.

제어화면이 나타날 때에는 제어내용을 선택할 수 있는 버튼만이 활성화되고 실행버튼과 연결선은 모두 비활성화되어 있는 상태이다. 제어화면을 띄운 상태에서 운전원이 제어내용에 따라 버튼을 선택하여 누르면, 해당기기에 대한 제어권한이 없다면 다음과 같은 제어권한에 대한 경고화면을 표시한다(그림 4). 경고화면이 나타나면서 경고음이 1회 발생한다. 운전원은 경고화면의 인식버튼을 누르면 경고화면은 사라진다. 경고화면이 사라지면서 실행버튼이 활성화되면서 선택한 버튼과 실행버튼 사이의 연결선이 활성화된다. 실행버튼을 누르면 제어신호가 발생된다.

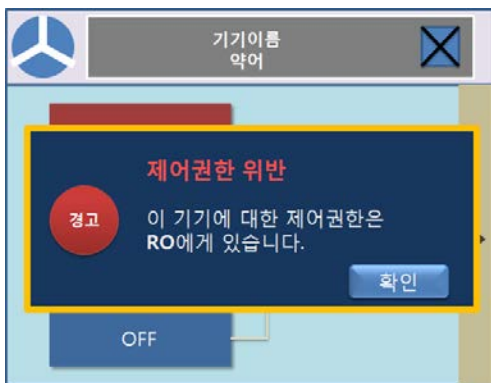


그림 4. 경고 팝업화면의 예

2.1.3 작업확인 인터페이스

(V-1) 팝업윈도우를 통해 타운전원 작업내용을 보여주는 인터페이스

원전 주제어실에서 다수의 운전원이 하나의 운전조를 이뤄 프로세스 감시 및 제어를 한다. 상태감시, 사고 진단 및 완화를 위해서는 운전조 내의 모든 구성원이 올바른 상황인식을 확보하는 것이 필수적이다. 각자가 담당하는 운전영역과 타운전원이 어떤 작업을 수행하고 있는 지 혹은 하였던 지를 인지하여야 정확한 상황인식이 가능하다. 하지만 디지털 주제어실에서는 워크스테이션 기반으로 운전을 수행하므로 공동의 상황인식을 확보하는 것, 특히 타운전원의 작업을 확인하기 어렵다. 이를 보완하기 위하여 주요 운전원의 작업을 상호 감시할 수 있는 인터페이스를 제공하여 운전조의 상황인식 확보에 기여하고자 한다.

운전원 워크스테이션에는 4개의 운전화면이 있으며, 그 중 CPS와 경보에 특화된 화면을 제외한 2개의 운전화면이 있다. 운전원은 상태감시나 제어를 위해서 마우스를 해당 버튼이나 미믹 상의 심볼에 이동시키고 선택(클릭)한다. 원자로 운전원(RO)이 화면이동을 위해 버튼을 선택하는 경우를 제외하고, 마우스를 이동하여 기기(제어기 포함)를 선택하는 경우 이는 그 기기를 제어하려는 시도로 해석하고, 해당 화면 전체를 SRO와 터빈 운전원(TO)에게 전송한다. SRO와 TO는 전송된 화면(중계화면)을 통해 RO의 운전내용을 파악할 수 있다. 실시간으로 중계되는 중계화면에는 마우스 움직임이 포함되어야 한다. 중계화면의 크기는 마우스의 움직임을 구별할 수 있을 정도의 크기이며 사용자의 마우스 클릭과 드래그(click and drag)에 의해 이동과 크기가 조절 가능하다. 중계화면은 SRO/TO가 전송된 화면을 더블 클릭하면 바로 사라지고, RO가 실행버튼을 누르면 잠시 후(0.5초) 사라진다. TO가 제어조작을 하는 경우 동일한 방법으로 SRO와 RO에게 중계화면이 생성된다.

운전원이 안전기기를 제어하는 경우 중계화면에 ESCM 화면이 표시된다(그림 5). ESCM의 내용 및 신호발생여부를 타운전원이 인식할 수 있어야 한다. 각 안전기기에 대한 ESCM화면의 내용은 상황에 따라 변하지 않고 일정하므로 이에 대한 설계내용을 미리 그려놓고, 제어신호발생을 감지하여 이를 미리 그려놓은 화면에 표시함으로써 운전원이 안전기기의 제어내용을 파악할 수 있도록 한다.

(V-2) 감독자용 작업확인 인터페이스

발전부장이나 안전과장은 운전원이 안전관련 운전활동을 수행하는 경우 이에 대한 확인 및 보조를 담당한다. 디지털 주제어실에서 안전과장은 원자로 운전원이나 터빈 운전원의 운전화면에 직접 접근하기 어려워 안전과장이 원자로 운전원이나 터빈 운전원의 워크스테이션에 직접 가서 운전내용을 확인하거나 지원하여야 한다. 본 인터페이스는 발전부장이나

안전과장의 신체적인 이동 없이 각 운전원의 운전내용을 확인할 수 있도록 해준다. 안전과장이 원자로 운전원이나 터빈 운전원의 운전행위를 모니터링하여 상호 발전소 상황인식을 공유하고 상황에 적합하지 않은 운전행위를 발견 및 지원하여 원자로 운전원과 터빈 운전원의 인적오류 발생 가능성을 저감시키는 데 목적이 있다. 이를 통해 발전부장이나 안전과장의 작업부하 저감 및 작업확인 수행도 향상 시킬 수 있다.

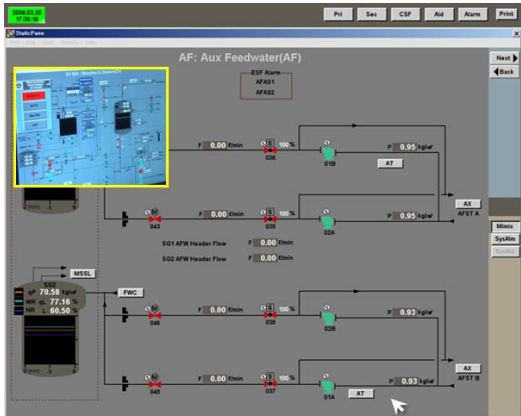


그림 5. 다운전원의 작업내용을 보여주는 팝업화면이 좌상단에 나타나 있다.

발전부장이나 안전과장은 아무 때나 원하는 운전원의 워크스테이션을 선택하면 해당 워크스테이션에 설치된 카메라로부터 실시간으로 동영상을 전송 받을 수 있다. 카메라는 원자로 운전원 및 터빈 운전원의 워크스테이션에 좌우 2개 채널로 설치되며 모든 운전화면을 감시할 수 있는 위치에 설치된다. 동영상은 운전원의 제어행위를 감시할 수 있는 충분한 해상도(200만 화소 이상의 Full HD)를 가지며, 안전과장은 동영상의 크기를 조절할 수 있어서 한 화면에서 RO 및 TO의 워크스테이션을 감시할 수 있다(그림 6). 안전부장에게 제공되는 이 인터페이스는 팝업이나 플다운이 아닌 별도의 화면으로 구현되며, 운전화면에 통합된다.



그림 6. 안전과장의 화면우측에는 새로운 버튼(VS)이 추가되어 있다. 이 버튼을 누르면 위와 같이 RO 좌우, TO 좌우 화면이 뜬다. 안전과장은 이 화면을 통해 RO 와 TO 의 모든 운전화면을 감시할 수 있다. 중계화면을 더블 클릭하면 해당 운전원의 운전화면을 크게 확대하여 볼 수 있다.

2.2 개선 인터페이스의 사용성 평가

2.2.1 시험일정 및 방법

시험평가 일정은 표 1과 같다. 본 시험에 앞서 사전시험을 실시하여 본 시험에서 발생할 수 있는 시험설비의 미작동 및 오작동 문제를 해결하고 시험 진행자는 시험평가 절차를 숙지하였다. 본 시험평가에 참여한 피험자는 평균 나이는 40.68세, 발전소 근무경력은 12.91년, 그리고 APR-1400 시뮬레이터 및 주제어실 근무경력은 모두 3년 이하이다. 국내에 APR-1400을 적용하고 있는 발전소는 신고리 2발전소가 최초이며, 현재 상업운전에 들어가지 않았기 때문에 시뮬레이터를 이용한 각종 절차서 운전 및 시운전 경력만을 포함하고 있다.

표 1. 시험평가 일정

구분	일정	시간	피험자 수	
예비시험	2015. 8. 20	13:00-18:00	3	
본시험	정보순항	2015. 8. 21	09:00-18:00	22
	조작오류 방지	2015. 8. 21	09:00-18:00	22
	작업확인	2015. 8. 21	09:00-18:00	22

본 시험평가는 개선한 인터페이스에 대한 사용성을 평가하는 방법으로 진행되었으며, 별도의 '인간공학 시험평가 절차서(최적 정보순항 및 조작오류 방지용 화면 인터페이스 프로토타입)'에 따른 시험설계 및 절차에 따라 시험평가를 수행하였다.

2.2.2 사용성 평가방법 및 판단기준

개발된 인터페이스에 대한 인간공학 시험평가는 피험자가 개발된 인터페이스를 사용해본 직후 사용성 평가를 수행하는 방식으로 수행하였다. 사용성 평가는 SUS (System Usability Scale)를 활용하였다. SUS는 다음과 같이 총 10개 평가 문항으로 구성되어 있으며, 긍정문항 5개와 부정문항 5개로 구성되어 있다. 각 문항은 리커트 5점 척도로 평가되며, 긍정문항은 (평가점수 -1)점을, 부정문항은 (5-평가점수)를 부여하여 총합에 2.5배 값을 SUS 값으로 산정한다(식 1).

- 이 시스템을 자주 사용할 것 같다. ($S_1 = X_1 - 1$)
- 이 시스템이 불필요하게 복잡한 것 같다. ($S_2 = 5 - X_2$)

- 이 시스템은 사용이 쉽다. ($S_3=X_3-1$)
- 이 시스템을 사용하기 위해 시스템 전문가의 기술지원을 받아야 할 것 같다. ($S_4=5-X_4$)
- 이 시스템의 여러 가지 기능이 잘 구성된 것 같다. ($S_5=X_5-1$)
- 이 시스템은 일관성이 너무 부족한 것 같다. ($S_6=5-X_6$)
- 이 시스템의 사용법을 대부분의 사용자가 쉽게 배울 것 같다. ($S_7=X_7-1$)
- 이 시스템은 사용하기가 매우 거추장스럽다. ($S_8=5-X_8$)
- 이 시스템은 나에게 확신감을 준다. ($S_9=X_9-1$)
- 이 시스템을 본격적으로 사용하기 위해 많은 것을 배워야 할 것 같다. ($S_{10}=5-X_{10}$)

$$\text{SUS Score} = \sum S_i \times 2.5 \quad (\text{식 1})$$

SUS는 새로운 시스템에 대한 사용성을 평가하는데 간편하고 신속한 도구로 활용되고 있다. 또한 사용성 평가의 신뢰도는 0.85(Kirakowskil, 1994)로 현존하는 사용성 평가도구들 중 높은 편이다. SUS를 활용하여 500개 시스템에 대해 5,000명의 사용자 대상으로 사용성을 평가한 결과, 평균 68점으로 기록되고 있다(그림 7). 평균을 기준으로 새로운 시스템에 대한 사용성을 판단하는 것은 어려운 일이지만, 일반적으로 평균 이상인 경우에 사용성이 인정된다.

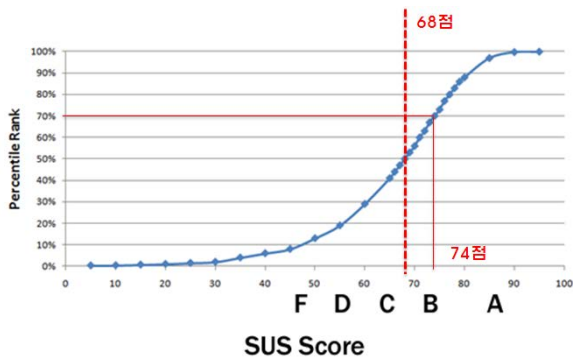


그림 7. SUS 사용성 판단기준(원자력산업 적용시 제안 기준)

본 시험평가는 원전 주제어실에서 사용될 시스템이므로 사용성 평가기준을 SUS 평균으로 정하는 데는 무리가 있다. 즉, 원전은 고신뢰도 시스템으로 다른 일반 산업의 시스템보다는 그 신뢰성에 대한 기대수준이 높다고 할 수 있다. 따라서 본 시험평가에서 SUS 사용성 평가 점수의 판단기준을 상위 70%인 74점으로 결정하였다.

3. Results

3.1 정보순항 인터페이스에 대한 사용성 평가

정보순항 인터페이스에 대한 사용성 평가결과, SUS 사용성 점수는 82.84점(± 2.81)으로 상위 약 92%에 해당한다(그림 8). 따라서 정보순항 인터페이스에 대한 사용성은 원전에 적용하기에 충분히 확보되었다고 할 수 있다.

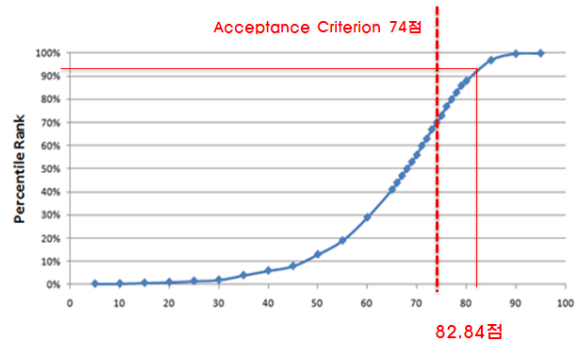


그림 8. 정보순항 인터페이스에 대한 사용성 평가결과

3.2 조작오류 방지 인터페이스에 대한 사용성 평가

조작오류 방지 인터페이스에 대한 사용성 평가결과, SUS 사용성 점수는 77.39점(± 3.67)으로 상위 약 81%에 해당한다(그림 9). 따라서 조작오류 방지 인터페이스에 대한 사용성은 원전에 적용하기에 충분히 확보되었다고 할 수 있다.

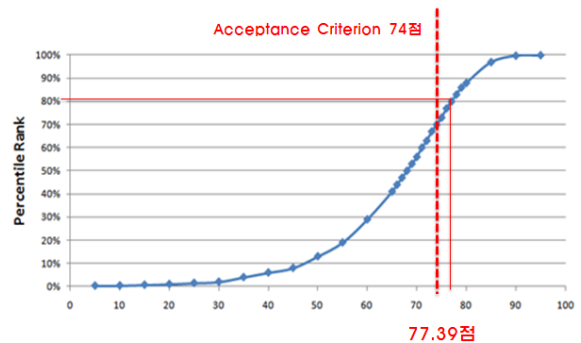


그림 9. 조작오류 방지 인터페이스에 대한 사용성 평가결과

3.3 작업확인 인터페이스에 대한 사용성 평가

작업확인 인터페이스에 대한 사용성 평가결과, SUS 사용성 점수는 64.09점(± 2.89)으로 상위 약 42%에 해당한다(그림 10). 따라서 작업확인 인터페이스에 대한 사용성은 원전에 적용하기에 부족하다고 할 수 있다.

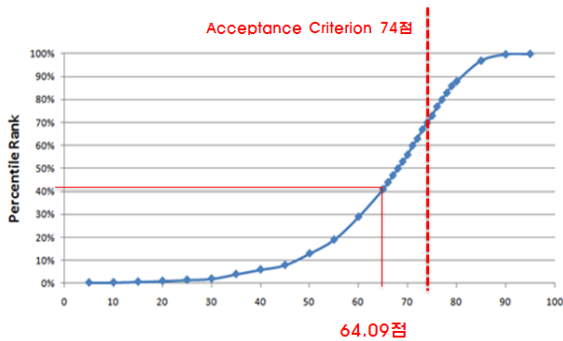


그림 10. 작업확인 인터페이스에 대한 사용성 평가결과

4. Conclusion

디지털 제어실(APR-1400)에서 예상되는 인적오류를 방지하기 위한 인터페이스를 제안하고 이를 프로토타입으로 구현하여 인간공학적 적합성평가의 일환으로 사용성을 평가 하였다. 사용성 평가는 현직에 있는 운전전문가를 대상으로 실시하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 도착지를 미리 알려주는 정보순항 인터페이스는 정보순항 실패의 시행착오를 줄여줄 수 있는 측면에서 우수하게 평가되었고, 전체적인 사용성이 높게 평가되었다.
- 실행버튼, 제어이력, 조치내용의 음성제공, 제어권한의 경고 기능을 제공하는 조작오류 방지 인터페이스는 ON/OFF 타입의 중요 안전 기기의 경우 인적오류를 방지할 수 있는 우수한 인터페이스로 평가되었고, 전체적인 사용성 역시 높게 평가되었다.
- 발전부장이나 안전차장에게 RO나 TO의 작업상황 정보를 제공하는 작업확인 인터페이스는 운전원 감시라는 다소 부정적인 시각이 지배적으로 평가되었으며, 전체적인 사용성 역시 낮게 평가되었다.

이상의 시험평가 결과를 바탕으로, 디지털 제어실에서 예상되는 인적오류 방지 인터페이스를 보완 및 수정하여 국내 원전설계에 반영할 필요가 있다. 국내 신고리 3,4호기에 적용된 디지털 제어실은 현재로서는 상업운전 경험이 없으므로 향후 상업운전 과정에서도 지속적인 수행도 감시 활동을 통해 디지털 제어실 환경에서 예상되는 인적오류 현안을 지속적으로 해결할 필요가 있다.

Acknowledgements

This research was supported, in part, by a grant from the Korea Ministry of Science, ICT and Future Planning, under

the development of the integrated framework of I&C conformity assessment, sustainable monitoring, and emergency response for nuclear facilities.

References

- NUREG-0800, “Standard Review Plan”, Rev.2, “18.0 Human Factors Engineering”, 2007.03
 NUREG-0711, Rev.3, “Human Factors Engineering Program Review Model”, 2012. 11
 NUREG-0700, Rev.2, “Human-System Interface Design Review Guideline”, 2002.05
 KEPIC ENB 6310, “제어실 설계”, 2005.01
 KEPIC ENB 6330, “사고 감시용 계측 설비 설계”, 2005.01
 IEEE Std. 1023, “Recommended Practice for the Application of Human Factors Engineering to Systems, Equipment, and Facilities of Nuclear Power Generating Stations and other Nuclear Facilities”, 2004.12
 IEEE Std. 845, "Evaluation of human system performance in nuclear power generating stations", 1999.
 ISO 9241-11, "Ergonomic requirements for office work with visual display terminals - Part 11: Guidance on usability, 1998.

Author listings

Sa Kil Kim: sakilkim@kaeri.re.kr
Highest degree: Ph.D., Department of Industrial Engineering, Kyung Hee University
Position title: Senior Researcher, I&C and Human Factors Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute
Areas of interest: Human Factors in Nuclear Power Plant, System Safety, Team Performance

Hyun Chul Lee: leehc@kaeri.re.kr
Highest degree: PhD, Department of Industrial Engineering, KAIST
Position title: Principal Researcher, I&C and Human Factors Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute
Areas of interest: Human Factors in Nuclear Power Plant, UI & UX, System Safety

Jung Taek Kim: jtkim@kaeri.re.kr
Highest degree: MS, Department of Nuclear Engineering, Han Yang University
Position title: Principal Researcher, I&C and Human Factors Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute
Areas of interest: Monitoring & Diagnostic System, Alarm System in Nuclear Power Plant, System Safety

Jang Soo Lee: jslee@kaeri.re.kr
Highest degree: PhD, Department of Electrical Engineering and Computer Science, KAIST
Position title: Principal Researcher, I&C and Human Factors Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute
Areas of interest: Software Safety, Software V&V, System Safety