

Specifying Information Requirements for Designing Ecological Displays Supporting Responsive Actions under Severe Accident Situations of Nuclear Power Plants

Hyeon-Woo Oh, Dong-Han Ham

Chonnam National University, Department of Industrial Engineering, Gwangju, 61186

원자력발전소의 중대사고 상황 관리를 지원하기 위한 생태학적 정보디스플레이 설계를 위한 정보요건의 도출

오현우, 함동한

전남대학교 산업공학과

Corresponding Author

Dong-Han Ham
Chonnam National University, Department of Industrial Engineering, Gwangju, 61186
Mobile: +82-10-3417-4607
Email : donghan.ham@gmail.com

Received : May 27, 2019

Revised : May 28, 2019

Accepted : June 27, 2019

Copyright©2019 by Ergonomics Society of Korea. All right reserved.

© This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Objective: This study aims to identify and organize information requirements for designing ecological displays supporting responsive actions under severe accident situations of nuclear power plants (NPPs).

Background: One of the requisites for supporting human operators in handling severe accident situations in complex systems such NPPs is to design information displays that satisfy information needs of human operators. Ecological Interface Design (EID) has been regarded as a viable approach for developing user-centered information displays. This study follows the design process and principles of the EID framework.

Method: We firstly identified functional knowledge structure of a work domain related to severe accident situations of NPPs through work domain analysis (WDA) using abstraction hierarchy (AH). After validating the WDA model through expert review, we finally specified information requirements for ecological displays.

Results: This study identified and organized information requirements for designing information displays that can be effectively used for supporting human operators in severe accident situations in NPPs.

Conclusion: A set of information requirements obtained from this study would be useful in designing information displays supporting human operators in coping with severe accident situations in NPPs.

Application: This study can contribute towards enhancing the safety of NPPs by providing a set of meaningful information requirements that should be offered to human operators in severe accident situations where their tasks could be very cognitively challenging.

Keywords: Ecological interface design, Information displays, Work domain analysis, Abstraction hierarchy

1. Introduction

원자력발전소와 같은 대형 복합 사회-기술적 시스템에서 안전성을 확보하기 위해서는 인간과 시스템 간의 상호작용이 원활하게 이루어져야 한다. 인간과 시스템의 상호작용을 지원하는 대표적인 방법 중의 하나는 사용자 중심의 정보디스플레이를 설계하는 것인데, 이는 시스템의 상황을 작업자가 정확하게 파악하고 필요한 작업을 효율적이고 효과적으로 수행할 수 있도록 정보디스플레이를 설계해야 한다는 것을 의미한다(Rasmussen, 1986). 사용자 중심의 정보디스플레이를 통한 정보지원의 중요성은 시스템이 안전성과 연관된 급박한 상황적 특성(예: 시간압박, 방대한 정보처리, 높은 불확실성, 시스템의 빠른 변화 등)을 보일 때 더 높아진다고 할 수 있다(Vicente, 2000). 원자력발전소의 중대사고 상황이 이러한 시스템 상태의 대표적인 예라고 할 수 있다. 일본의 후쿠시마 발전소 사고 이후 원자력산업계에서는 중대사고 방지 및 발생 후 안전성 확보를 위한 여러 가지 연구들이 진행되어 오고 있는데 중대사고 상황을 효과적으로 대처하는데 도움을 줄 수 있는 정보디스플레이의 개발도 그 일환으로 진행되고 있다. 원자력발전소의 중대사고는 운전원에게 높은 심리적 압박감과 인지적 부담감을 줄 수 있는 상황이므로 중대사고를 잘 대처할 수 있도록 운전원의 여러 인지적 활동(의사결정, 문제해결, 계획, 상황판단 등)을 체계적으로 지원해줄 수 있는 정보디스플레이의 개발은 원자력발전소의 안전성 확보에 매우 중요하다는 것을 알 수 있다(Ham et al., 2019).

복잡한 사회-기술적 시스템에서의 정보디스플레이란 시스템의 구조 및 기능을 중심으로 동적으로 변하는 시스템의 상태에 관한 정보를 제공하고, 작업자가 시스템의 상태를 변화시키기 위해 필요한 정보 및 제어 수단을 제공하는 인간-시스템 인터페이스(HSI: Human-System Interfaces)의 중요한 구성요소이다. 사용자 중심의 정보디스플레이는 작업 상황에 적합한 정보를 적절한 시기에 적합한 시각화를 통해 작업자에게 제공함으로써 작업자가 시스템을 감시, 제어 및 진단하는데 효과적인 정보지원을 가능하게 함을 목표로 한다. 일반적으로 정보디스플레이의 설계는 크게 두 개의 문제로 구성된다. 첫 번째는 작업자의 직무수행도에 직접적으로 도움이 될 수 있도록 디스플레이에 어떤 정보를 제공할 것인지를 파악하는 것이고(정보내용 설계), 두 번째는 디스플레이에서 제공될 정보를 직관적으로 인식하고 효과적으로 활용하기 위해 어떠한 정보를 시각화할 것인가를 고려하는 것이다(정보시각화 설계)(Ham, 2012; Pedersen and May, 1999; Vicente and Rasmussen, 1992).

본 연구는 두 가지의 설계 문제 중에서 첫 번째의 정보내용의 설계에 대한 것이다. 정보디스플레이에서 제공되어야 하는 정보의 내용을 파악하기 위해 필요한 것이 정보요건의 체계적이고 포괄적인 도출 및 분석이다. 정보요건 도출 및 분석 과정에서 중요한 점은 작업영역, 작업 상황 및 작업자의 인지적인 특성을 종합적으로 잘 고려해야 한다는 것이다. 특히 복잡한 사회-기술적 시스템의 정보디스플레이에서는 작업영역 혹은 대상시스템의 특성이 정보요건으로 반영되어야 함이 여러 연구들에 의해 강조되어 왔다(Rasmussen and Vicente, 1989). 이러한 관점에서 현재까지 개발되어온 복잡한 사회-기술적 시스템의 정보디스플레이 설계 방법론 중에서 생태학적 인터페이스 설계(EID: Ecological Interface Design)가 가장 이론적으로 우수한 방법론으로 간주되어 왔다(Vicente, 2002). 본 연구는 원자력발전소의 중대사고 상황을 효과적으로 감시 및 제어할 수 있도록 지원할 수 있는 정보디스플레이에 들어갈 정보요건을 EID 방법론에 기반해 도출하였다.

2. Research Backgrounds

2.1 Severe accident situations of nuclear power plants (NPPs)

원자력발전소에서의 중대사고(Severe Accidents)는 발전소 설계 시 고려되는 설계 기준 사고를 벗어나 노심이 용융되는 사고를 의미한다(Kim, 2018). 한편 중대사고를 원자로 용기 안에 있는 핵연료가 대량 손상되는 사고로 정의하는 견해도 있다(Song et al., 2018). 중대사고에 대한 견해 차이가 있지만 분명한 사실은 중대사고는 원자력발전소 안전에 매우 위협적인 상황을 초래할 수 있다는 점이다. 원자력발전소는 많은 다중 안전설비들이 있으므로 중대사고 발생 가능성은 매우 낮다고 할 수 있다. 그러나 후쿠시마 원전 사고와 같이 극단적인 자연재해나 운전원의 연속적인 실수 등에 의해 중대사고가 발생하면 노심이 회복될 수 없을 정도로 손상될 수 있다. 이에 따라 핵분열 생성물이 격납건물 내부로 누출되고, 격납건물 밀폐 기능이 손상되는 경우에는 핵분열 생성물이 대기로 방출되어 인근 지역을 오염시키고 인명 손상을 초래하여 국가 경제에 막대한 피해를 줄 수 있다. 중대사고 연구의 목표는 중대사고가 발생하더라도 노심을 적절히 냉각하여 원자로 용기 및 격납건물의 건전성을 확보하여 핵분열 생성물로 인한 피해를 최소화하는 것이다(Song, 2011).

중대사고 관리란 노심이 손상된 이후에 발전소를 안전하게 제어하고 안정된 상태로 만드는 일련의 조치를 수행하는 것이다. 중대사고가 발생하면 발전소의 상태는 격납건물이 파손될 때까지 동적으로 급속하게 변할 가능성이 매우 높다. 따라서 운전원들은 중대사고 관리를 위한 적절한 완화 조치를 효과적으로 선택해야 하고 선택된 완화 조치의 우선순위를 정하기 위해 발전소 상태를 올바르게 인식하고 진단할 필요가 있다(Yoo and Kim, 2004).

원자력발전소에서 중대사고가 일단 발생하면 중대사고관리지침서(SAMG: Severe Accident Management Guidelines)에 일차적으로 의존해 중대사고 관리가 이루어진다. 이 과정에서 발전소 제어에 대한 권한과 책임이 주제어실(MCR: Main Control Room)에서 비상기술 지원실(TSC: Technical Support Center)로 옮겨진다(Yoo and Kim, 2004). 이 상황에서 TSC의 주된 업무는 중대사고 대응 과정에서의 전체적인 지휘통제이며, MCR이 상실되지 않는다면 MCR은 TSC와 협력하면서 발전소 상태에 대한 감시와 제어를 수행하게 된다. 이 상황에서 MCR은 TSC에서 합리적인 의사결정을 할 수 있도록 발전소 상태에 대한 정보를 TSC에 잘 제공할 필요가 있다. 그런데 TSC에서 중대사고 상황을 관리하는데 도움을 줄 수 있는 효과적인 정보디스플레이가 개발된다면 이러한 TSC와 MCR 간의 협업이 더 원활해지고 MCR의 상실과 같은 상황에도 효과적으로 대비할 수 있을 것이다. 이러한 이유로 TSC에서 중대사고에 대응하는데 도움을 줄 수 있는 정보디스플레이 개발의 필요성이 대두되어 왔다. 본 연구의 목적은 TSC 요원이 중대사고 상황을 효과적으로 관리하는데 도움을 줄 수 있는 정보디스플레이의 정보요건을 EID 방법론에 기반해서 도출 및 조직화하는 것이다.

2.2 Ecological Interface Design (EID)

EID는 복잡한 사회-기술 시스템을 효과적으로 감시, 제어 및 진단할 수 있도록 지원해주기 위한 정보디스플레이를 체계적으로 개발하는데 필요한 설계 원칙 및 개념을 제공하는 인지시스템공학 분야의 대표적인 정보디스플레이 설계 방법론이다(Rasmussen and Vicente, 1989; Vicente 2002). 복잡한 시스템에서의 인간-시스템 상호작용에서 작업자의 인지적 정보요구가 특히 높아지고 중요해질 수 있는 상황이 예상치 못한 상황이 발생할 경우이다. EID 기반의 정보디스플레이는 이러한 예상치 못한 상황 및 작업복잡도가 높은 상황에서 그 우수성이 여러 연구들에 의해 입증되어 왔다(Ham and Yoon, 2001). 정보디스플레이의 정보내용 설계와 관련해 EID는 작업자가 상호작용해야 하는 작업영역의 다양한 추상화 수준의 기능적 지식을 포괄적이고 체계적으로 제공할 필요가 있음을 강조한다. 이를 위해 EID에서는 정보내용 설계를 위한 정보요건 도출 및 분석을 위해 추상화계층(AH: Abstraction Hierarchy)이라는 다단계 정보표현 프레임워크의 사용을 제안한다. AH에 기반해 도출되고 분석된 정보를 제공하는 EID 기반의 정보디스플레이는 다양한 시스템 상황(특히 예측하지 못한 상황)에서 작업자가 올바른 작업영역의 심성모형(Mental Model)을 형성하면서 작업할 수 있도록 여러 추상화 수준의 기능적 정보 및 이들의 관계를 유기적으로 제공해준다(Vicente and Rasmussen, 1992; Burns and Hajdukiewicz, 2004).

또한 정보의 시각화 문제와 관련해 EID는 작업자가 제공되는 정보를 직관적으로 인식해 이를 바로 큰 인지적 부담 없이 작업에 활용할 수 있도록 해주고 작업영역의 복잡한 기능적 정보구조를 보다 쉽게 이해할 수 있도록 해줄 수 있는 설계 원칙을 제공한다. 이를 위해 EID는 인지적 행위의 분류체계인 SRK (Skill-Rule-Knowledge) 프레임워크를 활용한다. 작업자가 익숙한 상황에서는 상대적으로 인지적 부담이 적은 기술기반 행동(SBB: Skill-Based Behavior)과 규칙기반 행동(RBB: Rule-Based Behavior)을 효과적으로 지원하는 정보형태를 제공하고, 예상치 못한 상황이나 복잡도가 높은 상황이 발생했을 때는 올바른 심성모형을 갖고 지식기반 행동(KBB: Knowledge-Based Behavior)을 할 수 있도록 지원해줄 수 있는 정보형태를 제공한다(Rasmussen, 1983; Vicente and Rasmussen, 1992; Ham, 2012).

EID는 위에서 설명한 것처럼 SRK에 기반한 정보시각화 설계 원칙을 제공함으로써 일반적으로 정보내용 설계 및 정보시각화 설계를 유기적으로 연결하는데 도움을 준다(Vicente and Rasmussen, 1992; Upton and Doherty, 2008; Ham, 2012). 다음은 EID에서 명시하고 있는 정보시각적 설계 원칙이다.

- (1) SBB를 지원하기 위해 직접 조작이 가능해야 하며 표현은 부분-전체 구조와 동일한 구조여야 한다.
- (2) RBB를 지원하기 위해 제약조건과 인터페이스에 제공되는 신호나 단서는 1대1로 일관되게 대응되어야 한다.
- (3) KBB를 지원하기 위해 정보디스플레이는 작업영역의 외부적 심성모형의 역할을 해줘야 하므로 작업영역을 추상화계층의 형태로 표현해야 한다.

기존의 연구들을 종합해볼 때 EID의 유용성을 크게 네 가지로 요약해볼 수 있다. 첫 번째로 EID 기반의 정보디스플레이는 작업수행에

영향을 주는 작업영역의 제약조건을 잘 표현해준다. 여기서 제약조건이란 작업영역이 어떻게 작동하는지와 작업영역 내의 작업자가 자유롭게 행동할 수 있는 범위를 나타낸다. 이는 작업영역의 여러 추상화 수준의 기능적 지식과 이들 간의 관련성을 의미 있게 제공한다는 것으로 해석될 수 있다. 작업자는 자신들이 작업하는 시스템의 제약조건을 항상 알고 있지 않고 또한 올바르게 알고 있지 않을 가능성이 높다. 따라서 EID를 이용하여 제약조건을 시각화하여 인터페이스에 보여준다면, 작업자들은 더 효과적으로 작업할 수 있을 것이다(Burns and Hajdukiewicz, 2004).

두 번째로 EID 기반의 정보디스플레이는 사용자로 하여금 작업영역에 대한 이론적 지식을 보다 체계적으로 습득하는데 도움을 준다. 복잡한 시스템은 구성요소들이 기능과 구조의 관점에서 복잡한 관계를 가지기 때문에 인터페이스를 통해 이런 정보를 제대로 표현한다는 것이 쉽지 않다. 그러나 AH에 기반한 정보요건의 파악 및 이의 표현은 작업자로 하여금 시스템의 이론적 지식을 보다 효율적으로 습득할 수 있도록 도와준다(Burns and Hajdukiewicz, 2004).

세 번째로 EID 기반의 정보디스플레이는 작업영역의 제약조건을 기반으로 설계함으로써 작업자가 예상치 못한 상황에 잘 대처할 수 있도록 도와준다. 시스템의 제약조건이 어긋났다는 것은 시스템이 비정상적인 상황이 되었음을 의미한다. 예측하지 못한 상황이 발생했을 때 EID는 작업자로 하여금 제약조건 중심으로 시스템 상태를 인지하고 추론하고 시스템을 정상 상태로 복구하기 위한 조치를 계획할 수 있도록 해줌으로써 작업수행도 향상에 도움을 줄 수 있다. 특히 앞에서 설명한 정보시각화 설계 원칙 중에서 세 번째의 설계 원칙이 이 부분과 밀접한 관련이 있다(Burns and Hajdukiewicz, 2004).

네 번째로 EID 기반의 정보디스플레이는 SRK 프레임워크에서 명시한 세 가지 인지적 행동 수준(SBB, RBB, KBB)을 모두 지원해준다. 작업자는 시스템과 상호작용을 할 때 작업복잡도, 이용 가능한 자원 등 여러 작업 상황에 따라 세 가지 다른 인지적 행동 수준을 보인다. 정보디스플레이를 설계할 때 이러한 작업자의 인지적 특성을 적절하게 고려해줄 필요가 있는데 EID는 이를 위한 설계 원칙을 제공해줌으로써 사용자 중심의 정보디스플레이 설계에 도움을 준다(Burns and Hajdukiewicz, 2004).

EID는 원자력, 자동차, 네트워크 관리, 항공 등 다양한 분야에서 연구되어 왔으며 그 유용성이 입증되어 왔다. 아래의 Table 1은 EID가 활용된 작업영역 혹은 응용문제를 요약하고 이에 해당하는 기존 연구들을 정리한 것이다.

Table 1. Work domains or application problems using the EID

Work domains or application problems	Examples of studies
Process control systems	(Vicente, 1996; Ham and Yoon, 2001; Jamieson and Vicente, 2001; Vernon et al., 2002; Jamieson, 2007; Ham, 2012)
Aviation & Air traffic control systems	(Dinadis and Vicente, 1999; Ho and Burns, 2003; Amelink et al., 2005; Ko and Myung, 2006; Van Dam et al., 2008; Kim and Myung, 2018)
Military systems	(Bennett et al., 2008)
Vehicle systems	(Hilliard and Jamieson, 2007; Seppelt and Lee, 2007)
Manufacturing systems	(Upton and Doherty, 2008)
Camera system	(Mazaeva and Bisantz, 2013)
Nuclear systems	(Dinadis and Vicente, 1996; Yamaguchi and Tanabe, 2000; Lau et al., 2008; Burns et al., 2008)
Network management	(Burns et al., 2003)
Healthcare systems	(Sharp and Helmicki, 1998; Jungk et al., 2000)
Social systems	(Burns and Proulx, 2002)

2.3 AH-based analysis of information requirements

앞에서 설명한 바와 같이 EID는 정보내용의 설계를 위해 AH에 기반해 정보요건을 도출하고 조직화할 것을 명시하고 있다. AH는 시스템의 설계지식을 다계층으로 모델링하는 지식표현 기법이라 할 수 있다. AH는 시스템의 설계지식을 기능적 관점에서 여러 추상화 수준으로 표현한다. 또한 각 추상화 수준의 기능들 간의 관련성을 목적-수단 관계(Goal-Means Relationship)의 관점에서 표현한다. AH에 기반해 도출되고 조직화된 정보가 디스플레이에서 제공될 때 이론적으로는 모든 작업 상황에 적합한 정보의 지원이 가능하다(Burns and Hajdukiewicz, 2004).

AH를 활용해 시스템의 기능적 정보를 표현할 때 여러 추상화 수준으로 표현되는데 일반적으로 다섯 개의 추상화 수준이 활용된다(Vicente, 1999). 다섯 개의 추상화 수준은 가장 상위 수준부터 나열하면 다음과 같다: 기능적 목표(FP: Functional Purpose), 추상적 기능(AF: Abstract Function), 일반적 기능(GF: Generalized Function), 물리적 기능(PF: Physical Function), 물리적 형태(P: Physical Form). 추상화 수준 간의 의미 있는 관련성은 목적-수단 관계에 의해 설명이 된다고 앞에서 기술하였다. 즉 어느 추상화 수준 내의 기능은 근접한 상위 추상화 수준의 특정 기능의 수단의 역할을 하고 근접한 하위 추상화 수준의 특정 기능의 목적의 역할을 한다고 할 수 있다. 이러한 목적-수단 관계는 특히 복잡한 작업 상황을 대처하는데 매우 유용한 정보임이 알려져 있다(Ham and Yoon, 2001). 또한 필요한 경우 동일 추상화 수준 내의 기능들 간의 인과관계(Topological Links)도 함께 표현된다(Vicente, 1999).

정보디스플레이에서 제공되는 정보내용의 관점에서 EID 기반의 정보디스플레이가 갖는 갖는 장점을 AH 기반의 정보표현으로부터 찾아볼 수 있다. AH의 다섯 추상화 수준 중에서 AF 및 GF 수준에서 표현되는 기능적 정보 및 목적-수단 관계에 의한 각 수준 간 기능들 간의 관련 정보는 SSID (Single Sensor Single Indicator)로 대변되는 전통적인 정보디스플레이에서는 쉽게 찾아볼 수 없다(Ham, 2012; Ham, 2013). 그러나 이러한 정보는 작업자가 시스템과 상호작용함에 있어 매우 필요한 정보로 이를 정보디스플레이에서 명시적으로 제공하고 표현해준다면 작업자의 인지적 부담을 효과적으로 줄여주고 작업수행도 향상에 큰 도움이 될 것이다. 또한 앞에서 설명했듯이 작업자가 상호작용하는 시스템의 설계지식을 AH 기반으로 표현해서 정보디스플레이에서 제공할 때 작업자가 시스템의 올바른 심성모형을 구축하는데 큰 도움을 줄 수 있다(Vicente, 1999).

AH 기반으로 작업영역 혹은 시스템을 분석하는 과정을 작업영역분석(WDA: Work Domain Analysis)이라 한다. AH 기반으로 정보요건을 분석할 때 다음과 같은 정보가 중점적으로 파악될 필요가 있으며 이러한 정보파악에 AH 분석이 매우 유용하다(Burns and Hajdukiewicz, 2004; Oh and Ham, 2018).

- (1) 추상화계층 각 수준의 single variable
- (2) 추상화계층 각 수준의 single variable의 제약조건
- (3) 추상화계층 각 수준의 multiple variables의 제약조건
- (4) 추상화계층 각 수준의 goal-means relationship
- (5) 여러 수준 간의 변수들이 형성하는 제약조건
- (6) 각 수준 구성요소의 topology

3. Method

3.1 Scope of work domain

본 연구의 목적은 원자력발전소에서 중대사고 발생 시 효과적으로 대응하는데 정보지원을 해줄 수 있는 EID 기반의 정보디스플레이에서 제공될 정보요건을 AH에 기반해 도출하고 조직화하는 것이다. 이론적으로 중대사고를 고려할 때 중대사고 완화조치를 위해 고려해야 하는 작업영역의 분석대상은 원칙적으로 원자력발전소의 모든 기능이라고 할 수 있다. 그러나 중대사고가 발생했음은 원자로의 노심이 용융되기 시작했음을 의미하기 때문에 이는 원자력발전소의 대부분의 계통 및 기기가 발전소의 설계된 원리에 의해 논리적으로 설명되지 않는 방향으로 거동할 가능성이 충분히 있다는 것을 의미한다. 또한 원자력발전소가 정상적으로 운영될 때의 궁극적 기능적 목표는 생산성 및 안전성 확보이기에 현재까지 원자력발전소에서의 EID 연구는 대부분 이러한 기능적 목표를 상정하고 AH 분석이 이루어져 왔다. 반면에 중대사고 상황에서의 궁극적 목표는 핵분열 생성물 방출 방지이다. 이러한 궁극적 목표를 효과적으로 달

성하기 위해 원자력발전소의 모든 계통 및 기기가 활용될 가능성은 매우 낮을 것이다.

이러한 이유로 중대사고가 발생하면 우선적으로 이용하는 원자력발전소 중대사고관리지침서(SAMG: Severe Accident Management Guidelines)에 나오는 기능들을 도출한 후 이 기능들만으로 구성된 가상적인 작업영역을 구상하였다. 이렇게 구상된 작업영역을 본 과제에서 분석해야 하는 작업영역으로 선정한 후 AH에 기반해 작업영역을 분석하고 정보요건을 도출 및 조직화하였다.

3.2 Work domain analysis using AH

AH에 기반한 작업영역분석을 보다 체계적으로 수행하기 위해 Oh and Ham (2018)의 연구에서 제안된 핵심질의 및 핵심어를 활용하였다. 작업영역분석을 위해 필요한 관련 자료 및 정보는 주로 원자력발전소의 계통 관련 연구 문헌, 중대사고관리지침서를 포함한 원자력발전소 운영 관련 문서, 원자력발전소의 기술 문서, 원자력발전소 계통 및 중대사고 연구 경험자들의 브레인스토밍 결과를 종합하여 도출하였다.

또한 AH 분석을 할 때 기능적 추상화 수준(Functional Abstraction Levels)과 시스템 분해 수준(Part-Whole Decomposition)을 동시에 고려하였고, 수준 간 목표-수단 관계와 수준 내 위상학적 관계(topological link)도 고려하였다. Table 2는 앞에서 말한 가상적인 작업영역을 대상으로 한 AH 기반의 작업영역분석 결과를 요약 정리한 것이다. 일반적으로 AH 기반 작업영역분석 결과를 그림으로 많이 표현하지만 기능의 수가 많으면 그림이 복잡하여 가독성이 떨어진다. 이러한 이유로 분석 결과를 표의 형태로 나타냈다.

FP는 시스템이 설계된 궁극적인 목표로 본 연구의 작업영역의 목표는 방사성물질 누출 방지와 노심 출구 온도 정상화로 정의하였다. AF와 GF 수준에서의 기능들에 관한 정보가 정보내용 관점에서 EID 기반 정보디스플레이의 핵심적 요소라고 앞에서 설명하였다. 중대 사고 완화조치를 위한 EID 기반 정보디스플레이의 정보요건을 도출하는데 핵심적인 부분은 마찬가지로 AF와 GF 수준의 기능이라 할 수 있다. AF는 작업영역의 FP인 방사성물질 누출 방지 및 노심 출구 온도 정상화가 얼마나 잘 달성되고 있는가를 직관적으로 알아볼 수 있는 지침자(Indicators) 역할을 할 수 있는 기능적 정보 및 FP를 위해 요구되는 기능이 어떻게 FP를 위해 작동하는가를 설명하는 기능적 정보라 할 수 있다. 본 연구에서 도출한 AF는 원자로 용기 건전성 유지, 격납건물 건전성 유지, 핵연료건물 건전성 유지, 노심냉각 기능 회복, 질량 보존, 에너지 보존이다.

GF는 SAMG의 세부 절차서의 내용을 기반으로 도출하였는데 각 기능은 두 개의 FP를 위해 필수적으로 요구되는 일반적 수준의 기능이다. 이러한 기능은 발전소의 형태나 특성에 상관없이 FP를 위해 어떻게 구현이 되더라도 필요한 기능이라 할 수 있다. 본 연구에서 파악된 GF는 핵분열 생성물 방출 제어, 격납건물 상태 제어, 격납건물 수소 제어, 원자로 냉각재계통(RCS: Reactor Coolant System) 냉각수 재고량 관리, RCS 감압, 증기발생기 상태 제어, 격납건물 냉각수 주입, 노심 열 제거, 사용 후 연료 저장조 상태 제어, 필수 전원 확보이다.

PF는 GF의 기능들을 달성하기 위해 실제적으로 구현된 기능들이면서 관측 가능한 물리적 장비, 기기 및 부품 등의 작동 상태 및 방식으로부터 추상화할 수 있는 물리적 형태의 기능이라 할 수 있다(Ham, 2013). 본 연구에서 파악된 PF는 격납건물 살수, 팬냉각기 작동 등 45개이다.

Table 2. Work domain analysis for coping with severe accident situations of NPPs using AH

Abstraction level	Decomposition level	Label	Functional element	Related functions-upper level
FP	System	FP-1	Preventing the radiation leak	
	System	FP-2	Normalizing temperature of the core outlet	
AF	Subsystem	AF-1	Maintaining structural safety of the reactor vessel	FP-1

Table 2. Work domain analysis for coping with severe accident situations of NPPs using AH (Continued)

Abstraction level	Decomposition level	Label	Functional element	Related functions-upper level
AF	Subsystem	AF-2	Maintaining structural safety of the containment	FP-1
	Subsystem	AF-3	Maintaining structural safety of the fuel building	FP-1
	Subsystem	AF-4	Recovering cooling function of the core	FP-1, 2
	Subsystem	AF-5	Conservation of mass	FP-1, 2
	Subsystem	AF-6	Conservation of energy	FP-1, 2
GF	Subsystem	GF-1	Controlling the fission products leak	AF-1, 2, 3, 6
	Subsystem	GF-2	The containment's condition control	AF-2, 5, 6
	Subsystem	GF-3	The containment's hydrogen control	AF-2
	Subsystem	GF-4	Managing the amount of coolant in the RCS	AF-1, 4, 5, 6
	Subsystem	GF-5	Depressurizing the RCS	AF-1, 4
	Subsystem	GF-6	Controlling condition of the steam generator	AF-2, 4, 5, 6
	Subsystem	GF-7	Putting coolant in the containment	AF-1, 2, 5, 6
	Subsystem	GF-8	Removing heat from the core	AF-1, 4, 5, 6
	Subsystem	GF-9	Controlling condition of the spent fuel pool	AF-3, 5, 6
	Subsystem	GF-10	Securing vital power	AF-1, 2, 3, 4
PF	Component	PF-1	Containment spray	GF-1, 2, 4, 7
	Component	PF-2	Operating the fan cooler	GF-1, 2
	Subsystem	PF-3	Containment isolation	GF-1
	Component	PF-4	Condenser steam dump	GF-1
	Subsystem	PF-5	Steam generator isolation	GF-1
	Component	PF-6	Blocking release path from containment to auxiliary building	GF-1
	Component	PF-7	The auxiliary building ventilation	GF-1
	Component	PF-8	Blocking release path from containment to fuel building	GF-1
	Component	PF-9	The containment ventilation	GF-2
	Component	PF-10	Operating the hydrogen igniter	GF-3
	Component	PF-11	Operating the hydrogen recombiner	GF-3
	Component	PF-12	Artificial hydrogen burning	GF-3
	Subsystem	PF-13	The containment deactivation	GF-3
	Component	PF-14	Operating the high pressure safety injection pump	GF-4, 7, 8
	Component	PF-15	Operating the low pressure safety injection pump	GF-4, 7, 8
	Component	PF-16	Operating the reactor coolant pump	GF-4, 7, 8
	Component	PF-17	Operating the charging pump	GF-4, 7, 8

Table 2. Work domain analysis for coping with severe accident situations of NPPs using AH (Continued)

Abstraction level	Decomposition level	Label	Functional element	Related functions-upper level
PF	Component	PF-18	Operating the mobile pump	GF-4, 6, 7, 8, 9
	Component	PF-19	Depressurization using turbine bypass condenser valve	GF-5, 6
	Component	PF-20	Depressurization using turbine bypass air valve	GF-5, 6
	Component	PF-21	Depressurization using atmospheric steam dump valve	GF-5, 6
	Component	PF-22	Depressurization using safety depressurization valve	GF-5
	Component	PF-23	Pressurizer spray	GF-5
	Component	PF-24	The reactor head ventilation	GF-5
	Component	PF-25	Pressurizer ventilation	GF-5
	Component	PF-26	Operating motor driven aux. feedwater pump	GF-6
	Component	PF-27	Operating turbine-driven aux. feedwater pump	GF-6
	Component	PF-28	Operating start-up feed water pump	GF-6
	Component	PF-29	Operating turbine-driven feedwater pump	GF-6
	Component	PF-30	Operating motor driven feedwater pump	GF-6
	Component	PF-31	Operating booster feedwater pump	GF-6
	Component	PF-32	Putting coolant using gravitational drainage of refueling water tank	GF-4, 7, 9
	Component	PF-33	Control rods drop	GF-8, 11
	Component	PF-34	Putting boric acid	GF-8, 9, 11
	Component	PF-35	Operating purification pump of the spent fuel pool	GF-9
	Component	PF-36	Operating boric acid make-up pump	GF-9
	Component	PF-37	Operating demineralized water transfer pump	GF-9
	Component	PF-38	Operating component cooling water make-up pump	GF-9
	Component	PF-39	Opening the spent fuel pool door	GF-9
	Component	PF-40	Operating normal ventilation air cleaner	GF-1, 9
	Component	PF-41	Operating normal supply air cleaner	GF-1, 9
	Component	PF-42	Operating abnormal ventilation air cleaner	GF-1, 9
Component	PF-43	Supplying power using emergency diesel generator	GF-10	
Component	PF-44	Supplying power using alternate alternating current	GF-10	
Component	PF-45	Supplying power using mobile generator truck	GF-10	

3.3 Validation and revision of AH

4인의 원자력발전소 계통 및 중대사고 관리 전문가들의 설문 및 집단토론편 기반의 자문을 이용해 작업영역분석 결과를 검증하였다. 자문에 참석한 4인의 전문가는 모두 최소 5년 이상의 중대사고 연구 및 10년 이상의 원자력발전소 계통연구 경험을 갖고 있었다. 작

업영역분석 결과의 적절성 및 안전성을 높이기 위해 검증 결과를 반영하여 작업영역분석 결과를 수정하였다. Table 3은 검증 결과를 반영하여 수정된 작업영역분석 결과이다. 또한 Figure 1은 Table 3의 작업영역분석 결과 중에서 상위 세 수준(FP, AF, GF)의 목적-수단 관계를 보여준다.

FP의 경우 FP-2인 '노심 출구 온도 정상화'가 기능적 목표로 부적합하고 중대사고 관리의 기능적 목표는 FP-1인 '방사능물질 누출 방지' 하나로 충분하다는 전문가들의 의견이 지배적이어서 FP-1만 남겨두기로 결정하였다.

AF의 경우 AF-4인 '노심냉각 기능 회복'보다 '노심/원자로공동 열 제거 기능 회복'이 더 포괄적인 표현이어서 기능 명을 변경했다. 또한 AF-5(질량 보존)와 AF-6(에너지 보존)은 SAMG 기반의 중대사고 관리에서는 의미가 없다는 의견이 지배적이어서 삭제하였다. 이는 중대사고가 발생하면 원자력발전소의 시스템 상태가 설계원리로부터 설명될 수 없는 거동을 보일 가능성이 높다는 점과 밀접한 관련이 있다.

GF-1인 '핵분열 생성물 방출 제어'는 GF 수준보다 높은 수준의 기능이고 나머지 GF의 목표가 될 수 있다는 의견이 있어 삭제하였다. GF-4인 'RCS 냉각수 재고량 관리'는 SAMG의 용어를 반영하여 'RCS 냉각수 주입'으로 변경하였다. GF-8인 '노심 열 제거'는 다른 GF들로 달성할 수 있고, AF-4와 중복된다는 의견이 있어 삭제하였다. GF-10의 '필수 전원 확보'는 필수 전원이 안전 계통에 필요한 전원을 의미하기 때문에 '비상 전원 확보'로 수정하였다.

PF 수준의 요소는 전체적으로 명사형으로 표현하였다. 또한 다음의 11개 기능을 삭제하였다: PF-3(격납건물 격리), PF-4(복수기 증기 덤프), PF-5(증기발생기 격리), PF-6(격납건물로부터 보조건물로 방출되는 경로 차단), PF-7(보조건물 배기), PF-8(격납건물로부터 핵연료건물로 방출되는 경로 차단), PF-12(인위적 수소 연소), PF-13(격납건물 불활성화), PF-25(가압기 배기), PF-33(제어봉 삽입), PF-34(봉산수 주입). PF-3, PF-4, PF-5, PF-7은 GF-1이 삭제되면서 목표-수단 관점에서 자연스럽게 삭제되었다. PF-6, PF-8은 PF-3의 기능이어서 삭제되었다. PF-12의 경우 PF-10(수소점화기 작동)와 중복되어 삭제하였으며, PF-13은 개정된 SAMG에서는 의미가 없어 삭제하였다. PF-25는 PF-22(안전감압밸브)와 중복되어 삭제하였다. PF-33은 GF-8이 삭제되면서 목표-수단 관점에서 자연스럽게 삭제되었다. PF-34는 PF-36(봉산수 보충펌프 작동)과 중복되어 삭제하였다. 또한 PF 수준에서 '안전주입탱크'와 '이동형 송풍기'가 새로운 기능으로 추가되었다.

Table 3. Revised work domain analysis for coping with severe accident situations of NPPs using AH

Abstraction level	Decomposition level	Label	Functional element	Related functions-upper level
FP	System	FP-1	Preventing the radiation leak	
AF	Subsystem	AF-1	Maintaining structural safety of the reactor vessel	FP-1
	Subsystem	AF-2	Maintaining structural safety of the containment	FP-1
	Subsystem	AF-3	Maintaining structural safety of the fuel building	FP-1
	Subsystem	AF-4	Recovering cooling function of the core/reactor cavity	FP-1
GF	Subsystem	GF-1	The containment's condition control	AF-2
	Subsystem	GF-2	The containment's hydrogen control	AF-2
	Subsystem	GF-3	Putting coolant in the RCS	AF-1, 4
	Subsystem	GF-4	Depressurizing the RCS	AF-1, 4
	Subsystem	GF-5	Controlling condition of the steam generator	AF-2, 4
	Subsystem	GF-6	Putting coolant in the containment	AF-1, 2
	Subsystem	GF-7	Controlling condition of the spent fuel pool	AF-3

Table 3. Revised work domain analysis for coping with severe accident situations of NPPs using AH (Continued)

Abstraction level	Decomposition level	Label	Functional element	Related functions-upper level
GF	Subsystem	GF-8	Securing emergency power	AF-1, 2, 3, 4
	Component	PF-1	Containment spray system	GF-1, 2, 6
		PF-2	The fan cooler	GF-1
		PF-3	The containment filtered system	GF-1
		PF-4	The hydrogen igniter	GF-2
		PF-5	The hydrogen recombiner	GF-2
		PF-6	The high pressure safety injection pump	GF-3, 6
		PF-7	The low pressure safety injection pump	GF-3, 6
		PF-8	The reactor coolant pump	GF-3, 6
		PF-9	The charging pump	GF-3, 6
		PF-10	The mobile pump	GF-3, 5, 6, 7
		PF-11	The turbine bypass condenser valve	GF-4, 5
		PF-12	The turbine bypass air valve	GF-4, 5
		PF-13	The atmospheric steam dump valve	GF-4, 5
PF	PF-14	The safety depressurization valve	GF-4	
	PF-15	The pressurizer	GF-4	
	PF-16	The reactor coolant gas vent system	GF-4	
	PF-17	The motor driven aux. feedwater pump	GF-5	
	PF-18	The turbine-driven aux. feedwater pump	GF-5	
	PF-19	The start-up feed water pump	GF-5	
	PF-20	The turbine-driven feedwater pump	GF-5	
	PF-21	The motor driven feedwater pump	GF-5	
	PF-22	The booster feedwater pump	GF-5	
	PF-23	The refueling water tank	GF-3, 6, 7	
	PF-24	The purification pump of the spent fuel pool	GF-7	
	PF-25	The boric acid make-up pump	GF-7	
	PF-26	The demineralized water transfer pump	GF-7	
	PF-27	The component cooling water make-up pump	GF-7	
	PF-28	The spent fuel pool door	GF-7	
	PF-29	The normal ventilation air cleaner	GF-7	
	PF-30	The normal supply air cleaner	GF-7	
	PF-31	The abnormal ventilation air cleaner	GF-7	
	PF-32	The emergency diesel generator	GF-8	
	PF-33	The alternate alternating current diesel generator	GF-8	

Table 3. Revised work domain analysis for coping with severe accident situations of NPPs using AH (Continued)

Abstraction level	Decomposition level	Label	Functional element	Related functions-upper level
PF	Component	PF-34	The mobile generator truck	GF-8
	Component	PF-35	The safety injection tank	GF-3, 6
	Component	PF-36	The mobile air blower	GF-7

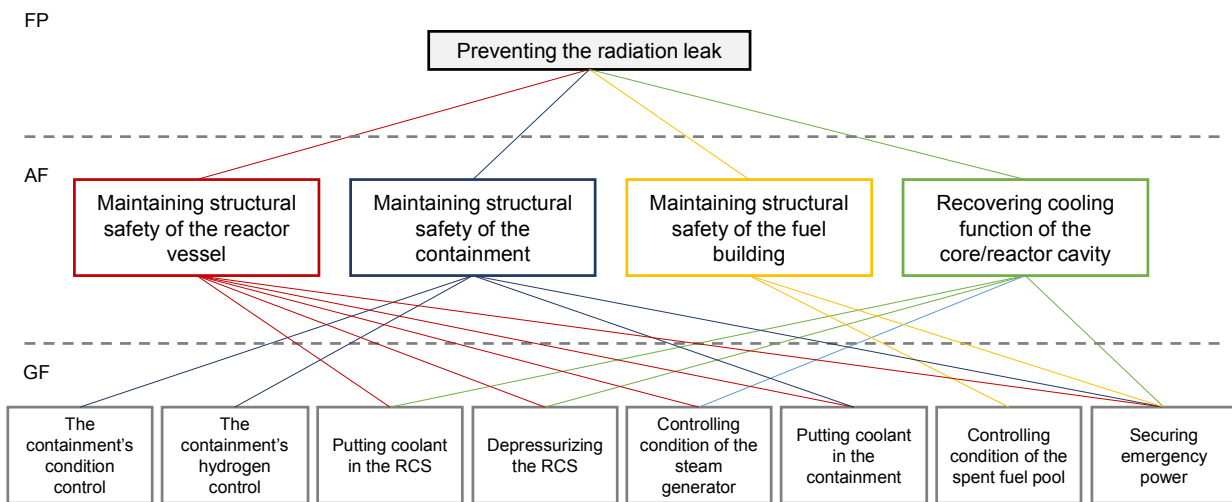


Figure 1. Goal-means relationships between FP, AF, and GF-level functions

3.4 Specifying information requirements

AH를 활용한 작업영역분석 결과로부터 EID 기반 정보디스플레이에서 제공해야 하는 정보요건을 도출 및 조직화하였다. 정보요건은 2.3절에서 기술한 여섯 가지 정보요건의 형태를 중심으로 파악하고 조직화하였다. 또한 정보요건이 AH의 어떤 수준의 어떤 기능에서 도출되었는지를 나타냈고, 정보요건의 범위와 단위를 알 수 있는 경우 함께 분석함으로써 작업영역의 제약조건을 더 구체적으로 파악하였다. 정보요건은 기능적 목표를 제외한 추상적 기능, 일반적 기능, 물리적 기능 수준만 도출하였다. 그 이유는 기능적 목표의 정보요건은 대부분 다른 하위 수준에서 나타나기 때문이다(Burns and Hajdukiewicz, 2004). 추상적 기능의 정보요건은 18개, 일반적 기능의 정보요건은 33개, 물리적 기능의 정보요건은 76개이다. 정보요건의 예로 아래의 Table 4는 AH의 추상적 기능(AF)으로부터 도출된 정보요건을 정리한 것이다. Table 4에서 Type은 2.3절에서 설명한 여섯 가지 정보요건의 형태를 의미한다.

Table 4. Identifying and organizing information requirements at the AF level

Label	Information requirements	Type	Source	Range	Unit
IR-AF-1	Structural safety of the reactor vessel	(1)	AF-1		
IR-AF-2	Pressure of the reactor vessel	(2)	AF-1	<2,500	psia
IR-AF-3	Temperature of the reactor vessel	(2)	AF-1	<650	°F
IR-AF-4	Water level in the reactor vessel	(2)	AF-1		

Table 4. Identifying and organizing information requirements at the AF level (Continued)

Label	Information requirements	Type	Source	Range	Unit
IR-AF-5	Structural safety of the containment	(1)	AF-2		
IR-AF-6	Internal pressure of the containment	(2)	AF-2	<57.0	psig
IR-AF-7	External pressure of the containment	(2)	AF-2	-4.0	pgig
IR-AF-8	Temperature of the containment	(2)	AF-2	<285	°F
IR-AF-9	Hydrogen concentration in the containment	(2)	AF-2	<5%	
IR-AF-10	Water level in the containment	(2)	AF-2	27.5%<level<87.5%	
IR-AF-11	Structural safety of the nuclear fuel building	(1)	AF-3		
IR-AF-12	Pressure of the nuclear fuel building	(2)	AF-3		
IR-AF-13	Temperature of the nuclear fuel building	(2)	AF-3		
IR-AF-14	Hydrogen concentration of the nuclear fuel building	(2)	AF-3		
IR-AF-15	Water level of the nuclear fuel building	(2)	AF-3		
IR-AF-16	Temperature of the core outlet	(2)	AF-4	<371.1	°C
IR-AF-17	Warning level of whole-body dose in plant site	(1)	AF-1, 2, 3	0.5 during less than 30 mins or 5 during 2 mins.	mSv/hr
IR-AF-18	Warning level of thyroid dose in plant site	(1)	AF-1, 2, 3	2.5 during less than 30 mins or 25 during 2 mins.	mSv/hr

물리적 기능 수준의 정보요건에는 기기의 이용 가능성이 있는데, 이는 기기의 이용조건 및 이용 가능 여부를 포괄하는 의미이다. 예로 이동형 설비(예: 이동형 펌프, 이동형 발전차)의 이용 가능성을 들 수 있다. 이는 정보디스플레이에서 이동형 설비의 이용 가능성(이용 가능 여부) 및 이용조건을 보여주어야 함을 의미한다. 또한 똑 같은 기기의 이용 가능성이라도 목적-수단 관계에 따라 이용조건이 약간씩 달라서 이 같은 경우는 목적-수단 관계를 적어 구분하였다. Table 5는 물리적 기능 수준의 정보요건 일부를 나타내는데 IR-PF-1부터 3을 보면 격납건물 살수펌프 이용 가능성이 각각 숫자로 구분된 것을 볼 수 있다. 이는 살수펌프의 유로가 목적-수단 관계에 따라 다르므로 따로 나타냈다.

Table 5. Part of the information requirements at the PF level

Label	Information requirements	Type	Source	Range	Unit
IR-PF-1	Availability of containment spray pump (1)	(3)	GF-1-PF-1		
IR-PF-2	Availability of containment spray pump (2)	(5)	GF-3-PF-7		
IR-PF-3	Availability of containment spray pump (3)	(3)	GF-6-PF-1		
IR-PF-4	Water level of recirculation sump	(2)	PF-1	≥46.5%	
IR-PF-5	pH of recirculation sump	(2)	PF-1	≥7.0	pH
IR-PF-6	Flow rate of containment spray	(1)	PF-1		Lpm

4. Discussion

원자력발전소 중대사고 상황에 적극적으로 대처하고 이를 효과적으로 감시 및 제어하는 데 도움을 줄 수 있는 정보디스플레이의 개발은 원자력발전소의 안전성을 확보하는데 중요한 요소라고 할 수 있다. 중대사고 상황이 되면 발전소를 안전한 상태로 유지하고 복원할 수 있는 궁극적인 자원은 결국 시스템 내의 작업자이다. 이러한 이유로 작업자가 올바른 의사결정 및 문제해결을 할 수 있도록 필요한 정보를 인지적으로 유용성 높은 정보디스플레이를 통해 제공하는 것은 점점 중요해질 것이다.

본 연구의 결과인 중대사고 완화조치를 위한 EID 기반의 정보디스플레이에서 제공되어야 하는 정보요건은 기존의 연구들처럼 원자력발전소 전체 시스템을 대상으로 도출한 것이 아니라 SAMG에서 기술된 기능들을 중심으로 가상적으로 상정한 작업영역을 대상으로 분석한 결과이다. 이는 중대사고의 특성 및 중대사고 발생 후 예상되는 다양한 시나리오의 특성을 반영한 것이다. 작업영역의 범위에서의 이러한 단점은 있지만 중대사고 완화조치를 위한 필요한 기능은 거의 모두 반영되었다는 전문가들의 의견으로부터 본 연구에서 도출하고 조직화한 정보요건의 타당성에 큰 위협은 되지 않는다고 할 수 있다. 또한 본 연구에서 분석된 정보요건은 SAMG에서 기술된 기능들을 대상으로 도출되었기에 이러한 정보요건을 제공하는 정보디스플레이는 운전원이 SAMG를 활용해 중대사고를 대처할 때 SAMG를 보다 넓은 시각에서 바라보고 SAMG의 지침들을 보다 체계적으로 활용할 수 있도록 도와줄 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 점에서 본 연구의 결과는 원자력발전소의 중대사고 완화조치를 위한 정보디스플레이 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것이라 판단한다.

기존의 연구들은 AF를 질량, 에너지, 정보, 가치 등의 흐름 관점에서의 인과관계 구조에만 집중하였다. 이러한 관점은 과거의 공정제어 시스템이나 제조 시스템 등의 인과관계 기반의 시스템에서는 유용하였다. 하지만 물리적 인과관계 중심의 AF 수준의 모델링은 헬스케어 시스템이나 교육 시스템 등의 인간 행위 기반의 시스템에 적용하기에는 부적절하다는 지적이 있었다. 이러한 시스템에서는 AF를 하위의 일반적 기능들의 우선순위 및 기능적 목적 기여도에 대한 가치지표 등으로 의미를 확장해야 한다(Ham, 2013). 따라서 본 연구는 AF 수준의 의미를 과거의 개념뿐만 아니라 GF가 FP에 어떻게 기여하는가를 파악하는 데 도움이 되는 정보의 관점으로 확장하여 AF 수준의 기능들을 도출하였다.

5. Conclusion

EID 기반의 정보디스플레이 설계는 크게 AH를 활용한 작업영역분석 및 분석 결과에 기반한 정보요건 도출과 SRK 프레임워크를 활용한 정보시각화로 이루어진다. 본 연구는 원자력발전소의 중대사고 완화조치를 위한 EID 기반 정보디스플레이에서 제공되어야 하는 정보요건 분석을 목표로 한다. 이를 위해 본 연구에서는 AH에 기반해 작업영역을 분석하고 여섯 가지의 정보형태를 중심으로 정보요건을 도출 및 조직화하였다. 일차적으로 분석된 작업영역의 기능적 지식 모델을 대상으로 전문가 검증은 거친 후에 개선된 작업영역 모형을 개발했고, 이에 기반해 AH의 추상화 수준별로 정보요건을 도출하고 조직화하였다. 원자력발전소에서 중대사고가 발생하면 발전소의 제어 및 관리에 대한 책임권한이 MCR에서 TSC로 옮겨지는데 TSC에서 활용할 수 있는 정보디스플레이가 아직 충분하지 않다는 점에서 EID 기반의 정보디스플레이 개발은 의미 있는 연구이고, 그 디스플레이에서 제공되어야 하는 정보요건을 파악했다는 점에서 본 연구의 의의를 찾을 수 있을 것이다.

EID는 정보요건 분석을 위해 AH를 활용해 작업영역을 분석해 작업영역 모형을 개발한 후 이에 기반해 정보요건을 도출할 것을 명시하고 있다. 일반적으로 사용자 인터페이스 설계에서 강조되는 직무분석 혹은 인지적 직무분석은 EID 기반 정보디스플레이의 정보요건 분석에서 요구되지 않는다. 이는 인지시스템공학 분야의 대표적인 사회-기술적 시스템 분석 및 설계 방법인 인지적 작업분석(CWA: Cognitive Work Analysis)에서 강조하는 제약조건 중심의 설계(Constraint-Based Approach) 및 형성/예측적 접근법(Formative Approach)과 관련되어 있다. EID는 CWA의 인간-시스템 인터페이스 설계에서의 응용 방법론으로 간주될 수 있다. CWA는 시스템 내 작업자의 행위는 작업영역, 직무, 전략, 조직구조 및 인지적 특성에 의해 제약을 받는다는 사실을 강조하는데 EID는 정보디스플레이의 정보내용과 관련해 작업영역의 제약조건(작업영역의 기능적 지식의 모형)에 기반해 정보요건이 도출되어야 함을 명시한다. 그러나 기존의 일부 연구는 인지적 직무분석의 결과가 EID 기반 정보디스플레이에 포함될 때 작업자의 직무수행도가 보다 향상될 수 있음을 입증하고 있다. 따라서 인지적 직무분석 결과와 본 연구에서 도출된 AH 기반의 정보요건을 통합하는 연구가 추후 의미 있는 연구가 될 것으로 판단한다.

또한 EID 기반 정보디스플레이의 개발을 위해 도출되고 조직화된 정보요건에 대한 정보시각화가 이루어져야 한다. 이를 위해 EID에서 명시하고 있는 SRK 프레임워크에 기초한 설계 원칙, 각종 사용자 인터페이스 가이드라인, 정보시각화 및 시각적 분석학의 설계 원칙 및 가이드라인, 그래픽 라이브러리 등의 종합적 활용이 요구된다. 정보요건 분석과 비교해 정보시각화는 아직까지 객관성이나 논리성이 결여되고 설계자의 창의성에 상당히 의존하는 과정으로 인식되고 있다. EID 기반 정보디스플레이 개발에서 정보시각화 문제를 보다 객관적이고 과학적인 수준으로 만들어가는 것도 중요한 추후 연구과제가 될 것이다.

Acknowledgement

This research was supported by Nuclear R&D Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (Grant-NRF-2017M2A8A4044063).

References

- Amelink, M.H., Mulder, M., Van Paassen, M.M. and Flach, J., Theoretical foundations for a total energy-based perspective flight-path display, *The International Journal of Aviation Psychology*, 15(3), 205-231, 2005.
- Bennett, K.B., Posey, S.M. and Shattuck, L.G., Ecological interface design for military command and control, *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2(4), 349-385, 2008.
- Burns, C.M. and Proulx, P., Solving social problems through interface design, *Ergonomics in Design*, 10(4), 10-16, 2002.
- Burns, C.M., Kuo, J. and Ng, S., Ecological interface design: a new approach for visualizing network management, *Computer Networks*, 43(3), 369-388, 2003.
- Burns, C.M. and Hajdukiewicz, J., *Ecological Interface Design*, CRC Press, 2004.
- Burns, C.M., Skraaning Jr, G., Jamieson, G.A., Lau, N., Kwok, J., Welch, R. and Andresen, G., Evaluation of ecological interface design for nuclear process control: situation awareness effects, *Human Factors*, 50(4), 663-679, 2008.
- Dinadis, N. and Vicente, K.J., Ecological interface design for a power plant feedwater subsystem, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 43(1), 266-277, 1996.
- Dinadis, N. and Vicente, K.J., Designing functional visualizations for aircraft systems status displays, *The International Journal of Aviation Psychology*, 9(3), 241-269, 1999.
- Ham, D.H. and Yoon, W.C., Design of information content and layout for process control based on goal-means domain analysis, *Cognition, Technology & Work*, 3(4), 205-223, 2001.
- Ham, D.H., An approach to designing visual forms for process control displays based on ecological interface design, *Journal of Korea Safety Management & Science*, 14(4), 239-246, 2012.
- Ham, D.H., Work domain analysis based on abstraction hierarchy: modelling concept and principles for its application, *Journal of Korea Safety Management & Science*, 15(3), 133-141, 2013.
- Ham, D.H., Oh, H.W., Jung, W.J., Han, H.J. and Lee, H.C., *Development of Ecological Information Displays for Supporting Responsive*

Action in the Severe Accident Situation (KAERI/CM-2725/2018), Korea Atomic Energy Research Institute, 2019.

Hilliard, A. and Jamieson, G.A., Ecological interface design for solar car strategy: From state equations to visual relations, *Systems, Man and Cybernetics*, ISIC IEEE International Conference on, 139-144, 2007.

Ho, D. and Burns, C.M., Ecological interface design in aviation domains: work domain analysis of automated collision detection and avoidance, *In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 47(1), 119-123, 2003.

Jamieson, G.A. and Vicente, K.J., Ecological interface design for petrochemical applications: Supporting operator adaptation, continuous learning, and distributed, collaborative work, *Computers & Chemical Engineering*, 25(7-8), 1055-1074, 2001.

Jamieson, G.A., Ecological interface design for petrochemical process control: An empirical assessment, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 37(6), 906-920, 2007.

Jungk, A., Thull, B., Hoeft, A. and Rau, G., Evaluation of two new ecological interface approaches for the anesthesia workplace, *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, 16(4), 243-258, 2000.

Kim, H.G. and Myung, R.H., Ecological interface design of altimeter for search and rescue helicopter, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 44(2), 124-131, 2018.

Kim, S.I., Fukushima nuclear accident and safety of nuclear power plant, *The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, 47(2), 88-91, 2018.

Ko, S.M. and Myung, R.H., Ecological interface design for air traffic control display, *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 25(4), 103-113, 2006.

Lau, N., Veland, Ø., Kwok, J., Jamieson, G.A., Burns, C.M., Braseth, A.O. and Welch, R., Ecological interface design in the nuclear domain: An application to the secondary subsystems of a boiling water reactor plant simulator, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 55(6), 3579-3596, 2008.

Mazaeva, N. and Bisantz, A.M., Ecological interface design of a photo camera display: method and example, *In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 57(1), 1343-1347, 2013.

Oh, H.W. and Ham, D.H., Effective use of key questions and keywords for work domain analysis based on abstraction hierarchy: Focusing on reactor cooling systems in nuclear power plants, *Journal of the Ergonomic Society of Korea*, 37(3), 411-429, 2018.

Pedersen, R. and May, M., Visualization in process control, *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 9(3), 267-276, 1999.

Rasmussen, J., *Information Processing and Human-Machine Interaction: An Approach to Cognitive Engineering*, North-Holland, 1986.

Rasmussen, J., Skills, rules, and knowledge: Signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 13, 257-266, 1983.

- Rasmussen, J. and Vicente, K.J., Coping with human errors through system design: Implications for ecological interface design, *International Journal of Man-Machine Studies*, 31(5), 517-534, 1989.
- Seppelt, B.D. and Lee, J.D., Making adaptive cruise control limits visible, *International Journal of Human-Computer Studies*, 65(3), 192-205, 2007.
- Sharp, T.D. and Helmicki, A.J., The application of the ecological interface design approach to neonatal intensive care medicine, *In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 42(3), 350-354, 1998.
- Song, J.H., Fukushima nuclear accident and severe accident study, *Korean Society of Mechanical Engineers*, 51(7), 49-54, 2011.
- Song, J.H., Kim, D.H., Kim, S.B., Kim, H.Y., Hong, S.W., Park, R.J., Song, Y.M., Kim, J.T. and Ha, K.S., *Looking Closely at Severe Accidents of Nuclear Power Plants*, JipMoonDang, 2018.
- Upton, C. and Doherty, G., Extending ecological interface design principles: A manufacturing case study, *International Journal of Human-Computer Studies*, 66(4), 271-286, 2008.
- Van Dam, S.B., Mulder, M. and Van Paassen, M.M., Ecological interface design of a tactical airborne separation assistance tool, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 38(6), 1221-1233, 2008.
- Vernon, D., Reising, C. and Sanderson, P.M., Ecological interface design for pasteurizer II: A process description of semantic mapping, *Human Factors*, 44(2), 222-247, 2002.
- Vicente, K.J., Improving dynamic decision making in complex systems through ecological interface design: A research overview, *System Dynamics Review*, 12(4), 251-279, 1996.
- Vicente, K.J., *Cognitive Work Analysis: Toward Safe, Productive, and Healthy Computer-based Work*, CRC Press, 1999.
- Vicente, K.J., HCI in the global knowledge-based economy: Designing to support worker adaption, *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 7(2), 263-280, 2000.
- Vicente, K.J., Ecological interface design: Progress and challenges, *Human Factors*, 44(1), 62-78, 2002.
- Vicente, K.J. and Rasmussen, J., Ecological interface design: Theoretical foundations, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 22(4), 589-606, 1992.
- Yamaguchi, Y. and Tanabe, F., Creation of interface system for nuclear reactor operation: Practical implication of implementing EID concept on large complex system, *In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 44(22), 571-574, 2000.
- Yoo, H.J. and Kim, H.T., Development and validation of plant-specific accident management guideline, *In: Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, 2004.

Author listings

Hyeon-Woo Oh: gusdn1704@naver.com

Highest degree: B.S., Department of Industrial Engineering, Chonnam National University

Position title: Graduate Student, Department of Industrial Engineering, Chonnam National University

Areas of interest: Human-computer Interaction, User Experience, System Safety, Human Factors

Dong-Han Ham: donghan.ham@gmail.com

Highest degree: Ph.D., Department of Industrial Engineering, KAIST

Position title: Professor, Department of Industrial Engineering, Chonnam National University

Areas of interest: Cognitive Systems Engineering, Human-Computer Interaction, System Safety Engineering, Service Science & Engineering, Knowledge Management