

원전 다수기 리스크 평가를 위한 국내 원전 사건이력 조사 연구

임학규*†

A Study on the Operational Events of Domestic Nuclear Power Plants for Multi-unit Risk

Hak Kyu Lim*†

†Corresponding Author

Hak Kyu Lim

Tel : +82-52-721-7311

E-mail : hklim@kings.ac.kr

Received : September 16, 2019

Revised : October 14, 2019

Accepted : October 15, 2019

Abstract : Compared to a single nuclear power plant (NPP) risk, the commonalities existing in the multiple NPPs attribute the characteristics of the multi-unit risk. If there is no commonality among the multiple NPPs, there will be no dependency among the risks of multiple NPPs. Therefore, understanding the commonality causing multi-unit events is essential to assessing the multi-unit risk, and identifying the characteristics of the multi-unit risk is necessary not only to select the scope and method for the multi-unit risk assessment, but also to analyze the data of the multi-unit events. In order to develop Korea-specific multi-unit risk assessment technology, we analyze the multi-unit commonalities included in the operational experiences of domestic NPPs. We identified 58 cases of multi-unit events through detailed review of domestic nuclear power plant event reports over the past 10 years, and the multi-unit events were classified into six commonalities to identify Korea-specific characteristics of multi-unit events. The identified characteristics can be used to understand and manage domestic multi-unit risks. It can also be used as a basis for modeling multi-unit events for multi-unit risk assessment.

Key Words : multi-unit risk, multi-unit event, commonality, operational experiences

Copyright©2019 by The Korean Society of Safety All right reserved.

1. 서론

현재 세계적으로 원전의 80%는 2기 이상의 다수기 부지에 위치한다. 이중 6기 이상의 다수기 부지는 한국을 비롯하여, 캐나다, 일본, 프랑스 등에 위치한다. 원전의 부지 선정 및 개발에는 많은 비용과 장기간의 논의과정의 필요하다. 따라서 이미 원전이 건설된 부지에, 수용 가능한 다수의 원전을 건설함으로써 사회·경제적 부담을 감소시킬 수 있다. 한국의 경우, 국토가 좁고 인구밀도가 높으며, 전력수요처가 지역적으로 편중되어 있어, 모든 원전 부지에서 다수기가 운영되고 있다¹⁾.

기본적으로 원전은 “원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙²⁾”에 따라 단일 원전을 기준으로 규제하며, 다수기인 경우, 제10조(다수기 건설) 다수 원전의 위치에 관한 요건과 제16조(설비의 공유) 다수 원전 간의 설비공유

에 대한 요건을 통하여, 각 원전의 안전성이 독립적으로 확보되며, 다수기로 인하여 저해되지 않도록 규제하고 있다. 즉, 단일부지에 있는 다수 원전간 안전에 중요한 구조물·계통·기기 (SSC, Structures, Systems and Components)등의 설비는 원칙적으로 공유가 허용되지 않으며, 정상운전 및 사고시 원전 상호간 영향을 미치지 않는다.

이러한 규제요건에 의하여, 사고 발생시 다수기 사이에 상호 영향을 설계단계에서 제거함으로써, 다수기 부지 내 각 원전에 대하여 독립적으로 사고결말을 분석할 수 있다. 최근까지 전 세계적으로 단일 부지 내 다수기에 의한 리스크를 고려하는 것은 규제관점에서 현실적이지 않다고 판단하여왔다³⁾.

그러나 2011년 3월 11일 동일본대지진으로 발생한 쓰나미로 인해 후쿠시마 제1원전에서 다수기 중대사고가 발생하여, 단일 원전에 대한 안전성 뿐 아니라, 부

*한국전력국제원자력대학원대학교 교수 (Department of NPP Engineering, KEPCO International Nuclear Graduate School)

지 내 다수 원전이 운영되는 경우, 다수기의 안전성도 중요하게 부각되었다. 이와 같은 극한 외부재해에 의한 다수기 리스크 뿐 아니라, 원전 간 다수의 공유설비에 의한 리스크, 원전 밀집 부지의 리스크 및 소형모듈형원전(SMR, Small Modular Reactor) 개발 등의 다양한 현안에 의하여, 다수기 리스크 평가의 필요성이 제기되고 있다. 현재 다수기 리스크 평가 기술은 단일 원전 리스크 평가 기술에 비하여 기술 현안을 파악하는 기초 연구단계이며, 평가기술 정립을 위한 심층적인 연구가 요구되고 있다^{4,5)}.

국내 원전부지의 다수기 리스크에 대한 규제는 최근 논의가 시작되었다. 원자력안전위원회에서 수행한 다수기 리스크 평가를 위한 기술현황 분석에서는 다수기 리스크 평가의 핵심 요소로 다수기간 종속성을 제시하고, 이러한 종속성은 초기사건, 사고경위, 다수기간 공통원인고장, 지진상관성, 인적종속성, 사고비상대응 등 폭넓은 범위에 존재하며, 이에 대한 이해 부족을 다수기 리스크 평가의 주요한 기술적 현안으로 파악하였다¹⁾.

다수기 사이의 종속성은 다수의 원전에 존재하는 공통성(commonality)에 원인을 두고 있다. 다수기 리스크 분석대상의 범위에 따라 공통성은 부지, 원자력발전사업자, 국가, 또는 동일 노형(예, APR1400) 등의 범위에서 다양하게 정의될 수 있다⁶⁾. 예를 들면, 단일 원전사업자가 운영하는 다수의 원전에 공통적인 원전 운영 조직체계와 조직문화가 적용된다면, 이들 원전 사이에는 조직체계와 조직문화라는 공통성이 있으며, 이러한 공통성은 다수 원전의 운전에 공통적인 영향을 미칠 수 있으므로 원전 간 종속성을 유발한다.

단일 원전 리스크와 비교하여, 다수기 리스크의 특성은 다수기에 존재하는 공통성에 기인한다고 볼 수 있다. 다수기 사이에 공통성이 없다면, 다수기 간 종속성이 존재하지 않을 것이다. 또한, 원전에서 발생하는 사건은 여타 원전의 사건과 독립적이므로, 이러한 개념에서 다수기 리스크는 단일 원전 리스크의 합으로 간단하게 계산될 수 있을 것이다.

현재까지 국내 다수기 공통성에 대한 연구는 원전의 불시정지와 관련된 다수기 초기사건과 다수기 간 공통설비를 파악하고 이를 다수기 리스크 평가에 반영하는데 초점을 맞추어왔다^{1,7)}. 그러나 최근 해외에서 수행된 연구에 의하면 다수기 초기사건 이외에 다양한 공통성에 기인하여 다수의 원전에서 발생한 사건(이하 다수기 사건)을 조사하였으며, 이를 고려하여 다수기 리스크 평가 기술을 발전시키고 있다^{6,8)}.

다수기 공통성에 대한 이해는 다수기 리스크 평가

에 반드시 필요한 사항으로, 다수기 리스크의 특성 파악을 통하여, 다수기 리스크 평가 대상 범위선정 및 평가 방법 개발 뿐 아니라 다수기 고유사건의 데이터 분석 등에 필요한 기초 자료로 활용될 수 있다. 본 연구는 국내 고유 다수기 리스크 평가기술 개발을 위하여, 국내 원전 사건이력에 포함된 다수기 공통성을 조사·분석하여, 국내 고유 다수기 공통성의 특징을 파악하였다.

2. 다수기 공통성

다수기 공통성은 다수기 리스크 평가 대상에 따라 다양하게 정의될 수 있다. 일반적으로 다수기 리스크는 국내 뿐 아니라 해외에서도 동일 부지 내 다수기 리스크를 의미하며, 이에 대한 연구가 진행되고 있다.^{1,4)} 다수기 공통성에 대한 연구는 최근 미국에서 원전의 부지 리스크 평가를 위한 다수기 공통성에 대한 Schroer의 연구⁶⁾가 널리 알려져 있다. 본 연구에서는 국내에서도 다수기 리스크 관련 현안이 부지 리스크에 초점을 두고 있는 점을 고려하여, Schroer의 공통성 정의 등을 참조하여 국내 고유 분석을 수행하였다.

Schroer⁶⁾은 부지 리스크에 기여할 수 있는 다수기간의 공통성을 다음과 같이 여섯 가지 범주로 구분하였다.

- 초기사건 (initiating events)
- 공유설비 (shared connections)
- 동일기기 (identical components)
- 근접종속성 (proximity dependencies)
- 인적종속성 (human dependencies)
- 조직종속성 (organizational dependencies)

첫 번째 범주는 다수 원전에서 동시에 과도상태를 유발하는 다수기 초기사건이다. 일반적으로 널리 알려진 지진, 송전망이상, 최종열침원상실과 같이 부지 전체에 영향을 미치는 사건이 해당된다.

두 번째 범주는 다수 원전 사이에 물리적으로 연결된 설비로 인한 공통성이다. 이 범주에는 화재방호계통과 같이 공유 설비가 다수 원전을 동시에 지원할 수 있는 경우, 공유설비가 단일 원전을 순차적으로 지원하는 경우, 그리고 대체교류발전기와 같이 정상운전 중에는 대기상태이며 필요시 단일 원전에만 연결할 수 있는 경우 등 세 가지 경우로 세분된다.

세 번째 범주는 단일 원전 PSA의 공통원인고장(common cause failure)에서 “공통”의 범위가 다수 원전

으로 확대된 개념이다. 단일 원전 PSA의 공통원인고장과 마찬가지로 다수 원전이 동일한 설계, 절차 및 운전 환경 등을 갖는 경우, 이들 동일한 요소는 다수기 간 공통원인고장의 원인이 된다.

네 번째 범주는 단일 원전에서 발생한 사건으로 유발된 환경이 인접한 원전의 설비에 영향을 줄 수 있는 경우를 의미한다. 예를 들면, 특정 원전의 설비에서 발생한 폭발이 인근 원전의 설비에 영향을 주는 경우가 해당된다.

다섯 번째 범주는 다수 원전에 적용된 동일한 인간-기계 인터페이스(HMI, Human-Machine Interface)로 인하여, 단일 원전의 인적오류 유발 환경이 다수 원전에도 적용되는 경우에 해당된다. 일반적인 인간신뢰도분석(HRA, Human Reliability Analysis)의 인적오류와 같이 다수기 인적중속성도 초기사건 이전과 이후로 세분된다. 초기사건 이전 인적중속성의 예는, 짧은 기간 동안 다수 원전에 동일한 정비팀이 동일한 정비업무를 수행하여 다수 원전에 동일한 오류가 발생하는 경우이다. 초기사건 이후에 발생하는 인적중속성의 예는 동일한 운전원이 여러 원자로를 제어하는 SMR에서 특정 원자로모듈의 사고에 대응하는 동안, 여타 원자로의 상황을 인식하거나 제어하지 못하는 경우이다.

마지막 범주인 조직중속성은 조직에 존재하는 잠재적 문제점이 조직에 연계된 다수의 원전에 확산되는 경우이다. 인적중속성 및 조직중속성은 서로 밀접하게 관련되어 있지만, 오류의 근본 원인으로 볼 때 인적중속성은 인간-기계 상호작용에 의해 야기되는 중속성이며, 조직중속성은 조직 문화에 의해 야기되는 인적오류이다. 이 경우 조직은 발전사업자의 조직 뿐 아니라 공급자의 조직, 정비업체의 조직 등 원전을 구성하는 모든 조직이 해당된다. 조직 중속성의 예는 엔지니어링부서의 분석오류가 포함된 절차가 여러 원전에 적용되는 경우이다. 또한 동일한 공급자가 여러 원전에 장비 및 지침을 제공하는 경우에도 조직중속성에 의한 다수기 사건이 발생할 수 있다.

Schroer⁶⁾은 이러한 범주를 기준으로 2000년부터 2011년까지 미국 NRC(Nuclear Regulatory Commission)에 보고된 4207건의 LER(Licensee Event Reports) 중 다수기가 관여된 사건으로 보고된 391건의 사건을 검토하여 공통성 범주에 따라 분류하였다. 참고로 미국의 LER 작성규정은 보고 대상 사건과 연관된 여타 원전 및 이들의 연관성을 보고하도록 되어 있다.

이들 다수기가 관여된 사건, 즉 다수기 사건은 전체 LER 중 9%에 해당하며, 이를 여섯 가지 범주로 분류한 결과는 Table 1과 같다. Schroer의 연구는 다수기 공

Table 1. Multi-unit LER classifications by Schroer⁶⁾

Classifications	Percentage of total multi-unit LERs
Initiating events	7%
Shared connection	34%
Identical component	10%
Proximity dependencies	5%
Human dependencies	3%
Organizational dependencies	41%

LER: Licensee event reports

통인자가 원전내 다양한 요소에 존재하며, 특히 조직중속성과 공유설비 범주로 분류된 보고가 많음을 보여주었다. 그러나 미국 원자력산업계의 다수기 현안인 SMR 리스크 관점에서 분석을 수행하여, 경수로형 원전의 다수기 사이에 발생하기 어려운 근접공통성, 초기사건 이후 인적중속성 등을 공통성 범주에 포함하고 있으며, 경수로형 원전의 다수기 리스크 분석에 활용될 수 있는 고찰을 제시하지 않았다.

3. 국내 원전 다수기 사건 조사 · 분석

3.1 분석 대상 사건

국내 원전 운영 중 발생하는 사건은 원자력안전법에 따른 원자력안전위원회고시 제2018-3호⁹⁾ 별표 규정에 의하여 원자력안전위원회에 보고하여야 한다. 보고대상 사건은 방사성물질의 누설, 도난, 피폭 등과 같이 방사선과 관련된 사건, 자연재해와 산업재해로 인한 긴급 조치, 원자로의 불시정지 및 출력감발 등 비계획적 운전, 원자로냉각재 누설 등의 사고, 운영기술지침서에 규정된 보고사항 등의 경우가 해당된다. 참고로 국내 원전의 보고대상 사건은 미국의 보고대상 사건과 일부 차이가 있다. 국내 규정은 보고대상으로 규정된 사건이 발생하는 경우 보고하도록 되어있다. 이와 달리 미국의 규정은 발생한 사건뿐만 아니라 안전성에 영향을 줄 수 있는 상황을 인지한 경우도 보고하여야 한다.

규정에 따라 보고된 사건은 그 원인을 조사 및 분석하여 유사한 사건의 재발방지를 위한 대책을 도출하고, 도출된 대책은 운영과정에 반영하는 사고·고장 대응체계를 운영하고 있으며, 원인 및 시정조치, 국내외 유사사건 조사, 사건의 교훈 등을 공유하도록 규정되어 있다. 이에 따라 한국원자력안전기술원(KINS, Korea Institute of Nuclear Safety)은 사건의 원인 및 영향, 그리고 원전운영자 조치의 적절성에 대한 사고·고장 조사보고서를 작성하여 국내 원전안전운영정보시스템(OPIS, Operational Performance Information System for Nuclear Power Plant)를 통하여 공개하고 있다¹⁰⁾.

3.2 다수기 사건 선별 방법

본 연구는 국내에서 발생한 다수기 사건을 조사하고, 이들 다수기 사건에 포함된 국내 고유의 다수기 공통성 특성을 파악하기 위하여, 2009년부터 2018년까지 10년간 원자력안전위원회에 보고된 사건을 조사하였다. 국내 원전사업자의 사건보고서는 공개되지 않으므로, 이를 대신하여 본 연구에서는 OPIS에서 입수한 KINS의 사고·고장 조사보고서를 활용하였다.

10년간 보고된 총 126건의 사고·고장 가운데 시운전기간 중 발생한 18건을 제외한 108건의 원전 사고·고장 조사보고서를 검토하였다. 국내 원전에서 보고된 사건은 대부분 단일 원전에서 발생한 불시정지, 주요 안전설비의 동작, 외부재해의 발생 등이며, 조사보고서에 다수기 연관성에 대한 기술이 분명하지 않다. 특히 보고대상 사건이 안전성에 영향을 미칠 수 있는 경우가 아니라 실제 설비의 이상이 발생한 경우이므로, 조사보고서를 통하여 다수기 사건을 찾고 이의 공통성을 파악하기 위하여 불가피하게 상당한 추정이 수반된다.

Schroer의 연구⁶⁾에서 조사한 LER과 달리, 본 연구에서 조사한 사고·고장 조사보고서에는 다수기 사건 여부 및 공통성에 대한 기술이 명확하지 않다. 본 연구는 원전 사고·고장 조사보고서에서 유사사건이나 시정조치가 다수 원전과 관련된 경우는 다수기 사건으로 판단하였다. 즉, 단일 원전에서 발생한 사건이 타 원전에 미친 영향은 없으나, 사건의 원인이 타 원전에도 존재하여 유사사건이 다수기에서 발생할 수 있는 것으로 추정되는 경우도 다수기 사건으로 분류하였다. 국내 다수기 리스크에 대한 연구^{1,4,7)}에서는 이들 사건을 다수기 사건으로 명시적으로 고려하지 않고 있으나, 본 연구에서는 다수기 리스크에서 중요한 공통성을 검토하기 위하여, 폭 넓은 다수기 사건 판단기준을 적용하였다. 반대로 유사사건에 대한 검토나 시정조치가 단일원전에 국한되어 있는 경우, 다수기 사건이 아닌 것으로 간주하였다.

다수기 사건으로 판단된 경우, Schroer의 여섯 가지 공통성 범주에 따라 분류하였다. Schroer의 연구 사례와 유사하게, 유사사건, 재발방지대책 등에 대한 기술에서 명확하게 다수기 공통성이 파악되지 않은 경우, 대부분 조직종속성으로 분류하였다.

3.3 다수기 사건 선별 결과

분석대상 사건 108건에 대하여 사건의 영향에 따라 다음 3가지 경우로 구분하여 다수기 사건을 파악하였다.

- Type 1: 다수기에서 동시에 발생한 사건 또는 다수기 공용설비에서 발생한 사건

- Type 2: 단일 원전에서 발생한 사건에 기인하여 타 원전에서 발생한 사건
- Type 3: 동일한 원인에 의하여 다수기에서 발생할 수 있는 사건

다수기 동시 발생사건(Type 1)은 14건으로, 지진 7건, 송전망 이상 3건, 공용설비에서 발생한 사건 2건, 동일 기기에서 동시에 고장이 발생한 사건 2건 등이다. 사건이 다른 원전으로 파급된 사건(Type 2)은 5건으로 전기설비와 관련된 사건이 인접 원전으로 파급된 사건이다. 다수기 사건의 33%가 다수기에서 동시에 발생한 Type 1과 2사건이며, 이들 사건은 사고·고장조사보고서에 명확하게 다수기 연관성이 기술되어 있다. Type 3 사건은 39건이며 다수기 사건의 67%를 차지한다. 이들 사건은 다수기에서 잠재적으로 발생할 수 있는 사건으로 고려될 수 있다. 그리고 INES(International Nuclear and Radiological Event Scale)¹¹⁾ 1등급 이상인 사건 17건 중 등급평가의 근거가 안전문화 결여인 16건을 모두 다수기 사건으로 분류하였다.

분석 대상 사건 중 58건이 다수기 사건으로 선별되었다. 다수기 사건의 비율은 54%로 미국 원전의 9%에 비하여 월등히 높은 수치이다. 이는 국내와 미국의 보고대상 사건이 상이한 점을 고려하더라도, 국내와 미국 원전의 다수기 상황이 상이하기 때문으로 판단된다. 국내 원전은 설계표준화 정책에 의하여 OPR1000 노형 12기(신고리 1,2호기, 신월성 1,2호기 및 한빛 3,4호기 포함)를 비롯하여, WH900 노형 4기 및 CANDU600 노형 4기 등 대부분의 원전이 3가지 노형의 표준화된 설계로 건설되는 등 모든 국내 원전은 다수기에 해당된다. 또한 하나의 부지에 6기 이상 다수 원전이 운영되고, 모든 원전이 단일 원전사업자가 운영하는 점 등이 원전 사건 중 다수기 사건 비율이 높은 원인으로 추정된다.

국내 원전과 비교하여, 미국은 원전 2기 부지 32곳과 원전 3기 부지 3곳 등 모두 35개의 다수기 부지와 22개의 단일 원전 부지를 다수의 원전사업자가 운영하고 있다. 미국의 원전사업자는 Exelon과 같이 여러 부지에 있는 17기의 원전을 운영하는 경우도 있으나, 대부분의 원전사업자는 단일 부지의 원전만을 운영하고 있다. 그리고 미국 원전은 설계표준화를 광범위하게 적용하지 않아, 동일 노형에도 다양한 설계가 적용되어 있다.

다수기 사건은 연평균 5.8건으로 지난 10년간 Fig. 1과 같이 보고되었다. 2016년은 경주 지진으로 인한 다수기 사건이 7건 보고되었으며, 이를 제외하면 연도별 다수기 사건의 발생건수에서 특이점은 보이지 않는다.

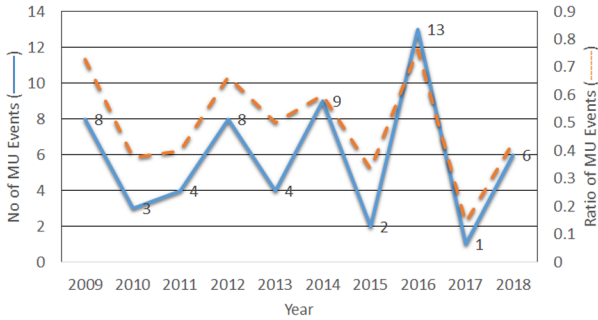


Fig. 1. Number of multi-unit(MU) events by year.

또한 신고리 및 신월성 원전 등 신규원전의 상업운전 초기에 발생할 수 있는 설계 및 시공의 문제점, 미숙련 운전 등과 관련된 경향도 나타나지 않았다. 이는 신규 원전의 시운전기 간 중 유사사건의 재발방지 대책이 효과적이었음을 의미하는 것으로 볼 수 있다.

참고로, 미국의 경우, 연평균 다수기 사건 발생건수가 32.6건으로 국내 연평균 발생건수 대비 5.6배이며, 다수기 원전이 국내는 24기, 미국은 73기이므로, 다수기 원전 당 다수기 사건 발생건수는 국내 0.24건/년, 미국 0.45건/년으로 상당한 차이를 보여준다. 이는 연구 대상 사건의 차이와 다수기 사건의 기준 등이 상이하기 때문으로 판단된다.

결론적으로 국내 원전에서 발생하는 사건은 다수 원전에서 발생할 수 있는 사건일 가능성이 높다. 그러나 본 연구에서는 미국의 LER과 달리 다수기 사건여부가 명시되지 않은 사고·고장 조사보고서를 검토하였기 때문에, 다수기 사건 여부 및 유사사건 조사와 재발방지대책 등에 대한 국내 원전사업자의 상세 검토 및 분석을 통한 실증적 확인이 필요하다.

3.4 다수기 사건 공통성 범주 분류

원전 사고·고장 조사보고서에 기술된 사고원인 및 유사사건 가능성 등을 검토하여, 여섯 가지 공통성 범주⁶⁾에 따라 다수기 사건을 분류한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Commonality classifications of operational MU events

Classifications	Type 1	Type 2	Type 3	Total
Initiating events	10	0	0	10
Shared connections	2	4	3	9
Identical components	2	0	7	9
Proximity dependencies	0	0	0	0
Human dependencies	0	0	3	3
Organizational dependencies	0	1	26	27
Sum	14	5	39	58

MU: Multi-unit

초기사건은 10건으로, 지진 7건과 송전망 이상 3건이다. 공유설비 사건은 9건이며, 이 중 7건이 스위치야드 등 공유 전기설비에서 발생하였다. 국내 원전은 앞서 설명한 다수기 건설에 관한 규정 등에 의하여, 다수기 부지 내 단일 원전에서 사고가 발생하는 경우에도 여타 원전들은 정상적인 운전이 가능하여야 한다. 따라서 국내 원전에서 안전에 중요한 설비는 각 원전에 독립적으로 설치되어 있으며, 스위치야드와 같은 일부 비안전 설비가 매우 제한적으로 다수 원전 간에 공유되어 있다. 동일기기 사건은 9건으로, 주로 공급자의 설계부실, 부품불량 등에 기인한다. 근접종속성으로 인한 다수기 사건은 없으며, 원전 간 충분한 이격거리를 확보한 국내 다수기 원전 배치를 고려하면, 발생할 가능성이 없을 것으로 판단된다. 인적종속성 범주는 3건으로, 시공오류, 기기오인, 정비불량 등의 사고 전 인적 오류사건이다. 조직종속성 범주는 27건으로, 대부분 Type 3에 해당되며, 사건등급 1이상 다수기 사건 16건 중 13건이 조직종속성 사건으로 분류되었다.

3.5 다수기 사건 공통성 특성

국내 고유 다수기 사건 공통성의 특성을 파악하기 위하여, 국내 원전 다수기 사건 범주의 비율을 Table 3과 Fig. 2에 Schroer의 연구결과⁶⁾와 비교하였다.

Table 3. Comparison of commonality classifications between NPPs in Korea and the USA

Classifications	Domestic NPPs	NPPs in USA ⁶⁾
Initiating events	17.3%	6.9%
Shared connections	15.5%	34.3%
Identical components	15.5%	10.5%
Proximity dependencies	0%	4.6%
Human dependencies	5.2%	3.1%
Organizational dependencies	46.5%	40.6%
Sum	100%	100%

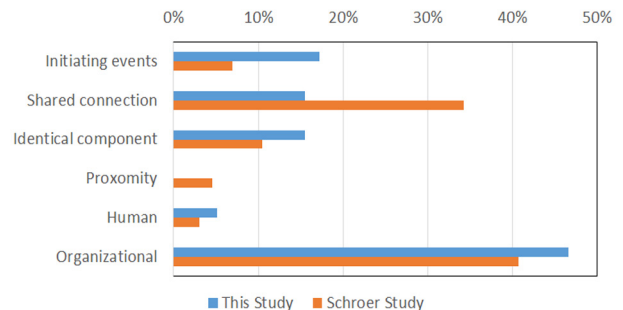


Fig. 2. Graphical comparison of commonality classifications between NPPs in Korea and the USA.

국내 원전과 미국 원전은 다수기와 관련된 규제요건을 포함하여 전반적으로 동일한 규제요건을 적용받으므로, 다수기 사건의 특성도 유사할 것으로 예상할 수 있다. 국내 원전에 대한 다수기 사건 분류결과와 다수기 사건 중 조직중속성 범주의 비율이 가장 높으며, 인적중속성 범주는 거의 발생하지 않는 등 Schroer의 연구결과와 유사한 경향을 보인다.

그러나 공유설비 범주의 경우 미국 원전에 비하여 국내 원전에 설치된 공유설비는 매우 제한적이므로 공유설비 범주는 상당히 낮은 비율을 보여주고 있다. 초기사건 범주의 차이는 2016년 경주에서 발생한 지진으로 인한 7건의 사건보고에 기인하는 것으로 판단되며, 국내 원전 부지가 다수 위치한 지역에서 지진이 발생했기 때문으로 해석할 수 있다. 국내 원전에서 동일기기 범주의 비율이 높은 원인은 동일한 설계로 건설된 원전의 비중이 높기 때문으로 추정된다. 마지막으로 근접중속성 범주의 다수기 사건의 경우, 앞서 설명한 바와 같이 국내 원전에서는 발생할 가능성이 없는 것으로 판단된다.

다수기 사건 중 16건(28%)이 INES 1 등급 사건이며, 이중 13건의 원인이 조직중속성 범주에 해당하는 안전문화결여로 보고되었다. INES Manual¹¹⁾에 의하면 조직의 속성에 따라 안전문화 결여가 발생하며, 이는 원전의 조직과 직원이 규정을 따르지 않는 결과를 초래할 수 있다. 따라서 다수기 사건의 사건등급이 단일 사건에 비하여 높게 평가되었으며, 국내 원전의 다수기 특성을 고려할 때 다수기 사건의 심각성을 적절하게 반영하는 것으로 판단된다.

미국 NRC는 원전 사건의 INES 등급을 판정하지 않으며, 보고된 사건 중 NRC 조사대상사건(findings)을 선정하고, 이를 SDP(Significance Determination Process) 등급 또는 NRC Enforcement Policy에 따른 심각도를 판정한다. 391건의 다수기사건 중 4건의 조직중속성 사건을 포함하여 총 8건(2%)이 NRC 조사대상사건으로 선별되었다.⁶⁾

3.6 조직 중속성 다수기 사건에 대한 추가 분석

국내와 미국의 원전에서 다수기 사건은 조직중속성에 크게 기인한다. 공통성 범주 가운데 초기사건, 공유설비, 동일 기기 등의 다수기 사건은 다수기 PRA에서 고장수목에 반영되고 있으나, 다수기 사건의 많은 부분을 차지하는 조직중속성 범주의 다수기 사건은 다수기 리스트 평가 모델에 명확하게 반영되지 못하고 있다.

일반적으로 정량적 리스크 평가에서 조직 인자

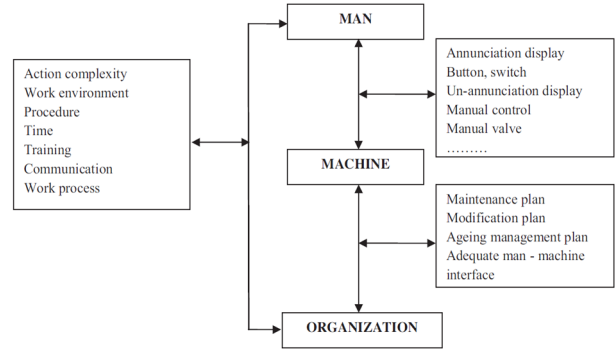


Fig. 3. Main factors which can influence MMOS¹²⁾.

(organizational factors)는 두 가지 방법으로 고려될 수 있다. 하나는 고장수목에 조직실패 사건(organizational error events)과 조직실패 사건에 의하여 영향을 받는 기본사건의 조건부 사건을 반영하는 방법이며, 두 번째 방법은 조직실패에 의하여 발생하는 잠재적 SSC 실패 사건 또는 인적오류사건으로 매핑하는 방법이다. 이들 방법에서 조직실패 사건의 영향은 SSC 실패 또는 인적 실패 사건과 연계되어 리스크 평가에 반영된다⁶⁾.

본 연구에서는 다수기 리스크 평가시 조직중속성 범주 다수기 사건의 모델링을 위하여, 조직중속성을 인간-설비-조직 시스템(MMOS, Man-Machine-Organization System) 모델¹²⁾의 인간-조직 연계성(Human-Organization Interface, HO)과 설비-조직 연계성(Machine-Organization Interface, MO)으로 세분하였다. 설비와 조직, 인간과 조직, 그리고 인간과 설비 사이의 중속성은 MMOS의 요소간 인터페이스에 기인한다. 각 인터페이스는 인적 및 설비의 실패로 이어질 수 있는 조건을 유발할 수 있다. Fig. 3은 MMOS에 영향을 미치는 주요 인자 간 관계를 나타낸다. 여기서 조직은 유지 관리 계획, 수정 계획, 노후화 관리 계획 등에 의해 설비에 영향을 미친다. 또한 조직은 작업 복잡성, 작업 환경, 절차, 교육, 커뮤니케이션 및 작업 프로세스에 따라 운전원에 영향을 줄 수 있다.

국내 원전의 조직중속성 범주 사건 27건을 Table 4의 예와 같이 세분하여, HO 11건(41%) 및 MO 16건(59%)으로 분류하였다. 이러한 결과는 조직중속성 범주의 다수기 사건의 41%는 인적오류를 유발하고 나머지 59%는 기기실패를 유발하는 것을 의미한다. 미국의 경우, 159건의 조직중속성 범주 다수기 사건이 HO 75건(47%), MO 81건(51%)으로 분류되었으며, HO 및 MO로 분류되지 않는 사건은 5건이었다. 국내 및 미국의 원전사건에 대한 조직중속성 범주의 다수기 사건 세분류 결과, Fig. 4와 같이 국내와 미국의 결과가 유사하며, HO에 비하여 MO의 비율이 약간 높다.

Table 4. Examples of human–organization and machine–organization interfaces in MU events

Interfaces	Examples of MU events
HO	Standardized procedures may be used on multiple units were found to be deficient. Inadequate maintenance may be conducted to multiple units.
MO	A design analysis that was used for multiple units was found to be inadequate. A design deficiency was found on multiple units. A vendor supplied components with defect for multiple units.

HO: Human-Organization Interface, MO: Machine-Organization Interface, MU: Multi-unit

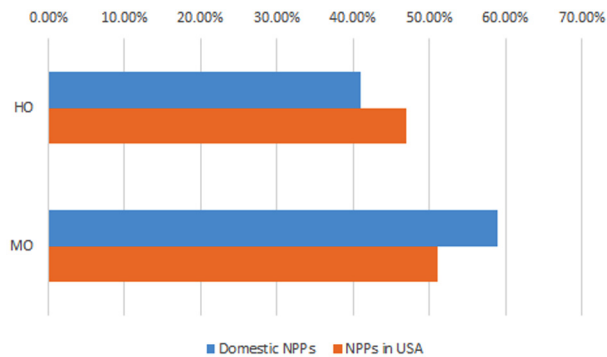


Fig. 4. Comparison of HO and MO Ratios between NPPs in Korea and the USA.

4. 결론 및 고찰

본 연구는 국내 원전 다수기 리스크 평가를 위해 국내 고유 다수기 사건의 특성을 파악하고자, 국내 원전 사건에서 다수기 사건을 선별하고, 다수기 사건에 포함된 다수기 공통성 범주에 따라 분류하였으며, 분류 결과를 미국 원전의 다수기 사건과 비교하여 국내 고유 다수기 사건의 특성을 파악하였다.

분석 대상 사건은 2009년에서 2018년까지 10년간 원전 상업운전기간 중 국내 규제기관에 보고된 108건의 사건이며, 규제기관의 사고·고장 조사보고서를 검토하여, 58건의 다수기 사건을 선별하였다. 국내 원전의 다수기 사건 비율은 검토대상 사건의 54%에 해당한다. 이는 미국 원전의 다수기 사건 비율인 9%와 비교하여 매우 높은 비율이며, 국내 원전에서 다수기 사건의 중요성을 나타낸다.

다수기 사건의 특성을 파악하기 위하여, 다수기 사건의 공통성을 초기사건, 공유설비, 동일기기, 근접성, 인적 종속성, 조직 종속성의 여섯 가지 범주로 분류하였다. 분류 결과, 다수기 사건 중 조직 종속성 범주가 가장 많았으며, 초기사건, 공유설비, 동일기기 범주 등의 순서로 해당 범주로 분류된 다수기 사건이 많았다.

인적종속성 범주는 3건이었으며, 근접성 범주 사건은 없었다. 조직종속성 범주의 비율이 가장 높고, 인적 종속성과 근접성 범주의 비율이 낮은 결과는 미국 원전의 사례와 유사하며, SMR이 아닌 대형 원전 사이에서 발생하는 다수기 사건의 일반적 특성으로 사료된다. 그리고 미국 원전에 비하여, 국내 원전 다수기 사건은 공유설비를 엄격하게 제한하는 국내 원전 설계 특성에 따라 공유설비 범주의 비율이 낮으며, 원전 부지가 밀집된 국내 상황으로 인하여 초기사건 범주의 비율이 높은 국내 원전 고유 특성을 보여준다.

그리고 다수기 리스크 평가를 위한 조직종속성 범주의 다수기 사건 모델링 방법 개발을 위하여, 인간-조직 연계성(Human-Organization Interface)과 설비-조직 연계성(Machine-Organization Interface)으로 세분하여, 조직종속성 범주에서 각 연계성의 비율을 도출하였다.

다수기 리스크 평가에서 다수기 사건의 특성에 대한 이해는 유의미한 다수기 리스크 평가결과를 도출하는데 필수적인 요소이다. 본 연구는 국내 원전 사건자료를 상세 검토하여 다수기 사건을 선별하였으며, 이들 다수기 사건을 공통성 범주로 분류하여, 국내 고유 다수기 사건의 특성을 파악하였다. 이러한 연구결과는 국내 다수기 리스크를 이해하고, 이를 관리하는데 활용될 것이다. 또한 다수기 리스크 평가를 위한 다수기 사건의 모델링을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

마지막으로 본 연구에서 파악한 바와 같이, 국내 원전 사이에는 동일노형, 단일 원전사업자 등으로 인한 공통성이 많으므로, 원전 사건 발생시 다수기 공통성과 관련된 상세한 검토 및 보고가 바람직하며, 원전사업자 및 규제기관의 상세 자료를 활용한 다수기 공통성에 대한 심도있는 연구를 통하여 다수기 안전성 강화가 필요하다.

Acknowledgement: 본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다(No. 1705001).

References

- 1) Nuclear Safety and Security Committee (NSSC), 1601001-0116-SB110, “Development of Strategy and Roadmap for Regulatory Methodologies of Multi-unit risk assessment and Analysis of Single-unit PSA Model Considering the Shared SSCs and Events”, 2016.
- 2) Nuclear Safety and Security Committee (NSSC), NSSC

- Enforcement Rule No. 22, “Regulations on Technical Standards for Nuclear Reactor Facilities, Etc.”, February 22, 2019.
- 3) The U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), ML13255A370, “Regulatory Background on Multi-unit Risk”, 2013.
 - 4) Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), KAERI/RR-4225/2016, “Development of the Integrated Risk Assessment Technology for Multiple Units”, 2017.
 - 5) International Atomic Energy Agency (IAEA), Safety Series 96, “Technical Approach to Probabilistic Safety Assessment for Multiple Reactor Units”, 2019.
 - 6) S. Schroer, “An Event Classification Schema for Considering Site Risk in a Multi-Unit Nuclear Power Plant Probabilistic Risk Assessment”, Master Thesis, University of Maryland, 2012.
 - 7) Korea Institute of Nuclear Safety (KINS), KINS/RR-1426, “A Study for Establishment of Regulatory Guide on Multi-Unit Risk Assessment”, 2015.
 - 8) T. D. Le Duy, D. Vasseur and E. Serdet, “Probabilistic Safety Assessment of Twin-unit Nuclear Sites: Methodological Elements”, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 145, pp. 250-261, 2016.
 - 9) Nuclear Safety and Security Committee (NSSC), NSSC Notification No. 2018-3, “Reporting and Disclosure Regulations for Accidents and Failures of Nuclear Power Plants”, 2018.
 - 10) Korea Institute of Nuclear Safety (KINS), KINS /ER-051, “Development and Management of the National level Operational Feedback System for Nuclear Installations”, 2012.
 - 11) International Atomic Energy Agency (IAEA), “INES: The International Nuclear and Radiological Event Scale User’s Manual”, 2013.
 - 12) Mita Farcasiu and Mirela Nitoi, “The Organizational Factor in PSA Framework”, Nuclear Engineering and Design, Vol. 293, pp. 205-211, 2015.