

A new definition of violation based on accident/failure analyses in nuclear power plants

Bora Kang¹, Sung H.Han¹, Heekyung Moon¹, Dong Yeong Jeong¹, Yong-Hee Lee²

¹Department of Industrial Management Engineering, POSTECH, Pohang, 37673

²I&C and Human Factors Division, KAERI, Daejeon, 34057

ABSTRACT

The objective of this study is to define a violation, a type of human errors, based on a case study in nuclear power plants. Accidents in nuclear power plants are rare-accident of large, complex and high-reliability systems. Since the damage of an accident could be extremely enormous, many efforts have been underway to prevent the human errors. Especially, the violation is a newly emerging type of human errors but its concept is not clearly defined in the nuclear industry. A total of 28 reports related to the human error accidents/failures in the last 10 years were collected from NEED (Nuclear Event Evaluation Database) in KINS-OPIS (Operational Performance Information System). The relationship between causal factors and violations were analyzed by the fault tree analysis (FTA) and the human related event root cause analysis method (HuRAM). As a result, the characteristics of violations were identified and four types of violations (routine, situational, avoidance and optimizing violations) were newly defined. The results of this study can be used to develop proactive countermeasures and implement a supervisory system for preventing violations.

Keywords: violation, human error, nuclear power plants, concept definition, case analysis

1. Introduction

전 세계 국가별 원전 운영 현황을 살펴보면 총 31 개국에서 438개의 원전이 운전 중이다. 안전성과 관련하여 원전 축소 및 폐지의 논란이 있음에도 불구하고, 현재 67개의 원전이 건설 중으로 아직까지 원전 수가 증가하고 있는 실정이다(IAEA PRIS, 2015). 원자력 발전소의 사고는 대형의(large) 복잡한(complex) 고신뢰도 체계 시스템(high reliability)에서 발생하는 희귀사고로 사고 발생 시 그 피해 규모가 막대하기 때문에, 사전에 이를 예방하기 위한 많은 노력이 요구된다.

최근 발생한 원전 사고를 살펴 보면, 많은 사례에서 인적오류(Human error)가 그 원인으로 지적되고 있다(KINS-OPIS, 2015). 이에 따라 인적오류와 개연성을 가진 다양한 위험요소를 분석하고, 이를 대처

하기 위한 선행적 대책을 마련하기 위한 노력이 요구된다. Reason(1990)에 따르면, 인적오류는 실수(slip and lapse), 착오(mistake), 위반(violation)으로 분류된다. 특히, 위반(violation)은 원자력 산업에서 새로이 부각되는 형태의 인적오류로 원자력 산업에 적합한 개념이 명확하게 정의되지 않았을 뿐만 아니라, 그 대처방안이 매우 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 원자력 산업의 사고/고장 사례 분석을 기반으로 비고의적 위반 오류(intended actions, unintended results)에 대해 정의하고자 한다. 비고의적 위반 오류는 작업자의 행위 자체에 의도는 있으나 시스템에 위험성을 가하려는 의도는 없는 것으로 판단되는 위반으로, 일상적, 상황적, 회피형, 사적 활용 위반으로 분류하여 각 위반의 의미를 정의하고자 한다.

원자력 산업에서 발생하는 오류를 파악하고 이에 대한 대책을 마련하기 위한 다양한 접근 방식

이 존재한다. 한편, 위반형 인적오류의 중요성이 점차적으로 높아지고 있음에도 불구하고 위반형 인적오류와 관련된 정의, 분석 방법, 대처 방안 등의 연구들이 상당히 미비한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 인적오류 사례들을 바탕으로, 이를 심층적으로 분석하는 상향식 접근 방식(bottom-up)을 활용했다.

2. Method

KINS-OPIS(원전안전운영정보시스템)의 NEED(사고/고장 데이터베이스)로부터, 인적 실수가 사고/고장의 주 원인으로 분류된 최근 10년 내 28개의 사건을 수집했으며, 이는 전체 사건/고장 발생건수의 18.5%에 해당한다. 이 때, 월성 3호기 잠수작업자 인명사고(2014)는 인적 실수로 분류되어 있으나, 명확한 원인 규명이 불가능한 사망 사고이므로 본 연구범위에서 제외하고, 총 27건에 대해 분석을 수행하였다. 사례 분석은 결함수 분석 기법(Fault Tree Analysis; FTA) 및 인적 사건 원인분석 관리시스템(human related event root cause analysis method; HuRAM)을 활용하여 진행하였다.

원자력 산업에서 활용되고 있는 위험성 분석 기법은 예비 위험분석법(Preliminary Hazard Analysis), What-If 분석법, HAZOP Study(Hazard and Operability Study), 결함수 분석 기법(FTA) 등 다양하다(한국 원자력 연구원, 2007). 본 연구에서 활용된 결함수 분석 기법(FTA)은 위반형 인적오류에 영향을 주는 다양한 위험 요인을 파악하고 그들간의 인과관계나 발생빈도를 가시화하여 사건에 대한 이해도를 높이기 위해 유용하게 활용되는 분석 기법이다. 결함수 분석 기법에서 정량적 결과를 도출하기 위한 발생빈도(확률)는 본 연구 목적에 활용되지 않을 뿐만 아니라 이와 관련된 근거 수집이 어렵기 때문에 논리 게이트 분석은 연구 범위에 포함하지 않았다.

HuRAM은 미국의 HPIP(Human Performance Investigation Process)를 벤치마킹하여 원전 사고에 개입될 수 있는 인적오류의 근본 원인을 체계적으로 분석하기 위해 개발된 인적 사건 원인분석 관리시스템이다(한국 원자력 연구원, 2009). HuRAM에서는 직무/시스템 요인을 절차서/작업지시서/도면, 작업부하, 교육/훈련 등의 8개 원인 그룹으로 분류하고 각각의 원인 그룹에 대해 주원인항목-세부원인항목을 Figure 1과 같이 정의하였다(한국 원자력 연구원, 2015).

본 연구에서는 사고/고장 보고서를 분석하여 위반 발생에 영향을 준 ‘위험 요인’, ‘위반’, 그리고 위반으로 야기된 ‘사건/고장’으로 항목을 분류하여 결함 수목도를 표현하였다. 먼저, 각 사건/고장의 위험 요인을 체계적으로 분류 하기 위해 HuRAM의 원인항목 분류 체계가 활용되었다. 이때, 각 위험 요인은 해당 요소들의 전/후 관계를 분석함으로써 총 3단계로 나타내었다. 사건/고장의 위반은 일상적/상황적/회피형/사적 활용 중 하나의 위반으로 분류되었다. 위반으로 인해 발생한 사고/고장은 그 연쇄성에 의해 여러 단계에 걸쳐 문제들이 발생하지만, 본 연구의 수목도에는 위반으로 인해 야기된 직접적인 하나의 사건/고장만을 포함하였다. ‘위험 요인’, ‘위반’, ‘사건/고장’을 도출하는 과정은 인간공학 전공의 전문가 3인의 토의를 통해 진행되었으며, 공통의 의견을

원인그룹	주원인항목	세부원인항목
(1D) 절차서/작업지시서/도면	<input type="checkbox"/> (1.1) 절차서/작업지시서/도면 자체가 없음	<input type="checkbox"/> (1.1.1) 작업에 필요한 해당 절차서/작업지시서/도면이 없음
	<input type="checkbox"/> (1.2) 절차서/작업지시서/도면에서, 필요한 세부 절차나 정보의 누락	<input type="checkbox"/> (1.1.2) 필요한 세부 절차/정보의 누락 <input type="checkbox"/> (1.1.2) 필요한 감독자 확인/점검 절차의 누락 <input type="checkbox"/> (1.1.2) 필요한 감독자 확인/점검 절차의 누락
	<input type="checkbox"/> (1.3) 절차서/작업지시서/도면의 부적절한 기술	<input type="checkbox"/> (1.1.3.1) 절차서/지침서/도면 내용 (기기 ID/설정지, 조작 방법, 주의사항, 도식/표, 배관라인 등)에 오기 또는 불분명한 기술 <input type="checkbox"/> (1.1.3.2) 기술된 작업 순서나 내용이 실제 작업과 부합하지 않음 <input type="checkbox"/> (1.1.3.3) 절차 기술에 부적절한 포맷/용어/조건문/논리문/부정문/중문 사용 <input type="checkbox"/> (1.1.3.4) 의사결정/판단에 필요한 기준 제공 미흡
	<input type="checkbox"/> (1.4) 작업과 관련된 다수 절차서/작업지시서/도면 존재	<input type="checkbox"/> (1.1.4) 유사 작업이나 정보가 여러 절차서/도면에 기술 <input type="checkbox"/> (1.1.4) 동일 절차서/도면이 여러 버전으로 존재
	<input type="checkbox"/> (1.5) 기타	

분석 결과에 반영하였다.

Figure 1. Sample of HuRAM+casual factors

3. Results

총 27건의 각 사고/고장 사례에 대해 사건/고장, 위반, 위험요인, 그리고 이들의 인과관계 등이 포함된 결함 수목도가 Figure 2와 같이 도출되었다.

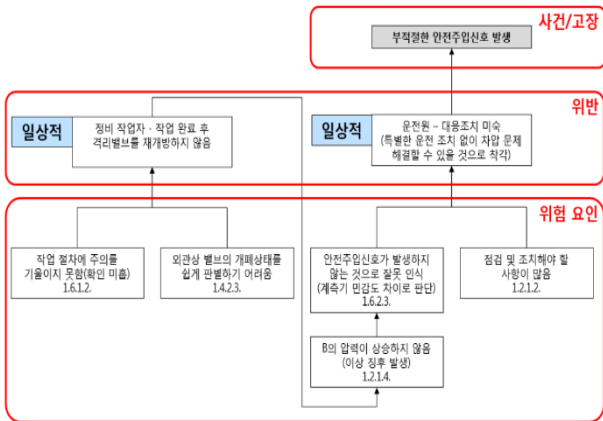


Figure 2. FTA Example (Uljin, 2006)

총 27건의 사고/고장 사례를 분석한 결과, 40여 개의 위반 항목이 도출되었다. 세부적으로는 일상적 위반 31건, 상황적 위반 8건, 회피형 위반 1건, 사적 활용 위반 0건으로 나타났다. 각 위반 유형 별 발생한 세부 위험 요인의 빈도는 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Frequency of causal factors

위험요인	일상적	상황적	사적 활용	회피형	총
1. 절차서/작업지시서/도면	17	3	0	0	20
2. 작업부하	9	7	0	1	17
3. 교육/훈련	3	0	0	0	3
4. HSI(환경/장비 포함)	11	5	0	0	16
5. 의사소통	8	1	0	0	9
6. 작업자(팀)	35	13	0	1	46
7. 감독/확인	9	2	0	0	13
8. 작업계획	9	0	0	0	10
총	101	31	0	2	134

사고/고장 및 위험 요인의 전/후 관계를 바탕으로 3단계로 분석된 세부 요인의 빈도는 Table 2와 같다. 분석 가능한 위반이 각각 1건, 0건으로 나타난 회피형, 사적 활용 위반은 결과에서 제외하였다.

Table 2. Frequency of causal factors (three-level)

위험요인	일상적			상황적		
	1 st	2 nd	3 rd	1 st	2 nd	3 rd
1. 절차서/작업지시서/도면	10	7		1		2
2. 작업부하	8	1		4	2	
3. 교육/훈련		2	1			
4. HSI(환경/장비 포함)	11				4	1
5. 의사소통	7	1			1	
6. 작업자(팀)	27	8		10	2	1
7. 감독/확인	4	5			2	
8. 작업계획	3	3	3			

4. Discussion

총 27건의 사건에서 발생한 위반형 인적오류를 분석한 결과, 한 건의 회피형 위반 항목을 제외한 모든 위반 항목이 일상적 위반 및 상황적 위반에 해당되었다. 따라서, 본 연구는 이 두 가지 위반 유형을 중점적으로 분석하였다.

일상적 위반 및 상황적 위반에서 공통적으로 ‘작업자(팀)’ 요인이 전체 빈도 및 1단계 위험 요인 빈도에서 가장 높게 나타났다. 예를 들어, 일상적 위반 사례에서는 업무 과정에서 작업자의 부주의로 인해 혹은 미흡한 능력/태도로, 절차서의 규정을 따르지 않아 해당 오류가 발생함을 확인할 수 있었다. 상황적 위반 사례에서는 새벽 근무나, 폐쇄되고 협소한 작업환경에서 장시간 작업 수행 등에 따른 작업자의 육체적 피로로 인해 해당 오류가 발생함을 확인할 수 있었다.

일상적 위반에서 ‘절차서/작업지시서/도면’이 두 번째로 높은 빈도를 차지했으며, 이는 작업과 관련해서 필요한 절차가 누락되거나 불분명하게 기술되어 작업자가 인일하게 작업에 임하는데 영향을 미친 것으로 해석된다. 상황적 위반에서는 ‘작업부하’가 두 번째 높은 빈도를 차지했으며, 이는 높은 작업 난이도, 과도한 업무량, 시간 제약, 돌발 상황 등으로 인해 작업 수행이 정상적으로 이뤄지지 않을 때 해당 오류가 발생하는 것으로 해석된다.

사례에서 드러난 위반형 인적오류의 세부적인 특성을 바탕으로 도출된 각 유형별 위반 오류 정의는 다음과 같다.

- **일상적 위반(Routine violations)**
사전에 교육된 작업 절차 또는 규정을 무시한 채, 주어진 업무에 안일하게 대처하는 행동으로써 해당 행위로 인한 직접적인 사건/사고 발생 확률이 낮아 조직 내에서 습관적 혹은 관행적으로 인정되고 있는 행위
- **상황적 위반(situational violations)**
발생 확률이 매우 낮은, 평소와는 다른 특수한 상황(과도한 직무량, 극도의 스트레스 및 누적 피로, 불시 비상 상황, 부적합한 작업 환경 등)으로 인해 적합한 작업 수행이 불가능하여 발생한 행위
- **회피형 위반(Avoidance violations)**
개인의 성격으로 인한 스트레스 또는 조직, 공동체에서 역할, 의무를 다하고자 하는 상황에서 발생하는 심적 부담 등으로 인해 개인 및 조직의 책임성을 피할 목적으로 직무수행에 필요한 조치를 미루거나 거부하는 행위
- **사적활용 위반(Optimizing violations)**
일반적으로 직무와 관계없이 자신의 편의나 친밀한 관계(가족 등)의 편의에 맞추어 직무를 수행하는 행위

원자력 산업의 인적오류 사례에서 나타난 위반형 인적오류는 일상적, 상황적 위반이 주로 나타났으며, 자료가 부족하다고 판단되는 회피형 및 사적활용 위반은 기존 문헌(Hudson, 1998; Reason, 1990; 한국원자력연구원, 2012)을 바탕으로 연구진들의 논의를 통해 위와 같이 정의하였다. 회피형 및 사적활용 위반의 정의 또한, 원자력 산업에 적합하게 보다 구체적이고 명확하게 규정하기 위해 추후 추가적인 사례 조사(타 분야에서의 인적오류 사건 등)를 통해 보완이 필요하다. 위반형 인적오류와 관련된 사례가 추가적으로 확보된다면 위험 요인들에 대한 통계적 분석 등을 활용함으로써 위반들의 특성들에 대해 보다 체계적인 접근이 가능할 것으로 생각된다.

원자력 산업에서 발생 가능한 위반형 인적오류를 사전에 대처하고 예방하기 위해 각 위반을 작업자 개인/팀/조직 관점에서 영향 요소를 파악하고, 각 위반이 발생하는 매커니즘 모형을 규명한다면 한 단계 더 체계적인 예방 대책 수립이 가능할 것으로 판단된다.

5. Conclusion

본 연구는 원자력 산업에서의 발생 가능한 위반형 인적오류의 개연성 있는 위험 요소를 분석하고, 이를 선형적으로 대처하기 위한 연구의 기초 연구로써 진행되었다. 원자력 산업에서의 일상적 위반, 상황적 위반, 회피형 위반, 사적 활용 위반을 명확하게 규정한 본 연구 결과를 토대로, 추후 위반형 인적오류를 관리하기 위한 구체적인 대응 지침을 마련하거나 지원 시스템/기능 설계하는 데 활용될 수 있다. 이는 위반형 인적오류 예방이 필수적인 고신뢰도 체계를 갖춘 항공, 철도, 기타 산업 시설 등에 적용함으로써 그 파급성을 높일 수 있을 것으로 생각된다.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MEST) (NRF-2015M2A8A4025069).

References

- 한국원자력연구원, 원자력시설 해체 공정 안전성 평가 및 방사능 피폭 평가 기술현황 분석 (2007)
- 한국원자력연구원, 조직/안전문화 요인을 포함한 계층적 인적사건 분석체계 개발 (2009)
- 한국원자력연구원, 국내 원전 불시정지 사례의 인적오류 위험요소(hazards) 분석 보고서 (2012)
- 한국원자력안전기술원, 인적사건 원인분석 관리시스템(HuRAM+) 활용성 개선 방안 (2015)
- International Atomic Energy Agency (IAEA) The Power Reactor Information System (PRIS), *Home page*, <https://www.iaea.org/pris> (retrieved SEP 18, 2015).
- Operational Performance Information System (OPIS) for Nuclear Power Plant Home page*, <http://opis.kins.re.kr> (retrieved SEP 18, 2015).
- Reason, J., *Human Error*, Cambridge University Press, (1990)
- Hudson, P., Verschuur, W., Parker, D., Lawton, R., Graaf, G., *Bending the Rules: Managing Violation in the Workplace*, Society of Petroleum Engineers International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration, (1998)

Author listings

Bora Kang: purple31@postech.ac.kr

Highest degree: BS, Department of Industrial& Management Engineering, POSTECH

Position title: PhD Candidate, Department of Industrial& Management Engineering, POSTECH

Areas of interest: User Experience Design, Gesture Interface, Human-Computer Interaction

Sung H. Han: shan@postech.ac.kr

Highest degree: PhD, Ind. & Sys. Eng. Dept, Virginia Polytechnic Institute & State University

Position title: Professor, Dep. of Ind. Mgmt. & Eng., POSTECH

Areas of interest: Human-Computer Interaction, Usability Engineering, Affective Product/Service Design, Intelligent User Interfaces, User Experience, Context Aware

Heekyung Moon: gomsak@postech.ac.kr

Highest degree: BS, Department of Industrial& Management Engineering, POSTECH

Position title: PhD Candidate, Department of Industrial & Management Engineering, POSTECH

Areas of interest: Idea generation, Creative thinking, Product/Service design, User experience

Dong Yeong Jeong: comnet924@postech.ac.kr

Highest degree: BS, Department of Industrial& Management Engineering, POSTECH

Position title: MS candidate, Department of Industrial & Management Engineering, POSTECH

Areas of interest: Human-Computer Interaction, User Experience Design, Gesture Interface, User Interface

Yong-Hee Lee : yhlee@kaeri.re.kr

Highest degree: MS, Department of Industrial Engineering, Seoul National University

Position title: Principal Researcher, I&C and Human Factors Division, KAERI

Areas of interest: Cognitive System Engineering, HMI design, Human Error, System Safety