Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol. 32, No. 1 pp.87-96, February 2013 http://dx.doi.org/10.5143/JESK.2013.32.1.87

Human Reliability Analysis of Soft Control Operations in Nuclear Power Plants: Issues and Perspectives

Seung Jun Lee, Wondea Jung

Integrated Safety Assessment Division, Korea Atomic Energy Research Institute,
1045 Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon, 305-353

ABSTRACT

Objective: The aim of this study is to describe several issues which should be considered in the human reliability analysis of soft control operations in nuclear power plants. **Background:** The operational environment of advanced main control rooms is totally different from that of conventional control rooms. The soft control is one of the major distinguishable features of the advanced main control rooms. The soft control operations should be analyzed to estimate the effects on human reliability. **Method:** The literatures, about task analysis, simulation data analysis, and a human reliability analysis method for the soft control, were reviewed. From the review, important issues for the human reliability analysis of the soft control were raised. **Results:** The results of task and simulation data analysis showed that the soft control characteristics could have large effect on human reliability and they should be considered in the human reliability analysis of the soft control operations. **Conclusion:** The soft control may affect human error and performance of operators. The issues described in this paper should be considered in the human reliability method for the advanced main control rooms. **Application:** The results of the soft control operation analysis might help to design more efficient interface and education/training program for preventing human errors. The described issues might help to develop a human reliability analysis method for soft control operations.

Keywords: Soft control, Advanced main control room, Human reliability analysis

1. Introduction

최근 원자력발전소에는 디지털 기술 및 컴퓨터 기술이 적용되고 있다. 신형 주제어실이라고 불리는 최근 원자력발전소의 주제어실은 기존 아날로그 기반의 주제어실과는 다르게 대형 디스플레이(Large Display Panel, LDP)와 운전원 워크스테이션 콘솔을 이용한 개인 디스플레이, 전산화절차서, 소프트제어기 등이 적용되고 있다. 이와 같은 컴퓨터 기술을 활용한 주제어실의 인터페이스 설계 변화는 주제어실 운전환경을 완전히 바꾸게 되며, 이에 따른 인간신뢰도분석(Human Reliability Analysis, HRA)이 최근 중요 이슈로 소개되고 있다(USNRC, 1996; O'Hara, 1992).

1970년대 이후 인적오류는 원자력발전소 사고의 중요한 원인으로 분석되기 시작했다(USNRC, 1975). 또한, 기술이 발달함에 따라 기기 신뢰도가 증가하면서 발전소의 신뢰도를 평가하는데 있어서 인적오류의 영향은 더욱 커지고 있으며, 인적오류 방지는 원전의 사고를 줄이는데 더욱 중요한 요소로 간주되고 있다. 인적오류는 운전원 개인의 특성과 운전환경에 의해서 많은 영향을 받는다. 차세대 주제어실의 변경된 운전환경은 운전원의 인적오류 발생 확률이나 수행도에 적지 않은 영향을 미칠 것이라고 예상되며 운전원의 인

Corresponding Author: Seung Jun Lee. Integrated Safety Assessment Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon, 305-353.
Mobile: +82-10-9899-3848, E-mail: sjlee@kaeri.re.kr

적오류 방지를 위해서는 이에 대한 분석이 반드시 수행되어야 한다.

본 논문은 원자력발전소 신형 주제어실의 소프트제어를 이용한 운전을 고려한 인적신뢰도분석을 다룬다. 이를 위해, 소프트제어의 특성을 설명하고 소프트제어를 이용한 운전 직무와 시뮬레이션 데이터를 분석함으로써 소프트제어의 오류모드와 중요 특성을 분류하며, 소프트제어를 고려한 인간신뢰도분석 방법에서 반드시 고려되어야 할 이슈들을 정의하였다.

2. Human Reliability Analysis for Soft Control Operations

2.1 Characteristics of soft controls

원자력발전소의 주제어실은 아날로그 기반 시스템에서 시작하여, 부분적으로 디지털화된 하이브리드 형식의 주제어실, 전체적으로 디지털화되고 컴퓨터를 기반의 인터페이스가 적용된 신형 주제어실로 진보하고 있다(Lee, 2007; Yoshikawa, 2005). 신형 주제어실에서 운전원들은 소프트제어기를 사용하여 운전을 수행한다. 소프트제어기는 컴퓨터 소프트웨어를 이용하여 설계된 모든 제어기를 의미한다(USNRC, 2000). 즉, 기존의 주제어실의 아날로그 기반의 핸드 스위치, 버튼이 기존 제어기라고 한다면, 차세대 주제어실의 마우스나 터치스크린을 이용한 제어기가 소프트제어기라고 불린다. 소프트제어기는 기본적으로 소프트웨어와 컴퓨터 입출력기기를 사용하여 설계되기 때문에 매우 다양한 형태의 설계가 가능하다(Lee, 2011a).

NUREC/CR-6635(USNRC, 2000)에 따르면 8가지의 대표적인 소프트제어의 특성을 서술하고 있으며 각 특성에 대한 설명은 다음과 같다.

1. 제어기와 기기 연결의 유연성: 기존의 아날로그 제어는 한 제어기가 하나의 기기와 하드와이어로 연결되어 있었지만, 소프트제어는 소프트웨어를 이용하여 설계되기 때문에 하나의 제어기로 여러 개의 기기를 제어하는 것이 가능하다. 반대로 하나의 기기를 여러 개의 제어기로 제어하는 것 역시 가능하다. 즉, 기기와 제어기의 연결이 매우 자유로우므로 설계가 자유로울 수 있으며, 제한된 화면 안에서 많은 기기를 표현하는 것이 가능하다. 신형 주제어실의 운전원은 개인의 워크스테이션 콘솔을 이용하여 발전소의 많은 제어기를 제어하는 것이 가능하다.
2. 제어를 위한 접근 방식: 기존 제어기는 주제어실에 펼쳐져 있어서 운전원이 물리적으로 자리를 이동하면서 제어기를 찾아서 제어를 수행하였다. 하지만, 소프트제어는 제한된 공간의 컴퓨터 화면을 통해 제어기기가 표시되므로, 실제 한 화면에 나타난 제어기는 극히 일부에 불과하다. 따라서, 소프트제어를 이용한 운전을 수행하기 위해서는 컴퓨터 화면 이동을 포함한 단계적인 접근이 필요하다. 기존 주제어실과 같은 운전원의 물리적인 이동이 대신, 컴퓨터 화면 안에서의 이동(screen navigation)이 필요하다.
3. 요구 시에만 표시 가능: 위에서 언급된 바와 같이 기존 주제어실의 펼쳐져 있던 제어기가 컴퓨터 화면을 이용하여 보여지기 때문에, 제어기를 언제나 보여지게 하지 않고 필요 시에만 보여지게 할 수 있다. 컴퓨터 화면 공간의 제약으로 인해 한 기기에 대한 제어창이 항상 표시되지 않고 요구 시에만 표시되도록 하여서 필요한 화면 공간을 줄이는 설계가 가능하다.
4. 제어기와 지시기의 물리적인 분리: 기존 제어기는 제어기와 그 결과를 보여주는 지시기가 물리적으로 근접하게 위치해 있는 경우가 많다. 하지만, 소프트제어는 이와 같은 설계가 자유로우므로 이들을 분리시킬 수 있다. 필요 시 한 제어기 옆에 관련된 여러 개의 지시기를 표시하는 설계도, 하나의 지시기 옆에 관련된 여러 개의 제어기를 표시하는 것도 가능하다.
5. 인터페이스 조작 업무: 소프트제어기를 이용하여 운전을 수행하기 위해서는 화면 이동을 포함해서 제어창을 불러내기 위한 부가적인 인터페이스 조작 업무가 필요하다. 위에서 언급된 해당 제어기를 찾기 위한 화면 이동을 비롯하여 제어창을 불러내기 위한 추가적인 인터페이스 조작 직무가 존재할 수 있다. 이와 같은 직무는 기존 제어기에서는 존재하지 않던 직무로서 운전원들에게 부가적인 작업을 요구한다.
6. 다중모드: 소프트웨어를 사용한 설계이기 때문에 하나의 제어창에서 다중 모드를 사용하여 여러 개의 제어기를 포함하는 것이 가능하다. 예로, 화면의 공간 제약 때문에 두 개의 제어창을 표시하는 것이 힘든 경우, 두 개의 제어기를 하나의 제어창에 연결시키고 원하는 제어기를 선택하여 표시할 수 있는 모드 버튼을 사용하여 설계하는 것이 가능하다.
7. 소프트웨어 정의 기능: 소프트웨어를 이용한 운전의 자동화가 가능하다. 어려운 판단이 필요하지 않은 단순한 직무의 경우 시스템이 운전원을 대신하여 직무를 수행하고 결과만 운전에게 알려준다면, 운전원의 업무 부하를 줄일 수 있다. 또는, 몇 가지의 직무가 반드시 순차적으로 수행된다면, 운전원에게 순차적으로 수행되는 직무에 대한 정보를 줄 수 있는 효율적인 디스플레이 설계를 통해 운전원의 오류를 줄일 수 있다.

8. 인터페이스 설계의 유연성: 컴퓨터 화면을 통해 제어기를 보여주기 때문에 매우 유연한 설계가 가능하다. 운전 전략이나 필요 기능에 따라서 적절한 입력기기와 출력기기를 선택하여 효율적인 설계를 할 수 있다.

소프트제어는 컴퓨터 장치를 이용한 설계이기 때문에, 다양한 입출력기기를 이용한 다양한 형태의 설계가 가능하다. 컴퓨터 기술이 진보할수록 더욱 효율적인 입출력기기들이 개발될 것이며 이를 이용하여 신형 주제어실 인터페이스 또한 개선될 것이다. 또한, 각 발전소의 운전 방식, 운전 전략, 운전원 수, 운전문화 등의 요소들과 설계자의 특성에 따라서 신형 주제어실의 인터페이스는 크게 바뀔 수 있다. 본 논문에서는 신형 주제어실이 가지는 일반적이고 공통된 특성들에 대한 이슈들을 서술하고자 한다.

소프트제어의 특징 중에 인적오류에 가장 많이 영향을 미칠 것이라고 예상되는 대표적인 특징은 '인터페이스 조작 업무'이다. 기존 제어기와 가장 다른 특징 중에 한 가지이며, 실제 언급된 모든 특징들이 관련되어 있다. 기존 제어기는 제어를 하기 위해 운전원이 해당 제어기를 찾아서 물리적으로 이동을 하고 운전을 수행하게 되는데, 소프트제어를 이용한 운전에서는 운전원의 자리에서 물리적인 이동 없이 컴퓨터 화면을 통해 해당 제어기를 찾고 제어창을 띄워서 운전을 수행하게 된다. 이 과정에서 기존에는 없던 인터페이스를 조작하는 업무가 요구되게 되며, 이와 같은 추가 직무가 운전원의 인적 실수나 수행도에 영향을 미칠 것이라고 예상된다. 여기서 기존 제어기와 소프트제어기에서 동일하게 수행되는 기기에 제어 신호를 주기 위한 직무를 1차 직무라고 부르며 그 이외에 소프트제어기에만 해당하는 인터페이스 조작에 관련된 직무를 2차 직무라고 정의한다.

앞서 언급된 대로, 각 주제어실의 설계에 따라서 인터페이스 디자인이나 사용되는 기능들에 많은 차이가 있을 수 있다. 본 논문에서는 신형 주제어실의 하나인 APR1400 주제어실의 설계를 기본으로 소프트제어 직무분석을 수행하였으며, 일반적으로 신형 주제어실에 해당되는 특성들에 대해서 분석을 수행하였다. Figure 1은 APR1400 주제어실 목업의 사진이다(Lee, 2009). 기존 주제어실과는 다르게 운전원은 자신의 자리에서 운전원 워크스테이션 콘솔의 화면들을 이용해서 발전소 상태를 관찰하며 마우스와 터치스크린을 이용하여 운전을 수행한다. APR1400 주제어실에서는 총 네 개의 운전원 콘솔이 있으며, 그 중 하나의 화면을 전산화절차서를 보는데 이용하고 나머지 세 개의 화면을 운전원이 발전소를 운전하는데 사용한다. 또한, 비안전기기와 안전기기 운전을 분리하기 위해서 비안전기기 운전은 콘솔 화면 안에 표시되는 제어창에서 마우스를 이용하여 수행되며 안전기기 운전은 콘솔 화면 아래에 위치한 독립적인 터치스크린을 통해서 수행된다.

Figure 1. APR1400 main control room

2.2 Soft control task analysis

오류분석을 위해서는 소프트제어 직무의 분석이 우선적으로 수행되어야 한다. Figure 2는 SHERPA (Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach) (Embrey, 1986)를 이용한 직무분석의 한 예를 보인다(Lee, 2011b). APR1400 주제어실에서 소프트제어기를 이용하여 보조급수를 이용한 증기발생기의 수위를 증가시키는 운전을 수행하기 위해서는 그림에서 보이는 1번부터 6번까지의 직무를 수행해야 하며, 1번, 2번, 3번 직무는 더 이상 하부 직무가 없는 단위 직무이지만, 4번, 5번, 6번 직무는 다시 하부 직무를 가진다. 예로, 특정 밸브를 여는 직무 4번을 수행하기 위해서는 직무 4.1부터 4.3까지를 수행하여야 한다. 4번과 5번 직무는 안전관련 기기의 조작이기 때문에 독립된 터치스크린을 이용하여 조작되며 6번 직무는 비안전관련 기기에 해당하는 운전이므로 운전원 콘솔 화면 안에 나타나는 제어창을 이용하여 운전된다.

이와 같은 운전절차는 Figure 3과 같이 네 가지 단계로 분류될 수 있다(Lee, 2011b).

1. 운전 선택(operation selection): 수행하고자 하는 운전을 선택하는 단계
2. 화면 선택(screen selection): 제어하고자 하는 제어기가 있는 화면을 선택하기 위해 화면을 이동하는 단계
3. 제어기 선택(control device selection): 제어하고자 하는 제어기를 선택해서 제어창을 불러오는 단계
4. 운전 수행(operation execution): 제어창을 통해 실제적으로 운전을 수행하는 단계

운전 수행 단계 중, 네 번째 단계가 1차 직무에 속하며,

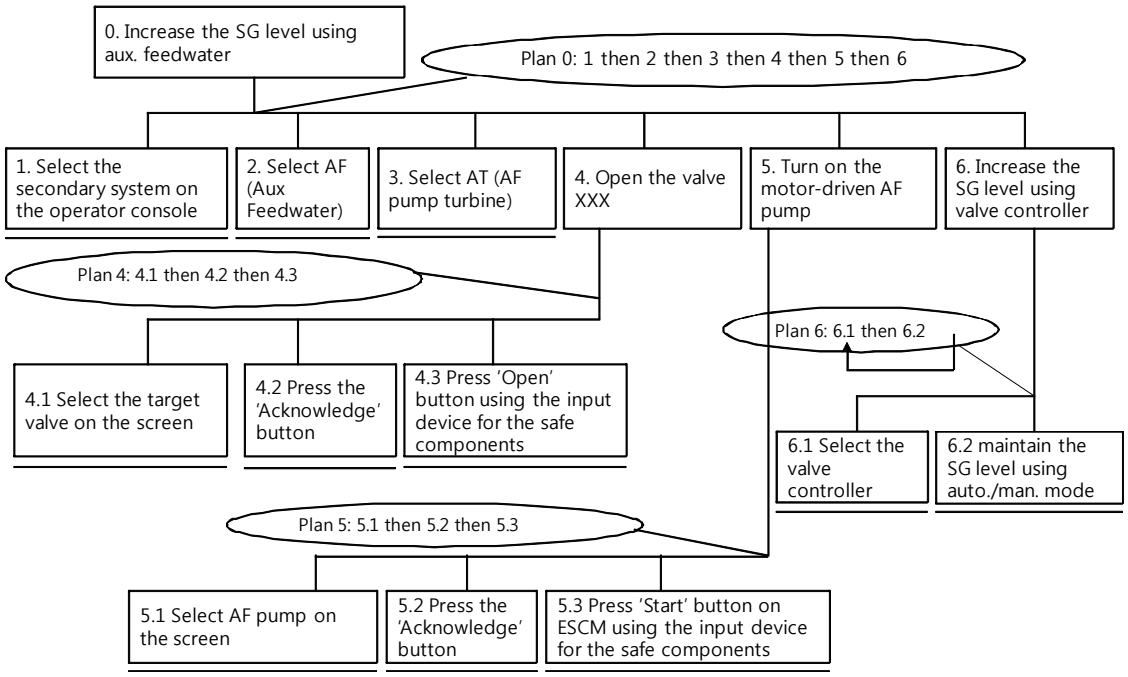

Figure 2. Task analysis of a soft control operation

두 번째와 세 번째 단계는 2차 직무에 포함된다. Figure 2에서 분석된 단위 직무 예제 가운데, 1차 직무는 4.3번, 5.3번, 6.2번 직무이며 그 외에 다른 직무는 기존 제어기에서는 고려되지 않던 2차 직무이다. 1번, 2번, 3번 직무는 화면을 이동하는 '화면 선택' 단계에 해당하는 직무이다. 4.1번, 5.1번, 6.1번 직무는 제어하고자 하는 기기를 선택하는 '제어기 선택' 단계에 해당하는 직무이다.

이와 같은 직무분석을 통해서 각 단계에서 발생할 수 있는 오류는 총 6가지 모드로 분류된다(Lee, 2011b). Figure 3에 운전 수행과정의 네 단계와 해당 단계에서 발생할 수 있는 오류모드 6가지를 보이고 있다. 수행해야 할 운전을 올바르게 인지해서 선택하지 못하면 운전누락(Operation Omission) 오류가 발생할 수 있다. 화면을 잘못 선택해서 다른 화면에서 운전을 수행할 경우 잘못된 기기조작(Wrong Object) 오류가 발생할 수 있으며, 대상 기기가 있는 화면을 올바르게 찾아갔으나 잘못된 기기를 선택하여도 마찬가지로 잘못된 기기조작(Wrong Object) 오류가 발생할 수 있다. 화면 선택과 제어기 선택 단계에서 발생한 실수는 복구될 수 있으며, 복구가 되지 않을 경우 최종적으로 오류가 발생하게 된다. 해당 기기를 올바르게 선택을 하여 운전을 수행할 때에도, 잘못된 운전 수행(Wrong Operation) 오류, 잘못된 모드에서 운전 수행(Mode Confusion) 오류, 적절하게 운전을 수행하지 못하고 너무 많이 수행, 혹은 너무 적게 수행하는 (예, 밸브 개방 정도를 운전 목표치에 맞추지 못함) 부적절한 운전 수행(Inadequate Operation) 오류가 발생할 수 있으며, 앞의 단계에서 오류를 복구하거나 다른 이유 때문에 운전이 적절한 시간에 수행되지 못하는 운전지연(Delayed Operation) 오류가 발생할 수 있다(Lee, 2011b). 네 단계

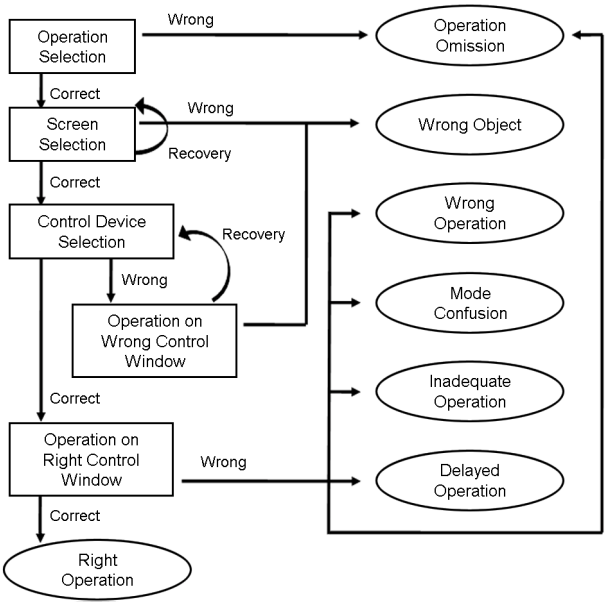

Figure 3. Human error modes of the soft control operation process

를 통해서 오류가 발생하지 않을 경우 최종적으로 올바른 운전이 수행되게 된다. 각 오류모드는 필요에 따라 발생원인과 경로에 따라서 세분화 될 수 있다.

위에서 정의된 오류모드들은 기존 제어기를 이용한 오류모드들과 크게 다르지 않다. 하지만, 제어를 수행하기까지의 과정이 다르기 때문에 각 오류모드가 발생할 확률이 달라지게 된다. 예로, '잘못된 기기조작 오류'의 경우, 소프트제어의 경우 기존과는 다르게 잘못된 화면 선택에서 발생하는 오류의 경로가 존재한다. 또한, 잘못된 기기를 선택하였을 때, 소프트제어는 운전원이 제어창에 집중하는 경향을 보일 수 있기 때문에(필요 시에만 나타나는 제어창이나 독립된 화면에서 제어되는 제어창의 경우 그 경향이 커질 수 있음), 기존 제어기와 비교해서 오류를 복구할 수 있는 확률이 적어질 수 있다.

2.3 Simulation data analysis

위에서 분석된 소프트제어 운전 직무분석은 운전절차서와 인터페이스 설계를 기반으로 분석자가 분석한 결과이므로 실제 운전 시 나타나는 양상과는 상이할 수도 있다. 실제 운전원의 소프트제어를 이용한 운전에서 나타나는 양상을 관찰하기 위해서 시뮬레이션 자료분석이 수행되었다(Lee, 2012).

시뮬레이션 분석은 APR1400 시뮬레이터를 이용하여 두 개의 시나리오(냉각수 상실 사고, 증기발생기 관파열 사고)에 대해서 5개의 조에 대해 수집된 데이터를 바탕으로 이루어졌으며, 해당 시나리오에서 운전을 많이 수행하는 원자로과장(Reactor Operator, RO)와 터빈과장(Turbine Operator, TO)에 대한 데이터가 분석되었다. 분석을 위해 취득된 데이터가 충분하다고는 할 수 없지만 분석을 통해서 어느 정도 일관성 있는 추이가 발견되었다. 데이터 분석의 결과는 Figure 4에 보이고 있다. 운전원들의 1차 직무 평균 조작수(Average Primary)는 2차 직무 평균 조작수(Average Secondary) 보다 작은 값을 보이고 있다. 이는 운전원들이 발전소 기기에 실제적으로 제어 입력 값을 주는 1차 직무를 수행하기 위해서 그보다 더 많은 2차 직무를 수행했음을 의미한다. 원자로과장과 터빈과장 그 수의 차이는 있지만 보다 같은 결과를 보여주었다.

단, 실험에 참여한 운전원들이 기존 주제어실에는 충분한 경험을 보유하고 있는 반면 신형 주제어실에는 아직 많은 경험을 보유하지 못하고 있다는 점이 고려되어야 한다. 만일 운전원들이 신형 주제어실 시스템에 익숙해지고 많은 경험을 쌓는다면 불필요한 2차 직무가 줄어들어서 총 수행되는 2차 직무 양이 줄어들 수 있을 것이다.

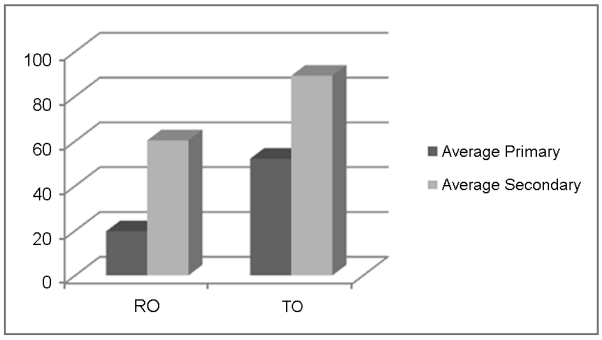

Figure 4. The result of simulation data analysis

3. Issues for Soft Controls

위에서 언급된 바와 같이 소프트제어를 사용한 운전은 운전원의 직무에 많은 변화를 야기하며 이로 인한 인적오류와 수행도의 영향을 예상할 수 있다. 본 장에서는 소프트제어를 이용한 운전에 대한 인간신뢰도분석을 수행하기 위해 고려되어야 할 이슈들을 설명한다.

3.1 Interface management tasks

신형 주제어실의 운전조작직무는 발전소 기기에 제어하고자 하는 값을 입력하는 1차 직무와 그 외에 인터페이스를 조작하는 2차 직무로 구분된다. 만일, 신형 주제어실 인적오류 분석에 1차 직무만 고려된다면 분석결과가 기존 주제어실의 분석결과가 크게 다르지 않을 것이다. 하지만, 위의 시뮬레이션 분석결과에도 나타나듯이 2차 직무의 양이 1차 직무의 양에 비해 상당히 많은 부분을 차지함을 알 수 있고, 따라서 이와 같은 부가적으로 요구되는 직무들이 인적오류와 수행도에 적지 않은 영향을 미칠 것이라고 예상할 수 있다.

요구되는 2차 직무의 조작 수는 인터페이스 설계에 의해서 크게 좌우된다. 신형 주제어실의 인터페이스는 기존 주제어실에 펼쳐져 있던 지시기와 제어기를 운전원 콘솔 화면 안에서 표현하기 때문에, 화면의 공간적 제약으로 인해 계층적 구조(hierarchical structure)를 가질 수 밖에 없다. 계층적 화면 설계를 가진 신형 주제어실에서는 인터페이스 조작을 위한 2차 직무가 반드시 요구되게 되며 얼마나 많은 2차 직무가 필요한지는 인터페이스 설계에 따라 결정된다. 소프트제어 특성 설명에서 언급되었듯이 소프트제어는 설계에 있어서 매우 다양한 형태를 가질 수 있다. 만일 화면의 이동수를 줄이기 위해서 한 화면에 많은 컴포넌트들을 포함시

킨다면, 필요한 화면 이동 수는 줄어드는 반면 한 화면 안에서 원하는 기기를 선택하는 것이 상대적으로 복잡해진다. 반대로 한 화면 안에 적은 기기만 포함시킨다면 화면 안에서 원하는 기기를 선택하는 것이 수월해지겠지만 화면 이동의 수는 많아질 수 밖에 없을 것이다. 제한된 화면 안에 효율적으로 디스플레이 설계를 하기 위해서 EID(Ecological Interface Design)같은 방법들이 사용된다. 하지만, 계층적 구조로 인한 한계점은 신형 주제어실이 가지는 기본적인 특징이며 이로 인한 제한적인 화면 설계 또한 신형 주제어실에서 고려되어야 할 기본 요소이다.

어떠한 입력기기가 사용되느냐에 따라서 2차 직무의 양이 변경될 수 있다. 소프트제어를 위해 다양한 컴퓨터 입력기기들이 사용 가능하다. 마우스, 터치스크린, 터치펜, 조이스틱, 키보드 등 여러 입력기기 중 설계 목적과 특성에 적합한 입력기기를 선택하여 설계가 가능하다. 예로, APR1400의 신형 주제어실에서는 안전관련 기기 제어와 비안전관련 기기 제어를 분리하기 위해서 다른 입력기기를 사용하고 있다. 비안전기기들은 운전원 콘솔 화면 안에 표시되는 제어창을 마우스를 이용하여 제어하며, 안전기기들은 운전원 콘솔 화면 아래에 위치하고 있는 ESCM(EFS-CCS Soft Control Module)에서 터치스크린 형식으로 제어된다. 이와 같이 설계에 사용되는 입력기기 종류와 수, 운전 방식에 따라서 다양한 설계가 가능하며 각 설계 특징에 따라 요구되는 2차 직무의 수도 바뀌게 된다. 2차 직무의 수가 반드시 인적오류 발생 확률과 비례한다고는 말할 수 없다. 비안전기기와 안전기기 제어를 다른 입력기기로 구분하고 있는 APR1400 주제어실 인터페이스 디자인은 더 많은 2차 직무를 야기할 수도 있지만, 운전원들이 안전기기를 제어할 때 보다 많은 주의를 기울일 수 있도록 하여 중요한 인적오류 발생을 줄여줄 수도 있다. 하지만, 너무 과도한 2차 직무가 요구되면 운전원에게 부담이 되어 인적오류가 발생이 증가할 것이다.

신형 주제어실에서는 2차 직무를 줄이기 위한 소프트웨어를 이용한 기능들이 설계되고 있다. EID 같은 방법을 이용한 효율적인 화면 설계로 전체 화면의 수를 줄이는 방법이 있으며, 화면 이동 방식을 효율적으로 설계하는 방법도 있다. 예를 들어, 전선화절차서에서 현재 수행하는 절차 단계에서 필요로 하는 정보를 갖고 있는 화면으로 바로 이동 가능한 '바로가기 버튼' 같은 설계가 2차 직무를 줄이기 위한 기능이라고 할 수 있다. 또한, 연관성 있는 화면간의 이동을 효율적으로 하는 화면간 이동 구성도 화면 이동의 수를 줄일 수 있는 방법이다.

소프트제어 운전에서 요구되는 2차 직무는 운전원의 인적오류나 수행도에 긍정적으로도 부정적으로도 영향을 미칠 수 있다. 하지만, 앞서 분석된 것과 같이 실제 운전을 수행할 때 2차 직무의 양이 전체 직무의 양에 비해 상당히 많은 부분을 차지하고, 2차 직무의 오류에 의해서 운전오류가 발생하는 경우도 있다. 따라서, 소프트제어 인간신뢰도분석을 위해서 2차 직무의 영향은 반드시 고려되어야 할 중요한 요소 중 하나이다.

3.2 Operator support systems

신형 주제어실에서는 인적오류 저감을 위한 다양한 운전지원시스템이 적용될 수 있다. 운전지원시스템은 간단하게 피드백을 효과적으로 보여주는 간단한 기능부터 특정 운전을 자동화 시켜주는 복잡한 시스템까지 설계가 가능하다. 위에서 언급된 필요한 계통 화면 바로가기 버튼 같은 기능들도 간단한 운전지원시스템의 한 예가 될 수 있다. 신형 주제어실에서는 운전원의 인지과정을 직/간접적으로 지원하는 높은 레벨의 운전지원시스템도 적용 가능하다. 운전원의 인지과정은 크게 4단계로 이루어지며 각 단계의 설명은 다음과 같다(Kim, 2004).

- 감시/감지(Monitoring/Detection): 외부자극을 보고, 듣고, 읽는 단계로 경보 발생으로 인해 비정상적인 상황이 발생하였다는 것을 인지하는 것이 대표적인 감시/감지 단계이다.
- 상황판단(Situation assessment): 상황을 판단하는 단계로 발전소 경보나 변수(parameter)들을 보고 현 상황을 판단하는 단계이다.
- 운전계획(Response planning): 대응 조치를 결정하는 단계로 발전소 운전에서는 현 상황에 맞는 운전절차서를 이용하여 수행되어야 하는 운전을 선택하는 단계이다.
- 운전 수행(Response implementation): 구체적 조치 수행(행위) 단계로 발전소에서는 운전절차서를 기반으로 필요한 조치를 수행하는 단계이다.

신형 주제어실의 인터페이스 설계 변경은 주로 감시/감지 단계와 운전 수행 단계에 영향을 미친다. 발전소 정보를 표시하는 인터페이스의 변화는 감시/감지 단계에 영향을 미치며 소프트제어를 이용한 운전을 수행하는 방법의 변화는 운전 수행 단계에 영향을 미친다. 인터페이스 설계 이외에 운전원의 운전을 지원해주는 여러 시스템들이 적용될 수 있다. 체계적이고 효율적인 경보시스템은 운전원의 감시/감지 단계를 지원하며, 현 상황을 자동으로 진단해주거나, 현 상황에 맞는 절차서를 자동으로 제시하거나 보여주는 기능은 상황판단 단계와 운전계획 단계를 지원해준다. 운전원이 수행한 운전이 절차서 논리를 벗어나거나 현 상황에 맞지 않는 위험한 운전일 경우에 운전원에게 경고를 주는 기능은 운전 수행 단계에서 운전원의 인적오류를 막기 위한 기능이 될 수

있다(Lee, 2007). 지능적인 운전지원(높은 레벨의 자동화)는 운전원의 업무를 줄여주고 부담을 줄여줄 수 있지만, 운전원의 의사결정에 많은 영향을 미치기 때문에 충분한 검증이 필요하다. 현재까지의 신형 주제어실은 인터페이스 설계와 간단한 운전지원 기능(낮은 레벨의 자동화)에 초점을 맞추고 있다(Lee, 2008).

제공되는 운전지원시스템의 기능에 따라서 운전원이 수행해야 하는 직무가 결정된다. 예로, 전산화절차서에서 수행한 운전을 표시하는 check-off 기능을 들 수 있다. 절차서 단계 수행 후 운전원이 수동으로 표시하여 절차의 수행여부를 확인하는 기능이 제공된다면, 운전원은 단계(step) 안의 부단계(sub step)를 수행하였다는 표시를 수동으로 한 후, 모든 부단계들에 대한 수행여부를 직접 확인하고 다음 단계로 넘어가야 한다. 만일, 운전원이 단계 안의 모든 부단계들을 수행하지 않으면 다음 단계로 넘어가는 버튼을 사용 불가능하게 하는 기능이 제공된다면, 운전원이 운전을 수행하지 않고 넘어가는 운전누락(operation omission) 오류발생 확률이 감수할 수 있다. 더 나아가서, 부단계 중에 단순히 값을 확인하는 직무들을 시스템이 자동으로 수행한다면, 확인 직무로만 이루어진 단계에서는 운전원은 시스템의 자동 수행 결과를 검토하는 업무만 수행하게 될 것이다. 이와 같이 운전지원시스템과 자동화 레벨에 따라서 운전원의 직무가 바뀌게 되며 발생 가능한 오류가 변하게 된다. 하지만, 높은 단계의 자동화는 운전원의 업무 부하를 줄여주는 반면, 운전원의 상황판단 능력을 저하시킬 수 있으며 운전원의 자유도를 낮게 만드는 원인이 된다. 만일, 컴퓨터 시스템의 고장으로 지원지능이 제공되지 않는 백업 시스템으로 직접 모든 운전을 수행해야 하는 경우가 발생한다면, 컴퓨터 인터페이스와 편리한 기능들에 익숙해진 운전원들은 지원시스템 없이 운전을 수행하는데 어려움을 겪을 수 있다.

신형 주제어실의 인간신뢰도분석에 있어서 제공되는 운전지원시스템들이 고려가 되어야 하며, 긍정적인 영향뿐만 아니라 부정적인 측면도 고려가 되어야 한다.

3.3 Human error probability of soft control operations

기존 주제어실에서는 많은 정보들이 운전원들의 대화를 통해 전달된다. 일반적으로 발전부장은 상황에 맞는 종이절차서를 열고, 필요한 조치를 각 보직자들에게 지시한다. 또한, 절차를 수행하는데 필요한 정보들을 보직자들에게 질문함으로써 취득한다. 각 운전원들은 자신의 맡은 자리에서 필요한 운전을 수행하고 필요 시 다른 운전원에게 정보를 전달하거나 자리를 이동하여 같이 운전을 수행한다.

신형 주제어실에서는 발전부장이 자신이 필요한 정보들을 운전원 콘솔 화면을 통하여 직접 취득하는 것이 가능하다. 기존에는 대부분 대화로 얻던 정보들이 운전원 콘솔을 통해서 취득 가능하게 됨으로써 정보를 취득할 수 있는 추가적인 방법이 제공되는 것이다. 절차를 수행하면서 필요한 정보를 해당 보직자에게 질문하여 얻고 그것을 자신의 콘솔 화면을 통해서 직접 확인도 가능해지면서, 운전원들간의 대화과정에서 오류가 발생하더라고 직접 취득한 정보를 기반으로 복구가 가능하다. 정보를 취득할 수 있는 추가적인 경로로 인해, 운전원이 잘못된 정보로 인해 운전을 잘못 수행하는 확률이 기존 주제어실보다 줄어들 가능성이 높아졌다.

이와 비슷하게, 기존 주제어실에서 발전부장에게만 제공되던 전산화절차서도 다른 운전원들에게도 운전원 콘솔 화면을 통해서 절차서가 제공된다(절차서 공유 기능은 전산화절차서 설계에 따라 다르다). 발전부장을 제외한 다른 운전원들이 절차서를 보는 것이 가능해짐으로써, 발전부장에게서 받은 수행해야 하는 운전 정보 이외에도 현재 어떠한 절차에서 어떤 운전이 수행되고 있는지를 직접 화면을 통해 보는 것이 가능하다. 이와 같은 인터페이스를 통해 운전원들에게 절차서 정보를 얻을 수 있는 방법을 제공함으로써 기존 주제어실보다 오류 확률이 줄어들 가능성이 높아진다. 예로, 발전부장에게 잘못된 지시가 왔을 경우, 예전에는 경험과 지식을 바탕으로 잘못된 지시에 의문을 갖고 오류를 복구하는 경우만 가능하였으나, 신형 주제어실에서는 공유되는 절차서의 정보를 바탕으로 오류를 복구할 수 있는 가능성이 부가적으로 생긴다.

다른 입력기기와 인터페이스로 인한 오류 확률도 고려해야 한다. NUREG/CR-1278(USNRC, 1983)의 인적오류확률 표에 따르면, 지시계(indicator)를 읽을 때 잘못 읽을 확률은 아날로그 지시계와 디지털 지시계에 대해 다른 값을 갖는다. 마찬가지로, 아날로그 제어기의 오류발생 확률과 마우스나 터치스크린을 이용한 소프트제어기의 오류발생 확률이 다를 수 있다. 손가락으로 버튼을 직접 누를 때 인적오류가 발생할 확률과 마우스를 이용하여 커서를 움직여서 해당 버튼 위치에서 클릭하는 과정에서 인적오류 확률 값에 차이가 있을 수가 있다. 또한, 아날로그 버튼을 누를 때와 터치스크린으로 버튼을 누를 때의 반응 차이로(터치스크린에서는 '딸깍'하고 눌리는 느낌이 없어서 진동으로 반응을 주는 설계도 있음) 인적오류 확률에 차이가 발생할 수 있다. 이러한 차이가 크지 않더라고, 정확한 평가를 위해서는 제어기 차이에 대한 기본오류확률 분석이 이루어져야 한다.

1차 직무와 2차 직무에 대한 영향을 평가할 때, 운전원이 느끼는 1차 직무와 2차 직무에 대한 부담감이 다르기 때문에 적절한 가중치가 고려되어야 한다. 2차 직무는 1차 직무를 수행하기 위해서 그 전에 수행되는 부가적인 직무들로 운전원들이 1차 직무를 수행하면서 느끼는 운전에 대한 부담감이 비교적 적다. 2차 직무에서 오류가 발생하여 잘못된 운

전으로 연결되는 경우도 있지만 2차 직무의 오류는 많은 경우 복구되어 실제 오류로 나타나지 않으므로 1차 직무와는 다르게 고려되어야 한다. 시뮬레이션 분석에서 2차 직무가 1차 직무 수보다 많은 결과를 보였지만, 운전원들이 느끼는 직무 수는 그와는 반대일 수도 있다.

이와 같이, 신형 주제어실의 소프트제어를 이용한 운전의 오류 확률을 구하기 위해서는 운전환경을 고려한 여러 다른 오류발생 확률과 복구 확률, 1차/2차 직무에 대한 가중치 등을 고려하여야 한다.

3.4 Human reliability analysis method for advanced main control rooms

만일 신형 주제어실의 여러 특성들을 고려하지 않고 단순히 소프트제어만 고려해서 인간신뢰도분석을 수행한다면 그 결과는 기존 주제어실의 분석결과에 비해서 좋은 결과를 보일 것으로 기대하기 힘들 것이다. 소프트제어로 인해 2차 직무가 부가적으로 요구되고 이로 인해 운전원들은 새로운 에러모드의 발생 가능성을 가지게 되며 전체 조작횟수가 2차 직무로 인해 늘어나게 된다. 단순히 각 직무 오류 확률을 요구되는 직무의 수만 고려하여 계산한다면 오류발생 확률은 늘어날 수 밖에 없을 것이다. 하지만, 기본적으로 기존 제어와 소프트제어의 차이점이 있으므로 이와 같이 기존 방법으로 단순히 계산하는 것은 적절하지 않다. 기존 주제어실에서 운전원의 물리적인 자리 이동이 신형 주제어실에서는 2차 직무로 대체되었으며, 다른 입력기기와 다른 인터페이스를 이용한 운전 수행되는 등, 소프트제어 운전의 특성을 반영한 인간신뢰도분석 방법이 필요하다(Lee, 2011a).

신형 주제어실의 인간신뢰도를 평가하기 위해서는 운전 수행과정만이 아닌 전체 운전과정이 고려되어야 한다. 운전원의 운전과정은 진단과 수행으로 구분될 수 있다. 소프트제어로 인해 수행과정에서 오류발생 확률이 증가하였더라고 전산화절차서와 경보시스템 등의 운전지원시스템으로 인해 진단과정의 인적오류가 줄어들 수 있으며, 전체적인 운전과정에 대한 인적오류가 줄어들 수 있다.

본 장에서는 신형 주제어실의 특성을 반영한 인간신뢰도 분석 방법인 HuRECA(Human Reliability Evaluator for Control Room Action)를 설명한다(Kim, 2010; Kim, 2011). HuRECA는 기존 주제어실의 인간신뢰도분석 방법인 K-HRA 방법을 기반으로 전산화절차서와 소프트제어 등의 신형 주제어실의 특성들을 고려하여 개발된 방법이다. HuRECA에서는 Figure 5와 같이 인적오류를 진단오류와 수행오류로 나누어서 평가하고 있다. 진단오류 확률(HEP_{Diag})은 식(1)과 같이 기본 진단오류 확률(B_HEP_{Diag})과 진단에 영향을 미치는 진단 보정인자(Performance Shaping Factor, PSF)로부터 결정되는 보정값(W_{Diag})의 곱으로 결정된다.

$$HEP_{Diag} = B\_HEP_{Diag} * W_{Diag}(PSF_{Diag}) \quad (1)$$

$W_{Diag}(PSF_{Diag})$ = f(주관심 작업, 전산화절차서 수준, 경보 / HMI 수준, 교육훈련수준, 의사결정부담)

기본 진단오류 확률(B_HEP_{Diag})은 진단 여유시간의 함수로 결정된다. 진단 보정값 $W_{Diag}(PSF_{Diag})$는 '주관심 작업 여부', '경보(MMI) 수준', '전산화절차서 수준', '교육/훈련 수준', '의사결정 부담감' 등의 종합적인 수행영향인자(PSF) 수준으로부터 얻는다.

수행오류(HEP_{Exec})는 식(2)와 같이 단위작업의 기본 수행오류 확률(B_HEP_{Exec})과 오류복구 확률(HEP_{Rec})의 곱한 값의 합으로 결정되며, 여기에 2차 직무 복잡도(Interface Management Complexity, IM_C)가 고려된다.

$$HEP_{Exec} = \sum[B\_HEP_{Exec} * HEP_{Rec}] * IM\_C \quad (2)$$

B_HEP_{Exec} = f(작업유형, 스트레스 수준)

HEP_{Rec} = f(시간긴급성, HMI, 감독/확인).

기본 수행오류 확률(B_HEP_{Exec})은 작업유형과 스트레스 수준의 함수로 결정된다. 작업유형은 '작업복잡도', '절차서 수준', '교육/훈련 수준', '동시작업 유무' 등의 종합적인 수행인자영향 수준으로부터 얻으며, 스트레스 수준은 '시간긴급성', '상황심각성', '작업위험성', 등의 종합적인 수행인자영향 수준으로부터 얻는다. 2차 직무 복잡도(IM_C)를 결정하기 위해서는 수행되는 '단위작업의 수', '제어를 위해 이동되는 화면의 수', '다른 입력 장치의 혼용 수' 등의 수행인자영향 수준으로부터 계산된다.

HuRECA 방법은 신형 주제어실의 특성을 반영하기 위해 소트프제어의 영향을 고려할 수 있는 수행영향인자를 고려하고 있다. 2차 직무로 인해 발생하는 인터페이스 조작 복잡도와 다른 인터페이스로 인한 복구 영향인자가 그 대표적인 예이다. 하지만, 아직 신형 주제어실의 운전경험 데이터가 충분하지 못하여, 기본 수행오류 확률을 비롯한 스트레스 수준 등의 인자들은 기존 주제어실에 적용되던 값을 그대로 사용하고 있으며, 가중치 값들은 전문가들의 의견을 바탕으로 결정되고 있다. 신형 주제어실의 충분한 운전경험 데이터가 축적되고 분석된다면 보다 신뢰성 있는 결과를 얻기 위한 방법론의 개선이 가능할 것이다.

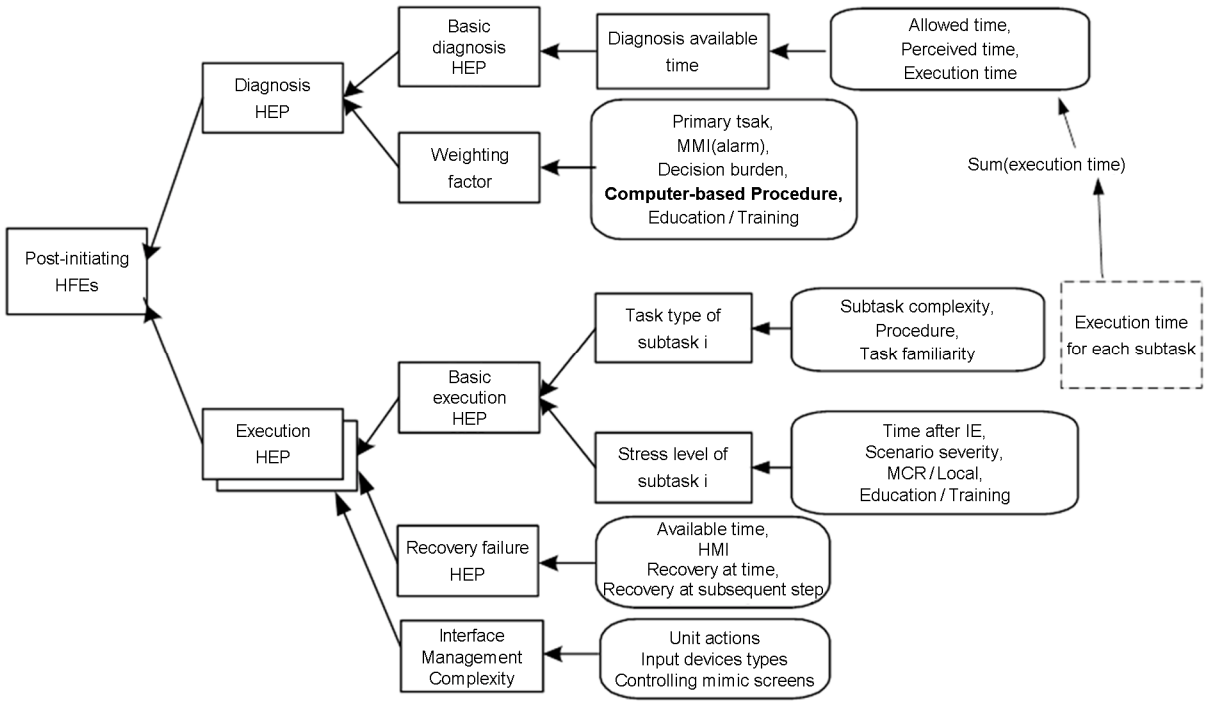

Figure 5. The framework of the HuRECA

4. Conclusions

신형 주제어실은 기존 주제어실과는 다른 운전환경을 갖고 있다. 운전원의 인간신뢰도는 운전환경에 많은 영향을 받으며, 운전환경의 변화로 인한 인간신뢰도의 영향을 신중하게 평가할 필요가 있다. 신형 주제어실은 컴퓨터 기반으로 설계되어서 다양한 설계가 가능하다. 전산화절차서와 운전지원시스템, 첨단경보시스템 등의 많은 특징을 갖고 있지만, 그 중 운전원의 수행오류에 가장 큰 영향을 미치는 것은 소프트제어기다. 기존의 아날로그 제어기와는 다르게 소프트제어기를 이용하기 위해서는 인터페이스 조작을 비롯해서 소프트제어의 새로운 특성들이 사용된다.

본 논문에서는 소프트제어 운전의 인간신뢰도분석을 위해 고려되어야 할 이슈들이 설명되었다. 이를 위해, 소프트제어 운전을 수행할 때 인적오류 분석에 관련된 논문들이 리뷰되었으며, 소프트제어 직무분석을 통한 오류유형 분류, 시뮬레이션 데이터 분석 등을 통해서 소프트제어를 이용한 운전의 특성을 서술하였다. 신형 주제어실에 맞는 적절한 인간신뢰도분석을 위해서는 신형 주제어실의 특징과 새로운 운전환경의 영향을 반영한 인간신뢰도분석 방법이 필요하다. 본 논문에서는 신형 주제어실의 인간신뢰도분석 방법 중의 하나인 HuRECA가 설명되었다.

신형 주제어실의 인간신뢰도분석에 대한 연구는 많이 진행되지 않은 상황이다. 분석 방법도 확립되지 않았으며 운전경험자료도 역시 충분하지 않다. 하지만, 보다 효율적인 신형 주제어실 인터페이스 설계와 훈련/교육 프로그램을 개발하기 위해서는 신형 주제어실 인간신뢰도분석이 반드시 필요하며, 이를 위해 신형 주제어실의 특징들을 반영한 인간신뢰도분석 방법 개발이 필요하다. 본 분야에 대한 연구가 많이 이루어지고 운전경험이 쌓인다면, 신형 주제어실의 적절하고 품질 높은 인간신뢰도분석을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgements

This research was supported by a Nuclear Research & Development Program of the National Research Foundation (NRF) grant funded by the Korean government(Grant Code: 2012-011506).

References

Embrey, D.E. "SHERPA: a systematic human error reduction and prediction approach," *International Topical Meeting on Advances in Human Factors in Nuclear Power Systems*, Knoxville, Tennessee, 1986.

Kim, M.C. and Seong, P.H., A quantitative model of system-man interaction based on discrete function theory, *Journal of Korean Nuclear Society*, 36, 430-442, 2004.

Kim, J., Lee, S. and Jang, S., Analysis of human error potentials and design-related influencing factors for computer-based procedure and soft controllers to develop HRA method for ACRs, KAERI/TR-4207, KAERI, 2010.

Kim, J., Lee, S. and Jang, S., HuRECA: The Human Reliability Analysis Method for Computer-based Advanced Control Rooms, KAERI/TR-4385, KAERI, 2011.

Lee, S.J. and Seong, P.H., Development of an integrated decision support system to aid cognitive process of operators, *Nuclear Engineering and Technology*, 39, 703-717, 2007.

Lee, S.J., Kim, M.C. and Seong, P.H., An analytic approach to quantitative effect estimation of operation advisory system based on human cognitive process using the Bayesian belief network, *Reliability Engineering of System Safety*, 93, 567-577, 2008.

Lee, M.S. et al., Development of human factors validation system for the advanced control room of APR1400, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 46, 90-101, 2009.

Lee, S.J., Kim, J. and Jang, S.C., "An Analysis and Quantification Method of Human Errors of Soft Controls in Advanced MCRs," *Proceedings of ICI2011*, Daejeon. Korea. 2011a.

Lee, S.J., Kim, J. and Jang, S.C., Human Error Mode Identification for NPP Main Control Room Operations using Soft Controls, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 48, 902-910, 2011b.

Lee, S.J., Kim, J. and Jung W., "A Human Reliability Evaluation Tool for Main Control Rooms in Nuclear Power Plants," *Proceedings of NPIC & HMIT2012*, San Diego. USA. 2012.

O'Hara, J.M. and Hall, R.E., Advanced control rooms and crew performance issues: Implications for human reliability, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 39, 919-923, 1992.

USNRC, Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications, NUREG/CR-1278, US NRC, 1983.

USNRC, The Reactor Safety Study, WASH-1400(NUREG-75/014), US NRC, 1975.

USNRC, Development of the human-system interface design review guideline; Revision I, NUREG-0700, US NRC, 1996.

USNRC, Soft control: Technical basis and human factors review guidance, BNL-NUREG-52565, NUREG/CR-6635, US NRC, 2000.

Yoshikawa, H., Human-machine interaction in nuclear power plants, *Nuclear Engineering and Technology*, 79, 51-158, 2005.

Author listings

Seung Jun Lee: sjlee@kaeri.re.kr

Highest degree: PhD, Department of Nuclear and Quantum Engineering, KAIST

Position title: Senior Researcher, Division of Integrated Safety Assessment, Korea Atomic Energy Research Institute

Areas of interest: Human Performance and Reliability in Nuclear Power Plant, Risk Assessment and Management

Wondea Jung: wdjung@kaeri.re.kr

Highest degree: PhD, Department of Industrial Engineering, KAIST

Position title: Project Manager, Division of Integrated Safety Assessment, Korea Atomic Energy Research Institute

Areas of interest: Human Performance and Reliability in Nuclear Power Plant, Risk Assessment and Management

Date Received : 2013-01-21

Date Revised : 2013-01-29

Date Accepted : 2013-01-29