

A Study on Human Error Hazard Analysis of Fukushima Accident based on Industrial Accident Dynamics

Youmin Shin*, Yeonju Oh, Yong-Hee Lee

Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Daedeok-daero 989-11, Yuseong-gu, Daejeon, 305-353, Korea

ABSTRACT

후쿠시마 사고는 원자력 산업에서 발생한 사고 중에서 사고의 원인 및 영향관계가 매우 복잡하고 예측이 어려운 사고였다. 원자력 산업에서는 후쿠시마 사고 이후 이를 중대사고로 정의하고, 중대사고를 예방하기 위한 다양한 안전대책을 제공하고 있다. 국내에서는 중대사고관리지침(SAMG)로 극한환경에 의한 사고 예방으로 설비의 기속적 관리에 국한되어 있다. 본 연구는 인간공학적 관점에서 중대사고를 예방하기 위한 대책을 마련하기 위해 후쿠시마 사고의 원인을 위험 요소관점에서 분석해보고자 한다. IAD는 기존 사고 원인 분석을 기반으로 사건 경위별 발생 배경, 불안정한 상태, 불안정한 행동으로 분석하여 이들간의 다이내믹한 영향관계를 중점적으로 분석할 수 있다. 분석 결과 대응지침서 부족, 화재 관련 장비 관리 부족, 화재 감지기 오작동, 비상대응 훈련부족, 비상시 보고체계 부족, 직무 경험 부족, 비상시 의사소통 부족 등이 도출되었다.

Keywords: Industrial Accident Dynamics, Human Error, Hazard

1. Introduction

원전과 같은 대형/고신뢰도 시스템의 안전성을 확보하기 위하여 후쿠시마 원전 사고를 분석한 사례가 많이 제시되었다. 그런데 하드웨어 관점의 설계 문제뿐만 아니라 인적 오류의 문제도 심층적인 분석이 필요하다.

인적오류의 문제의 접근 방식에 관하여 Reason과 Dekker는 두 가지 관점을 소개하였다. 대부분의 인적 오류 분석에서는 인적오류의 직접적인 원인만을 사고의 원인이라고 결론 짓고 원인의 제거를 중심으로 대책을 제시한다. 이러한 경우 사람에게 사고의 원인을 밝혀내려는 시도는 조직이나 절차는 물론 기술적 경위의 문제와 같은 보다 근본적인 요소에 대한 대책은 규명하기 어렵다. 따라서 값비싼 사고의 경험에도 불구하고 유사한 사고가 재발되기 쉽다.

원자력 등 안전이 절대적인 고신뢰도 산업에서는 인적오류에 관하여 시스템의 내부에 잠재된 문제의 징후로 보는 확장된 시각이 필요하다. 후쿠시마 사고의 경우 해당 사고의 정확한 원인을 찾는 것도 중요

하지만 어떤 잠재적인 위험요소가 있어 사고를 발생시킬 수 있는지에 대한 선제적 분석이 필요하다. 후쿠시마 사고의 경우 예상하지 못한 대형 지진 및 쓰나미 등 자연재해로 촉발되었지만, 재해로 형성된 극한상황에서 종사자의 반응과정에서의 오류가 복합적으로 개입되었다. 본 연구에서는 보다 다양한 인적 오류 위험요소를 파악하는 방법론을 모색하였다. 인적 오류 사례로부터 유추할 수 있는 다양한 영향관계를 포착하는데 적합한 기법으로 IAD(Industrial Accident Dynamics)를 채택하였으며, IAD를 기반으로 후쿠시마 원전 사고의 인적오류 위험요소를 분석하였다.

2. Method

2.1 연구 방법 및 범위

본 연구에서는 인적요소 측면에서의 후쿠시마 사고 사례에서 유사한 사고에 대비한 인적오류 저감을 위한 대응 방안을 도출하기 위하여 발견되는 인적오

류 관련 위험요소(hazard)를 파악하였다. 고전적인 사고 분석기법 중 하나인 IAD(Industrial Accident Dynamics)기법을 활용하였으며, 후쿠시마 사고에서도 가장 사고의 영향이 큰 1호기의 사례를 선정하여 인적오류 위험요소를 분석하였다.

Thyrgerson의 IAD 기법에서는 사건의 내부 구조를 구성하는데 분석의 초점을 맞춘 기법으로 안전 공학의 기본적인 개념에 충실한 기법이다. 본 연구에서는 사례분석을 위하여 사건에 개입되는 인적 오류의 가능성을 분석하는데 충실하도록 IAD를 활용하여 사건을 분석하였다. IAD에서는 사고의 연쇄성을 요구하는 Heinrich의 도미노 이론을 따르고 있다. 도미노 이론에서는 사고의 과정에서 사건의 환경과 배경, 사람의 결함, 사건 발생의 불안전 상태 및 행위, 사건 자체, 결과적인 피해 등으로 구성되는 일련의 과정이 포함된다. IAD에서는 이러한 단계성과 연쇄성을 고려할 수 있는 7가지 단계로 나눈다. (Background factor, Background initiating factor, Initiating factor, Intermediate factor, Immediate factor, Near accident, Accident) 최종적인 accident의 결과에 대하여 Measurable result, counter-measure 등의 순서로 분석할 수 있다.

그러나 IAD에서 이러한 단계는 고정적인 것이 아니며 응용분야의 성격이나 목적에 따라 단계 구성을 조정할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 황축에는 영향요인, 기본원인, 불안정한 상태, 불안정한 행동, 사고유발가능인자를 중축에는 4M에서 Man, Machine, Management 세 가지 부분으로 나누어 분석하였다.

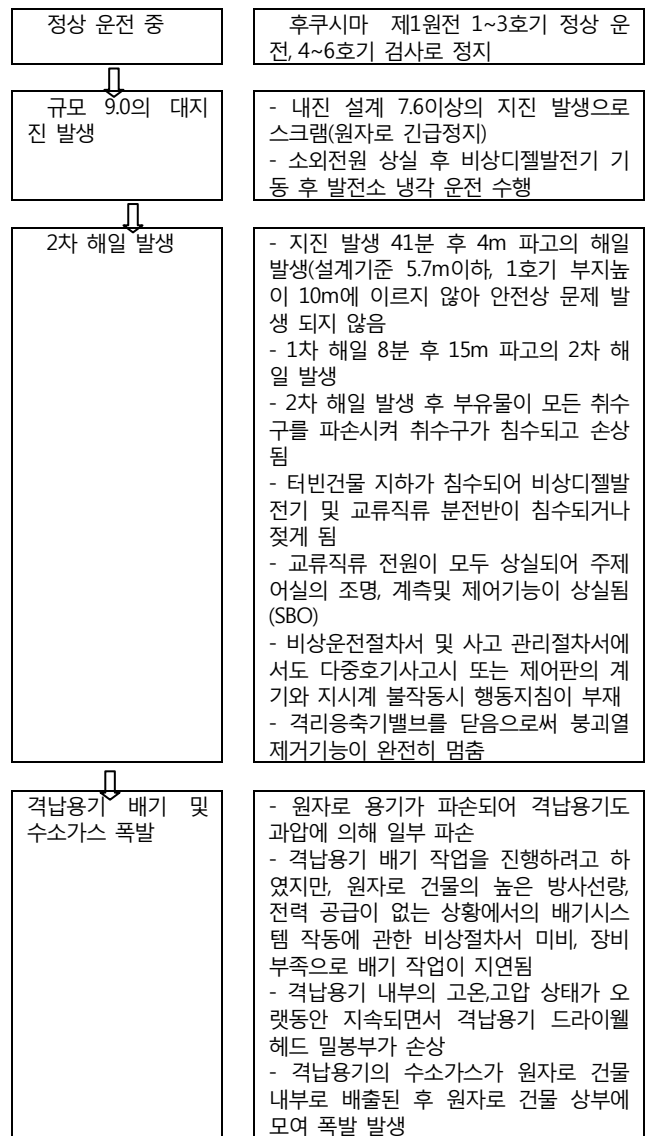
다만 인적오류를 설명하기 위해 사람이 잘못된 부분을 찾기 보다는, 사람의 판단과 행동이 그 상황에서 어떻게 문제로 작용하게 되었는지를 찾는 방식을 적용하였다. 전통적으로 인적오류의 특성과 위험요소(hazard)는 경험된 사례의 원인(cause)을 중심으로 분석되어 왔다. 그런데 희귀사고(rare event) 성격을 보이는 고신뢰도 체계에서는 경험된 사례로부터 얻을 수 있는 위험요소의 정보가 매우 부족하다. 따라서 전체 시스템에 문제가 발생할 수 있는 인적오류로 작용할 가능성이 있는지를 판단하여 가능한 모든 요소들을 인적오류 위험요소로 보는 확장된 방식을 적용한 것이다.

2.2 분석절차

인적오류 위험요소 분석에 IAD를 적용하기 위해서 표1과 같이 후쿠시마 1호기의 사고 시간대별로

정리를 하였다. 사고의 전체 경위에서 모든 단계를 분석하지 않고 인적오류 위험성이 가장 많이 내포된 영역으로 판단되는 부분을 자체적으로 발췌하여 본 논문의 사례로 분석하였다. 후쿠시마 앞 바다에서 규모 9.0의 대지진(소위 동일본 대지진) 발생 이후로부터 1발전소를 중심으로 2차로 쓰나미가 도달하여 연이은 폭발 등 방사능 누출로 이어지는 핵심적인 사건들이 발생된 부분을 사건 경위를 중심으로 재정리한 것이다.

Table 1. Fukushima accident의 경위(발취 재구성)



3. Results

3.1 사고의 위험요소 분석 내용

후쿠시마의 사고는 다른 원전 사고와 달리 극한 복합 자연재해(지진+ 쓰나미)가 유발한 최초의 원전 중대 사고였으며, 다수 호기에서 중대사고가 발생하여 장기간 지속되었다. 사고의 근본 원인으로 뽑히는 것으로 원전의 설계·건설·운영 과정에서 지진과 쓰나미가 빈번하게 발생하는 일본 고유의 자연 환경 특성을 적절하게 고려 하지 못한 점이 있었다. 또한 사고가 발생하고 악화시킨 원인으로 초대형 쓰나미에 대한 무방비, 중대사고 대책의 미흡, 지진과 쓰나미에 의해 악화된 작업환경, 사고 진행 과정에서의 부적절한 대응, 원자로에 대한 이해 부족 등 다양한 점이 사고원인으로 뽑히고 있다. 표2는 후쿠시마 사고를 분석한 표이다.

Table 2. Potential factors and determine which path to take advantage of the IAD

영향 단계	영향 요인 (원인표 요인)	기본원인 (근본원인)	불안전한 상태	불안전한 행동	사고유발가능인자 (원발사고 요인)	결과 및 손실
Machine	장기적인 설계 평가 미흡	고유 지진(일본 고유) 지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡			원자로 인출정지
	관리감독 미흡	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡		원자로 인출정지	원자로 인출정지
	부적절한 설계	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡		원자로 인출정지	원자로 인출정지
	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡		원자로 인출정지	원자로 인출정지
	원자로 인출정지	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡		원자로 인출정지	원자로 인출정지
Man	원자로 인출정지	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡		원자로 인출정지	원자로 인출정지
	원자로 인출정지	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡		원자로 인출정지	원자로 인출정지
	원자로 인출정지	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡		원자로 인출정지	원자로 인출정지
	원자로 인출정지	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡		원자로 인출정지	원자로 인출정지
	원자로 인출정지	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡		원자로 인출정지	원자로 인출정지
Management	원자로 인출정지	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡		원자로 인출정지	원자로 인출정지
	원자로 인출정지	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡		원자로 인출정지	원자로 인출정지
	원자로 인출정지	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡		원자로 인출정지	원자로 인출정지
	원자로 인출정지	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡		원자로 인출정지	원자로 인출정지
	원자로 인출정지	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡	지진정보기, 지진 정보기가 충분히 활용된 지진정보정보기 활용 미흡		원자로 인출정지	원자로 인출정지

3.2 IAD 기법을 활용한 위험요소 분석 결과

표 2를 보면 가로 축에 영향요인, 기본원인, 불안정한 상태, 불안정한 행동, 사고유발가능인자, 결과 및 손실, Man 부분을 보면 기본원인(근본원인)은 사고를 말하며 약 15m의 예상을 뛰어넘는 쓰나미가 설계 기준이상으로 도달하여 불안정한 상태로는 취수구가 파손되었고, 이로 인하여 원전 곳곳이 침수되어 비상디젤발전기 마저 침수되어 전원 상실이 되었다. 불안정한 행동은 전원 상실로 인하여 화면을 통해 얻을 수 있는 정보가 없었으며, 계측 장비를 통해서도 얻을 수 있는 정보가 아무것도 없었으며, 운전원은 정신적 당황으로 인하여 IC 작동에 대한 확인을 놓친 부분이다. 사건 쓰나미로 모든 사고의 연관성이 유발된다는 것이다. 또 그림을 보면 관리영역(Management)의 안전의식 미흡 부분에서 화살표가 올라 오는 것을 알 수 있다. 안전의식 미흡 부분이 발전용 원자로 시설에 관한 내진 설계 심사 지침 기준 미흡으로 인하여 안전 부분이 미흡하여 사고의 영향을 미친 것을 보여 준다.

IAD를 통하여 도출된 후쿠시마 위험요소로는 대응지침서 부족, 화재 관련 장비 관리 부족, 화재 감지기 오작동(후쿠시마 원전에 설치되었던 대부분의 계측기기들은 중대사고환경에 대해 검증되지 못하였음), 비상대응 훈련부족, 비상시 보고체계 부족, 직무 경험 부족, 비상시 의사소통 부족, 심리적 불안감으로 인한 기억 상실 등을 도출 할 수 있었다. 근본적으로 들어가 보면 도쿄 전력의 안전의식문제를 꼽을 수가 있었다.

후쿠시마 원전 건설 당시 1960년대에는 지진과 학이 미숙하여 부지주변의 지진 활동을 낮다고 생각하여 원전의 내진 설계에 있어 안전 기능 유지를 확인해야 할 지진동의 최대 가속도를 부과 265gal로 내진성능은 현전하게 낮았다. 하지만 2006년 발전용 원자로 시설에 관한 내진 설계 심사 지침이 대폭 개정되어, 산업성 원자력 안전보안원은 즉시 전국의 원자력 사업자에 대해서 신지침에 따른 기설원전의 내진 안전성 평가의 실시를 요구하였지만, 도쿄전력은 2008년 3월에 후쿠시마 제1원전 5호기의 내진별 체크 중간보고 제출하고, 내진설계의 기준 지진동에 대한 안전성이 확보 되었다고 하였다. 하지만 일부분에 대한 안전성 보고 자료였다. 이와 같은 도쿄전력은 우리 원전은 안전하다는 원전안전에 대한 자만이 주변 환경에 대한 지질 조사 및 쓰나미 대비를 못하여 비상 대응절차서의 내용 부족, 원전 계측기기의 중대사고환경에 대해 검증되지 못하는 문제가 발생한 것으로 분석을 통하여 판단하였다.

4. Conclusion

본 연구에서는 고신뢰도 시스템에서 인적오류에 선제적으로 대처하기 위하여 IAD 기법을 활용하여 대응 방안 중심의 인적오류 위험요소 분석 방법 및 후쿠시마 사고의 사례를 제시하였다. 인적오류의 대표성 및 중속성 개념에 따라, 잠재적 요인들과 가능한 위험의 구조를 파악하는 간단한 방법을 제안하였다. 사례 분석 결과를 검토해 보면 기존에 논의되었던 직접적인 원인 및 대응방안 이외에도 다수의 추가적인 공학적 관리적 방안들을 도출할 수 있었다. 추후 각 대응방안에 대한 우선 순위의 도출된 원전 운영자의 선택을 반영할 경우 인적오류 대처의 실효성을 더욱 보강할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgements

This research was supported by the nuclear energy research and development project (Grant. 2012M2A8A-4004256) funded by the Ministry of Education, Science and Technology.

References

1. 한국원자력학회 후쿠시마위위원회, 후쿠시마 원전 사고 분석: 사고내용, 결과, 원인 및 교훈, 2012.
2. 이용희 외, A Strategy to the Development of a Human Error Analysis Method for Accident Management in NPPs using Industrial Accident Dynamics, KAERI/TR-1107/98 1998.6
3. Yong-Hee Lee, Yeonju Oh, An Analysis Method with the Human Error Perspective Proposed for the Events in HANARO, 2011 HANARO SYMPOSIUM, 2011.
4. Dong-Hyun Baek, Lock-Jo Koo, Kyung-Sun Lee, A Method to Analysis Human Errors at the Nuclear Power Plants. 2011.
5. Dongsan Kim, Min-Ju Shin, Wan Chul Yoon, Myung-Chul Jung, Taxonomy of Performance Shaping Factors for Human Error Analysis of Railway Accidents, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering Vol. 31, No. 1, pp.41-48, March 2008.*