Work Domain Analysis for the Information Display Design of the Steam Generator Water Level Control in APR+

Soo Ill Lee[1]

[1] Central Research Institute, Korea Hydro and Nuclear Power co., (KHNP), Daejeon, 305-343, Korea (kangta1@khnp.co.kr)

ABSTRACT

Objective: This paper introduces a work domain analysis for the information display design based on ecological interface design in APR+ (Advanced Power Reactor +). **Background:** The display method in conventional NPPs (Nuclear Power Plants) mainly relies on the type of P&ID (Piping & Instrumentation Diagram), and represents the plant information directly without processing of the sensor outputs. From the cognitive engineering viewpoints, plant information display is significant contributing factors to NPPs accidents considering situation awareness, decision making and proper operator's task. Due to the lack or excess of the information, the operators in NPPs could not understand the overall relationship between the objective and operator's control; it leads to be a human's cognitive decision burden and human error. The cognitive information display based on EID (Ecological Interface Design) is developing to apply into APR+. **Method:** In this paper, we propose the work domain analysis in the cognitive task analysis process, which is an abstraction hierarchy to deal with the relationship between objective and means, to design the cognitive information display for control tasks, e.g., water level control of steam generator and pressurizer. **Conclusion:** Proposed cognitive task analysis, which is including work domain analysis and procedure based task analysis, shows the effectiveness when represents the operator's task to designing the cognitive information display in NPPs.

Keywords: Cognitive Task Analysis, Ecological Interface Design, Advanced Power Reactor, Piping & Instrumentation Diagram, Nuclear Power Plants

1. Introduction

디지털 기술의 발전에 따라 한국형 첨단 원전에는 첨단 디지털 주제어실과 계측제어시스템(I&C System)이 적용되고 있다. 또한 원전의 안전성과 인적 신뢰도를 향상시키기 위해서, 인간의 상황인식과 관련한 첨단 MMI(Man Machine Interface)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. APR1400(Advanced Power Reactor 1400 MWe) 주제어실을 위한 MMI 화면은 SSSI(Single Sensor Single Indicator)의 물리적 설계 원칙에 따라 설계되어 있으며, 주제어실의 구조는 그림 1과 같다. 이러한 기존의 발전소 운전 화면은 P&ID(Piping & Instrumentation Diagram) 기반의 화면에 센서의 값이 직접 표시되는 방식으로 구성되어 있다. 기존의 운전원 워크스테이션에서는 운전 정보가 부족한 경우, 운전대상인 목적과 적절한 수단 간의 전체적인 상관관계에 대한 이해부족으로 인적 오류를 발생시킬 수 있는 반면, 대형 정보표시시스템(LDP, Large Display Panel)은 동시에 많은 정보를 보여주기 때문에 적절한 정보를 찾기가 쉽지 않은 문제점이 있다. 운전원이 운전정보가 직접 표시된 기존의 화면에서 쉽게 상황인식을 하기 어렵기 때문에 정보의 통합, 의사결정 과정에서 운전원의 인지적 부담이 될 수 있다. 생태학적 인터페이스 설계(EID, Ecological Interface Design)는 인간의 뇌의 내부과정을 묘사하는 데 사용되며, 운전원의 인지적 부담과 인적 실수를 줄일 수 있는 방법이다.

본 논문에서는 APR+ (Advanced Power Reactor +, 1500MWe급)에 적용될 인지적 정보표시를 설계하는 과정에서 목적과 수단간의 상관관계를 이용하여 추상화 단계를 분석하는 work domain analysis를 포함한 인지적 직무분석(CTA, cognitive task analysis)에 대해서 소개한다. 인지적 직무분석은 인지적 정보표시 대상 직무에

대한 설계에 필요한 각종 지식과 처리과정이 무엇인지를 조사하는 방법으로, 인지적 구조, 내용(예: 지식 조직과 표상) 및 처리과정(예: 주의, 문제해결, 의사결정)을 밝히는 접근방법이다[1]. 본 논문에서는 증기발생기 수위제어에 대해 인지적 분석 결과를 제시하고 있으며, 제안된 인지적 직무분석에 의해 증기발생기 수위제어의 인지적 정보표시 설계에 필요한 지식과 정보 처리과정을 알 수 있게 된다

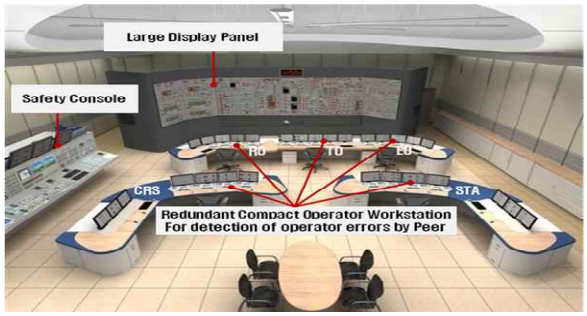


그림 1. APR1400 주제어실의 구성 및 운전원 정보표시 화면

2. Related work

운전원에게 할당된 기능은 관찰 가능한 물리적 기능과 의사결정/진단과 같이 관찰이 불가능한 인지적 기능이 있다. 이러한 인지적 기능과 인지적 자원을 적절히 모아서 분석, 평가하는 과정은 인지적 직무분석을 통해서 수행된다[3]. 운전원이 문제 진단과 해결을 하고자 할 때, 당면하는 문제는 크게 두 가지로 요약될 수 있다. 첫째는 역동적인 환경에서 사전에 정해진 절차에 의한 진단과 해결에서 오는 취약성인 규칙기반 인적오류(rule-based mistake)가 발생하는데, 시스템 반응에 즉각적으로 대처하기 위해서는 운전원 수행을 위해 지식기반 (knowledge-based)의 해결이 필요하게 된다. 둘째로 운전원은 진단 및 해결을 할 때 추상화 수준(level of abstraction)을 이동하면서 문제를 해결한다는 것이다. 따라서 운전원에게는 상이한 수준의 추상화를 통해 수준 사이를 신속하게 오르내릴 수 있는 도구의 제공이 필요하게 된다[2]. 이러한 문제를 해결하는 기법으로는 목표-수단 관계를 기술하기 위한 그림 2 와 같은 추상화계층(AH, abstraction hierarchy) 기법이 있다[2].

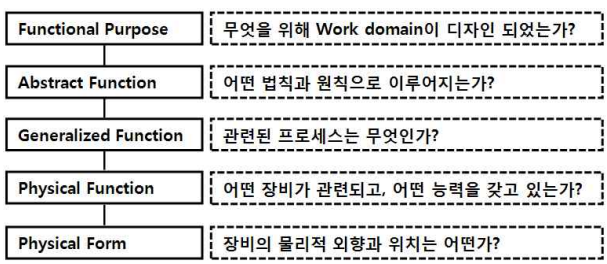


그림 2. AH 의 5 가지 레벨

AH에 표현된 추상화 정보가 운전원에게 제공될 경우, 발전소 시스템의 진단과 제어에 효과가 있음이 밝혀졌으며[3], 또한 원전 시뮬레이터에 대한 EID를 이용한 정보표시 실험에서 기존의 정보표시 기법보다 상황인식 측면에서 좋은 성능을 보여주고 있다[4]. 현재 EID기반 대부분의 적용사례는 시뮬레이션과 적용성 평가에 집중되어 있다. 이는 EID가 실제 산업현장에 적용된 사례가 거의 없다는 것을 보여주며, 그 이유로는 첫째, 정보표시 형태가 정립되지 않고, 시스템 및 그 분석자에 따라 시스템에 의존적으로 설계된다는 점이다. 둘째 이유로는 새로운 정보표시 기법은 운전원들이 다시 한번 학습하여야 한다는 부담이 있다는 점이다[1].

EID 에 의한 정보표시를 설계한 후에는 적용성 평가가 정보표시의 성능을 향상시키는 가장 중요한 단계이며, 그림 3 의 FIP(Functional Information Profile)가 저온살균기의 EID 설계에 사용되기도 하였다[5]. 시스템의 규모가 복잡해지고 큰 경우에는 AH 이외에 Part-Whole Hierarchies 분석을 추가하여 시행하게 된다. Work domain 모델의 검증을 위해 Burns(2002)는 훈련 시나리오를 이용하였고[5], Marmaras(2004)는 시나리오에 기반한 work-through 를 이용하여 검증을 수행하였다[6].

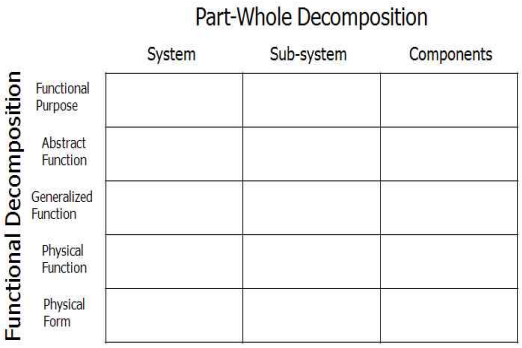


그림 3. FIP의 구성

3. Proposed CTA

3.1 CTA 검증 지침 및 대상 직무 선정

Work domain analysis(WDA) 결과를 원전 운전용 절차서를 통한 직무분석을 이용하여 검증하는 지침을 제시하고 있다[1]. 따라서 본 논문에서는 선정된 대상 직무에 대한 WDA 결과를 절차서 직무분석을 통해 검증한다.

인지적 직무분석의 대상직무는 증기발생기 수위 제어 절차이므로, 인지적 직무분석의 범위를 증기발생기 수위제어와 관련된 시스템으로 제한하였다. 증기 발생기의 경우 1차 계통의 원자로 냉각재의 온도 유지 및 가압기 등의 시스템과도 연관이 있지만 원자로의 출력과 원자로 냉각재 평균 온도만을 인자로 선정한다. 또한 가압기의 수위를 조절하기 위한 인자로써 물의 유입량과 증기 배출량의 관계, 레벨 등을 고려하기 위해 그림 4와 같은 2차 계통 중 FW Booster Pump(Startup FW Pump 포함)에서 Steam Flow Transmitters까지를 분석의 대상으로 선정한다.

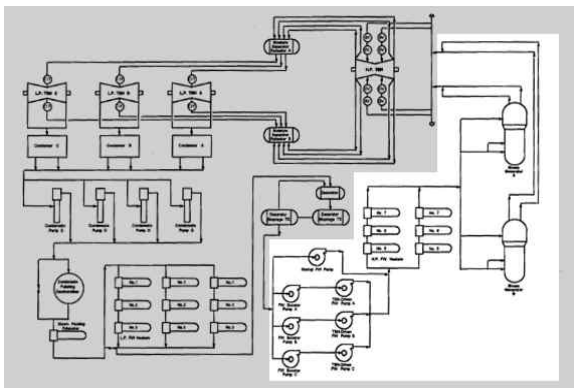


그림 4. 주급수 계통(흰색범위 : 분석대상)

3.2 추상화 계층 분석

증기발생기의 목적은 1차 계통의 냉각재 온도 유지와 전력생산용 증기의 발생이며, 부수적으로 2차 계통의 하드웨어 보호의 역할도 수행하고 있다.

- Functional purpose 단계에서 1차 계통의 열 제거, 하드웨어 보호를 목적으로 정하였다.
- Physical Function 단계에서 수위제어 및 H/W 보호와 관련된 요소로는 그림 5 와 같이 펌프, 밸브, 배송관, 가열기, 수위계측기, 습분분리기 등으로 나눌 수 있다.
- Generalized Function 단계에서 하드웨어 보호와 1 차 계통의 열 제거를 위해서는 습분분리 계통 및 보조 급수 계통과 수위제어를 고려해야 한다. 금속의 부식이나 열의 전도 및 물질의 상태 변화 등이 주요 원칙들이 될 수 있겠다. 특히 수위 제어의 경우 급수의 양과 증기의 양 그리고 레벨을 고려해야 하기 때문에 세부적으로 주급수 계통, 보조급수 계통, 증기계통, 수위계측 등으로 세분화 하여 고려한다.

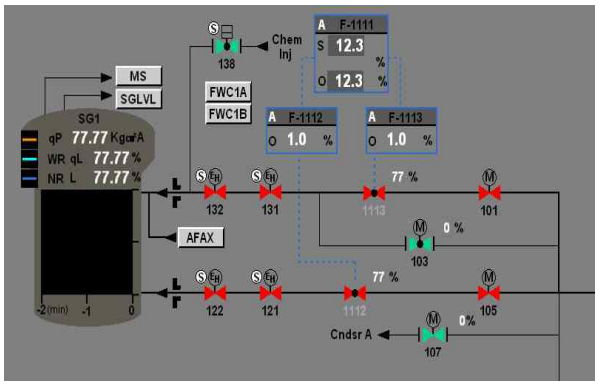


그림 5. 증기발생기 관련 하위계층 요소

3.3 Work domain analysis (WDA)

추상화 계층분석 결과를 AH의 레벨에 반영한 결과, 그림 6과 같이 구성요소들은 전 계층에 걸쳐 Means-Ends 관계로 연결되어 있는 구성임을 볼 수 있다.

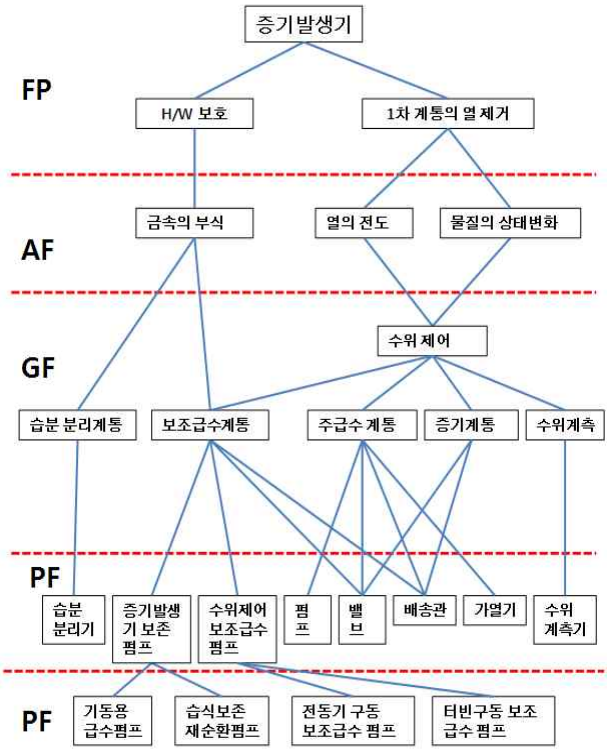


그림 6. 증기발생기 수위제어 절차에 대한 AH

그림 7은 증기발생기 수위제어 대상직무에 대한 Part-Whole Hierarchies 분석을 추가한 FIP 구성을 보여주며, 그림 8은 도출한 요구사항을 보여주고 있다.

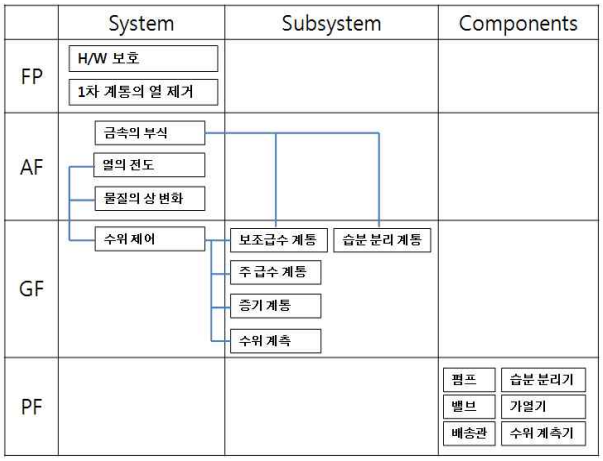
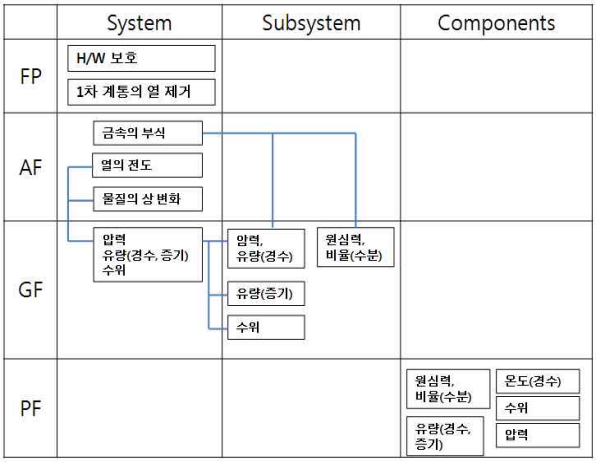


그림 7. 증기발생기 수위제어 절차에 대한 FIP 구성
그림 8. 증기발생기 FIP에서 도출한 요구사항



3.4 절차서 직무분석

본 절차서 직무분석 단계에서 영광원전 5, 6호기의 3가지 비상 운전 절차서를 기반으로 직무 수행 시 필요한 요구정보를 조사하였다. 원자로 트립, LOCA(Loss of Coolant Accident), SGTR(Steam Generator Tube Rupture)에 대한 직무분석 결과 대부분의 직무에서 공통적으로 유량, 압력, 온도 그리고 수위 등의 정보를 필요로 한다는 점을 확인할 수 있었으며, 이것은 FIP 구성에서 보여준 변수들과 유사했다. 직무 분석의 결과 증기발생기에서 나오는 정보 요인으로는 유량(증기, 경수), 온도(RCS, 경수), 압력(SG), 수위(SG) 등이 있었다. 이것은 WDA에서 나왔던 원심력, 유량(증기, 경수), 온도(경수), 수위, 압력, 정보의 흐름 이외에 RCS의 온도라는 새로운 인자를 찾아 낼 수 있었다.

4. Conclusion

본 논문에서는 인지적 직무분석을 위해 사용한 WDA과 절차서 직무분석 기법이 원전 인지적 정보표시 설계에 유효하게 적용될 수 있음을 보여주고 있다. 또한 절차서 직무분석은 WDA와 함께 상호 보완적인 관계이며, 이 관계를 사용한 상호 검증 및 확인이 가능할 것으로 판단된다.

향후, 사고 사례분석 또는 운전원 오류 분석 기법 등을 통해 인지적 직무분석에 대한 상호 보완성 향상이 필요할 것으로 보인다.

References

[1] B. H. Jang, “Design of Display Templete in Nuclear Power Plant using the Principle of Ecological Interface Design,” Master Paper, KAIST, 2011.

[2] 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, 517-534, 1989.

[3] Ham D. "The effects of presenting functionally abstracted information in fault diagnosis tasks," *Reliability Engineering & System Safety*, 73(2), 103-119,2001.

[4] Burns, C. M., Skraaning, Jr., G., Jamieson, G. a., Lau, N., Kwok, J., Welch, R., et al. “Evaluation of ecological interface design for Nuclear process control: Situation Awareness Effects,” *Human Factors*, 50(4), 663-679. 2008.

[5] Reising DV, Sanderson PM. "Ecological interface design for Pasteurizer II: a process description of semantic mapping," *Human factors*, 44(2), 222-47. 2002.

[6] Marmaras N, Drivalou S. "Design and Evaluation of Ecological Interfaces,” Technical Report of THALES project, Pr. No. 65/1192, 2004.

Author listings

Soo Ill Lee: kangta1@khnp.co.kr

Highest degree: M.S., Department of Electrical Engineering, KAIST
Position title: Researcher, Central Research Institute, Korea Hydro and Nuclear Power co., (KHNP)
Areas of interest: Neural Network, Artificial Intelligence, Fault Diagnosis, HCI