Journal of the Korean Society of Safety
Vol. 38, No. 3, pp. 102-109, June 2023
https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2023.38.3.102

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

다수기 PSA를 활용한 원전 안전자원 공유 활용성 평가

박종우[1†] · 임호곤[2] · 윤재영[3]

Feasibility Study on Cross-tie Systems in Nuclear Power Plants Using Multi-unit PSA

Jong Woo Park[1†] · Ho-Gon Lim[2] · Jae Young Yoon[3]

†Corresponding Author
Jong Woo Park
Tel : +82-42-866-2436
E-mail : jwpark822@kaeri.re.kr

Received : January 2, 2023
Revised : April 13, 2023
Accepted : April 27, 2023

Copyright@2023 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Abstract : Following the accident at Fukushima, the true impact of multi-unit accidents came to light. Accordingly, research related to multi-unit accident effect analysis, risk evaluation, and accident prevention/prevention technology has been conducted. Specific examples are mobile/fixed equipment such as multi-barrier accident coping strategy (MACST) and diverse and flexible coping strategies (FLEX), which have been introduced and installed in multi-units for preventing and mitigating multi-unit accidents. These strategies are useful for enhancing the safety of nuclear power plants (NPPs); however, a more efficient strategy is required in terms of the costs of physical and human resources. To effectively and efficiently mitigate an increase in multi-unit accidents, it is necessary to not only to utilize mobile/fixed equipment but to also use crosstie options with resources that already exist at NPPs. Therefore, we analyzed the current international and domestic status of crosstie systems technology and propose a method to evaluate feasibility alongside risk based on a multi-unit probabilistic safety assessment (PSA). To analyze the international and domestic status of crosstie systems technology, actual cases and related research were studied, and a list of potential crosstie safety resources was derived. Additionally, a case study was performed on crosstie cases of two systems within the assumed six units on-site under a multi-unit accident, and a multi-unit PSA-based risk evaluation method is proposed.

Key Words : Multi-unit PSA, cross-tie, safety resources, core damage frequency, risk analysis

1. 서 론

2011년 발생한 후쿠시마 원자력발전소(원전) 사고는 원자력 발전과 이용에 있어 안전성이 가장 중요하다는 것을 시사함과 동시에 부지 내 다수기사고(multi-unit accident)에 대한 관심이 증대되는 계기가 되었다. 후쿠시마 사고 이후, 부지 내 다수의 원전 사고에 대한 영향 평가, 리스크 평가, 사고 확대 방지 기술, 중대사고 관리 및 대응 기술 등과 관련된 많은 연구가 수행되었다[1,2].

이러한 배경에서 다양한 안전자원들이 다수기가 있는 원전 부지에 새롭게 적용되었으며, 대표적으로 국내에서는 MACST(Multi-barrier accident coping strategy), 미국에서는 FLEX(Diverse and flexible coping strategies) 같은 이동/고정형 안전 설비가 다수기사고에 대응하기 위한 대비책으로 갖춰지게 되었다. 이러한 이동/고정형 안전 설비는 분명 후쿠시마 사고와 같은 다수기사고 발생 시, 안전 기능을 유지하기 위한 다양하고 독립적인 옵션으로 제공될 수 있으며, 이는 부지 내 다수기 리스크를 효과적으로 줄이고 관리할 수 있을 것으로

[1]한국원자력연구원 리스크평가연구부 박사후연수생 (Risk Assessment Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute)
[2]한국원자력연구원 리스크평가연구부 책임연구원 (Risk Assessment Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute)
[3]한국원자력연구원 리스크평가연구부 선임연구원 (Risk Assessment Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute)

기대된다. 하지만, 새롭게 도입되는 이동/고정형 안전 설비의 운용 및 구비 측면에서, 인적 물적 비용이 많이 들 뿐만 아니라, 다수기사고의 다변성을 고려하면 해당 설비들의 사용이나 활용에 있어 불확실성을 내포하고 있다. 따라서, 다수기사고에 적절하게 대응하기 위해서는 새로운 자원을 확보하는 것도 물론 중요하지만, 기존 원전 부지에 이미 가지고 있는 안전자원을 공유(cross-tie)하여 활용하는 것은 이미 가지고 있는 자원을 효율적으로 활용할 수 있을 뿐 아니라, 이동/고정형 안전 설비의 이용 불능 시 실제 사고 상황에서 선택할 수 있는 또 다른 전략이 될 수 있으므로 안전성 확보 측면에서 중요하다.

본 연구에서는 이러한 측면에서, 다수기 부지에 이미 있는 안전자원의 공유를 통한 다수기사고 확대 방지 기술에 대한 현황과 이를 평가하기 위한 다수기 확률론적안전성평가(Probabilistic safety assessment: PSA) 기반 활용성 평가 방법을 다루고자 한다. 안전자원의 공유 활용성 평가 방법을 통해 안전자원 공유의 활용성 또는 리스크 저감의 효과성을 판단할 수 있으며, 이는 향후 다수기사고의 확대 방지 전략 도출에 핵심적인 요소기술로 활용될 것으로 판단된다.

본 논문은 다음과 같이 구성하였다. 1장 서론에 이어, 2장에서는 원전 안전자원 공유와 관련된 국내외 기술 현황을 분석하고 이를 기술하였다. 3장에서는 다수기 PSA 모델 기반 원전 안전자원 공유 활용성 평가 방법을 설명하고, 이를 가상의 부지 내 다수기에 대해 안전자원의 공유에 따른 활용성을 평가한 사례 연구 결과를 다루었으며, 마지막으로 4장에서 결론을 정리하였다.

2. 국내외 원전 안전 자원 공유기술

2.1 국내외 안전자원 공유 현황 분석

본 연구에서 부지 내 안전자원 공유기술 국내외 현황 분석을 위해 안전자원 공유와 관련된 여러 연구 및 실제 사례가 기술되어있는 문헌들을 중점적으로 조사하였다.

1975년 VVER-440 노형인 Greifswald 1에서는 발전소정전사고(Station Black Out: SBO)가 발생하였으며, 부지 내 2호기의 전원이 1호기로 교차연결되어 냉각기능을 유지할 수 있었다[2]. 2호기 전원을 1호기에 연결하는 것은 당시 절차서에는 없는 작업으로, 전력계통이 사고방지에 활용될 수 있음을 실제로 보였다.

또한, 1982년 VVER-440 노형의 Armenia 1 & 2에서도 1호기에 화재가 발생하였으며, 이에 따라 1호기와 2호기에서는 모두 원자로 정지가 발생하였다[2]. 특히, 1호기의 경우 SBO가 발생하였으며, 이 경우 역시 절차서에 없는 작업이지만 2호기로부터 전력을 공유받아 노심 손상을 막을 수 있었다.

이러한 실제 사례 외에도, PSA 수행 및 연구에서 안전자원의 공유가 고려된 것으로 파악되었다. 미국의 D. C. COOK 원전의 화재 PSA 및 Byron 원전의 PSA에서는 필수용수계통(Essential service water system: ESWS)이 공유되는 시스템인 것으로 고려되었으며, LaSalle 1 and 2의 PSA 연구에서는 터빈기기냉각수계통(Turbine component cooling water system: TBCCWS)가 공유계통으로 고려되었다[3,4]. 이외에도, 후쿠시마 사고 발생 이후 다수기 부지 내 비상디젤발전기(Emergency diesel generator: EDG), 대체교류발전기(Alternative AC diesel generator: AAC-DG), FLEX 장비와 같은 안전자원의 공유를 고려하여 단일기 리스크 평가를 수행하는 연구가 활발히 진행되어 왔다[5-9]. 국내에서는 공유계통인 AAC-DG의 PSA 모델링 및 정량화와 활용성 분석과 관련된 연구가 수행되어 왔다[10-12]. 문헌조사를 통해, 국내외에서 안전자원 공유가 사고에 활용된 실제 사례가 있었으며, 단일기 PSA를 활용한 안전자원 공유의 영향 평가를 다수 수행해온 것으로 분석되었다.

분명히 할 점은, 원전에는 안전등급과 비안전등급의 계통이 있으며, 안전등급의 안전자원은 독립성의 원칙에 따라 설계되어 있으므로 이러한 안전자원의 공유는 분명 독립성 원칙을 위배할 수 있다. 하지만, 문헌조사에서 알 수 있듯 부지 내 다수기사고가 발생하면 사고완화에 가능한 모든 안전자원을 활용하며, 이러한 자원들이 불가용한 경우 비록 안전등급의 자원이라도 부지 내 가용한 안전자원을 공유를 하나의 전략으로 활용하며, 안전자원의 공유가 사고를 방지 및 완화할 수 있다. 따라서, 다수기사고 상황에서 안전자원의 공유의 리스크 저감 또는 상승 요인을 정성적/정량적으로 평가 및 분석하는 것이 필요하며, 본 연구에서는 다수기 PSA를 활용한 원전 안전자원의 활용성 평가 방법을 다룬다.

2.2 다수기 호기간 공유 가능한 안전 자원

2.1절에서 분석된 국내외 안전자원 공유기술을 토대로 호기간 공유 가능한 안전자원 목록을 도출하였다. 여기서 안전자원 목록은 원전 노형이나, 실제 원전에 설치되어 있는 시스템들의 물리적 제약을 고려하지 않고 도출된 일반적인 목록으로, 다수기 호기간 공유가 가능한 안전자원은 크게 전력계통, 냉각계통, 지원계통, 기타와 같이 총 4개의 유형으로 나뉘며, Table 1에

Table 1. List of safety resources that can be shared between units

Type	Lists of examples
Electrical systems	EDG (Emergency Diesel Generator)
	AAC-DG (Alternate AC Diesel Generator)
	House load operation (unit to unit)
Decay heat removal systems	RHR (Residual heat removal, primary)
	AFWS (Auxiliary feedwater system, secondary)
	CST (Condensate Storage Tank, secondary)
Support systems	ESWS (Essential service water system)
	ECWS (Essential chilled water system)
	CCWS (Component cooling water system)
	TBCCWS (Turbine component cooling water system)
Etc	Instrument air common compressors
	Fire protection system
	Service water intake structure
	Uninterruptible power supply heating, ventilation, and air conditioning
	Control room heating, ventilation, and air conditioning
	6.9 kV and DC electrical
	Common buses
	Turbine plant cooling water
	Spent fuel pool cooling

계통분류 유형과 예시 계통들이 제시되었다. 전력계통, 냉각계통의 경우 대다수 안전등급 계통의 범주로 공유 시 독립성 위배를 반드시 고려해야 함을 다시 한 번 명시한다.

전력계통의 경우, 대표적으로 EDG, AAC-DG와 같은 안전자원이 공유 가능하며, 국내의 경우 AAC-DG는 부지에 따라 다르지만, 신규 노형의 원전인 APR-1400의 일부 원전을 제외하고는 2개 호기당 하나의 AAC-DG를 공유하고 있다. 2.1절에서 기술되었듯, 실제 국외에서는 단일기 소외전력상실사고 시 부지 내 다른 호기로부터 전력계통을 공유한 사례가 있는 만큼 다른 계통들에 비해 다수기에 공유될 가능성이 가장 클 것으로 판단된다. 여기서, EDG의 경우 안전등급 계통이지만, AAC-DG는 비안전등급 계통이다.

냉각계통과 관련된 시스템은 대다수 안전등급 계통으로, 1차 측에 해당하는 RHRS(Residual heat removal system), 2차 측에 해당하는 AFWS(Auxiliary Feed-water System), CST(Condensate storage tank) 등이 있는 것으로 조사되었다. 냉각계통의 경우 대부분 안전계통으로, 국내의 경우 냉각계통에 해당하는 시스템이 호기간 공유하는 자원은 아니며, 실제 공유를 위해서는 배관설치를 통한 유로 확보, 기기 조작 및 작동을 위한 신호 확보 등 물리적 조치가 필요한 것으로 판단된다. 국외에서는 일부 부지 내 노형에 해당하지만, 냉각계통과 관련된 기기들의 공유가 가능한 것으로 조사되었다.

지원계통과 관련된 시스템은 ESWS, ECWS(Essential service water system), CCWS(Component cooling water system), TBCCWS 등이 있다. 냉각계통과 마찬가지로 대다수 안전등급 계통으로, 국내의 경우 지원계통 역시 부지 내 다수기에 공유되는 자원은 아니지만, 부지에 따라 최종 열제거원(예: 열제거원과 관련된 취수구 구조물 등)이 공유되는 경우가 있는 것으로 판단된다. 국외의 경우, 해당 시스템들은 노형에 따라 실제 공유되는 자원인 경우도 있고, 국내와 같이 최종 열제거원이 공통이 되는 경우가 있는 것으로 조사되었다.

이외에도 Instrument air common compressors, Fire protection system, Spent fuel pool cooling 등과 관련된 기타 여러 시스템이 노형에 따라 공유하고 있는 안전자원들이 있는 것으로 도출되었다.

3. 원전 안전자원 공유 활용성 평가

3.1 원전 안전자원 공유 활용성 평가 방법

2장에서는 다수기사고 확대방지를 위해 활용할 수 있는 전략인 안전자원 공유기술 현황과 공유 가능한 안전자원 목록을 도출하였다. 도출된 목록들에 대해, 안전자원의 공유가 원전의 리스크 저감에 영향이 있는지 확인하는 것이 필요하며, 이를 위해 원전 안전자원 공유 활용성 평가 방법을 개발하였다. 개발된 방법은 총 5단계의 절차로 이루어져 있으며, Fig. 1과 같다.

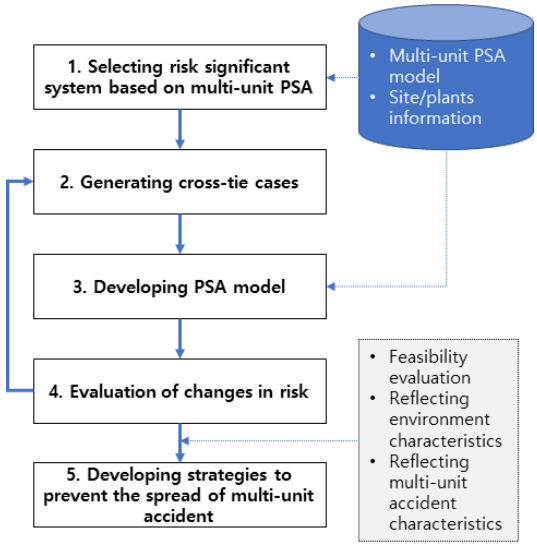

Fig. 1. Overall process to develop strategies to prevent the spread of multi-unit accident.

다수기 PSA 기반 안전자원 공유 활용성 평가 방법의 1단계는 다수기 PSA 모델을 기반으로 기기 중요도 분석을 수행하고, 공유 대상이 되는 중요한 안전자원을 도출하는 것이다. 여러 중요한 안전자원을 도출한 이후에는, 해당 안전자원을 공유하는 유형들을(본 연구에서는 이를 case로 표현함) 생성하는 것이 2단계이다. 공유 case 생성을 위해서는 현재 해당 안전자원의 기본 공유 상태를 파악하고, 안전자원의 공유 가능성을 검토하는 과정이 포함된다. 2단계에서 공유 case가 생성되면, 그다음 단계는 공유 case에 대한 다수기 PSA 모델 개발이 필요하며, 이 과정에 대한 상세 내용은 3.2절에서 다루도록 한다. 3단계에서 안전자원 공유 모델링 과정이 완료되면, 4단계는 개발된 다수기 PSA 모델을 안전자원 공유 case에 대해 리스크 평가를 수행하는 것이다. 본 연구에서는 리스크 평가의 척도를 부지노심손상빈도(site core damage frequency; site CDF)로 평가하며, 안전자원 공유 전과 후의 site CDF 변화, 즉 리스크 저감률을 통해 안전자원 공유 case를 평가한다. 마지막 단계인 5단계에서는 4단계에서 평가된 리스크 저감률 정보와 다양한 적용성 판단 기준(예를 들어 현장 적용성, 부지 별 환경 특성, 다수기사고 특성 등)을 토대로 활용성을 평가하여 안전자원 공유 전략을 도출하는 것이다.

개발된 원전 안전자원 공유 활용성 평가 방법을 통해 안전자원 공유의 효과성을 파악함을 동시에, 다수기 확대방지 전략을 도출하는데 필요한 요소기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

3.2 안전자원 공유 PSA 모델 개발 방법

3.1절에서 기술되었듯, 원전 안전자원 공유 활용성 평가 방법의 3단계는 공유 case에 대한 다수기 PSA 모델 개발이다. 모델 개발에 고려되는 요소는 총 5가지로, 방법을 순서대로 나열하면, 1) 공유 유형 모델링, 2) 점유 분율 배분 모델링, 3) CCF(common cause failure) 모델링, 4) MUX(mutually exclusive event) 모델링, 5) One-top 모델 개발이 있다.

공유 유형 모델링은 생성된 case로 변화되는 시스템의 실패를 고장수목(fault tree)에 반영하는 과정이다. 본 방법에서는 공유 유형이 크게 세 가지로 나누어 고려된다. 첫 번째 공유 유형은 Twin cross-tie로, 2개의 twin 호기간 공유이며, 두 번째 공유 유형은 Semi-site cross-tie로 부지 내 같은 타입의 노형에 대한 호기간 공유이고, 세 번째 공유 유형은 Site cross-tie로, 부지 내 모든 노형에 대한 호기간 공유이다. 첫 번째 공유 유형에 대해 예를 들면, 만약 부지 내 원전이 2기(U1, U2)가 있고, 각 원전의 시스템 A(A_U1, A_U2)가 공유 가능하다면, 기존 U1의 시스템 A 실패는 A_U1과 A_U2의 동시 실패, 즉 AND 게이트로 Fig. 2와 같이 고장수목에 모델링된다.

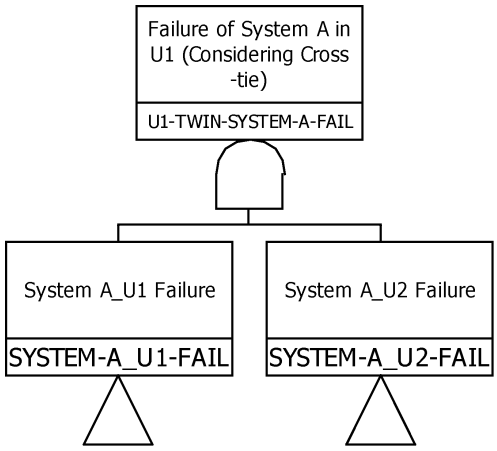

Fig. 2. Example of fault tree model for system A(U1) in unit 1 considering cross-tie of system A(U2) in unit 2.

점유 분율 모델링은 공유 유형에 따라 시스템의 점유 확률이 다르므로 이를 모델링하는 과정을 의미한다. 공유 case에 따라 시스템 여부를 고장수목에 모델링하고, 점유 확률을 계산하여 모델에 반영한다.

CCF 모델링은 공유 case에 따라 추가적으로 고려되는 CCF를 모델링하는 과정을 의미한다. 추가적인 다수기 CCF를 고려함으로써 보다 보수적인 평가가 가능하며, 본 연구에서 고려되는 CCF 유형은 총 3가지로 각각 single unit CCF, Twin-unit CCF, Inter-plant(site) CCF가 있다. 이러한 CCF 유형과 계산 방식은 한국원자력연구원에서 개발한 다수기 PSA를 위한 호기간 CCF 기본사건 계산방법을 활용하였다[13].

공유 유형을 고려하다보면, 하나의 시스템이 2개 이상의 호기에 공유되어 활용되는 시나리오와 같은 불가능한 시나리오를 선별제거 해주는 작업이 추가적으로 필요하다. 이를 위해 MUX 모델링이 필요하며, 공유 유형에 따라 MUX모델은 다르게 개발된다.

마지막으로, 앞서 개발된 모델들을 종합하여 One-top 모델을 개발한다. One-top 모델은 site CDF 계산을 위해서 필요하며, 여기서 site CDF는 1개 호기 노심손상 빈도(CDF_1-unit)부터 부지 내 최대 다수기(N개)의 동시 노심손상 빈도(CDF_N-units)까지의 총합으로 아래와 같이 계산된다.

$$site\ CDF = \sum_{i=1}^{N} CDF_{i-units} \quad (1)$$

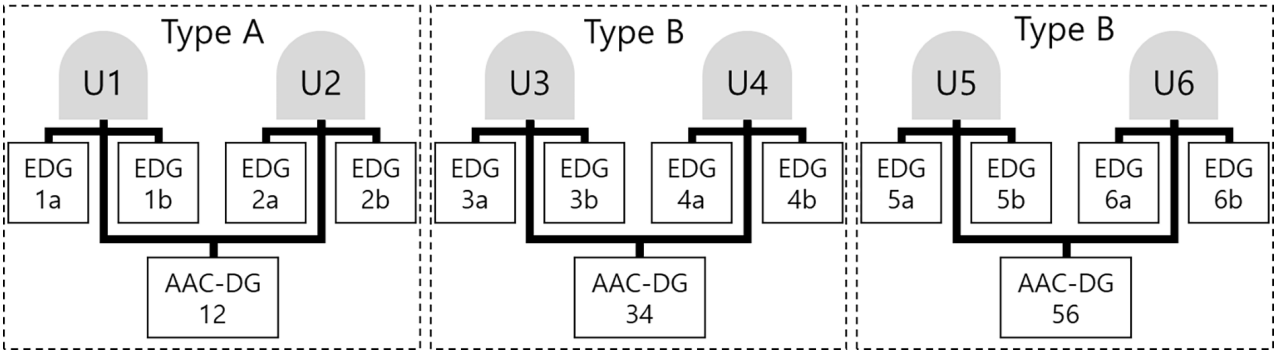

Fig. 3. Schematic of multi-units with risk significant systems (AAC-DGs, EDGs) in the site considered in the case study.

3.3 사례 연구

3.1절과 3.2절에서 소개된 활용성 방법 및 모델링 개발 방법을 통해 가상의 부지 내 다수기 원전에 대해 안전자원 공유 활용성 평가를 수행하는 사례 연구를 수행하였다.

3.3.1 사례 연구 범위 및 가정사항

다수기 PSA 기반 안전자원 공유 활용성 평가 방법을 토대로 사례 연구를 수행하였으며, 사례 연구에 고려된 범위 및 가정사항은 다음과 같다.

❍ 다수기 초기사건

- 다수기 초기사건으로 부지 소외전원상실사고(Multi-unit loss of offsite power: MU-LOOP)를 상정하였다. 다수기 PSA 모델 또한 MU-LOOP 초기사건에 대해서만 고려한다.

❍ 공유 대상 안전자원

- 다수기 PSA 모델의 중요도 분석 결과, EDG, AAC-DG가 매우 높은 중요도를 갖는 기기들로 파악되었으며, 사례 연구를 위해 EDG와 AAC-DG를 선정하였다.

❍ 주요 가정사항

- 부지 내 총 6개의 다수기를 고려한다(Fig. 3 참고). 6개의 다수기 중 2개 호기인 U1, U2는 A 타입의 노형으로, 나머지 4개 호기인 U3-U6는 B 타입의 노형으로 가정한다.
- 전력 계통으로는 모든 호기가 2개의 EDG를 가지며, 2개의 원전 당 1개의 AAC-DG를 공유하고 있는 것으로 가정한다.
- AAC-DG는 한 호기에서 최대 1개까지 점유 가능한 것으로 가정한다. EDG의 경우 각 호기 당 1개의 EDG (EDG-#A)는 무조건 점유하되, 공유는 그 외의 1개 EDG (EDG-#B) 공유를 고려한다.

❍ 활용된 소프트웨어

- 본 연구에서 다수기 PSA 모델을 정량화하기 위해 한국원자력연구원에서 개발한 AIMS 모델링 소프트웨어와 정량화 엔진인 FTREX를 활용하였다.

3.3.2 사례 연구 수행 내용

앞서 제시된 사례 연구 범위 및 가정사항을 바탕으로, EDG와 AAC-DG에 대해 각각 2개의 공유 case를 고려하였으며 다음과 같다.

Case 1은 기본 공유 case로, Fig. 3과 같이 하나의 원전이 2대의 공유하지 않는 EDG와 1대의 공유하는 AAC-DG를 가진 경우이다. case 2-1과 2-2는 EDG를 공유한 case로, case 2-1은 쌍둥이 원전(U1-U2, U3-U4, U5-U6)간 EDG를 공유한 경우이며, case 2-2는 case 2-1에서 같은 유형의 원전들(U3-U4) 사이의 EDG 공유를 추가적으로 고려한 case이다. Fig. 4는 case 2-1과 case 2-2의 공유 case를 나타낸다.

Case 3-1과 3-2는 AAC-DG를 공유한 case로, case 3-1은 같은 유형의 원전들(U3-U4) 사이의 AAC-DG 공유를 고려한 case이며, case 3-2는 부지 내 모든 원전들(U1-U6)에 AAC-DG를 공유한 case로, Fig. 5는 case 3-1과 case 3-2의 공유 case를 나타낸다.

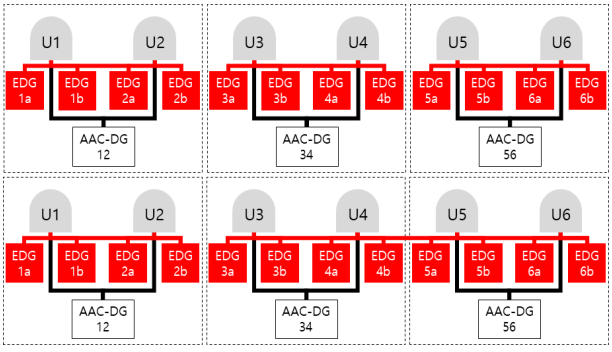

Fig. 4. Cross-tie cases of EDGs corresponding to cases 2-1 (up) and 2-2 (down).

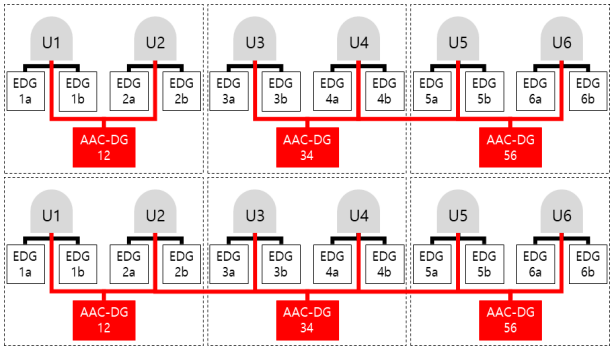

Fig. 5. Cross-tie cases of AAC-DGs corresponding to cases 3-1 (up) and 3-2 (down).

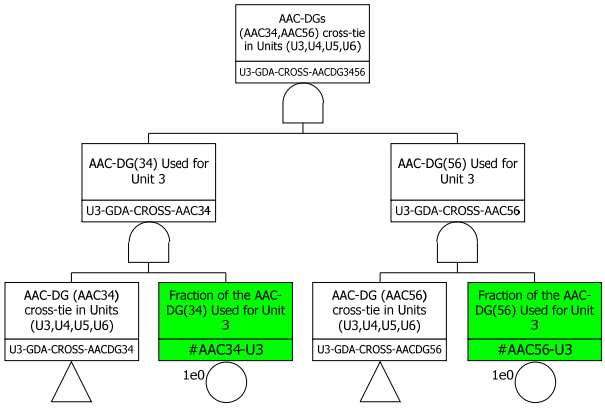

Fig. 6. An example of cross-tie modelling in FT regarding with failure of AAC-DGs.

기본 공유 유형을 포함하여 5개의 case에 대해 3.2절에 기술되어 있는 5단계의 모델링 방법을 적용하여 다수기 PSA 모델 개발을 수행하였다. 공유 유형은 case 2-1, 2-2, 3-1, 3-2에 대해 각각 모델링하였으며, Fig. 6은 case 3-1에서 Unit 3의 AAC-DG 고장수목 모델링 예시를 나타낸다.

다음 단계로는 공유 유형에 따른 분율을 적절하게 모델링하는 것이다. 예를 들어, 2개의 AAC-DG가 4개 호기에 공유되는 경우, 활용 가능성은 0.5가 된다. Fig. 7은 case 3-1에서 AAC-DG 활용성에 따른 분율을 모델링한 예시이며, 같은 방식으로 모든 공유 유형에 대해 이를 FT에 모델링했다.

이후 단계는 CCF를 모델링하는 것이다. 공유 이전에는 독립적인 기기의 CCF인 single-unit CCF만 고려된다.

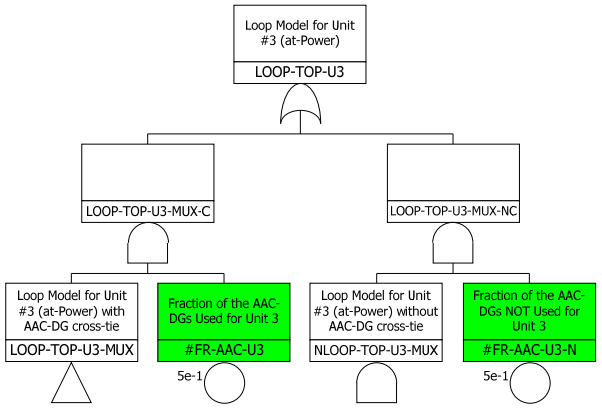

Fig. 7. An example of fraction modelling in FT regarding with failure of AAC-DGs.

하지만, 안전자원을 공유하기 때문에 새롭게 고려될 수 있는 CCF로는 같은 본부의 쌍둥이 호기간의 CCF인 twin-unit CCF와 부지 내 모든 호기간의 CCF인 Inter-plant CCF가 추가적으로 고려된다. 이러한 CCF의 분율은 기존에 한국원자력연구원에서 개발한 방법론을 활용하였으며[13-14], Table 2는 본 연구에서 활용한 CCF 분율과 계산 방법을 보여준다. 이를 활용하여, 기존의 단일 CCF를 세 종류의 CCF와 각각의 분율로 모델링하였으며, Fig. 8은 case 3-1에서 활용된 AAC-DG의 CCF 모델링 예시를 나타낸다.

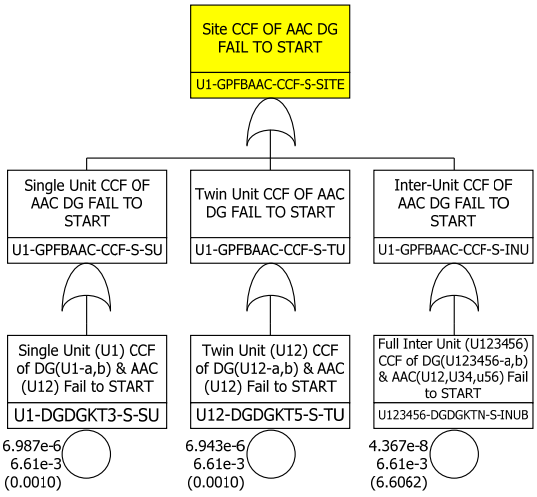

Fig. 8. An example of CCF modelling in FT regarding with failure of AAC-DGs.

Table 2. List of CCFs with fractions and equations used in the case study

CCF Sub-Category	Description	Fraction	Equation	Assumptions
Single-unit CCF	FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6	0.5	ex) FR1 = 1 − FR12 - FR123456	C12, C34, C56 = 1 C123456 = 1
Twin-unit CCF	FR12, FR34, FR56	0.496875	ex) FR12 = (0.5)*C12 - FR123456	
Inter-plant CCF	FR123456	0.003125	FR123456 = (0.5)^5*C123456	

Table 3. Results of changes in site CDF according to cases for EDGs and AAC-DGs

Cases	Description	Cross-tie		Remarks	Results
		EDG	AAC-DG		(⊿ site CDF)
1	Base case	N/A	twin	EDG(S1/S2/S3/S4/S5/S6) AAC-DG(S1-S2/S3-S4/S5-S6)	-
2-1	EDGs cross-tie for the twin/ AAC-DGs cross-tie for twin	twin	twin	EDG(S1-S2/S3-S4/S5-S6) AAC-DG(S1-S2/S3-S4/S5-S6)	-17%
2-2	EDGs cross-tie for the same type of NPPs/ AAC-DGs cross-tie for twin	semi-site	twin	EDG(S1-S2/S3-S6) AAC-DG(S1-S2/S3-S4/S5-S6)	-23%
3-1	No EDGs cross-tie/ AAC-DGs cross-tie for the same type NPP	N/A	semi-site	EDG(S1/S2/S3/S4/S5/S6) AAC-DG(S1-S2/S3-S6)	-15%
3-2	No EDGs cross-tie/ AAC-DGs cross-tie for all NPPs	N/A	site	EDG(S1/S2/S3/S4/S5/S6) AAC-DG(S1-S6)	-20%

CCF까지 모델링되면, 다음으로는 MUX 모델링이 필요하다. MUX 모델링은 문자 그대로 실제로는 불가능한 이벤트들이 도출되지 않도록 모델링하는 것이며, 이를 통해 MCSs(Minimal cut sets)에 사고경위상 불가능한 사고를 제거하도록 모델링 하였다. 마지막으로는 이러한 모델링을 종합하여 one-top 모델을 개발하였으며, 최종적으로 site CDF를 평가하고 MCSs를 분석하였다.

3.3.3 사례 연구 결과

3.3.2절에 기술된 내용을 바탕으로 최종적으로 부지 리스크 척도인 site CDF를 평가하였다. Table 2는 기본 공유 유형(case 1) 대비 4가지 case에 대한 site CDF 변화율을 나타낸다. 사례 연구를 통해 MU-LOOP 초기사건에 대해 EDG와 AAC-DG 공유가 리스크 저감에 효과적임을 알 수 있었다. EDG를 공유하는 case 2-1은 site CDF가 약 17% 감소하였으며, 추가적인 공유가 고려되는 case 2-2의 경우 약 23%가 감소되는 것으로 평가되었다. AAC-DG의 공유를 고려한 case 3-1과 case 3-2 또한 site CDF가 기본 공유 유형 대비 각각 약 15%, 20% 감소하는 것으로 평가되었다.

안전자원 공유 활용성 평가 방법과 사례연구를 통해 다수기사고인 MU-LOOP 발생 시, EDG와 AAC-DG는 안전성을 향상할 수 있는 하나의 전략으로 활용될 수 있음을 알 수 있었다. 하지만, 안전자원 공유는 사례연구의 결과인 리스크 저감에 반대로, 리스크 상승 요인이 될 수도 있다. 기존의 독립적인 시스템 또는 기기가 공유됨으로써 고려되는 호기간 CCF와 분율은 공유 전과 달리 상대적으로 높은 리스크 기여도를 갖게되며, 본 연구에서 사용한 CCF들의 분율을 달리하면 정량적으로도 리스크가 향상될 수 있다.

사례 연구를 통해 원전 안전자원 공유 활용성 평가 방법이 여러 안전자원의 공유 전략에 대해 정량적 리스크 정보를 바탕으로 활용성 평가가 가능함을 보였다. 물론 3.1절에 나와있듯, 최종적으로 다수기 확대 방지를 위한 안전자원 공유 전략을 도출하기 위해서는 리스크 평가 결과 외에도 다양한 적용성 판단 기준이 필요하다. 또한, 안전자원 공유로 인한 CCF 분율 계산 방식과 그에 따른 리스크 변화를 분석하는 것과 같이 추가적인 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 다수기사고 확대 방지기술 개발의 요소기술 중 하나인 부지 내 원전 안전자원 공유와 관련된 기술 현황을 분석하고, 다수기 PSA 모델을 기반으로 안전자원의 공유 활용성 평가 방법을 개발하고, 이를 활용한 사례 연구를 수행하였다. 활용성 평가를 위해 다수기 PSA의 리스크 척도인 부지 CDF 변화율을 활용하였으며, 사례 연구 결과, 부지 내 다수기사고인 MU-LOOP 초기사건 발생 시 EDG, AAC-DG와 같은 안전자원들이 공유 유형에 따라 10%~20%의 리스크 저감이 가능한 것으로 평가되었다. 따라서, 부지 내 다수기 안전성 향상 전략으로 원전 안전자원 공유가 효과적일 것으로 판단되며, 본 연구에서 개발된 안전자원의 공유 활용성 평가 방법이 향후 다수기사고 확대 방지를 위한 다양한 기술 최적화에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement: This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20224 B10200050).

References

1) IAEA, “Implementation and Effectiveness of Actions Taken at Nuclear Power Plants following the Fukushima

Daiichi Accident", IAEA-TECDOC-1930, 2020.
2) N.Siu et al., "Fire PRA Maturity and Realism: A Technical Evaluation and Questions", OECD/NEA/CSNI/WGRISK International Workshop on Fire PRA, 2014.
3) AEP, "Calculation of Regulatory Guide 1.177 Risk Parameters for Potential One-Time Emergency Technical ・Specification Completion Time Change for Unit 1 and Unit 2 Train B Reserve Feed", PRA-QNT-007, 2016.
4) ORNL, "Initiating Events for Multi-Reactor Plant Sites", ORNL/TM-2014/533, 2014.
5) IAEA, "Multi-unit Probabilistic Safety Assessment", Safety Reports Series No. 110 , 2021.
6) ORNL, "Design Strategies and Evaluation for Sharing Systems at Multi-Unit Plants - Phase I", ORNL/LTR/INERI-BRAZIL/06-01, 2007.
7) Mandelli et al., "Dynamic Pra of A Multi-Unit Plant", PSA 2017, 2017.
8) J. K. Alsuwaidiet al., "The Risk Analysis of the Electrical Cross-tie for Extended Station Blackout in Multi-Unit Site", ANE, 2020.
9) J. K. Alsuwaidiet al., "Studies on the Optimal Mitigation Strategy of Extended SBO for the Isolated Multi-unit NPP Site", ANE, 2021.
10) M. C. Kim, "Feasibility of Shared use of Alternative AC Diesel Generator under Dual-unit Station Blackout", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 54, No. 10, pp. 1029-1035, 2017.
11) S. H. HAN and H. G. LIM, "Fault Tree Modeling of AAC Power Source in Multi-unit Nnuclear Power Plants PSA", KNS 2015 Autumn, 2015.
12) W. S. Jung et al.,"A New Method to Evaluate Alternate AC Power Source Effects in Multi-unit Nuclear Power Plants", RESS, Vol. 82, pp. 165-172, 2003.
13) D. S. Kim et al., "A Pragmatic approach to Modeling Common Cause Failures in Multi-unit PSA for Nuclear Power Plant Sites with a Large Number of Units", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 195, 106739, 2020.
14) D. S. Kim et al., "Development of an Inter-Unit Common Cause Failure Analysis Method for Multi-Unit Probabilistic Safety Assessment", KAERI/TR-7061/2017, 2017.