

다수기 PSA 기반 원자력 발전소 이동형 안전 설비 활용성 평가

윤재영^{1†} · 임호곤² · 박종우³

Evaluating the Application of Portable Safety Equipment in Nuclear Power Plants using Multi-unit PSA

Jae Young Yoon^{1†} · Ho-Gon Lim² · Jong Woo Park³

[†]Corresponding Author

Jae Young Yoon

Tel : +82-42-868-4514

E-mail : jyoon@kaeri.re.kr

Received : January 2, 2023

Revised : March 29, 2023

Accepted : May 2, 2023

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

Abstract : Following the Fukushima accident, portable equipment employed as accident mitigating systems have been installed and operated to reduce core damage and large early release frequencies. In addition, the establishment of an accident management strategy has gained importance. This study investigated the current status of portable equipment including the international portable equipment FLEX (diverse and flexible coping strategies), and domestic portable equipment multi-barrier accident coping strategy (MACST). Research on optimal utilization of MACST remains insufficient. As a preliminary study for establishing an optimal strategy, sensitivity studies were conducted to facilitate the priority of use on portable equipment, number of portable equipment, and dependency of operator actions based on a multi-unit probabilistic safety assessment model. The results revealed the conditions that reduced the multi-unit and site conditional core damage probabilities, indicating the optimal strategy of MACST. The results of this study can be used as a reference for establishing an optimal strategy that utilizes domestic safety equipment in the future.

Key Words : portable safety equipment, FLEX, MACST, optimal strategy. multi-unit probability safety assessment

1. 서론

원자력발전소가 상업적으로 전기 생산에 큰 역할을 하기 시작하면서 원전의 안전성은 수십년동안 세계적으로 큰 이슈가 되어 왔다. 원전은 효율적으로 전기 생산을 할 수 있는 반면 사고가 발생하면 큰 결과를 초래할 수 있기 때문에 안전성을 증진시키기 위한 노력들과 연구들이 계속되어 왔다. 그럼에도 불구하고 1979년 미국 TMI 원전 2호기에서 발생한 노심손상 사건과 1986년 소련 체르노빌 원전 4호기에서 발생한 원전 폭발 및 노심용융 사건이 예상치 못한 원인으로 발생했고 이로 인해 중대사고 관리에 대한 리스크 평가의 중요성이 대두되고 운전 및 건설 원전에 대해 확률론적 안전성 평가 (Probabilistic safety assessment, PSA)를 수

행하기 시작했다. 그리고 2011년 일본 후쿠시마에서 발생한 지진 및 해일로 인한 노심용융 및 수소폭발 사건 등 큰 재해가 발생했고 이는 원전 안전성 증진에 더욱 더 경각심을 주는 계기가 되었다. 기존에 국내 원전의 경우 단일기 기준 안전목표인 연간 노심손상빈도 (Core damage frequency, CDF)를 10⁻⁴/yr 이하로 유지하고 연간 조기대량방출빈도(Large early release frequency, LERF)를 10⁻⁵/yr 이하로 유지하는 것을 목표로 하였으며, 신규 국내 원전은 이에 1/10을 적용하는 기준을 적용하여 평가 및 설계를 진행하였다. 이를 만족시키기 위해 초기사건이 발생하면 발전소를 안전정지상태로 만들기 위해 여러 안전계통들이 수동 혹은 자동으로 작동되며, 이를 확률론적 안전성 평가를 통해 사고경위별로 분석하여 CDF 및 LERF를 계산하였고 이는 원

¹한국원자력연구원 리스크평가연구실 선임연구원 (Risk Assessment Research Team, Korea Atomic Energy Research institute)

²한국원자력연구원 리스크평가연구실 책임연구원 (Risk Assessment Research Team, Korea Atomic Energy Research institute)

³한국원자력연구원 리스크평가연구실 박사후연수생 (Risk Assessment Research Team, Korea Atomic Energy Research institute)

전 건설 허가 및 계속 운전의 의사결정에 중요한 역할을 하였다. 이처럼 안전 목표 이하의 CDF 및 LERF를 만족시키기 위해 더욱 향상된 안전성 기능을 갖는 안전계통들이 필요로 되었으며 기존의 고정형 설비를 강화할 뿐만 아니라 새로운 이동형 안전 설비를 추가하여 원전 심층 방어를 강화하려는 노력들이 이루어지고 있다. 특히 후쿠시마 사고는 다수기 부지 내 여러 호기가 동시에 손상을 입은 사건으로, 다수기 사고에 대한 중요도가 급격하게 늘어감에 따라 부지 내 다수기 리스크를 저감하기 위한 여러 방안들이 제시되고 있으며 그 중 하나인 이동형 설비 도입안은 더욱 더 중요성이 커지고 있다. 특히 후쿠시마 사고 때 부지 내 구비되어 있는 이동형 설비가 제대로 작동하지 않아 더욱 큰 사고로 이어지게 되었으며 이를 통해 다수기 부지 내 이동형 설비의 운영방법과 운전원들에게 제공되는 교육 및 훈련 시스템 구축의 필요성을 인식하게 되었다. 국내 원전의 경우 모든 부지 내 5개 이상의 호기들이 존재하고 있으며, 2015년 신고리 3호기 운영허가를 위해 다수기 PSA 수행을 권고했으며 2016년 전문가 검토를 통해 신고리 5, 6호기의 건설허가를 위한 다수기 PSA 수행을 권고하면서 다수기 PSA에 대한 많은 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 이후 원자력안전법이 개정되면서 원전 사업자는 모든 발전소에 대해 사고관리계획서(Accident manage plan, AMP)를 제출하게 되어 있고 여기에는 중대사고 관리를 포함하여 국내 이동형 설비인 MACST (Multi-barrier accident coping strategy)에 대한 운영 절차를 포함하게 되어 있기 때문에 이를 효과적으로 운영하기 위한 사고관리 전략 구축이 현안으로 대두되고 있다. 체계적인 MACST 운영 전략이 구축된다면 이를 반영한 규제검증용 PSA 모델을 개발하여 신규 및 가동중 원전에 대한 건설 및 운영허가에 제시할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 이러한 MACST 설비 운영 전략 구축에 앞서 예비평가로서 PSA 모델을 활용한 민감도 분석을 수행하고 그 결과를 제시한다. 2장에서는 현재 국내의 이동형 안전 설비 현황에 대해 간략하게 설명하고 3장에서는 PSA 모델을 활용한 민감도 분석 구축, 4장에서는 민감도 분석 결과에 대해 설명하도록 하겠다.

2. 이동형 안전 설비 현황

2.1 국외 이동형 안전 설비

2011년도 이후 극한재해 대비 NRC (Nuclear Regulatory Commission)의 사고완화 전략수립 명령에 따라 NEI (Nuclear Energy Institute)는 발전사들의 대응전략 수립

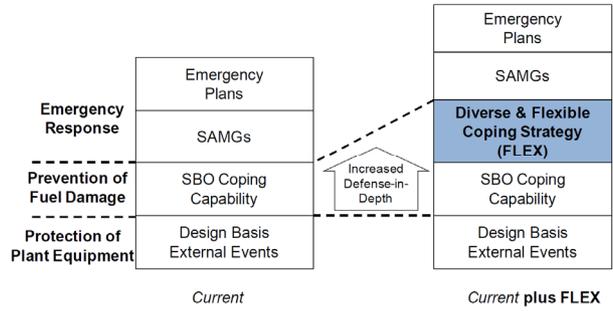


Fig. 1. Increased defense-in-depth using FLEX.

지침(NEI 12-06¹⁾)을 제시하였으며 미국 내 개별 원전들은 NEI 12-06에 의거하여 고정/이동형 안전 설비인 FLEX (Diverse and flexible coping strategies) 이행에 착수하였다. FLEX는 미국 NRC의 사고완화 전략 하에 후쿠시마 사고와 같이 설계되지 않은 극한재해 (Beyond design basis external event, BDBEE) 발생 시 사고완화를 위해 도입한 설비로서 최종적으로 장기 소외전원 완전 상실 (Extended loss of all AC power, ELAP)과 최종 열 제거원 상실 (Loss of ultimate heat sink, LOUHS) 사고 발생 시 노심손상 및 방사성물질 방출 리스크를 저감하는데 목적이 있다. FLEX를 통해 얻고자 하는 기본개념은 Fig. 1과 같다¹⁾.

설계기준사고, 다중고장사고나 극한 재해가 발생했을 때 FLEX를 도입하여 중대사고 조건으로 진입하는 것을 지연 또는 방지함으로써 심층 방어를 강화시키는 것이 기본개념이다. FLEX를 통해 확보 및 증진시키려는 안전기능은 크게 1) 안전 설비 운전을 위한 전원 공급 2) 냉각수 공급으로 인한 열제거와 같이 두 가지로 제시할 수 있다. 전원 공급을 위한 설비로는 발전소 내 보유하고 있는 축전지, 비상디젤 발전기, 대체교류 발전기와 사고완화전략으로 추가된 다양한 전력용량의 이동형 발전기를 예로 들 수 있다. 냉각수 공급 설비로는 다양한 원자로 냉각계통들과 사고완화전략으로 추가된 다양한 용량의 이동형 펌프가 대표적인 예시이며 이들은 원자로냉각재를 보충하고 증기발생기에 냉각재 주입하여 노심 내 핵연료를 냉각하거나 격납건물 살수를 통해 원자로격납건물의 방호벽기능을 확보하는 기능을 갖고 있다. FLEX를 운영하기 위한 기본적인 네가지 요소는 다음과 같다.

- 1) 원자료를 안전한 상태로 만들기 위한 전력 유지 및 냉각수 공급 이동형 설비
- 2) 극한 외부재해로부터의 FLEX 설비 안전 보호
- 3) FLEX 전략을 수행하기 위한 절차
- 4) 실현 및 재현 가능한 FLEX 전략을 위한 체계

이 네가지 기본 요소를 포함한 FLEX의 전략은 다음과 같이 정리할 수 있다¹⁾.

- 기본 사고대처 용량 설정: ELAP과 LOUHS가 동시에 발생했을 때 발전소에서 대처할 수 있는 사고 대처 용량을 설정한다.
- 극한 외부재해 선정: 부지에 발생가능한 극한 외부재해를 지진, 외부침수, 폭풍, 폭설, 폭염 5가지로 그룹화하여 선정하며 외부재해 발생 시 FLEX 설비의 이용 가능성도 함께 고려한다.
- 부지 특성 반영 FLEX 전략 설정: 외부재해 발생 시 FLEX 이용전략의 최적 전략을 설정한다. FLEX 설비들은 외부재해가 발생해도 안전하게 보호되어야 한다.
- 체계적 제어: 체계적인 FLEX 수행에 있어 고려할 사항은 다음과 같다. 대처능력, 설비 설계, 설비 보관, 사용 절차, 유지 보수, 훈련, 조직, 배열 제어 등
- 소외 자원 고려: 소외 가용자원들도 소내 자원들과 함께 효과적으로 고려해야 한다.

현재 미국에서는 각 원전마다 FLEX 이행계획서를 제출하고 이에 맞춰 FLEX 설비 및 전담조직, 절차, 훈련 등 계획을 이행하고 있다. 또한 NRC에 의해 계획서를 검토 및 업데이트 하여 최종 이행계획서를 제출하게 되며 NRC의 안전검토가 최종 완료되는 순으로 FLEX 대응 전략을 수립하고 있다.

2.2 국내 이동형 안전 설비

2015년 원자력안전법 개정이 되면서 전 원전에서 사고관리계획서를 작성 및 제출하도록 요구되었고 2016년 사고관리계획서 규제지침이 신규 재정되었다. 이러한 법제화에 따라 사고관리계획서 PSA 모델 개발이 요구되었고 이를 통해 법적 안전목표 및 규제기준 만족이 요구되었다. 기존 PSA 모델에서는 고정형 사고관리 설비 및 운전원 조치만을 다루었지만 사고관리계획서 PSA 모델에서는 설비개선을 반영하고 이동형 설비로 구성되어 있는 MACST 설비를 추가함으로써 신뢰도를 향상하는데 주력하였다. MACST 운영 고유 전략을 개발하고 MACST 설비 선정, 설비 적용을 위한 안전계통형상/설계 변경을 포함하여 MACST 통합보관고 및 전담조직, 절차, 교육 및 훈련 등을 개발하여 사고관리계획서에 반영 후 검토 작업이 이루어진다. MACST는 FLEX와 마찬가지로 극한자연재해로 다수기 부지 내 장기교류전원상실 사고와 최종열제거원상실 사고가 발생했을 때 필수안전기능을 유지 및 복구하기 위한 중

대사고 예방 전략 중 하나이며 냉각수 공급 및 전원 공급을 통해 사고 대응을 하게 된다. 냉각수 공급은 터빈 구동 보조급수펌프를 통해 증기발생기로 냉각수를 공급하는 증기발생기를 이용한 노심 냉각, 안전주입탱크 및 충전펌프를 이용한 노심 냉각수 공급으로 냉각재 충수 및 냉각, 기기냉각수계통 운전을 통한 정지냉각운전으로 장기 노심냉각등을 예로 들 수 있는데 기존 설비가 이용불능 시 이러한 냉각수 공급 라인으로 MACST 설비를 이용해 외부 주입을 하게 되면 안전기능을 확보할 수 있게 된다. 또한 소내외 전원, 비상디젤발전기 (Emergency diesel generator, EDG)를 통한 전원공급, 대체교류발전기 (Alternate alternating current DG, AAC-DG)를 통한 전원공급 등이 상실되면 MACST 설비인 이동형 발전차를 이용해 전원공급을 하여 전원 및 안전기능을 확보할 수 있게 된다. MACST 설비를 통한 대응 전략은 크게 3단계로 이루어지며 이는 FLEX도 동일하다.

- 1단계: 소내 고정형 설비를 이용한 노심냉각기능 확보 (~8시간): 1단계에서는 축전지 전원으로 전원공급이 이루어지며 터빈구동보조급수로 냉각이 이루어지기 때문에 축전지 가용시간을 늘리는 데 중점을 두고 있다. 비필수계통 부하차단을 통해 축전지 가용 시간을 연장하고 소용량 발전기를 배치하여 축전지 가용 시간을 늘린다.
- 2단계: 소내 이동형 설비를 이용한 노심냉각 유지 (~72시간): 2단계에서는 1단계 연장 조치로 1 MW 이동형 발전차를 이용해 사고 후 8시간 이전에 축전지를 충전하여 축전지 가용 시간을 좀 더 장기간으로 늘리며 저압이동형 펌프를 이용해 1차측 및 2차측으로 냉각수를 주입하여 증기발생기 냉각 기능을 유지하는데 중점을 두고 있다.
- 3단계: 소내 이동형 설비 및 소외 지원을 통한 장기노심냉각 (72시간~): 3단계에서는 지원 가능한 모든 소내외 설비를 사용하여 장기노심냉각을 하는 단계로 3.2 MW 대용량 이동형 발전차를 이용해 안전계통설비를 운영하고 최종열제거원 확보를 하게 된다. 또한 많은 냉각수원이 필요하므로 이동형 정수설비를 통해 냉각수를 확보해야 한다.

기본적으로 대부분의 MACST 설비의 부지 내 운영 전략은 FLEX와 마찬가지로 N+1 전략을 수립하고 있는데, 호기별로 1개 혹은 2개를 확보하며 부지 공용으로 1개를 추가 확보하고 있다. Table 1은 국내 MACST 이동형설비 목록 예시이다²⁾. 대부분 내진설계가 되어 있는 통합보관고에 보관되며 국내 원전 부지마다 통합보

Table 1. The list of MACST equipment²⁾

List	
Step 1	5.5 kW, 350 kW portable generator, Vehicle for communication, Lighting, Portable air compressor
Step 2	1 MW portable generator, Portable low pressure pump, Portable high pressure pump, Portable fan and duct, Portable refueling equipment
Step 3	3.2 MW portable generator, Portable water source
LOUHS	Portable high flow rate pump, Portable heat exchanger
Disaster (ex. Fire)	Portable high pressure spray
etc.	Vehicle for transport

관고는 이미 설치 완료되고 전담조직이 운영되고 있다.

국내에는 MACST를 운영하기 위해 다중방어운영지침서 (MACST operating guideline, MOG)를 FLEX 지원지침서(FLEX supporting guideline, FSG) 기반으로 개발하였고 이는 다중방어 및 광역손상에 대해 대처할 수 있도록 지침을 제공한다³⁾. 설계기준초과 사건이 발생하면 기본적으로 비상운전절차서를 이용하여 사고 완화를 수행하되, 기존 고정형 설비들의 실패로 이동형 설비를 운영하게 되면 MOG를 동시에 사용하여 발전소를 안전한 상태로 만들게 된다.

국내 MACST 설비를 이동/배치/연결 하기 위해 재해 대응안전센터를 신설 계획중에 있으며 비상 운영지원실 및 비상 기술지원실과 연락하여 사고를 효과적으로 대처하도록 계획중에 있다. 이러한 MACST를 운영하는 조직 체계 계획안으로는 현장 잔해물 제거, MACST 설비 이동, 배치 및 연결하는 재난대응안전센터, MACST 설비 이동, 배치 및 연결을 지원하는 MACST 지원조, 초기 도로 복구, 화재 진압 및 구호 활동을 하는 본부 소방대, 소내 비상통신설비 구축, MACST 설비 운전하는 현장 운전원으로 구성되어 있다⁴⁾.

현재 MACST에 대해서는 전략 수립이 진행중에 있고 여러 결정 사항들이 논의 중이기 때문에 아직까지 많은 연구가 수행되지 않는 상태이다. Kim⁵⁾은 FLEX와 MACST 설비의 배치 행위에 대해 인간신뢰도 분석을 수행하였는데, ELAP이 선언되고 이후 4.16 kV 이동형 발전기와 480 V 이동형 발전기를 배치시키는 운전원 조치들을 이동형 발전기의 사전배치, 소내 이동 및 배치, 소외 이동 및 배치 세 가지 사례분석을 통해 분석하였다. 각 사례마다 필요한 직무를 파악하고 인지오류 및 수행오류를 분석하여 인적오류확률을 평가하였다. Yoon⁶⁾은 다수기 부지 내 특정 호기에서 방사성 물질이 방출될 때 다른 호기에서 수행하고 있는 고정/이동형 안전 설비에 대한 운전원 행위의 영향을 PSA 모델을 통해 분석하였다. Park⁷⁾는 열수력분석 코드 MELCOR를

이용해 이동형펌프를 이용한 1, 2차 측으로의 외부주입에 따라 사고진행 완화 효과를 분석하였는데, 외부주입수행 시 원자로용기 손상을 지연시키는 것을 확인하였다. Park⁸⁾은 ELAP 선언 시 이용되는 4.16 kV 이동형 디젤발전기의 설계 특성을 분석하였으며 모터 기동으로 인한 전압 및 주파수 흔들림을 분석하여 큰 용량 기기에 선 전원 주입 및 작은 용량 기기에 후 전원 주입하는 방향이 안정적임을 확인하였다.

이처럼 MACST 관련 연구 문헌조사를 통해 최근 MACST 설비를 도입하고 활용하려 하는 노력들이 이루어지고 있으나 아직까지 MACST 설비활용 전략에 대한 연구는 활발하게 수행되지 않고 있는 현황을 파악할 수 있었다. 본 연구에서는 다수기 부지 내 이동형 설비의 최적화 전략 구축을 위한 선제연구로 기존 다수기 PSA 모델에 MACST 이동형 설비 모델을 추가하는 민감도 분석을 수행하였고 이를 3, 4장에서 간략하게 소개하도록 한다.

3. PSA 모델 기반 민감도 분석

다수기 부지내 한정된 MACST 설비를 효과적으로 사용하기 위해서는 이를 최적화하기 위한 전략이 필요하다. 거시적으로는 이동/고정형 안전 설비 사용을 위한 일반적인 Framework를 구축하고 각 부지 특성에 맞추어 이를 적용하는 방법 개발이 필요한데 이를 위해서 선제적으로 여러 요소별 민감도 평가를 수행하여 최적화 조건을 찾고, 향후 이를 근간으로 Framework를 구축할 계획이다. 이번 민감도 분석에서는 MACST 설비를 설치 및 이용하기 위한 경제성 분석이나 규제적인 측면 등 현실적인 이슈는 고려하지 않고 PSA를 통한 리스크 측면으로만 평가한다. 현실적인 가능성에 대한 평가는 추후 추가적으로 연구되어야 한다. 본 민감도 분석에서 사용된 모델은 기존 LOOP 초기사건 PSA 모델에 MACST 설비 모델을 적용하는 초기단계로 모델에 대한 가정사항도 많고 앞으로 구체화 시킬 것들이 많이 남아있다. 본 연구를 통해 PSA 모델을 이용하여 기초적인 insight들을 얻는다면 앞으로 개발될 구체화된 모델과 Framework를 적용하여 더 실질적이고 의미 있는 insight들을 얻는 데 도움을 줄 수 있을 것이다.

3.1 가정사항

본 연구에서는 이동형 설비인 MACST 설비 중 국내 다수기 소외전원상실사고 (Loss of Offsite Power, LOOP) 발생 시 추가 완화조치로 사용될 수 있는 기기들을 선별

하여 이를 기존 LOOP 사고 시나리오에 추가함으로써 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석을 통해 얻는 정량화 지표는 CCDP (Conditional core damage probability) 이며 이는 CDF를 초기사건으로 나눈 값을 의미한다. CCDP는 단일기 조건부 노심손상확률 (Single-unit CCDP, SU CCDP), 다수기 조건부 노심손상확률 (Multi-unit CCDP, MU CCDP), 그리고 부지 조건부 노심손상확률 (Site CCDP)와 같이 세 가지 종류로 구성된다. SU CCDP는 한 개 호기에서만 노심손상이 발생경우, MU CCDP는 두 개 이상의 호기에서 노심손상이 발생하는 경우, Site CCDP는 SU CCDP와 MU CCDP를 합한 부지 내 CCDP를 의미한다. 본 장에서는 MACST 설비 사용에 영향을 미칠 수 있는 세 가지 민감도 요소를 선정하여 이에 대해 민감도 분석을 수행하고 그 결과를 분석하여 앞으로 나아가야 할 방향을 제시하고자 한다. 본 장에서 다룰 세 가지 민감도 요소는 다음과 같다.

- 이동형 공유설비 우선순위
- 호기/부지별 이동형 설비 수
- 이동형 설비 운전원 종속성

위 민감도 분석을 위해서 기본 참조 PSA 모델이 필요하며 이와 관련하여 몇 가지 전제조건 및 가정사항은 다음과 같다.

- 대상 부지는 2개의 OPR 노형 원전과 2개의 APR 노형 원전을 갖고 있는 다수기 부지로 가정하였으며 민감도 분석을 위해 가상의 참조 PSA 모델을 사용하였다. 이들 호기의 명칭은 S1, S2, S3, S4로 정의한다.
- 분석 범위는 Level 1 PSA로 노심손상빈도에 대한 민감도 분석을 수행하였다.
- 초기사건은 다수기 부지 내 동시 발생하는 다수기 LOOP으로 가정하였다.

Table 2. The list of MACST used for sensitivity study

List	역할
Portable 1 MW generator	Supply power after failures of AAC-DG and EDG
Portable 3.2 MW generator	Supply power after failure of portable 1 MW generator
Portable low pressure pump	Inject water to steam generator after failure of secondary heat removal
Portable high flow rate pump	Spray water to containment after failure of long-term heat removal through containment spray

- 본 분석에서 사용되는 MACST 설비는 노심손상을 방지하기 위해 쓰이며 목록 및 역할은 다음 Table 2와 같이 가정한다. 이동형 1 MW 발전기는 EDG 및 AAC-DG가 상실되었을 때 대체 전원 공급수단이며 이동형 3.2 MW 발전기는 이동형 1 MW 발전기가 상실되었을 때 전원 공급수단이다.

위 세 가지 민감도 요소에 대한 기본모델 전제조건은 다음과 같이 가정한다.

① 이동형 공유설비 우선순위

공유설비의 경우 부지 내 한정된 자원을 갖고 있기 때문에 특정 호기에서 사용되면 이 외의 호기에서는 사용할 수 없다. 우선순위 전략은 각 호기의 노심손상 사고경위를 결정하며 이를 조합하여 SU CCDP, MU CCDP, 그리고 Site CCDP를 결정지을 수 있다. 공유설비는 호기별 안전계통 상실로 인한 사고의 진행상황이나 사고의 심각성에 따라 사용 우선순위가 정해지지만 본 연구는 이러한 호기별 동적 특성을 고려하지 않고 기존 PSA 모델에 이동형 설비만 추가하여 분석하였기 때문에 고정형 공유설비 AAC-DG의 우선순위는 정해놓고 이동형 설비들의 우선순위를 바꿔가며 민감도 분석을 수행하였다. AAC-DG의 경우 S1, S2는 한 개를 공유하고 있으며 S3, S4의 경우 호기별로 한 개씩 보유하고 있다고 가정한다.

- 공유 AAC-DG 우선순위: S1 > S2

② 호기/부지별 이동형 설비 개수

이동형 설비 수가 많을수록 사고완화 수단이 많아지고 결국 노심손상은 줄어들 것으로 예상되나 자원을 무작정 늘리는 것은 비용이 많이 들기 때문에 비용 대비 이동형 설비 수의 최적화가 필요하다. 본 민감도 분석에서는 비용은 고려하지 않고 설비 개수나 호기 간 공유설비 조합에 따른 노심손상빈도 증감의 정도를 분석하여, 추후 비용 대비 이동형 설비 개수 최적화 연구의 예비평가 자료로 사용할 예정이다. 기본모델(Base model)에서는 현재 국내 MACST 전략에 따라 Table 3과 같이 설비 개수 및 공유조합을 정하고 민감도 분석에서 이를 변화시켜가며 영향을 볼 예정이다.

③ 이동형 설비 운전원 종속성

이동형 설비 운영은 조직적으로 구성될 필요가 있으며 비상운영지원실, 비상기술지원실, 비상대책실 등 각 조직들의 역할 분담과 의사소통이 중요하지만 본 민감도 분석에서는 모델의 간단화를 위해 각 이동형 설비마

Table 3. The portable equipment deployed in a multi-unit site for a base model

	AAC-DG	Portable 1 MW Generator	Portable 3.2 MW Generator	Portable Low Pressure Pump	Portable High Flow Pump
Not shared	1 for S3 & 1 for S4	1 for each unit		2 for each unit	1 for each unit
Shared	1 for S1 and S2	1 for all units	2 for all units	1 for all units	1 for all units
Total	3 in a site	5 in a site	2 in a site	9 in a site	5 in a site

다 하나의 운전원 행위만 고려했다. 이동형 설비를 위한 조직은 각 호기별로 동시에 운용하기에 충분하도록 가정하였고 기본모델에서는 Twin-unit (S1&S2, S3&S4) 간 운전원 행위가 중속성을 갖는다고 가정하였다.

3.2 PSA 민감도 모델

다수기 PSA 모델은 LOOP 사건수목 (Event Tree, ET) 과 시스템 고장수목 (Fault Tree, FT)으로 구성되어 있는 단일기 PSA 모델을 One-top으로 만든 뒤 구성된 네 개의 One-top을 Fig. 2와 같이 하나의 Top으로 재구성하여 다수기 PSA 모델을 구축하였다. Top 게이트는 한 개 호기에서부터 네 개 호기까지 노심손상 일어나는 게이트들의 합 (OR)으로 구성되며 각 게이트에는 태그(#) 이벤트를 고려하여 서로 섞이지 않도록 구분한다.

Fig. 3은 LOOP 초기사건 발생 시 사용되는 완화 계통을 포함한 사고경위의 한 예를 보여준다. LOOP 사고가 발생 후 EDG가 실패하면 발전소 정전사고(Station Blackout, SBO)로 진행되고 2차측 열제거가 수행되는데 기존에는 터빈구동펌프만을 이용하여 수행하는데 본 연구에서는 이동형 저압펌프를 통한 증기발생기 열제거를 추가하였다. 이후 AAC-DG가 실패하면 1 MW 이동형 발전기와 3.2 MW 이동형 발전기가 차례로 사용된다. 이 이동형 설비마저 다 실패한다면 소외전원을 반드시 회복시켜야 하며 소외전원이 회복되어 전력 공급에 성공하면 일방관류 냉각을 수행한다. 마지막으로

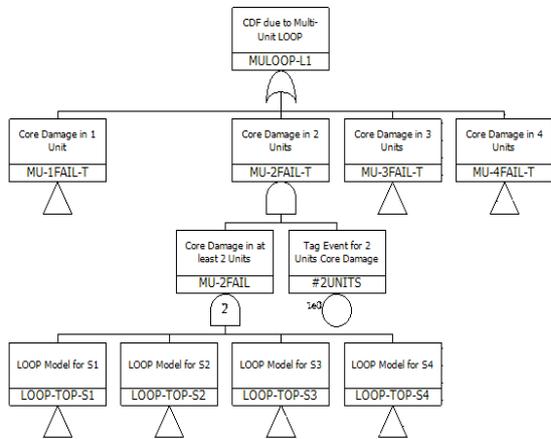


Fig. 2. One-top logic for a multi-unit LOOP model.

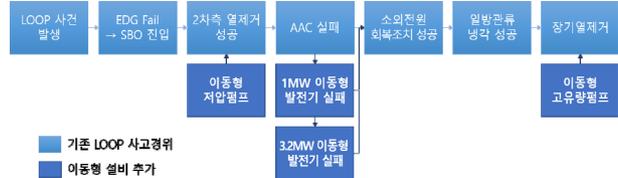


Fig. 3. Typical accident sequence during LOOP initiating event.

격납건물 내 압력을 조절하기 위한 격납건물 살수계통을 통한 장기열제거를 수행하는데 이 때 이동형 고유압펌프를 이용한 추가 살수를 고려하게 된다.

부지 내 공유 이동형 설비의 호기 간 우선순위를 Fig. 4와 같이 FT 내 OR 게이트를 통해 모델에 반영하였다. 예를 들어 공유하고 있는 1 MW 이동형 발전기의 우선순위가 S1 > S2라면, S2 공유 1 MW 이동형 발전기 실패 게이트 (Fig.4의 S2-GMT-PMGC) 에 S1 SBO 발생 (Fig. 4의 G-U1-SBO) & AAC-DG 실패 (Fig. 4의 G-U1-AAC) & 독립 1 MW 이동형 발전기 실패 (Fig. 4의 S1-GMT-PMGA) 로직을 OR 게이트로 고려하면 S1에서 해당로직이 발생할 때 (보라색 표시) S1에서 우선적으로 공유 1 MW 이동형 발전기가 사용되기 때문에 S2에서는 공유 1 MW 이동형 발전기가 사용될 수 없다.

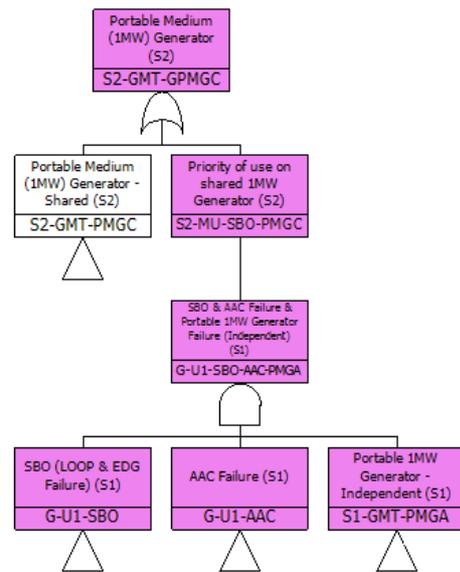


Fig. 4. Failure logic of Shared 1 MW Generator at S2.

공통원인고장(Common Cause Failure, CCF)은 이동형 설비가 통합보관고에 보관되어 있다는 가정하에 같은 종류 및 용량의 기기들의 수만큼 고려해 주었고 alpha factor를 이용하여 모델링 하였으며 Alpha factor에 쓰이는 모수들은 NUREG/CR-5485⁴⁾에 있는 Generic 모수를 사용하였다. 이때 기기의 수가 많아질수록 CCF 이벤트 수는 2ⁿ 수준으로 급격하게 늘어나기 때문에 정량화 시간이 오래 걸리거나 불가능하게 된다. 이에 따라 이번 민감도 분석에서는 부지 내 9개 기기가 있는 저압 이동형 펌프의 경우 한 개 호기에 한 개의 저압 이동형 펌프가 있다고 가정하여 총 5개의 저압 이동형 펌프에 대한 CCF로 가정하여 모델하였다.

4. 모델 결과 분석

민감도 분석을 위한 정량화는 AIMS-PSA 소프트웨어⁹⁾를 이용해 수행하였고 CDF의 cutoff는 1E-14로 설정하였다. 민감도 분석을 수행하기 전에 사고 완화계통으로서 MACST 설비가 LOOP 초기사건 발생 시 노심손상빈도에 미치는 영향을 살펴보면 Table 4와 같다. MACST를 추가함에 따라 단일기 CCDP (=CDF/초기사건빈도) 와 부지 CCDP는 약 70% 가량 감소하였으며 다수기 CCDP는 98% 감소 효과를 나타냈다. 이로 인해

Table 4. Conditional core damage probability according to whether MACST is considered or not

	SU CCDP	MU CCDP	Site CCDP
MACST X	4.29E-04	1.45E-05	4.43E-04
MACST O	1.20E-04	3.15E-07	1.20E-04
Reduction Ratio	72.1%	97.8%	72.9%

Table 5. The priority of use on portable equipment

	Sen 1. The priority of use on portable equipment				
	Portable 1 MW Generator (Shared)	Portable 3.2 MW Generator A	Portable 3.2 MW Generator B	Portable Low Pressure Pump (Shared)	Portable High Flow Pump (Shared)
Sen 1-1	S1 > S2 > S3 > S4	S1 > S2 > S3 > S4	S1 > S2 > S3 > S4	S1 > S2 > S3 > S4	S1 > S2 > S3 > S4
Sen 1-2	S2 > S1 > S3 > S4	-	-	-	-
Sen 1-3	-	S2 > S1 > S3 > S4	-	-	-
Sen 1-4	-	S2 > S1 > S3 > S4	S2 > S1 > S3 > S4	-	-
Sen 1-5	-	-	-	S2 > S1 > S3 > S4	-
Sen 1-6	-	-	-	-	S2 > S1 > S3 > S4
Sen 1-7	S2 > S1 > S3 > S4	S2 > S1 > S3 > S4	-	-	-
Sen 1-8	S2 > S1 > S3 > S4	S2 > S1 > S3 > S4	S2 > S1 > S3 > S4	-	-
Sen 1-9	S2 > S1 > S3 > S4	S2 > S1 > S4 > S3	-	-	-
Sen 1-10	S2 > S1 > S3 > S4	S2 > S1 > S4 > S3	S1 > S2 > S4 > S3	-	-

- means the condition " S1 > S2 > S3 > S4 "

MACST 설비의 사고완화 효과를 확인할 수 있으며 특히 다수기 CCDP는 눈에 띄게 감소하였다.

① 이동형 공유설비 우선순위

이동형 공유설비 우선순위의 민감도 분석 조건은 Table 5와 같다. S3, S4는 AAC-DG를 한 대씩 보유하고 있기 때문에 AAC-DG를 공유하고 있는 S1, S2의 이동형 설비 우선순위를 높게 두었다. Sen 1-1은 모든 이동형 설비에 대해 S1>S2>S3>S4의 우선순위를 갖는다고 가정하였고 이 조건을 바꿔가며 민감도 분석을 수행하였다. Table 5의 Sen 1-1을 제외하고 S1>S2>S3>S4의 우선순위를 갖는 조건들은 “ - ”로 표기하였다. Sen 1-2에서 Sen 1-6까지는 공유설비 하나씩 우선순위를 S2>S1으로 두면서 민감도 분석을 수행하였고 그 결과를 토대로 Sen 1-7에서 Sen 1-10까지 민감도 분석을 수행 하였다.

Sen 1-1 ~ Sen 1-6의 다수기 CCDP (MU CCDP)와 부지 CCDP (Site CCDP)는 Fig. 4와 같다. 이 결과들은 눈에 띄는 결과를 보이진 않지만 PSA 모델, 초기사건 종류, MACST 모델 구성 등에 따라 다른 결과를 보일 수 있기에 각 결과가 나온 원인을 파악하여 모델의 정당성을 확보하였다. 파란색 막대는 좌측 세로축, 다수기 CCDP에 해당하며 노란색 막대는 우측 세로축, 부지 CCDP에 해당한다. 공유 1 MW 이동형 발전기와 공유 3.2 MW 이동형 발전기 1개만 S2 우선순위를 갖는 Sen 1-3의 조건에서 다수기 CCDP 및 부지 CCDP가 최소화 되는 것을 볼 수 있다. 이를 S1, S2 두 호기별 CCDP로 보면 Fig. 5와 같다. 파란색 막대는 S1, 노란색 막대는 S2에 해당하며 Sen 1-1은 모든 설비가 S1 우선순위에 있기 때문에 하나의 설비에 S2 우선순위를 설정한

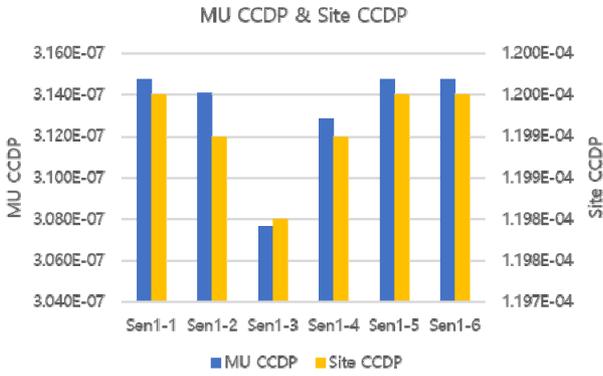


Fig. 4. MU CCDP and site CCDP for Sen 1-1 ~ Sen 1-6.

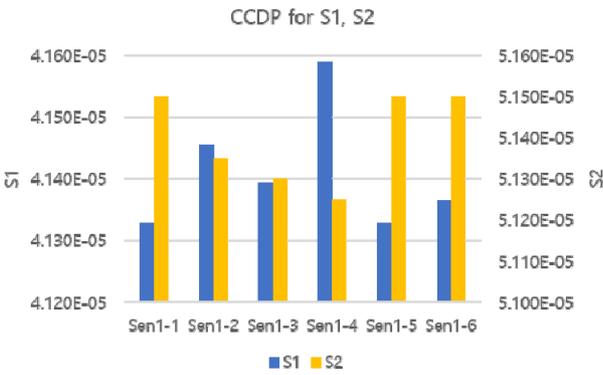


Fig. 5. CCDP of S1 and S2 for Sen 1-1 ~ Sen 1-6.

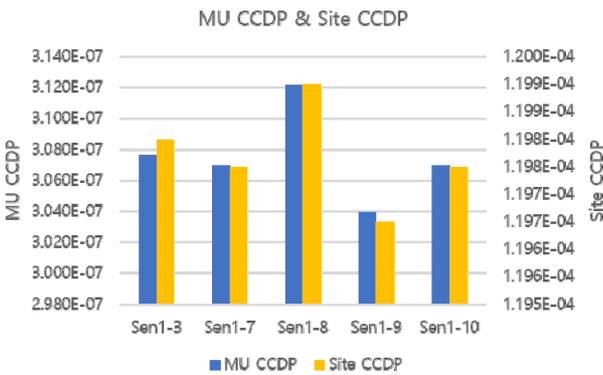


Fig. 6. MU CCDP and site CCDP for Sen 1-3, Sen 1-7 ~ Sen 1-10.

다른 조건 (Sen 1-2 ~ Sen 1-6)들에 비해 S1 CCDP가 가장 낮고 S2 CCDP가 가장 높다. Sen 1-1에 비해 S2의 CCDP가 가장 감소하는 조건은 Sen 1-4이지만 반면 S1의 CCDP가 크게 증가하게 된다. S1 CCDP 증가와 S2 CCDP 감소를 고려하였을 때 Sen 1-3이 가장 최적의 조건으로 판단할 수 있다. 이 결과를 정리하면 다음과 같다.

- Sen 1-2와 Sen 1-3의 비교를 통해 3.2 MW 발전기

의 우선순위가 더 중요한 것을 알 수 있는데 1 MW 발전기의 경우 호기별 1개씩 보유하고 있기 때문에 부지 내 공유 1 MW 발전기의 중요성이 상대적으로 떨어지고 부지 내 공유설비밖에 없는 3.2 MW 발전기의 중요성이 상대적으로 크다.

- Sen 1-3과 Sen 1-4의 비교를 통해 두 개의 공유 3.2 MW 발전기는 한 개씩 호기별 우선순위를 나누어야 효율적임을 알 수 있다.
- Sen 1-5와 Sen 1-6의 경우 우선순위에 의한 영향이 거의 없는데, 이동형 저압펌프의 경우 호기별로 두 개씩 보유하고 있기 때문에 부지 내 한 대의 공유 펌프는 영향이 거의 없으며, 이동형 고유량펌프는 호기별로 보유하고 있는 두 계열의 격납건물 잔열 제거계통이 실패했을 때의 다중계통이며 호기별로 한 개씩 이동형 고유량펌프를 보유하고 있기 때문에 공유계통의 중요성은 낮다.

Sen 1-7과 Sen 1-8은 앞의 Sen 1-2 ~ Sen 1-4의 조건을 혼합하여 만든 조건이며 Sen 1-9와 Sen 1-10은 S3, S4의 우선순위를 변경한 조건이다. Sen 1-7 ~ Sen 1-10의 결과를 가장 낮은 CCDP를 보여준 Sen 1-3과 비교하면 Fig. 6과 같다. 이를 통한 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- Sen 1-3과 Sen 1-7의 비교를 통해 AAC-DG의 우선순위가 S1>S2 이면 공유 1 MW 발전기는 그와 반대인 S2>S1이 노심손상 감소에 효율적인 전략임을 알 수 있다. 이는 앞서 Sen 1-1과 Sen 1-2의 비교결과와 유사하며, Sen 1-7이 Sen 1-3과 비교하여 S1 CCDP는 증가하고 S2 CCDP는 감소하는 결과가 나왔는데 감소하는 부분이 더 커서 전체적인 다수기 CCDP가 감소하였다.
- Sen 1-7과 Sen 1-9의 비교를 통해 두 개의 공유 3.2 MW 발전기는 S3, S4의 경우도 한 개씩 호기별 우선순위를 나누어야 효율적임을 알 수 있다 (S1, S2와 동일). Sen 1-9가 Sen 1-7에 비해 S3 CCDP는 증가하지만 S4 CCDP가 감소하는데 감소량이 더 크기 때문에 전체적인 다수기 및 부지 CCDP가 작아진다.
- 본 민감도 분석에서는 Sen 1-9가 다수기 CCDP와 부지 CCDP가 최소인 것으로 보아 LOOP 초기사건 발생 시 우선순위 최적 조건이다.

② 호기/부지별 이동형 설비 개수

호기/부지별 이동형 설비 개수의 분석 조건은 Table 6

Table 6. The number of portable equipment in a multi-unit site

Sen 2. The number of portable equipment		
	Portable 1 MW Generator	Portable 3.2 MW Generator
Sen 1-9 (Base)	1 for each unit 1 for all units (shared)	2 for all units (shared)
Sen 2-1	1 for each unit 2 for all units (shared)	-
Sen 2-2	2 for S1 & 2 for S2 1 for S3 & 1 for S4 1 for all units (shared)	-
Sen 2-3	2 for each unit 1 for all units (shared)	-
Sen 2-4	-	3 for all units (shared)
Sen 2-5	-	1 for each unit 1 for all units (shared)

- means the condition which is same with Sen 1-9

과 같으며 설비 개수 뿐만 아니라 부지 내 공유 조합도 고려한다. 이 때 공유설비 우선순위는 가장 CCDP가 작은 Sen 1-9 (Table 5 참조)의 우선순위이며 Sen 1-9에서 고려한 이동형 설비 개수를 Base로 하고 민감도 분석을 수행하였다. Table 6 내 “-”의 의미는 Base와 같은 조건을 의미하며 이동형 저압펌프 및 이동형 고유량펌프는 중요도가 낮기 때문에 민감도 분석항목으로 고려하지 않았다. Sen 2-1은 공유하고 있는 1 MW 발전기를 부지 내 한 개 추가한 조건이고 Sen 2-2는 S1, S2에만 1 MW 발전기 한 개씩 추가이며 Sen 2-3은 모든 호기에 1 MW 발전기를 한 개씩 추가한 조건이다. Sen 2-4는 부지 내 공유하는 3.2 MW 발전기 한 개 추가, Sen 2-5는 부지 내 공유하는 3.2 MW 발전기를 한 개 줄이고 대신 모든 호기에 3.2 MW 발전기를 한 개씩 추가한 조건이다. 1 MW 발전기의 경우 부지 내 개수가 많아짐으로 인한 CCF도 기기수를 늘려가며 평가해야 하지만 앞서 언급했듯이 공동원인고장그룹 수가 많아지면 정량화가 불가능한 수준으로 모델이 커지기 때문에 기존 Base 모델에 사용된 CCF (총 5개 1 MW 발전기의 alpha factor)와 동일한 CCF를 사용하도록 가정하였다.

Fig. 7은 Sen 2-1 ~ Sen 2-5의 다수기 CCDP 및 부지 CCDP를 Sen 1-9와 비교하여 보여주고 있다. Sen 2-3 조건이 가장 작은 CCDP를 갖는 최적의 조건을 보여주며 이로 인해 알 수 있는 사항은 다음과 같다.

- Sen 2-1과 Sen 2-2의 비교를 통해 부지 공유 1 MW 발전기 한 개 추가가 S1, S2에 각각 1 MW 발전기를 추가하는 것보다 노심손상 감소에 효율적임을 알 수 있다. 공유 발전기 한 개는 S1~S4 모두 추가적으로 사용될 수 있으며 S1~S4의 CCDP를 모두

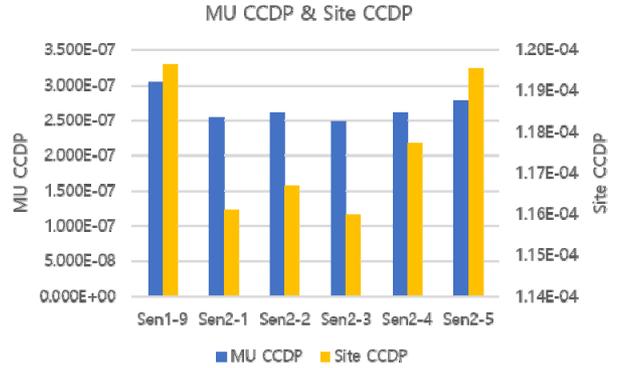


Fig. 7. MU CCDP and site CCDP for Sen 1-9, Sen 2-1 ~ Sen 2-5.

- 감소시킨다. S1, S2에 각각 한 개씩 추가하는 것은 S1, S2의 CCDP를 집중적으로 감소시키지만 S3, S4에는 영향이 없다. 이 감소량을 비교했을 때 공유 발전기 한 개가 더 총 CCDP 감소에 효과적이었다.
- 반면 Sen 2-1과 Sen 2-3의 비교를 통해 부지 내 모든 호기에 1 MW 발전기를 한 개씩 추가하면 부지 공유 1 MW 발전기 한 개 추가하는 것보다 노심손상 감소에 효율적임을 알 수 있다. 다만 모든 호기에 발전기를 한 개씩 추가하면 총 네 개가 추가되므로 이에 수반되는 비용은 따로 고려되어야 한다.
- Sen 2-1과 Sen 2-4의 비교를 통해 부지 공유 1 MW 발전기를 한 개 추가하는 것이 부지 공유 3.2 MW 발전기를 한 개 추가하는 것보다 노심손상 감소에 효율적임을 알 수 있다. 원래 3.2 MW 발전기가 더 많은 기기에 공급을 할 수 있으나 본 민감도 분석에서는 1 MW 발전기의 대체수단으로 3.2 MW 발전기로 가정하였기 때문에 1 MW 발전기가 더 큰 영향을 미치는 것으로 나왔다.
- 본 모델의 경우 이동형 발전기 추가에 따른 감소 효과가 Sen 1-9에 비해 부지 CCDP 기준 최대 3%로 크지 않은 것을 확인할 수 있었다. 하지만 이동형 발전기 추가에 따른 감소 효과는 분석 모델에 따라 다르므로 다른 모델을 사용할 경우 효과의 정도는 달라질 수 있다.

③ 이동형 설비 운전원 종속성

이동형 설비 운전원 종속성 분석 조건은 Table 7과 같으며 마찬가지로 공유설비 우선순위와 이동형 설비 개수는 Sen 1-9 조건을 바탕으로 수행하였다. 이 PSA 모델에서는 이동형 설비에 대한 운전원 조치 실패사건의 중요도가 굉장히 낮게 평가 (FV<0.002)되고 있기 때문에, 운전원 종속성의 민감도 영향을 보기 위해서 각 이동형 설비 운전원 조치 실패 확률을 기존에 비해

Table 7. Dependency of operator actions in a multi-unit site

Sen 3. Dependency of operator actions	
Sen 1-9 (Base)	Dependent between twin-unit (S1&S2, S3&S4)
Sen 3-1	Independent (all units)
Sen 3-2	Dependent (all units)

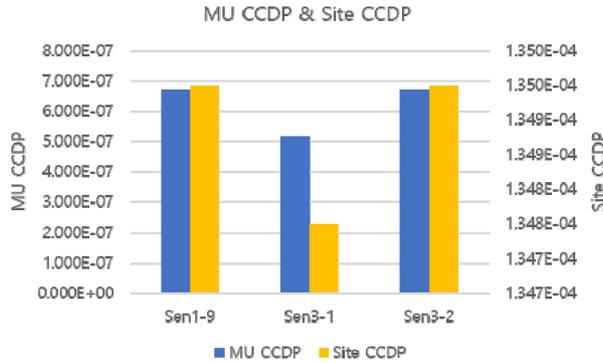


Fig. 8. MU CCDP and site CCDP for Sen 1-9, Sen 3-1, and Sen 3-2.

약 25배 상승시킨 0.1로 가정하고 민감도 분석을 수행하였다. 앞서 3.1에서 언급하였듯이 운전원 행위는 이동형 설비당 하나의 운전원 행위만 모델 하였다.

Sen 3-1과 Sen 3-2에 대한 다수기 CCDP 및 부지 CCDP는 Sen 1-9와 비교하여 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 이로 인해 얻을 수 있는 결과를 정리하면 다음과 같다.

- Sen 1-9와 Sen 3-1의 비교를 통해 호기별 운전원을 독립시키면 부지 CCDP는 약 0.15% 감소로 거의 변화가 없지만 다수기 CCDP 측면에서는 약 23% 감소로 큰 효과를 볼 수 있다.
- Sen 1-9와 Sen 3-2의 차이가 없는 것은 본 모델의 다수기 노심손상 최소단절집합을 분석하면 전부 Twin-unit간 (S1&S2, S3&S4) 두 개 호기 노심손상으로 이루어져 있기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 최근 다수기 부지 내 리스크 저감을 위한 노력으로 도입된 이동형 설비로 국외 대표적인 이동형 설비 FLEX (Diverse and flexible coping strategies) 와 국내 대표적인 이동형 설비 MACST (Multi-barrier accident coping strategy)에 대해 운영현황을 정리하였다. 또한 이동형 설비의 최적 운영 전략구축을 위한 예비평가로 가상의 다수기 확률론적안전성평가 (Probabilistic

safety assessment, PSA) 모델을 통한 MACST 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석은 부지 내 공유기기 이동형 설비 우선순위, 부지 내 이동형 설비 개수, 부지 내 운전원행위 종속성에 대해 조건을 변화시켜가며 수행하였다. 이를 위해 가상의 다수기 PSA 모델을 사용했으며 다수기 소외전원 상실사고 발생 시 사고완화를 위해 사용된 MACST 설비는 1 MW 이동형 발전기, 3.2 MW 이동형 발전기, 이동형 저압펌프, 이동형 고유량펌프를 고려하였다. 위 세 가지 요소들의 조건을 변화시켜가며 조건부 노심손상확률 (Conditional core damage probability, CCDP)를 정량화하여 다수기 CCDP와 부지 CCDP가 가장 작은 최적의 조건들을 찾아냄으로써 부지 특성을 반영한 운영 전략 구축을 위한 예비평가 결과를 제시하였다.

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) Nuclear Energy institute, Diverse and Flexible Coping Strategies (FLEX) Implementation Guide, NEI 12-06 [Rev 0], 2012.
- 2) S.-T. Yang, “The Follow-up Status of Accident Management Plan of Nuclear Operators”, Workshop on Korean Nuclear Society Autumn Meeting, 2019.
- 3) J. M. Park, E. S. Kim, H. B. Yim, C. G. Lee, K. S. Sung, M. H. Lee, C. E. Park and G. C. Lee, “A Current Development Status of the Beyond Design Basis External Events Coping Strategies: MACST Operating Guidelines”, Journal of Power Engineering, 2018.
- 4) S.-T. Yang, The Current Status and Plan of AMP-ST of Nuclear Operators, Workshop on Korean Nuclear Society Autumn Meeting, 2018.
- 5) J. Kim, W. Jung and J. Park, “Human Reliability Analysis of the FLEX/MACST Actions deploying Portable Equipment”, Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, 2018.
- 6) J. Y. Yoon and D. S. Kim, “Estimating the Adverse Effects of Inter-unit Radioactive Release on Operator Actions at a Multi-unit Site”, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 228, 2022.

- 7) Y. Park, S. Kim, Y. Jin, D. H. Kim and M. Jae, "Evaluation for Accident Mitigation Effect of External Injection at WH600 using MELCOR", Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, pp. 1-4, 2020.
- 8) J.-K. Park, J.-D. Lee, H.-S. Jang and H.-S. Park, "Analysis of Mobile Diesel Generator Operation to cope with Extended Loss of all AC Power in Nuclear Power Plant", 53rd International Universities Power Engineering Conference, pp. 4-7, 2018.
- 9) S. H. Han, K. Oh, H.-G. Lim and J.-E. Yang, AIMS-MUPSA Software Package for Multi-unit PSA, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 50 pp. 1255-1265, 2018.