Journal of the Korean Society of Safety
Vol. 39, No. 1, pp. 82-95, February 2024
https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2024.39.1.82

ISSN 1738-3803 (Print)
ISSN 2383-9953 (Online)
http://www.kosos.or.kr/jkosos

절차 미준수 행동의 재해석 : 국내 원전 사건을 중심으로

김동진[1†]

Reinterpretation of Behavior for Non-compliance with Procedures : Focusing on the Events at a Domestic Nuclear Power Plants

Dong Jin Kim[1†]

†Corresponding Author
Dong Jin Kim
Tel : +82-42-868-0849
E-mail : danielkim@kins.re.kr

Received : November 29, 2023
Revised : January 14, 2024
Accepted : January 27, 2024

Copyright@2024 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Abstract : Analyzing the aftermath of events at domestic nuclear power plants brings in the question: "Why do workers not comply with the prescribed procedures?" The current investigation of nuclear power plant events identifies their reasons considering the factors affecting the workers' behaviors. However, there are some complications to it: in addition to confirming the action such as an error or a violation, there is a limit to identifying the intention of the actor. To overcome this limitation, the study analyzed and examined the reasons for non-compliance identified in nuclear power plant events by Reason's rule-related behavior classification. For behavior analysis, I selected unit behaviors for events that are related to human and organizational factors and occurred at domestic nuclear power plants since 2017, and then I applied the rule-related behavior classification introduced by Reason (2008). This allowed me to identify the intentions by classifying unit behaviors according to quality and compliance with the rules. I also identified the factors that influenced unit behaviors. The analysis showed that most often, non-compliance only pursued personal goals and was based on inadequate risk appraisal. On the other hand, the analysis identified cases where it was caused by such factors as poorly written procedures or human system interfaces. Therefore, the probability of non-compliance can be reduced if these factors are properly addressed. Unlike event investigation techniques that struggle to identify the reasons for employee behavior, this study provides a new interpretation of non-compliance in nuclear power plant events by examining workers' intentions based on the concept of rule-related behavior classification.

Key Words : events in nuclear power plants, rule-related behavior classification, violation

1. 서 론

원자력발전소에서 발생한 사건 중 인적오류에 의한 사건에서는 규정된 절차를 준수하지 않는 등의 문제점을 확인할 수 있다. 국제원자력기구의 사건 원인 분류[1)]를 참고하여, 국내 원전 사건의 원인은 기계결함, 전기결함, 계측결함, 외부영향, 인적오류, 기타로 분류된다[2)]. 이 중 인적오류에 의한 사건의 세부 원인은 작업수행 오류, 절차준수 미흡, 정보 은폐 등으로 알려져 있다. 특히 절차준수 미흡은 인적오류에 의한 사건에서 공통적으로 확인할 수 있다[3-13)].

다만, 사건조사 결과 확인되는 절차 미준수 행동에 있어 행위자의 의도를 파악하기는 용이하지 않다. 산업계에서 활용하는 원인분석 지침이나 국외 사건 조사/평가 프로세스는[14-17)] 절차서, 교육훈련, 인간-시스템 연계(Human system interface, 이하 "HSI")와 같은 요인이 종사자의 실수 또는 절차 미준수 행동에 영향을 끼치는 것으로 설명한다. 이와 같은 분석 기법 또는 프로세스를 활용한 사건조사 결과[3-13)]에서는, 전술한 요인들이 종사자 행동에 끼친 영향을 확인할 수 있다. 이는

[1]한국원자력안전기술원 월성주재검사팀 책임연구원 (Wolsong Regional Inspection Team, Korea Institute of Nuclear Safety)

사건을 종합적으로 이해하는 것에는 유용하지만, 종사자가 규정된 절차를 준수하지 않았을 때, 어떤 의도로 그러한 행동을 하였는지 파악하기는 어렵다.

이와 관련하여, 학술적 관점에서 절차를 준수하지 않은 행동에 대한 연구들을 확인할 수 있으나, 행위의 의도를 파악하기에는 용이하지 않은 것으로 판단된다. Park과 Jung[18]은 두 가지 요인에 국한하여 절차 미준수 행동에 끼친 영향을 분석하였고, Kim 등[19]은 위반보다는 오류에 초점을 두고 절차 미준수 행동을 분석하였으며, Kim 등[20]은 인적요인 분류 및 분석 체계에 기반하여 오류 및 위반행동에 영향을 끼친 요인 간 관계를 정량화하였다. 즉, 전술한 연구들을 통해 행동에 영향을 끼친 요인이 아닌 행위 자체의 의도를 파악하기에는 어려움이 있다. 다만, 강보라 등[21]은 위반오류 메커니즘의 개념모형을 정의하고 이에 따른 위반 유형을 분류하였으나, 해당 모형의 학술적 근거는 명확하지 않은 것으로 확인된다.

이에 비해, Reason은 재해를 유발하는 안전하지 않은 행위는 현장(local workplace) 및 조직 요인의 영향을 받음을 언급하였고[22,23], 행위의 의도를 확인할 수 있는 규칙 관련 행동 분류[24,25]를 제시하였다. Reason에 따르면, 절차서와 같은 현장 요인과 조직 요인의 영향을 받은 안전하지 않은 행위가 시스템의 방어 체계에 손상을 가져옴으로써 위험이 재해로 연결된다[22,23]. 이 중 인적오류와 위반행위를 포함하는 안전하지 않은 행위에 대해 규칙 관련 행동 분류[24,25]를 제시함으로써 행위의 다양성 및 행위자의 의도를 파악할 수 있도록 하였다. 예를 들어 규칙은 적절하였으나 부적절한 위험평가에 근거하여 개인적 목표만을 달성코자 규칙을 준수하지 않은 행동 등을 확인할 수 있다.

이에 따라 본 연구는 Reason의 규칙 관련 행동 분류[25]에 근거하여 국내 원자력발전소에서 발생한 사건별로 확인된 종사자 행동을 분류하고 현장 및 조직 요인을 고려함으로써 절차 미준수 행동을 새롭게 해석하고자 한다. 즉, 절차를 준수하지 않은 행동에 영향을 끼친 요인에 대한 분석 뿐 아니라 규칙 관련 행동 분류의 개념을 적용하여 종사자 행동의 의도를 고찰함으로써, 원전 사건 및 안전에 대한 이해를 증진시키고자 한다.

본 연구는 우선 사건 조사 기법과 Reason의 규칙 관련 행동 분류[25]에 대한 이론적 논의를 정리하고, 원전 사건에서 확인되는 종사자 행위 분석을 위한 방법론을 제시한다. 이어서 이를 활용하여 종사자 행위 및 이에 영향을 끼친 요인들을 체계적으로 분석하고, 행동 분류 결과를 제시한다. 마지막으로 이상의 논의들이 제공하는 시사점을 기술한다.

2. 이론적 배경

2.1 사건 조사에 활용되는 원인 분석 기법

산업현장의 사건의 이해를 위해서는 사고를 유발한 근본적인 원인에 대한 이해가 필요하다. 근본원인은 부적합을 야기하는 것으로 프로세스 향상을 위해 궁극적으로 제거되어야 할 요인으로 정의된다[26]. 근본원인은 적절히 개선되었을 때 특정 사건 및 유사 사건의 재발을 방지할 수 있는 것으로 발생 가능한 사건에 일반적으로 적용할 수 있는 특징을 갖는다.

미국 에너지부는 산업 현장에서 발생하는 사건의 조사 및 원인 보고를 위한 근본원인 분석 지침을 개발하였다[14]. 해당 지침은 조사 단계별 수행해야 할 과업을 기술하며, 원인 분석 및 평가 단계에서는 다양한 분석 기법(예. 사건 및 원인 요인 분석, 방벽 분석, 관리 감독 및 위험 수목 분석 등)을 제시하였다. 모든 산업 현장에서 사건 조사시 미국 에너지부의 지침을 따르는 것은 아니나, 다양한 업계에서 이와 유사한 근본원인 분석 지침을 활용하고 있다(예. TapRoot®의 근본원인 분석 지침 등). 국내에서도 산업현장에서 발생한 사건에 대해 근본원인 분석 기법을 활용하고 있다[27,28].

미국 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission, 이하 “NRC”)는 원전 사건조사시 인적수행도 분석을 위한 조사 프로세스를 개발하였다[15]. 이는 인적수행도가 주요 현안인 사건에 적용하는 방법으로, 앞서 설명한 근본원인 분석 지침과 유사하게 여러 조사 단계들로 구성되며, 이를 통해 근본원인, 재발방지 대책 등을 도출한다. NRC는 동 프로세스에서 조사 단계별로 교육・훈련, 절차서, 의사소통, 조직 요인, 인간공학, 감독 등의 요인별 적절성을 평가할 수 있는 지침을 제시하였다. 이후 NRC는 사건조사 이외에 원전 운영자들이 자체적으로 이행하는 문제 식별 및 해결 프로그램의 검토시 활용하는 인적수행도 평가 프로세스를 개발하였다[17]. 이는 NRC가 기존에 개발한 조사 프로세스와 비교했을 때 인적수행도 영향 요인(절차서, 작업도구 및 환경, HSI, 감독, 의사소통 등)에 유사성을 갖는다.

Shappell & Wiegmann은 교통・항공 업계에서 발생하는 사건 조사시 인적요인 평가를 위한 체계인 인적요인 분석 및 분류 체계(Human Factors Analysis and Classification System, 이하 “HFACS”)를 개발하였다[16]. Reason의 스위스 치즈 모델[22]을 고려하여, “안전하지 않은 행위”, “안전하지 않은 행위의 사전 조건”, “안전하지 않은 감독”, “조직적 영향” 영역을 상향적으로 구성하고 영역별 세부 요인들을 나열하였다. 이를 통해 요인별 발생 여부를 확인함으로써 최종적으로 안전하

지 않은 행위의 원인을 확인할 수 있도록 하였다.

전술한 사건 원인 분석 기법들은 인적행위에 영향을 끼친 요인들을 확인할 수는 있으나, 행위 자체의 이유를 확인하기는 어렵다. 근본원인 분석 지침은 사건의 직접・근본・기여 원인의 파악을 통해 사건을 유발한 다양한 원인을 확인하며 여기에는 인적행위에 영향을 끼친 요인들이 포함된다. NRC의 인적수행도 조사 프로세스도 인적행위에 영향을 끼치는 절차서, 교육훈련, HSI의 품질 등을 평가하여 인적행위에 끼친 영향 여부를 분석한다. HFACS 역시 승무원 할당 실패, 알려진 문제에 대한 시정 실패, 조직 문화 등 인적행위에 영향을 끼칠 수 있는 요인들을 평가한다. 그러나 행위에 영향을 끼친 요인이 아닌 행위 자체에 대한 평가에 있어, 행위자의 의도나 행동에 대한 이유를 평가하기에는 한계가 있다.

2.2 절차 미준수에 대한 기존 연구

Park과 Jung[18]은 국내 원전 운전원의 직무경력과 절차서의 복잡성이 절차 미준수 행동에 끼치는 영향을 분석하였다. 원전 시뮬레이터를 활용하여 비상운전절차 교육에 참여한 24명 운전원들의 실습 기록을 근거로, 절차 내 단계의 이행 여부에 따라 절차 준수 여부를 확인하고 그 결과를 분석하였다. 분석 결과, 10~13년 경력을 갖는 운전원의 절차 미준수 비중이 다른 경력의 운전원에 비해 높았고(41.5%), 두 번째 복잡도를 갖는 절차의 미준수 비중이 다른 복잡도의 절차서에 비해 높은 것으로(30.9%) 파악되었다. 다만, 특정 요인들에 국한하여 절차 미준수 행동과의 관계를 파악함으로써, 행위 자체의 의도를 명확히 파악하기는 어려운 것으로 확인되었다.

Kim 등[19]은 국내 원전에서의 시험 및 유지보수 작업과 관련된 인적오류의 특징을 분석하였다. 해당 연구는 2006년 이전 계획되지 않은 원자로 정지 사건의 시험 및 유지보수 작업 중 발생한 인적오류들을 계획(planning) 실패와 실행(execution) 실패로 구분하였다. 원전 사건 조사보고서의 내용을 기반으로, 작업 계획 또는 절차서의 결함에 해당하는 계획 실패의 오류들에 기여한 요인들과, 절차 이행을 누락하거나 적절치 않은 행동을 수행한 실행 실패의 오류들의 유형을 정리하였다. 따라서 이는 종사자가 수행하는 과업에 대해 계획 단계의 결함과 실행 단계의 오류 유형 확인을 설명한 것으로, 의도적으로 절차를 준수하지 않은 위반 행동을 중점적으로 고려하지는 않은 것으로 파악되었다.

강보라 등[21]은 국내 원전 사건을 대상으로 위반오류가 발생하는 메커니즘의 특징을 분류하였다. 사전 연구[29]를 통해 올바른 작업 절차를 의도적으로 따르지 않는 위반오류를 네 가지 유형으로 정의하였고, 이를 통해 위반 행위의 이유를(예. 안일한 대처, 책임 회피, 사적 편의 등) 파악할 수 있도록 하였다. 해당 연구[21]는 인간・작업・조직 관련 특성항목에 의해 위반오류가 발생하는 메커니즘의 개념 모형을 구성하였다. 이후 일상적 위반 및 상황적 위반에 해당하는 국내 원전 사건 8건에 대해(2005년~2014년) 사건 조사보고서의 내용을 기반으로 메커니즘 모형을 적용함으로써 위반오류 유형별 발생 특징을(예. 작업자 및 작업 특성에 의한 일상적 위반 등) 정리하였다. 다만, 해당 연구는 위반오류 발생 메커니즘 개념 모형의 학술적 근거가 불명확한 것으로 판단된다. 예를 들어 교육/훈련 특성 항목을 조직으로 분류하였으나, 이는 사전 연구의 참고자료로 활용된 HuRAM+[30] 또는 Reason의 연구[22]와는 차이가 있는 것으로 확인된다.

절차 미준수와 관련된 국외 사례에서도 다양한 연구들을 확인할 수 있다. Lawton[31]은 영국 철도 기관사들을 대상으로 절차 위반의 동기에 대해 연구하였고, Laurence[32]는 호주 광산 업계 종사자들을 대상으로 절차의 인식 정도 및 준수 여부 등을 연구하였다. Alper와 Karsh[33]는 절차 위반의 원인, 절차 위반으로 인한 부상 및 질병 여부, 종사자 포함 여부를 기준으로 온라인 검색을 통해 학술 연구들을 선별하고, 이들을 정리하여 위반의 요인을 도출하였다. 다만, Bye와 Aalberg[34]가 언급한 바와 같이, 전술한 연구들을[31-33] 포함한 대부분의 연구들은 설문과 인터뷰를 활용하여 수행된 것으로 확인되었다.

2.3 조직적 사고

Reason은 산업 현장에서 발생하는 재해를 조직적 사고로 명명하면서 다양한 요인이 작용하여 재해가 발생함을 설명하였다[23]. 위험이 상존하는 시스템에서는 재해 예방을 위해 여러 계층으로 구성된 방어 기제가 동작하는데, 방어 체계에 손상이 발생할 경우 이는 재해로 연결될 수 있다(Fig. 1). 방어 체계에 손상을 일으키는 요인으로는 인적오류나 위반 행위와 같이 시스템 안전에 즉시 부정적 영향을 미치는 즉발 실패(active failure)와, 잘못된 설계나 유효하지 않는 절차 등 시스템 전반에 내재된 결함인 지연 조건(latent condition)이 있다. 즉발 실패와 관련하여, Reason은 예측불가능한 사건의 개입 없이 의도한 목적을 달성하기 위해 계획한 행위의 실패를 ‘인적오류(human error)’로, 안전운영 절차나 표준 또는 규칙으로부터의 일탈(deviation)을 ‘위반(violation)’으로 정의하였다. 현장 및 조직 요인은

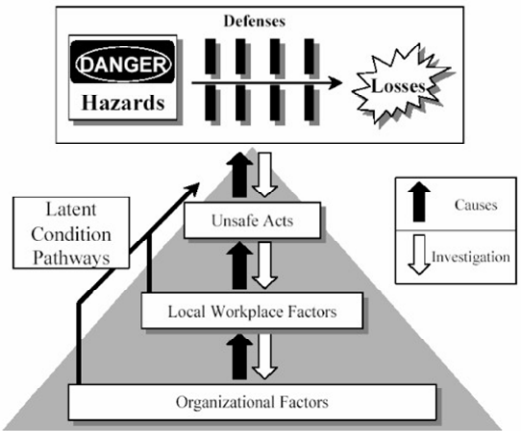


Fig. 1. Stages of investigation and development in organizational accident[23].

안전하지 않은 행위에 영향을 끼치기도 하고, 지연조건으로 작용하기도 한다.

원자력 안전규제 관점에서 현장 요인과 조직 요인은 다음과 같이 구분할 수 있다. NRC의 인적수행도 조사 프로세스는 사건 발생시 파악해야 할 인적수행도에 영향을 끼치는 요인으로 절차, 훈련, 의사소통, 인간공학(HSI, 작업 환경 등), 감독, 경영시스템(정책, 경영 관리, 조직 문화 등)을 제시하였다[15]. Reason에 따르면, 현장요인은 작업장 설계, 작업도구, 절차, 감독, 교육·훈련 등으로 구성되고, 조직의 안전척도는 안전 요인(안전 정책 등), 관리 요인(변화 관리, 리더쉽 등), 기술 요인(하드웨어, HSI, 설계 등), 절차 요인, 교육・훈련 요인과 같은 세부 요인으로 구성된다[23]. 특히 안전척도의 중심에 전념(commitment), 인식(cognizance) 등과 같은 문화적 요인이 자리잡고 있음을 기술하였다. 따라서 NRC[15]가 제시한 요인 중 경영시스템을 제외한 요인들과 Reason 연구의[23] 기술・절차・교육・훈련은 현장 요인에 해당되고, 조직 요인은 경영 정책, 리더쉽, 조직 문화 등 조직 운영의 상위 수준에 해당하는 요소들로 구성된다고 볼 수 있다.

2.4 행동 분류를 위한 방법론

Reason 등은 규칙이나 절차는 작업 프로세스를 표준화시키기 위한 조직적 통제(control)의 수단으로 작동함을 언급하였다[24]. 위험이 상존하는 조건에서 운영되는 시스템에 있어, 조직 구성원의 행동은 효과적이고 효율적일 뿐 아니라 안전해야 한다. 이에 따라 조직은 구성원의 행동의 예측가능성 및 규칙성을 산출하기 위한 수단으로 규칙 또는 절차를 제정하여 운영한다. 절차의 위반은 작업 프로세스 상 순차적 오류의 가능성을 증가시키고 의도치 않은 결과를 유발할 가능성 역시 증가시킨다. 다만, 절차의 준수 또는 위반에 있어 맥락을 정확히 고려할 필요가 있다. 작업 계획과 같은 요소를 고려하지 않은 부적절한 절차에 대해 단순히 이를 준수하지 않았다고 하여 위반 행위로 판단하는 것은 적절치 않다.

이와 관련하여 Reason 등은 규칙 준수 행위의 다양성을 고려한 규칙 관련 행동 유형을 제시하였다[24]. 이는 개인의 심리적 보상(psychologically rewarding) 여부, 절차 준수(compliant) 여부, 적합한(correct) 행위 여부, 적절한(good) 절차 여부에 따라 산업 현장에서 발생할 수 있는 종사자 행위를 10개 유형으로 분류하였다. 이러한 Reason 등의 연구[24]는 다양한 사례들에 적용되거나 이론적 배경으로 활용되었는데, Lawton과 Parker는 의료계에서 발생하는 사건 보고(reporting)에 대한 의향을 조사하였고[35], Phipps 등은 의료행위에 있어 위반을 유발하는 조건을 파악하는 데 활용하였다[36]. 이외에도 규칙 관련 행동 분류의 개념은 안전문화와 안전성과(절차 준수) 간 관계를 탐색하거나[37], Safety-Ⅰ/Ⅱ의 개념을 활용한 위반 행위의 이해 연구[38] 등에 활용되었다. 후자의 연구와 관련하여, Safety-Ⅰ 관점에서 안전은 잘못된(wrong) 상황을 가능한 최소화하는 것으로, Safety-Ⅱ 관점에서 안전은 적절한(right) 상황을 가능한 최대화하는 것으로 정의된다(Hollnagel 등[39]).

Table 1. The Varieties of Rule-related Behaviour

Where the task was covered by an appropriate rule or procedure (good rule)

- Was the procedure followed and was it psychologically rewarding?
  - If YES → Correct and rewarding compliance ①
  - If NO → Correct but unrewarding compliance ②
- If the procedure was not followed and was it psychologically rewarding?
  - If YES → Incorrect but rewarding violation ③
  - If NO → Mistaken circumventioin (misvention) ④
- Was the non-compliance motivated by a desire to damage the system?
  - If YES → Malicious circumvention (malvention or sabotage) ⑤

Where the task was covered by some inappropriate rule or procedure (bad rule)

- Was the procedure followed and was it psychologically rewarding?
  - If YES → Incorrect but rewarding compliance ⑥
  - If NO → Mistaken compliance (mispliance) ⑦
- If the procedure was not followed and was it psychologically rewarding?
  - If YES → Correct violation ⑧
  - If NO → Correct but unrewarding violation ⑨
- Was the compliance motivated by a desire to damage the system?
  - If YES → Malicious compliance (malpliance or working-to-rule) ⑩

Where the task was not covered by a rule or procedure (no rule)

- Did the knowledge-based improvisation yield a good or acceptable outcome?
  - If YES → Correct improvisation ⑪
  - If NO → Mistaken improvisation ⑫

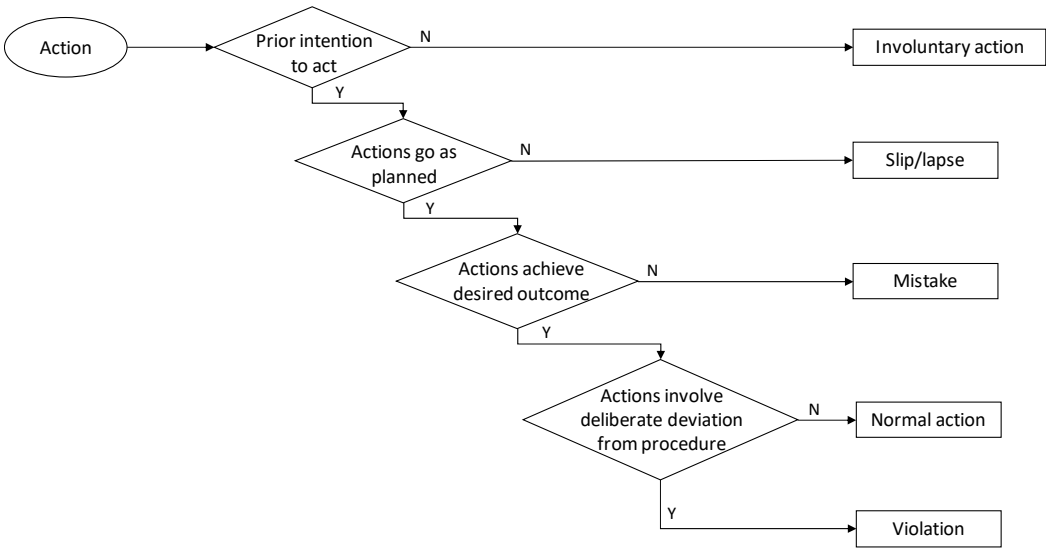


Fig. 2. Classification of unsafe acts involving slip/lapse, mistake, violation.

이후 Reason은 조직적 사고의 조사 및 발전 단계(Fig. 1) 상 '안전하지 않은 행위'를 상세히 설명하고자 기존의 연구[22] 및 Reason 등의 연구[24]를 보완하여 규칙 관련 행동 분류를 제시하였다(Table 1)[25]. 기존의 연구는 '안전하지 않은 행위'를 의도 여부에 따라 실수(slip/lapse, mistake)와 위반(violation)으로 구분하였다(실수와 위반의 정의는 2.3절과 동일). 그러나 규칙 관련 행동 분류의 연구[25]는 실수나 위반 모두 의도가 있음을 기술하고 고의적으로(deliberate) 절차를 준수하지 않은 경우에 한정하여 위반을 정의하였다(Fig. 2). 행동 분류 기준의 경우 Reason 등의 연구[24]와 대동소이하며, 규칙의 품질은 '적절한(good)', '잘못된(bad)', '규칙 없음(no rule)'으로 구분되는데, '적절한'은 '적합한(correct)'을, '잘못된'은 '부적절함(inappropriate)' 또는 '부정확함(incorrect)'을 수반하는 개념이다. 행위의 적합성은 행위자의 위험 인식의 정확도를 의미하며, 정확한 위험평가(appraisal)에 근거한 '적합한' 행위와, 부정확하거나 부적절한 위험평가에 근거한 '부적합한' 행위로 구분된다. 심리적 보상은 행위자의 목표를 만족시키는 것을 의미하며, 행위자의 만족은 조직의 목표와 다를 수 있으므로 행위자는 절차를 준수할 수도 그렇지 않을 수도 있다. 다만, Reason 등의 연구[24] 대비 Reason의 분류[25]는 행위의 결과가 위해를 가져올 것이라는 예상하에 부적절한 행위를 수행하는 경우에 대한 두 가지 행동(Malicious circumvention, Malpliance)을 추가하였다. 이와 같은 분류에 따른 행동 분류의 결과 및 각각의 행동별 속성은 Table 1과 같다. 예를 들어 'Incorrect but rewarding violation ③' 행동은 적절한 절차를 준수하지 않은 부적합한 행동으로 심리적 보상이 부여되는 특징을 갖는다. 이와 같은 행동은 적은 노력으로 개인적인 목표를 달성코자 하는 의도가 내포된 것으로 간주된다. 'Mistaken circumventioin (misvention) ④' 행동은 적절한 절차를 실수로 준수하지 않은 행동으로 심리적 보상이 부여되지 않는 특징을 갖는다. 적절한 규칙으로부터의 일탈은 실수에 의한 것으로 간주된다. 'Incorrect but rewarding compliance ⑥' 행동은 잘못된 절차를 준수한 부적합한 행동으로 심리적 보상이 주어진다. 이는 행위자의 직무 가치보다 규칙의 준수에 대한 가치가 클 경우 발생한다. 'Mistaken compliance ⑦' 행동은 잘못된 절차를 준수하지 않은 행동으로 심리적 보상이 주어지지 않는다. 이는 부정확한 위험평가에 의해 실수로 행동을 수행했다는 점에서 '④' 행동과 유사한 속성을 갖는다. 'Mistaken improvisation ⑫' 행동은 적절한 규칙의 부재로 적절한 결과가 달성되지 않은 경우를 의미한다.

3. 절차 미준수 행동의 분석 방법

본 연구는 국내 원전 사건에 대해 Reason의 규칙 관련 행동 분류[25]를 적용하여 절차를 준수하지 않은 행동의 의도를 파악하고자 한다. 행동의 의도를 명확히 확인하기 어렵거나 인적오류 중 실수에 초점을 둔 기존의 연구에 비해서, 본 연구는 실수와 위반의 개념을 모두 고려하는 Reason의 분류를, 원전 사건에서 확인되는 행동들에 적용하고 그 유형을 확인한다. 이를 통해 절차를 준수하지 않은 행동의 의도를 보다 명확히 파악하고자 한다. 또한 국외 사례들과 달리 원전 사건 조사보고서에 기반하여 절차 미준수 행동을 실증적으로 분석

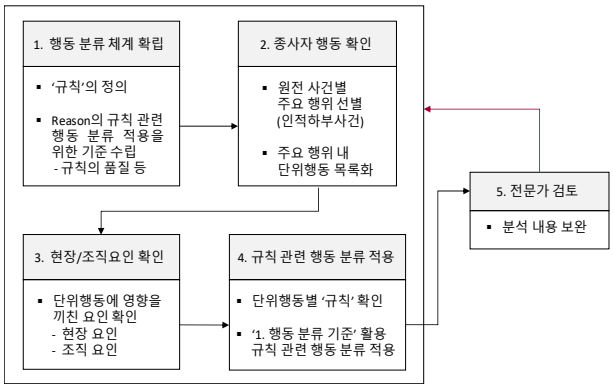


Fig. 3. Process of behavior analysis.

하였다. 이와 함께 기존의 연구들과 유사한 방식으로 Reason의 조직적 사고의 조사 및 발전 단계 모델(Fig. 1)에 의거하여, 절차 미준수 행동에 영향을 끼친 요인을 파악하고자 한다. 이는 전술한 요인이 종사자의 행동 및 그 의도에 영향을 끼칠 수 있기 때문이다.

본 연구는 다음과 같은 흐름으로 국내 원전에서 발생한 사건별 확인된 종사자의 행동을 분석하고자 한다(Fig. 3). 먼저, Reason의 규칙 관련 행동 분류를 국내 원전 사건에서 확인되는 행동에 적용하기 위하여, 행동 분류 체계를 확립하였다. 즉, 종사자가 준수하여야 할 '규칙'을 정의하고, 종사자 행동에 대해 규칙의 품질, 행위의 적합성, 심리적 보상 여부를 판별할 수 있는 기준을 수립함으로써 해당 행동의 유형을 구분할 수 있도록 하였다. 이후 원전 사건에서 확인되는 종사자 행동을 나열하고, Fig. 1을 참고하여 단위행동에 영향을 끼친 요인들을 확인하였다. 단위행동 및 영향 요인 확인 후 Reason의 규칙 관련 행동 분류[25]를 적용하여 행동의 유형을 확인하였다. 또한, 1차 분류 결과의 신뢰성을 검증하기 위해 전문가 검토를 실시하고, 검토 의견은 행동 분류 기준, 종사자 행동, 현장 및 조직 요인, 규칙 관련 행동 분류 적용 모든 분석 단계에 반영될 수 있도록 하였다.

3.1 행동 분류 체계 확립

Reason의 규칙 관련 행동 분류를 국내 원전 사건에서 확인되는 종사자 행동에 적용할 수 있도록 해당 체계에 기술된 '규칙'을 새롭게 정의하고, 판별 기준을 구체화하였다.

'규칙'의 정의를 위해 국내 원전 운영 체계를 검토하였다. 국내 원전 운영자인 한국수력원자력(주)(이하 '한수원')는 발전용원자로 및 관계시설의 운영을 위하여 기준에 적합한 서류를 갖추어야 하고, 운영에 관한 사항에 대해 위원회의 검사를 받아야 하며, 원자로의 안전운전에 관한 조치나 원자로시설의 자체점검에 관한 조치 등을 위원회규칙으로 정하는 바에 따라야 한다. 이러한 요건에 따라 한수원은 발전용원자로 및 관계시설의 운영을 위한 체계(시설의 구조·설비 및 성능 검사, 운영을 위한 안전조치 등)와 품질보증계획을 구축하였다. 이를 참고하여 본 연구에서 활용하는 '규칙'은 원자력안전법령 체계 하의 모든 항목과 한수원이 수립한 원전 운영을 위한 체계 및 품질보증계획으로 정의한다. 예를 들어, 제어봉의 제어능을 측정하는 절차(규칙)가 수립되는 과정은 다음과 같다. 원자력안전법 제22조(검사) 및 관련된 하위 법령들에 따라 한수원은 규정된 검사 대상, 방법 및 기준에 따라 정기검사를 받아야 하며, 구체적으로 원자력안전위원회고시 제2017-28호는 원자로 본체의 검사 대상 항목으로 노물리 시험을 규정함에 따라, 한수원은 이를 이행할 수 있는 체계로 관련 절차(제어봉 제어능 측정)를 수립하였다.

다음으로 행동의 분류를 위한 판별 기준(2.4절 및 Table 1 참고)을 국내 원전의 상황에 맞게 구체화하였다. '규칙의 품질'의 경우, Reason[25]의 설명에 따라 상황 및 맥락을 고려함으로써 적절성(good) 여부를 판별토록 하였다. 이는 원전 운영에 활용되는 규칙(절차) 내 특정 항목(또는 단계)이 상황에 따라 적절할 수도, 그렇지 않을 수도 있음을 의미한다.

'절차의 준수'는 절차 내 모든 내용을 대상으로 최소 단위의 항목 또는 단계의 준수 여부에 따라 판별토록 하였다. 즉, 특정 항목(또는 단계)을 절차에 따라 이행하였을 경우 '준수'로 판정한다. 단, '절차의 준수'는 '행위의 적합성'과 함께 고려해야 하는데, 이는 '심리적 보상' 여부 판단에 단초를 제공하기 때문이다. 예를 들어, 적절한(good) 절차를 부적절한(inappropriate) 위험평가에 의해 준수하지 않았을 경우, 이는 부적절한 행동으로 간주되어 위험도와는 관련 없는 개인적 목표 달성만을 위한 행동으로 판별된다. 또한, 잘못된(bad) 절차를 부정확한(incorrect) 위험평가에 의해 준수하였을 경우, 이는 부정확한 행동으로 간주되어 실수로 개인적 목표를 달성하지 못한 행동으로 판별된다. 따라서, '절차의 준수' 여부만을 판단하기 보다는 '행위의 적합성' 여부를 함께 고려하여 '절차의 준수' 여부를 파악하게 된다.

'심리적 보상'은 조직이 수립한 규칙과 관계없는 개인의 목표 달성 여부로 판별토록 하였다. 원전 사건 조사보고서만으로 개인의 목표 달성 여부를 판단하기는 용이하지 않으나, Table 1의 행동 분류는 위험평가 적합성 또는 실수 여부에 따라 심리적 보상 여부를 판별한다. 예를 들어, 절차를 준수하지 않았으나 이에 영향

을 끼친 요인이 있다면, 이는 실수로 개인의 목표를 달성하지 못한 것으로 판단할 수 있다. 더불어 절차 미준수에 영향을 끼친 요인을 확인할 수 없다면, 보수적으로 개인의 목표 달성을 위해 절차를 이행하지 않은 것으로 판단하였다.

3.2 종사자 행동 확인

종사자의 행동 분석을 위해 Reason의 분류를 적용할 수 있는 행동을 도출해야 하고 이는 다음과 같은 과정을 거친다. 먼저 주요 행위에 해당하는 인적하부사건을 선별코자 한다. 원전에서 발생하는 사건은 여러 세부 원인이 복합적으로 작용하여 발생하며, 원인 파악 과정에서 여러 하부 사건들이 파악된다. 이 중 인적하부사건은 원자력발전소의 시스템・계통・기기의 상태에 영향을 끼친 행위를 의미한다[40]. 예를 들어, '작업자 A가 계통 B의 상태를 잘못 파악함'이 계통 B나 상위 계통에 영향을 미치지 않을 경우 인적하부사건이 될 수 없으나, 만약 작업자 A가 계통 B의 상태를 잘못 파악해서 필요한 조치를 누락하거나 조작하지 않아야 할 기기를 운전함으로써 시스템・계통・기기에 영향을 미쳤다면 이는 인적하부사건에 해당된다. 본 연구에서는 사건별 확인된 인적하부사건을 주요 행위로 선정하였다.

이후 주요 행위인 인적하부사건에 포함되는 여러 단위행동들을 나열하였다. 인적하부사건은 특정 단위행동을 지칭하기도 하나, 정의상 해당 단위행동 전후 확인된 다른 단위행동 및 정황들을 포함한다. 예를 들어

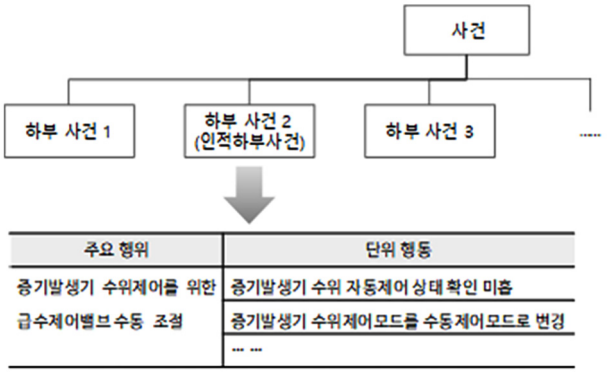


Fig. 4. Screening of important action and list of unit behavior.

작업자 C가 기기 D를 오개방하였을 경우, 해당 행동 이전에는 기기 D를 잘못 확인한 단위행동이 존재할 수 있고 해당 행동 이후에는 오개방으로 인하여 계통 E에 존재하는 유체들이 계획되지 않은 경로로 이동할 수 있다. 전술한 주요 행위의 선별 및 단위행동의 확인 과정은 Fig. 4와 같다.

3.3 단위행동에 영향을 끼친 현장 및 조직요인 확인

Reason의 조직적 사고의 조사 및 발전단계(Fig. 1)를 참고하여, 3.2절에서 확인된 단위행동에 영향을 끼친 현장요인 또는 조직요인을 확인하였다. 이를 위해 원전 사고・고장 조사 보고서를 참고하여 원전에서 발생한 사건별 주요 행위에 영향을 끼친 요인들을 확인하였다. 단, 현장요인 또는 조직요인은 특정 단위행동에만 영향을 끼칠 수도, 여러 단위행동들에 영향을 끼칠 수도 있다. 예를 들어 규칙에 해당하는 절차서가 미흡하게 작성된 경우 이는 특정 단위행동에만 영향을 끼치지만, 공정 준수 압박과 같은 요인은 여러 단위행동에 영향을 끼칠 수 있다.

3.4 단위행동별 규칙 관련 행동 분류 적용

규칙 관련 행동 분류의 적용함으로써 행동을 구분하기 위해 3.2절에서 확인된 단위행동별로 '규칙'을 확인하고, '규칙의 품질'과 '행위의 적합성' 및 '심리적 보상' 여부를 판별한다. 단위행동별로 적용되는 규칙은 3.1절의 정의에 따른 모든 항목이라기보다는 해당 단위행동에 적용되는 규칙(절차)으로 한정하였다.

단위행동과 규칙을 확인한 이후, Reason의 분류[25]를 적용하였다. 이를 위해 3.1절에서 설명한 '규칙의 품질', '행위의 적합성', '심리적 보상' 기준에 따라 단위행동에 부합하는 분류를 확인하였다. 즉, 해당 단위행동에 적용되는 규칙이 적절하였는지를 확인하고, 규칙의 준수여부로 파악되는 종사자의 행위 적합성을 분석하며, 심리적 보상 여부를 평가하는 과정을 거쳤다(Table 2). 그 결과, Reason의 12가지 분류[25] 중 해당되는 행동을 확인할 수 있었다. 예를 들어 Table 2에 따르면, 운전원은 증기발생기 수위 자동제어 상태를 확인하지 않았다. 해당 단위행동에 적용되는 규칙은 증

Table 2. Process to classify behavior per unit behavior

Unit behavior	Rule	Cause		Result
Not checking the status of automatic control of steam generator water level	Procedure for controlling steam generator water level	Rule quality	A bad rule because there is no information to check the status of automatic control of water level	⑦ Mistaken compliance
		Correctness	Operator performed procedure based on inappropriate risk appraisal	
		Psychologically rewarding	Difficult to regard this as providing psychologically rewarding	

기발생기 수위제어 절차이며, 이는 수위 자동제어 상태 확인에 필요한 정보를 기술하지 않았기 때문에 '잘못된(bad)' 절차에 해당한다. 운전원은 부정확한 위험 평가에 기반하여 실수로 절차를 준수하였고, 이는 심리적 보상이 부여된다고 판단할 수 없기 때문에 '⑦ Mistaken compliance' 행동으로 분류되었다.

전술한 분류[25]상 위반(violation) 행위는 2.3절에서 언급한 바와 같이 절차로부터의 일탈을 의미하며, 이는 본 연구에서 초점을 두는 절차 미준수 행동과 동일한 의미를 갖는다.

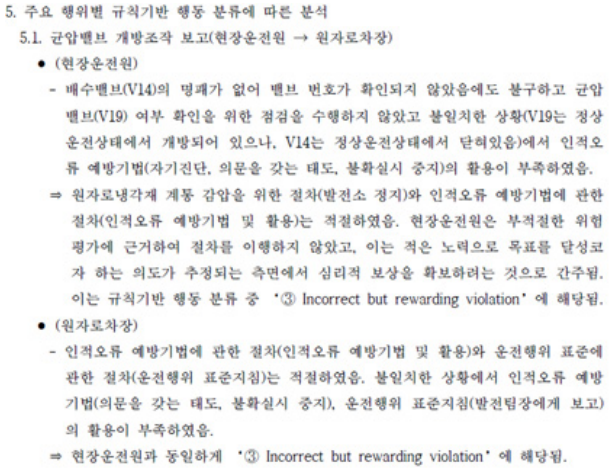
3.5 전문가 검토

3.4절까지의 과정을 통해 원전에서 발생한 사건별 확인된 단위행동들에 대한 분석 이후, 결과의 객관성 확보를 위해 전문가 검토를 실시하였다(Table 3). 검토에 참여하는 전문가 선정을 위해 원자력 발전소에 대한 지식과 원전 사건 및 원인 분석에 대한 경험 보유 여부를 고려하였다. 사건을 유발한 주요 행위, 주요 행위 내 단위행동 및 이에 영향을 끼친 현장 및 조직 요인의 파악에 따라 분석 결과가 달라질 수 있으므로, 전술한 지식 또는 경험을 보유한 전문가들을 선정하였다. 원전 사건 및 원인 분석에 대한 경험은 원전 사건 조사 경험이나 사건 조사 관련 연구 경험 또는 사건 조사 완료 이후 시행되는 등급평가위원회 활동 등으로 판단하였다.

이후 단위행동별 규칙 관련 행동 분류를 적용한 1차 분류 결과에 대해 전문가 검토를 실시하였다. 분석 대상 사건별로 3.2, 3.3, 3.4절에 따라 '주요 행위'와 '단위행동 도출 결과' 및 '단위행동별 규칙 관련 행동 분류를 적용한 분석 결과'를 문서로 작성하였다. 해당 자료를 활용하여(Fig. 5), 2023년 7월 24일부터 9월 14일까지

Table 3. Professionals' profile

Belonging	Major and degree	Major experience
Research professor of nuclear engineering in A university	Ph.D in nuclear engineering	Chief of IAEA International Nuclear Reactor Materials Property(THERPRO) DB Center
Professor of nuclear engineering in B university	Ph.D in nuclear engineering	Member of the Event Scale Rating Commission in Nuclear Safety and Security Commission
Principal researcher in C nuclear research institute	Ph.D in nuclear engineering	Task(event investigation) leader of Working Group on Human and Organizational Factors in OECD/NEA
Principal researcher in D nuclear safety regulatory institute	Ph.D in nuclear engineering	Event investigation team leader


5. 주요 행위별 규칙기반 행동 분류에 따른 분석

5.1. 균압밸브 개방조작 보고(현장운전원 → 원자로차장)

● (현장운전원)

- 배수밸브(V14)의 명패가 없어 밸브 번호가 확인되지 않았음에도 불구하고 균압밸브(V19) 여부 확인을 위한 점검을 수행하지 않았고 불일치한 상황(V19는 정상운전상태에서 개방되어 있으나, V14는 정상운전상태에서 닫혀있음)에서 인적오류 예방기법(자기진단, 의문을 갖는 태도, 불확실시 중지)의 활용이 부족하였음.

⇒ 원자로냉각재 계통 감압을 위한 절차(발전소 정지)와 인적오류 예방기법에 관한 절차(인적오류 예방기법 및 활용)는 적절하였음. 현장운전원은 부적절한 위험평가에 근거하여 절차를 이행하지 않았고, 이는 적은 노력으로 목표를 달성코자 하는 의도가 추정되는 측면에서 심리적 보상을 확보하려는 것으로 간주됨. 이는 규칙기반 행동 분류 중 '③ Incorrect but rewarding violation'에 해당됨.

● (원자로차장)

- 인적오류 예방기법에 관한 절차(인적오류 예방기법 및 활용)와 운전행위 표준에 관한 절차(운전행위 표준지침)는 적절하였음. 불일치한 상황에서 인적오류 예방기법(의문을 갖는 태도, 불확실시 중지), 운전행위 표준지침(발전팀장에게 보고)의 활용이 부족하였음.

⇒ 현장운전원과 동일하게 '③ Incorrect but rewarding violation'에 해당됨.

Fig. 5. Example for expert interview.

기간 중 전문가별로 1:1 대면 인터뷰를 실시하였다. 인터뷰시 본 연구의 배경과 목적, 원전 사건에서 확인되는 행동들의 선별 및 도출 방법을 포함한 분석 방법에 대해 설명하였다. 대면 인터뷰를 통해 1차적으로 분석한 단위행동별 분류 결과에 대해 수정 또는 개선 의견을 수집할 수 있었고 이를 통해 본 장에 기술한 행동 분류 체계 및 단위행동 도출 결과와 행동별 분류 결과를 보완할 수 있었다.

4. 사례 분석

본 연구는 한국원자력안전기술원에서 발행한 원전 사고·고장 조사 보고서를 참고하여, 3장에서 설명한 분석방법에 따라 사건별 주요 행위에 포함된 행동들을 대상으로 Reason의 규칙 관련 행동 분류[25]를 적용하였다.

다만, 본 연구에서 분석하려는 대상은 국내 원전에서 발생한 사건 전체가 아닌 절차를 준수하지 않은 행위와 관련이 있는 사건들로 한정하였다. 먼저, 인적오류에 의한 사건을 대상으로 하였다. 국내 원전 사건의 조사 결과에 따르면[3-13], 인적오류에 의한 사건에서는 절차를 준수하지 않는 행위가 확인된다. 국내 원전 사건의 원인 분류에 있어 참고 기준에[1] 따르면, 인적요인에 의해 발생한 사건의 세부 원인으로 실수(Slip or lapse, Mistake), 위반(Violation), 사보타주(Sabotage)를 명시하고 있다. 즉, 인적오류에 의해 발생한 사건에서는 실수나 절차 미준수 행동을 확인할 수 있으며, 이는 절차 미준수 행위와 함께 이행될 수 있으므로, 인적오류가 원인인 사건을 분석 대상으로 선별하였다.

다음으로 안전문화 결여로 인해 등급이 상향된 사건을 분석 대상으로 선별하였다. 원전에서 발생한 사건

의 등급 평가 시 안전문화 결여 요인이 확인될 경우 등급을 상향한다[41,42]. 이와 관련하여, 사전 승인 없는 절차 위반, 인적오류의 누적, 품질보증 프로세스 이행 미흡은 절차를 준수하지 않은 행위에 해당된다. 따라서, 인적오류에 의한 사건이 아니더라도 전술한 안전문화 결여 요인에 의해 등급이 상향된 사건은 분석 대상에 포함하였다.

이와 함께 새로운 규제 정책이 적용된 2017년 이후 발생한 사건들을 대상으로 한정하였다. 원자력안전위원회의 제2차 원자력안전종합계획[43]에 따르면, 원전 사업자는 사고・고장 등의 근본원인 분석이 인원・조직・프로세스 측면에서 체계적으로 이행되도록 운전경험 관리 체계를 개선해야 한다. 이에 따라 표면적 원인 분석이 아닌 프로세스 관점의 근본 원인 분석에서는 절차를 준수하지 않는 행위를 보다 체계적으로 파악할 수 있다. 전술한 기준에 따라 2017년 이후 원전에서 발생한 사건 중 인적오류에 의한 사건 또는 안전문화 결여(사전 승인 없는 절차 위반, 인적오류의 누적, 품질보증 프로세스 이행 미흡)에 의해 등급이 상향된 사건을 선별하였고 그 결과는 Table 4와 같다.

본 장에서는 Table 4의 사건 중 월성3호기 원자로냉각재 누설 사건[6]을 대상으로 주요 행위를 도출하고 행위에 포함된 행동들에 대한 규칙 관련 행동 분류 적용 결과를 설명하고자 한다. 다음의 기술 내용들은 전문가 검토 결과를 반영한 것으로, 분석 과정에서 수집된 전문가 검토 의견은 4.4절에 정리하였다.

4.1 종사자 행동 확인

사건 전개 과정에서의 주요 행위는 '균압밸브 개방 조작 보고(실제로는 가압기 배수밸브 개방)'로 선별하였다. 현장운전원이 밸브를 오인하여 가압기 배수밸브를 개방함으로써 원자로냉각재가 누설되었으므로 이를 주요 행위로 선정하였다. 참고로, 균압밸브(pressure equalizing valve)는 가압기 격리밸브의 내부 압력 균형을 유지하는 역할을 한다.

주요 행위와 관련된 사건의 정황은 다음과 같다. 18:35경, 원자로차장은 현장운전원에게 가압기 격리밸브의 균압밸브(V19, V20) 열림 상태 확인을 지시하였다. 18:39경 현장운전원은 균압밸브를 찾던 중 물리적 형상이 유사한 밸브(실제로는 가압기 배수밸브)를 발견하였으나 밸브 명패는 없음을 인지하였다. 이후 가압기 격리밸브의 균압밸브의 명패를 확인하지 않았음에도 불구하고 균압밸브(실제로는 가압기 배수밸브)의 개방 상태(열림)를 원자로차장에게 보고하였다. 18:40경 원자로차장은 정상운전 중 개방되어있어야 하는 밸브인데 닫혀있는 것으로 보고받아 가압기 격리밸브의 균압밸브를 개방하도록 지시하였다. 18:41경 지시를 받은 현장운전원은 가압기 격리밸브의 균압밸브(실제로는 가압기 배수밸브) 개방하였다.

사건의 정황에 기반하여 주요 행위로부터 도출되는 단위행동들은 다음과 같다. 현장운전원은 가압기 배수밸브(V14)의 명패가 없어 밸브 번호가 확인되지 않았음에도 불구하고, 균압밸브(V19) 여부 확인을 위한 점검을 수행하지 않았으며, 눈앞에 위치한 밸브의 번호 및 상태를 보고하였다. 또한, 명패가 없는 밸브 조작시 불확실성이 존재함에도 불구하고 작업을 중단하지 않았다. 원자로차장은 밸브(실제로는 V14. V19로 보고받음)의 상태가 정상상태(열림)와 불일치(닫혀있음)하

Table 4. Events analyzed in this research

Date	Event	Cause	Rating level upgraded
2017-03-27	Wolsong Unit 4 Drop of a fuel bundle during handling of new fuel	Human error	×
2018-01-24	Wolsong Unit 4 Opening emergency water supply system isolation valve during plant cooldown after reactor shutdown	Human error	×
2018-03-06	Hanbit Unit 2 Automatic startup of emergency diesel generator 'B' by loss of voltage on 4.16 kV safety bus 'B'	Human error	×
2018-06-11	Wolsong Unit 3 Reactor coolant leakage by mistake to control pressurizer drain valve	Human error	○
2019-01-24	Hanbit Unit 2 Automatic Reactor Trip due to Low Level of Steam Generator 'C'	Human error	×
2019-05-10	Hanbit Unit 1 Auxiliary Feedwater System Actuation and Manual Reactor Trip due to Careless Withdrawal of Control rods	Human error	○
2019-09-06	Shin-Wolsong Unit 2 Automatic Reactor Trip due to Low Water Level of Steam Generator #1	Human error	×
2020-07-19	Hanul Unit 6 Automatic Reactor Trip due to Two Reactor Coolant Pumps Trip	Human error	○
2021-04-23	Automatic Reactor Trip due to Turbine/generator Trip Caused by Actuation of Differential Protective Relay	Human error	×
2022-09-08	Shin-wolsong Unit 2 Automatic Reactor Trip Due to Opening of M-G Set Output Breakers	Electrical failure	○
2023-04-05	Wolsong Unit 2 Automatic Actuation of a Standby Diesel Generator #2 Caused by Opening of Circuit Breaker for Class 4 Power Bus	Human error	○

다는 보고를 받았음에도 인적오류 예방기법(의문을 갖는 태도)의 활용이 부족하였다. 더불어 명패가 없는 밸브의 조작 시 불확실성이 존재하나 작업을 중단하지 않고 균압밸브(V19) 재확인 지시 없이 배수밸브(V14) 개방을 지시하였다. 또한 절차서의 내용대로 절차를 수행할 수 없는 경우 즉시 발전팀장에게 보고해야 하나 밸브 상태 확인 및 개방 조작 결과를 발전팀장에게 보고하지 않았다.

4.2 단위행동에 영향을 끼친 현장 및 조직요인 확인

주요 행위에 영향을 끼친 현장 요인에는 HSI 미설치, 미흡한 교육훈련으로 확인되었다. 발전소 내 모든 기기에는 기기를 식별하기 위한 수단(명패)이 구비되어야 하나 가압기 배수밸브(V14)의 경우 명패가 부착되지 않았다. 또한 가압기 배수밸브는 오개방시 냉각재 누설 우려가 있는 기기임에도 불구하고, 체인 또는 자물쇠와 같은 잠금 장치가 설치되지 않았다. 더불어, 현장운전원 대상 교육 프로그램에는 현장 기기 확인 등 현장을 직·간접적으로 경험할 수 있는 실습 과정이 부족하였다.

4.3 단위행동별 규칙 관련 행동 분류 적용

4.1절에서 도출된 단위행동들에 대해 규칙 관련 행동 분류를 적용한 결과는 다음과 같다. 현장운전원의 단위행동 모두 절차는 적절(good)하였으나, 부적절한 위험평가로 절차를 이행하지 않았으며, 이는 조직이 수립한 규칙과 관계없이 적은 노력으로 개인적 목표를 달성하려는 의도로 판단된다. 이와 관련하여 현장운전

Table 5. Unit behavior classification for important action (field operator)

Unit behavior	Rule	Analysis according to behavior classification criteria		Result
i)* He failed to perform inspection to check whether it is the valve which maintain a pressure equally in pressurizer isolation valve or not	Procedure for human error prevention technique	a*	Procedures to prevent human error were appropriate	③ Incorrect but rewarding violation
		b**	The field operator did not implement procedures in accordance with an inappropriate risk appraisal.	
		c***	This is presumed to be an intention to achieve the goal with little effort and also considered to get psychological rewards.	
ii) He reported valve number and its status although he did not check the number of valve	Procedure for human error prevention technique	a	Procedures to prevent human error were appropriate	③ Incorrect but rewarding violation
		b	The field operator did not implement procedures in accordance with an inappropriate risk appraisal.	
		c	This is presumed to be an intention to achieve the goal with little effort and also considered to get psychological rewards.	
v) He did not stop the work despite of uncertainty when he controlled a valve without nameplate of it	Procedure for human error prevention technique	a	Procedures to prevent human error were appropriate	③ Incorrect but rewarding violation
		b	The field operator did not implement procedures in accordance with an inappropriate risk appraisal.	
		c	This is presumed to be an intention to achieve the goal with little effort and also considered to get psychological rewards.	

(*The number means the sequence of unit behavior. **Rule quality, ***Behavior correctness, ****Psychological rewarding)

Table 6. Unit behavior classification for important action (reactor operator)

Unit behavior	Rule	Analysis according to behavior classification criteria		Result
iii) It was not sufficient for him to have a questioning attitude although he had been briefed on the status of the valve inconsistent with the normal condition	Procedure for human error prevention technique	a	Procedures to prevent human error were appropriate	③ Incorrect but rewarding violation
		b	The reactor operator did not implement procedures in accordance with an inappropriate risk appraisal.	
		c	This is presumed to be an intention to achieve the goal with little effort and also considered to get psychological rewards.	
iv) He did not stop the work despite of uncertainty when a field operator controlled a valve without nameplate of it	Procedure for human error prevention technique	a	Procedures to prevent human error were appropriate	③ Incorrect but rewarding violation
		b	The reactor operator did not implement procedures in accordance with an inappropriate risk appraisal.	
		c	This is presumed to be an intention to achieve the goal with little effort and also considered to get psychological rewards.	
vi) He did not report the status of valve and the operation to open the valve to shift supervisor if he could not implement procedure according to it	Procedure for human error prevention technique	a	Procedures to prevent human error were appropriate	③ Incorrect but rewarding violation
		b	The reactor operator did not implement procedures in accordance with an inappropriate risk appraisal.	
		c	This is presumed to be an intention to achieve the goal with little effort and also considered to get psychological rewards.	

원의 단위행동들은 모두 '③ Incorrect but rewarding violation'으로 분류되었다(Table 5). 원자로차장의 단위행동 모두 현장운전원의 행동과 마찬가지로 절차는 적절하였으나, 부적절한 위험평가로 절차를 준수하지 않았으며, 적은 노력으로 개인적 목표를 달성하려는 의도로 판단된다. 따라서 현장운전원의 단위행동들과 동일하게 원자로차장의 단위행동들은 모두 '③ Incorrect but rewarding violation'으로 분류되었다(Table 6).

4.4 전문가 검토 결과

본 사건에서 확인된 행동들을 분석한 행동분류에 대해 전문가 검토를 실시한 결과, 단위행동들을 보다 세분화할 수 있었다. Table 5, 6의 행동분류 이전 1차적으로 작성한 행동분류에서는, '균압밸브 개방조작 보고(실제로는 가압기 배수밸브 개방)' 주요 행위에 대해 현장운전원과 원자로차장의 단위행동을 각 1개로 도출하였다. 그러나 전문가 검토 결과, 단위행동별 행위 주체를 명확히 하고 절차를 준수하지 않은 빈도를 정확히 계산할 필요가 확인되었다. 이에 따라 사건 당시 현장운전원과 원자로차장 간 이루어진 보고, 지시, 밸브 조작 조치 등을 고려하여 단위행동을 6개로 세분화하였고, 각 단위행동별 규칙 관련 행동 분류를 적용한 결과를 도출할 수 있었다.

5. 분석 결과

5.1 규칙 관련 행동 분류를 적용한 종사자 행동의 고찰

Table 4의 분석 대상 사건에 대해 주요 행위별 단위행동들을 분석한 결과, 행동별 발생 빈도는 Table 7과 같다. 분석 결과, '③ Incorrect but rewarding violation' 행동의 빈도가 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 일상적인 활동이 될 가능성이 존재한다는 측면에서 위험 가능성이 증대될 수 있는 행동이다[25]. 상대적으로 빈도는 적었으나, '⑦ Mistaken compliance' 행동은 '③' 행동 다음의 빈도를 갖는 행동으로 확인되었다. 이 외에 '④ Mistaken circumvention', '⑥ Incorrect but rewarding compliance', '⑫ Mistaken improvisation'로 분류된 행동들을 확인할 수 있었다. '⑥' 또는 '⑦' 행동의 경우

Table 7. Classification result according to unit behavior

	③	④	⑥	⑦	⑫	N/A*
Frequency	53	1	2	7	4	5
Ratio	73.6%	1.4%	2.8%	9.7%	5.6%	6.9%

(*The unit behavior can not be classified according to the classification of rule-related behavior[25])

한수원이 수립한 품질보증계획 및 운영에 관한 안전조치를 위한 체계의 요소로서 절차가 부적절하게 수립된 경우를 의미한다.

'③'으로 분류된 행동 중 규칙을 준수하지 않고 개인적 또는 조직의 목표 달성만을 추구한 행동들을 다수 확인할 수 있었다. 한울 6호기 원자로 자동정지 사건[10]의 경우, 현장보관창고에서부터 주제어실을 거쳐 작업현장까지 교체되어야 할 전자카드를 확인할 수 있는 기회가 여러 번 존재했음에도 불구하고 자기진단과 같은 인적오류 예방기법을 적용하지 않아 잘못된 카드를 삽입한 정황이 드러났다. 고리 2호기 터빈발전기 및 원자로 자동정지 사건[11]의 경우, 작업 전 작성된 작업오더의 처리에 있어 규칙(정비작업 처리 관리 절차)을 준수하지 않았고, 작업 당시 한수원 감독자 역시 현장에 입회하여야 하는 규칙을 준수하지 않았다. 월성2호기 예비디젤발전기 자동기동 사건[13]의 경우, 모선 정전 유발 가능 작업을 관련 지침과 다르게 운영하고 있었고, 작업 전 작성된 작업오더의 처리에 있어 고리 2호기 사건과 동일한 규칙(정비작업 처리 관리 절차)을 준수하지 않았으며, 시험 당시 신호를 주입하는 행동에 있어 규칙(을종보호계전기 시험 절차)을 준수하지 않았다.

다만, '③'으로 분류되었으나 행동에 영향을 끼친 요인들을 확인할 수 있는 사례들도 존재하였다. 한빛2호기 비상디젤발전기 자동기동 사건[5]의 경우, 현장 기기의 설계특성에 대한 이해가 부족하여 기기 조작 결과를 잘못 이해한 것으로 확인되었다. 비안전모선의 정상전원공급차단기 핸드스위치 조작 결과가 실제 계통의 상태를 반영하지 못한 것으로 확인되었다. 월성3호기 원자로냉각재 누설 사건[6]의 경우, 균압밸브(V19)에 명패가 설치되지 않았고 현장 운전원들을 대상으로 한 교육프로그램에 현장 실습 과정이 부족한 것으로 나타났다. 신월성2호기 원자로 자동정지 사건[9]의 경우, 발전소 제어계통 임시변경에 영향을 끼친 요인으로 유사한 설계를 가진 신고리1,2호기의 사례에 대한 검토 및 정보교류가 미흡한 것이 확인되었다. 즉, 기기 설계특성 이해 부족, 기기의 명패 미설치, 미흡한 교육프로그램, 운전경험의 반영 미흡과 같은 요인들이 안전하지 않은 행위에 영향을 끼친 것으로 파악되었다.

만약, 행동에 영향을 끼친 현장 요인 또는 조직 요인이 적절하게 갖춰졌을 경우 이는 재해로 연결되지 않을 가능성이 존재한다. 월성3호기 원자로냉각재 누설[6] 사건에서, 균압밸브(V19)의 명패가 있었고 현장운전원들에게 현장을 실습할 수 있는 교육과정이 제공되었다면, 사건 발생을 방지할 수 있었을 것으로 가정할 수

있다. 특히, '⑦' 행동은 적절한 절차 수립의 중요성을 강조할 수 있는 사례에 해당한다. 한빛2호기 원자로 자동정지[7] 사건에서, 증기발생기 수위의 자동제어 상태를 확인할 수 있고 수동제어모드 전환 조건이 구체적으로 제시된 절차가 제공되었다면, 사건이 발생할 가능성은 줄어들 수 있었을 것이다. 이는 신월성2호기 원자로 자동정지[9] 사건에서도 확인할 수 있는 사항이다.

규칙 자체가 수립되지 않은 경우도 일부 파악할 수 있었다. 신월성2호기 원자로 자동정지[12] 사건은 기존의 절차서에서 다루지 않는 운전 조건에서 발생하였다. 이와 함께 절차서 이외의 조건 및 설비에 대한 이해 부족이 사건에 기여한 것으로 확인되었다. 따라서 이와 같은 상황에서는 절차서 개발, 설비개선 검토, 교육과정 개설 등의 재발방지대책이 필요하다.

5.2 전문가 검토 결과

검토 결과, 규칙의 품질에 대한 판단 기준을 보다 명확히 수립하였다. Reason은 특정 행동에 대한 규칙의 품질을 판단함에 있어, 상황이나 맥락을 고려해야 함을 언급하였다[25]. 이는 상황에 따라 규칙이 적절할 수도 잘못될 수도 있음을 의미한다. 다만, 본 연구에서는 원전에서 발생한 사건에서 확인된 행동들에 대해 분석을 하므로, 상황이나 맥락에 따라 규칙이 적절할 수도 잘못될 수도 있다는 가정은 적합하지 않으며 원전 운영에 필요한 규칙의 신뢰성 측면에서도 적절하지 않은 것으로 검토되었다. 이를 기반으로, 절차서의 내용 중 한가지 내용이라도 오류가 있을 경우, 해당 절차서는 '잘못된' 규칙에 해당하는 것으로 규칙의 품질에 대한 판단 기준을 보완하였다. 유사한 맥락으로, 절차서에 기술되어야 내용이 부재할 경우, 이는 '규칙 없음'이 아닌 '잘못된' 규칙으로 판단하였다. 따라서 종사자가 일부 내용이 부재한 특정 절차를 활용하여 작업을 수행하다면, 이는 규칙이 없는 상황이 아닌 '잘못된' 규칙을 적용한 것으로 판단하였다.

또한 주요 행위로부터 단위행동을 도출하는 기준을 보다 명확히 수립하였다. 1차 분류 결과에서는 특정 단위행동에 대해 둘 이상의 행동 분류 결과가 도출되기도 하였는데, 이 경우 행위 주체의 구분이 모호해짐으로써 절차 준수 여부의 빈도 계산에 영향을 끼칠 수 있었다. 이에 따라 단위행동별 행위 주체를 명확히 구분하고 단위행동을 보다 세분화함으로써, 절차 준수 여부의 빈도 계산에 대한 정확성을 높일 수 있었다.

전문가 검토를 통해 규칙의 품질에 대한 판단 기준과 주요 행위로부터 단위행동을 도출하는 기준을 명확히 수립함으로써, 1차적으로 분류한 결과를 보완할 수 있었고 이를 반영하여 단위행동별 분류 결과를 수정하였다.

5.3 기타 사항

본 연구에서 분석된 행동 중 3건은 Reason의 규칙 관련 행동 분류[25]에 해당되지 않는 행동들로 확인되었다(5건 중 2건은 본 연구에서 정의한 '규칙' 적용 불가). 한빛1호기 보조급수계통 작동 사건[8]에서 노심차장은 부적절한 위험인식에 따라 잘못된 절차를 준수하지 않았고 심리적 보상을 확보하고자 하였다. 원자로 차장은 부정확한 위험인식에 따라 잘못된 절차를 준수하지 않았고 심리적 보상을 확보할 의도는 없었다. 이와 같은 행동들은 Reason의 분류[25]에 해당하지 않는다. 만약, Reason의 언급과 같이 상황이나 맥락에 따라 규칙의 품질이 달라진다면 전술한 결과는 도출되지 않겠으나, 5.2절의 검토와 같이 이와 같은 가정은 분석에 적합하지 않다. 또한, 원전 운영에 있어 규칙의 신뢰성이 담보되지 않는다는 측면에서도 적절하지 않은 것으로 판단하였다. 따라서 재해 발생시 확인되는 행동에 대한 분류에 있어 Reason의 규칙 관련 행동 분류[25]의 적용에는 추가적인 고찰이 필요하다.

이론적 배경에 기술된 기존 연구들과 본 연구를 직접적으로 비교하기에는 한계가 존재한다. 기존 연구의 경우 중점적으로 확인하려는 요인 이외의 운전원 행동에 영향을 끼친 요인을 확인할 수 없었다. 또한, 사건의 원인분석에 있어 인원・조직・프로세스 측면을 체계적으로 고려하지 않은 사건을 분석 대상으로 하였고, 위반 유형이 제시되었을 뿐 특정 사건의 위반 유형의 결과가 무엇인지 제시되지 않았다. 물론, 원전 사건조사보고서를 기반으로 실증적으로 연구를 수행한 유사성은 존재한다. 다만, 본 연구는 실수와 위반의 개념을 모두 포함한 Reason의 규칙 관련 행동 분류를 적용하여 절차를 준수하지 않은 종사자 행동의 의도를 파악했다는 점에서 기존 연구 대비 차별성을 갖는다.

6. 결 론

본 연구는 규칙 관련 행동 분류에 근거하여 국내 원전에서 발생한 사건들에서 확인되는 절차 미준수 행동을 새롭게 해석하였다. 기존의 사건조사기법으로는 확인이 어려운 종사자 행동의 의도를 파악하고자 Reason의 규칙 관련 행동 분류[25]를 적용하였다. 이와 함께 Reason의 조직적 사고의 조사 및 발전 단계[23] 상 종사자 행동에 영향을 끼친 현장 및 조직 요인을 확인함으로써 종사자 행동을 고찰하였다.

분석 결과, 부적절한 위험평가에 따라 규칙을 준수하지 않고 개인적 목표 달성만을 추구한 위반 행동(③ Incorrect but rewarding violation)의 빈도가 가장 높은 것으로 나타났다(53건, 73.6%). 안전을 위해 수립한 절차가 실제로는 이행되지 않았고, 이로 인해 사전에 구축된 구축된 방벽들이 제 기능을 하지 못함으로써 재해 발생에 기여하였다. 뿐만 아니라 원전에서 이루어지는 대부분의 활동에 적용되어야 할 인적오류 예방기법을 준수하지 않아 사건을 유발한 사례들도 확인할 수 있었다. 다만, 이와 같은 행동에 영향을 끼친 현장 및 조직 요인들을 확인할 수 있는 사례들도 존재하였다. 이는 HSI, 절차서 및 교육·훈련 프로그램과 같은 현장 요인이나 조직의 성과 지표와 같은 조직 요인들이 적절하게 수립될 경우, 사건 발생 가능성을 저감할 수 있다는 함의를 제공한다. 다만, Table 7의 분류 결과와 같이 일부 행동은 Reason의 분류[25]에 따라 구분할 수 없었다. 때문에 해당 행동들에서는 그 의도를 파악할 수 없다는 한계가 남았다.

그러나, 본 연구는 기존의 사건 조사 기법에서는 확인이 어려웠던 인적행위에 대한 의도나 이유를 규칙 관련 행동 분류의 개념에 입각하여 고찰했다는 점에서 의의를 갖는다. 즉, 개인적 목표만을 추구함으로써 절차를 준수하지 않는 행동이 발생하는 상황이 반복되는 한, 기존의 사건 조사 기법의 한계를 보완하여 사건의 원인을 분석할 필요가 있다. 향후 연구에서는 본 연구의 한계를 극복하고 조직 내 구성원 행동에 대한 심화된 분석을 통해 원전 안전에 대한 이해를 보다 증진시킬 수 있기를 기대한다.

References

1) International Atomic Energy Agency, “Manual for IRS Coding”, International Atomic Energy Agency Service Series, Service Series No. 20, 2011.
2) Operational Performance Information System for Nuclear Power Plant, https://opis.kins.re.kr.
3) Korea Institute of Nuclear Safety, “Wolsong Unit 4 Drop of a fuel bundle during handling of new fuel”, Nuclear Power Plant Events Investigation Report, 2017-01, 2017.
4) Korea Institute of Nuclear Safety, “Wolsong Unit 4 Opening Emergency Water Supply System Isolation Valve during Plant Cooldown after Reactor Shutdown”, Nuclear Power Plant Events Investigation Report, 2018-02, 2018.
5) Korea Institute of Nuclear Safety, “Hanbit Unit 2 Automatic Startup of Emergency Diesel Generator ‘B’ by Loss of Voltage on 4.16 kV Safety Bus ‘B’”, Nuclear Power Plant Events Investigation Report, 2018-03, 2018.
6) Korea Institute of Nuclear Safety, “Wolsong Unit 3 Reactor Coolant Leakage by Mistake to Control Pressurizer Drain Valve”, Nuclear Power Plant Events Investigation Report, 2018-06, 2018.
7) Korea Institute of Nuclear Safety, “Hanbit Unit 2 Automatic Reactor Trip due to Low Level of Steam Generator ‘C’”, Nuclear Power Plant Events Investigation Report, 2019-03, 2019.
8) Korea Institute of Nuclear Safety, “Hanbit Unit 1 Auxiliary Feedwater System Actuation and Manual Reactor Trip due to Careless Withdrawal of Control rods”, Nuclear Power Plant Events Investigation Report, 2019-07, 2019.
9) Korea Institute of Nuclear Safety, “Shin-Wolsong Unit 2 Automatic Reactor Trip due to Low Water Level of Steam Generator #1”. Nuclear Power Plant Events Investigation Report, 2019-09, 2019.
10) Korea Institute of Nuclear Safety, “Hanul Unit 6 Automatic Reactor Trip due to Two Reactor Coolant Pumps Trip”, Nuclear Power Plant Events Investigation Report, 2020-02, 2020.
11) Korea Institute of Nuclear Safety, “Automatic Reactor Trip due to Turbine/generator Trip Caused by Actuation of Differential Protective Relay”, Nuclear Power Plant Events Investigation Report, 2021-06, 2021.
12) Korea Institute of Nuclear Safety, “Shin-wolsong Unit 2 Automatic Reactor Trip Due to Opening of M-G Set Output Breakers”, Nuclear Power Plant Events Investigation Report, 2022-09, 2022.
13) Korea Institute of Nuclear Safety, “Wolsong Unit 2 Automatic Actuation of a Standby Diesel Generator #2 Caused by Opening of Circuit Breaker for Class 4 Power Bus”, Nuclear Power Plant Events Investigation Report, 2023-03, 2023.
14) U.S. Department of Energy, “Root Cause Analysis Guidance Document”, U.S. Department of Energy Guideline, DOE-NE-STD-1004-92, 1992.
15) U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Development of the NRC’s Human Performance Investigation Process (HPIP)”, Contractor-prepared U.S. Nuclear Regulatory Commission Technical Report Designation, NUREG/CR-5455 (2), 1993.
16) S. A. Shappel and D. A. Wiegmann, “The Human Factors Analysis and Classification System-HFACS”, U.S. Department of Transportation & Federal Aviation Administration, DOT/FAA/AM-00/7, 2000.
17) U. S. Nuclear Regulatory Commission, “The Human

Performance Evaluation Process", Contractor-prepared U.S. Nuclear Regulatory Commission Technical Report Designation, NUREG/CR-6751, 2002.
18) J. Park and W. Jung, "The Operators' Non-compliance Behavior to Conduct Emergency Operating Procedures. comparing with the Work Experience and the Complexity of Procedural Steps", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 82, No. 2, pp. 115-131, 2003.
19) J. Kim, J. Park, W., Jung and J. T. Kim, "Characteristics of Test and Maintenance Human Errors Leading to Unplanned Reactor Trips in Nuclear Power Plants", Nuclear Engineering and Design, Vol. 239, No. 11, pp. 2530-2536, 2009.
20) S. K. Kim, Y. H. Lee, T. I. Jang, Y. J. Oh and K. H. Shin, "An Investigation on Unintended Reactor Trip Events in Terms of Human Error Hazards of Korean Nuclear Power Plants", Annals of Nuclear Energy, Vol. 65, pp. 223-231, 2014.
21) B. Kang, S. H. Han, D. Y. Jeong and Y. H. Lee, "Conceptual Models of Violation Error in a Nuclear Power Plant", J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 1, pp. 126-131, 2016.
22) J. Reason, "Human Error", New York: Cambridge University Press, 1990.
23) J. Reason, "Managing the Risks of Organizational Accidents", Hampshire: Ashgate, 1997.
24) J. Reason, D. Parker and R. Lawton, "Organizational Controls and Safety: The Varieties of Rule-related Behaviour", Journal of Occupational and Organizational Psychology, Vol. 71, No. 4, pp. 289-304, 1998.
25) J. Reason, "The Human Contribution: Unsafe Acts, Accidents, and Heroic Recoveries", Surrey: Ashgate, 2008.
26) American Society for Quality, https://www.asq.org
27) Korea Occupational Safety and Health, "Technical Guide about Root Cause Analysis of Accident", KOSHA GUIDE, P-151-2016, 2016.
28) H. J. Lee, E. Y. Choi, M. S. Ock and S. I. Lee, "Guidelines for Performing Root Cause Analysis", Quality Improvement in Health Care, Vol. 23, No. 1, pp. 25-38, 2017.
29) B. Kang, S. H. Han, H. Moon, D. Y. Jeong and Y. H, Lee, "A New Definition of Violation based on Accident/Failure Analyses in Nuclear Power Plant", Proceedings of Fall Conference of the Ergonomic Society of Korea, 2015.
30) Korea Atomic Energy Research Institute, "A Study on the Strategy Enhancing the Applicability of HuRAM+", KINS/HR-1393, Korea Institute of Nuclear Safety, 2015.
31) R. Lawton, "Not Working to Rule - Understanding Procedural Violations at Work", Safety Science, Vol. 28, No. 2, pp. 77-95, 1998.
32) D. Laurence, "Safety rules and regulations on mine sites - The problem and a solution", Journal of Safety Research, Vol. 36, No. 1, pp. 39-50, 2005.
33) S. J. Alper and B. T. Karsh, "A Systematic Review of Safety Violations in Industry", Accident Analysis and Prevention, Vol. 41, No. 4, pp. 739-754, 2009.
34) R. J. Bye and A. L. Aalberg, "Why do They Violate the Procedures - An Exploratory Study within the Maritime Transportation Industry", Safety Science, Vol. 123, Article 104538, 2020.
35) R. Lawton and D. Parker, "Judgments of the Rule-related Behaviour of Healthcare Professionals: An Experimental Study", British Journal of Health Psychology, Vol. 7, No. 3, pp. 253-265, 2002.
36) D. L. Phipps, D. Parker, E. J. M. Pals, G. H. Meakin, C. Nsoedo and P. C. W. Beatty, "Identifying Violation-provoking Conditions in a Healthcare Setting", Ergonomics, Vol. 51, No. 11, pp. 1625-1642, 2008.
37) S. Clarke, "The Relationship Between Safety Climate and Safety Performance: A Meta-Analytic Review", Journal of Occupational Health Psychology, Vol. 11, No. 4, pp. 315-327, 2006.
38) C. E. L. Jones, D. L. Phipps and D. M. Ashcroft, "Understanding Procedural Violations using Safety-I and Safety-II: The Case of Community Pharmacies", Safety Science, Vol. 105, pp. 114-120, 2018.
39) E. Hollnagel, R. L. Wears and J.Braithwaite, "From Safety-Ⅰ to Safety-Ⅱ: A White Paper", 2015.
40) Korea Atomic Energy Research Institute, "Development of a Hierarchical Framework for Analyzing Human Related Events, Including Organizational Factors and Safety Culture", KINS/HR-952, Korea Institute of Nuclear Safety, 2009.
41) International Atomic Energy Agency, "The International Nuclear and Radiological Event Scale User's Manual (2008 Ed.)", 2013.
42) Nuclear Safety and Security Commission, "Regulation on the Reporting and Public Announcement of Accidents and Incidents at Nuclear Energy Utilization Facilities", Notice of the Nuclear Safety and Security Commission No. 2020-03.
43) Nuclear Safety and Security Commission, "The second Comprehensive Nuclear Safety Plan Proposal('17～'21)". The 62th Meeting of the Commission, 2016.