Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 4, pp. 455-461, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.4.455

Original article

원전 중대사고 시 보조건물 내 작업자 선량평가를 위한 방사선 환경 분석

김준혁[1] · 김병조[1] · 배진형[1,*]

[1]한국전력기술 원전기술연구소

Analysis of Radiation Environment for Dose Evaluation to Workers in Auxiliary Building of Nuclear Power Plants during Severe Accidents

Jun Hyeok Kim[1], Byung Jo Kim[1], and Jin Hyoung Bai[1,*]

[1]KEPCO E&C, Nuclear Technology Research Dept., 269 Hyeoksin-ro, Gimcheon-si 39660, Republic of Korea

ABSTRACT In During severe accidents at nuclear power plants, field operations performed by workers in auxiliary buildings play a critical role in accident mitigation. Quantitative evaluation of the radiation environment in these areas is essential for accurate worker dose assessment and radiation safety. In this study, five representative worker actions were derived from the Severe Accident Management Guidelines (SAMG), and three representative severe accident scenarios—LBLOCA, SBO, and LOFW—were selected. The MAAP5.06 code was used to calculate radiation source terms for nine major compartments in the auxiliary building, reflecting worker's paths and action timelines. Airborne source terms were evaluated for Xe and I, while deposited source terms were analyzed for Mo, I, Cs, and Te; Xenon and Iodine were chosen as representative nuclides. The analysis, performed for a time range of 0 to 90,000 seconds after accident onset, showed that airborne Xenon concentrations were similar among scenarios, while deposited Iodine levels varied significantly, with the highest values observed in the LOFW scenario. All scenarios exhibited lower source terms in the basement (55 ft) compared to upper floors, and non-uniform spatial distributions across compartments. The results highlight that the radiation environment within the auxiliary building exhibits distinct temporal and spatial variations depending on the accident scenario. The primary objective of this study is to generate compartment-specific radiation source term data in a format directly applicable to high-fidelity dose assessment codes. The evaluated source terms are provided in units of $kg \cdot m^{-3}$ (airborne) and $kg \cdot m^{-2}$ (deposited), ensuring compatibility with MCNP6 and Dose-Sim. These data serve as essential input for future worker dose simulations and can support the development of an ALARA-based decision support system for radiation exposure prediction and diagnosis during severe accidents.

Key words: Workers, Radiation Source Term, MAAP5.06, Severe Accident, Auxiliary Building

1. 서 론

원자력발전소에서 중대사고 발생 시 원자로건물의 상태 제어는 주로 주제어실의 운전원이 원격으로 수행하지만, 보조건물 내에서 수행되는 작업자의 현장 조치 또한 사고 완화에 중요한 역할을 한다. 중대사고관리지침서(SAMG)는 보조건물 내에서도 작업자의 조치를 요구하고 있으며, 일부 조치는 가혹한 방사선 환경에서 수행될 수 있다. 이로 인해 작업자 피폭 가능성에 대한 평가와 정량적 방사선 환경 평가가 필수적이다.

기존 연구[1]에서는 새울 1,2호기를 대상으로 대표적인 중대사고 경위를 설정하고, SAMG에 기반한 작업자 조치사항을 바탕으로 작업자의 이동 경로를 정의한 뒤, MAAP5.06 코드[2]와 내장 DOSE 모듈[3]을 활용하여 피폭선량을 정량적으로 평가하는 방법론을 개발하였다.

본 연구는 이러한 선행 연구를 기반으로, 중대사고 시 보조건물 내 고정밀 선량평가를 위한 전산코드 입력자료 생성을 주요

ISSN 1976-2402 **http://www.ksri.kr/**

Copyright© 2025 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Jin Hyoung Bai
Tel: +82-54-421-4512, Fax: +82-54-421-4051, E-mail: jhbai@kepco-enc.com

Received 14 November 2025 **Revised** 18 November 2025 **Accepted** 20 November 2025

목적으로 한다. 이를 위해 동일한 사고 시나리오를 적용하되, 보다 넓은 범위의 보조건물 영역을 반영할 수 있도록 작업자 조치사항을 재정의하였으며, 각 조치별 이동경로를 기반으로 보조건물 내부를 세분화한 격실 모델을 구성하였다. MAAP5.06 코드를 이용하여 격실별 방사선원항을 도출하고, 침적형 핵종(Mo, I, Cs, Te) 및 기체 확산형 핵종(Xe, I)에 대해 각각 단위 면적당 침적량($kg \cdot m^{-2}$) 및 단위 체적당 농도($kg \cdot m^{-3}$) 형태로 정량화하여, MCNP6 [4] 또는 Dose-Sim [5]과 같은 고정밀 선량평가 코드에 직접 입력 가능한 형태의 자료를 생성하였다.

본 연구에서 생성된 방사선원항 자료는 향후 고정밀 선량평가를 통한 작업자 피폭 분석 및 방사선 방호 전략 수립에 활용될 수 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 사고 경위 선정

본 연구에서는 중대사고 대표 사고경위 및 방사선원항을 도출하기 위해, 규제기관의 규제지침 KINS/RG-N16.04, "사고 영향의 평가"에 제시된 평가 방법론을 적용하였다[6]. 본 연구에서는 1단계 확률론적안전성평가(PSA) 결과를 기반으로 한 확률론적 사고 경위와 원자로건물 대기 중 선원항 관점에서 보수성을 고려한 결정론적 사고 경위를 종합적으로 고려하여, 다음의 세 가지 사고 경위를 선정하였다.

Table 1. Severe Accident Sequence

No.	Severe Accident Scenarios
1	LLOCA: SIT failure - SIS failure - 3-way valve success - Reactor Cavity Flooding success - Containment Spray System failure - ECSBS, IVI success 24 hours after LLOCA - Recirculation Operation success 72 hours after LLOCA
2	SBO: AACDG failure - TDAFW failure - RCP sealing success - Power Restoration failure - Containment Isolation success - 3-way valve success - Rapid Depressurization failure - External Injection to Secondary System failure - Power Restoration before Reactor Vessel Failure failure - Reactor Cavity Flooding System success - Containment Spray System failure - ECSBS, IVI success 24 hours after SBO - Power Restoration and Recirculation Operation success 72 hours after SBO - Hydrogen Ignitor failure
3	LOFW: TDAFW failure - MDAFW failure - SIS failure - SIT operation success - Safety Depressurization & 3-way Valve Operation success - Reactor Cavity Flooding System success - Containment Spray System failure - ECSBS, IVI success 24 hours after LOFW - Recirculation Operation success 72 hours after LOFW

* LLOCA: Large break Loss of Coolant Accident
SIT: Safety Injection Tank
SIS: Safety Injection System
ECSBS: Emergency Containment Spray Backup System
IVI: In-vessel Injection
SBO: Station Blackout
AACDG: Alternate AC Diesel Generator
LOFW: Loss of Feedwater
TDAFW: Turbine Driven Auxiliary Feedwater
RCP: Reactor Coolant Pump
MDAFW: Motor Driven Auxiliary Feedwater

2.2. 작업자 조치사항 도출

2.2.1. 작업자 조치사항 1: 수소점화기 점등 확인

새울 1·2호기의 SAMG [7]에 따르면, 원자로건물 내 수소 누적으로 인한 위험을 방지하기 위해 수소점화기의 정상 운전 여부를 확인하는 절차가 요구된다. 중대사고시 수소 위협을 예방하기 위해, 전기관통부격실(137-A11D) 내 현장패널을 통해 개별 수소점화기의 적색 점등 상태를 확인하는 절차를 작업자의 조치사항으로 선정하였다.

2.2.2. 작업자 조치사항 2: 원자로건물 관통부 세정

SAMG에서는 원자로건물 관통부를 통해 핵분열생성물이 방출될 경우, 이들이 보조건물로 확산되는 것을 억제하기 위해 이동형 살수차 또는 소방 호스를 이용하여 관통부 주변에 살수를 실시함으로써 핵분열생성물을 제거(세정)할 것을 요구하고 있다. 기계관통부격실(120-A16B) 내 다수의 원자로건물 관통부 중 하나에서 밀봉재의 성능 상실로 인해 가상의 방사성물질 누출 사고가 발생할 경우, 작업자는 인근 일반접근구역(120-A31B)에 설치된 소방 호스를 활용하여 누출이 발생한 관통부를 향해 살수 조치를 수행해야 한다.

2.2.3. 작업자 조치사항 3: IRWST 수위 대체 계측

SAMG에서는 원자로건물내재장전수탱크(In-containment Refueling Water Storage Tank, IRWST) 수위 계기 작동 여부와 IRWST 수위를 확인할 것을 요구하고 있다. IRWST 수위 계기가 오작동하여 주제어실에서 IRWST 수위 감시가 불가능한 경우, 광역손상완화지침서(EDMG)에 기술되어 있는 대체 계측을 수행하여 IRWST 수위를 확인할 수 있다. IRWST 수위 계측기는 일반접근구역(055-A19B, 055-A35A)에 위치하고 있으며 일반접근구역(055-A35A)에 위치한 계측기를 이용하여 대체 계측을 수행하는 것을 작업자 조치사항으로 선정하였다.

2.2.4. 작업자 조치사항 4: 원자로건물 광역압력 대체 계측

SAMG에서는 발전소 중대위협 변수가 설정치를 초과할 때에는 해당 변수를 설정치 이하로 낮출 수 있는 해당 완화지침을 우선적으로 수행해야하며, 이러한 발전소 중대위협 변수는 반드시 연속적으로 감시할 것을 요구하고 있다. 원자로건물 광역압력은

발전소 중대위협 변수 중 하나로 원자로건물 광역압력 계기가 오작동하여 주제어실에서 원자로건물 광역압력 감시가 불가능한 경우 , EDMG에 기술되어 있는 대체 계측을 수행하여 원자로건물 광역압력을 확인할 수 있다. 원자로건물 광역압력 계측기는 일반접근구역(120-A20A, 120-A31B, 100-A37B)에 위치하고 있으며 일반접근구역(120-A20A)에 위치한 계측기를 이용하여 대체 계측을 수행하는 것을 작업자 조치사항으로 선정하였다.

2.2.5. 작업자 조치사항 5: 이동형펌프차 외부주입유로 점검

중대사고 상황에서 원자로냉각재계통 냉각수 주입이 필요할 경우 이동형 펌프차 외부주입유로 이용 가능성을 확인하고, 원자로냉각재계통에 냉각수를 주입할 수 있는 수단의 사용이 불가능하다면 그 원인을 밝힐 것을 요구하고 있다.

새울 1호기에는 중대사고를 예방하고 완화하기 위해 고압 및 저압 이동형 펌프를 통한 원자로냉각재계통의 외부주입유로가 일반접근구역(100-A37B)에서 기계관통부격실(100-A13B)에 이르기까지 위치하고 있다. 이동형 펌프를 이용하여 원자로냉각재계통 냉각수 주입을 시도하였으나 알 수 없는 원인으로 실패하는 경우, 작업자는 보조건물로 진입하여 외부주입유로 및 밸브 점검을 통해 그 원인을 파악할 필요가 있다.

Table 2. Severe Accident Sequence

Time	Event	Remark
0	Initial event	
86,400 (24 hours)	Enter 100’ Quadrant B from Compound building	
86,406	Enter 100’ Quadrant D	(1)
86,558	Enter 137’ Quadrant D	(2)
86,569	Enter Room 137-A11D	
86,709	Exit Room 137-A11D	
86,841	Exit 137’ Quadrant D	(1)
86,873	Exit 100’ Quadrant D	
86,878	Exit 100’ Quadrant B to Compound building	

(1) The time required to move between floors was assumed to be 2 minutes.
(2) The hydrogen igniter status check was assumed to take 2 minutes.

Table 3. Expected Worker’s Timeline for Action 2

Time	Event	Remark
0	Initial event	
86,400 (24 hours)	Enter 100’ Quadrant B from Compound building	
86,477	Enter 120’ Quadrant B	(1)
86,613	Enter Room 120-A16B	(2)
86,941	Exit Room 120-A16B	(3)
87,010	Exit 120’ Quadrant B	
87,028	Exit 100’ Quadrant B to Compound building	

(1) The time required to move between floors was assumed to be 1 minute.
(2) A preparation time of 2 minutes was assumed for the fire hose.
(3) The water spray operation was assumed to take 5 minutes.

2.3. 작업 시나리오 및 이동 경로 구성

앞서 2.2절에서 중대사고 시 보조건물 내에서 구체적인 작업자 조치사항을 도출하였다. 도출된 작업자 조치사항을 수행하기 위한 작업자 조치 경과를 Table 2~6에 나타내었다. 이 때, 작업자의 보조건물 진입 시점은 초기 사건 발생 후 24시간 시점을 가정하였다. 작업자의 이동속도는 일반 보행속도(1.3 m sec^{-1})보다 20% 빠른 1.56 m sec^{-1}로 가정하였으며, 이는 사고 대응 상황에서의 신속한 이동을 반영한 값이다[8]. 다만, 조치사항 5의 외부주입유로 점검은 제한된 접근로와 점검 동작을 수행하면서 이동해야 하는 실내 밀집 구역에서 이루어지므로, 이동이 제약되고 안전 확보가 우선시되는 점을 고려하여 평상시 보행속도의 50%인 0.65 m sec^{-1}를 가정하였다. 또한, 작업자의 조치 경과에 따른 작업자의

Table 4. Expected Worker‘s Timeline for Action 3

Time	Event	Remark
0	Initial event	
86,400 (24 hours)	Enter 100’ Quadrant B from Compound building	
86,583	Enter 55’ Quadrant A	(1)
86,594	Enter Room 055-A35A	(2)
86,802	Exit Room 055-A35A	
86,933	Exit 55’ Quadrant A	(1)
86,996	Exit 100’ Quadrant B to Compound building	

(1) The time required to move between floors was assumed to be 2 minutes.
(2) The alternative measurement task was assumed to take 3 minutes.

Table 5. Expected Worker’s Timeline for Action 4

Time (sec)	Event	Remark
0	Initial event	
86,400 (24 hours)	Enter 100’ Quadrant B from Compound building	
86,523	Enter 120’ Quadrant A	(1)
86,811	Exit 120’ Quadrant A	(1), (2)
86,874	Exit 100’ Quadrant B to Compound building	

(1) The time required to move between floors was assumed to be 1 minute.
(2) The alternative measurement task was assumed to take 3 minutes.

Table 6. Expected Worker‘s Timeline for Action 5

Time (sec)	Event	Remark
0	Initial event	
86,400 (24 hours)	Enter 100’ Quadrant B from Compound building	
86,465	Enter Room 100-A13B	(1)
86,708	Exit Room 100-A13B	(1), (2)
86,726	Exit 100’ Quadrant B to Compound building	

(1) The travel time was set to double, considering movement while inspecting the external injection line.
(2) A valve inspection time of 3 minutes was assumed.

이동경로를 각각 Fig. 1~5에 나타내었다.

2.4. 방사선 환경 분석 목표

중대사고 시 보조건물 내 방사선 환경을 분석하기 위해, 앞서 2.1절에서는 총 3개의 중대사고 경위를 선정하였다. 2.2절에서는 중대사고관리지침서(SAMG)를 기반으로 보조건물 내에서 수행되는 5개의 작업자 조치사항을 도출하였고, 2.3절에서는 각 조치사항별로 작업자의 구체적인 시나리오 및 시간대별 이동경로를 설정하였다.

본 절에서는 방사선원항 분석을 위한 평가 시간, 대상 핵종 및 격실 구역을 설정하였다. 분석 기간은 작업자가 진입하는 시점인 86,400초부터 1시간 후인 90,000초까지로 설정하였으며, 이는 Table 2~6에 제시된 작업 조치 시간을 충분히 포괄할 수 있도록 고려한 것이다. 대상 핵종은 향후 선량평가에 주요한 영향을 미칠 것으로 판단되는 침적형 핵종인 Mo, I, Cs, Te와 공기 중 확산형 핵종인 Xe, I로 선정하였다.

방사선원항은 각 격실에 대해 벽면/바닥 침적 방사선원항(kg m^{-2}) 및 공기 중 방사선원항(kg m^{-3}) 형태로 정의하였다. 이는 MAAP5.06 해석을 통해 시나리오별로 산정되며, 이후 MCNP와 같은 고정밀 선량평가 코드의 입력자료로 활용될 수 있도록 구성되었다.

분석 대상이 되는 격실은 2.3절에서 설정한 작업자의 이동경로를 기반으로 하여 선정되었으며, 각 조치별 주요 경로 상에 위치한 격실들을 포함한다. 평가 대상 격실 목록은 Table 7에 정리하였다.

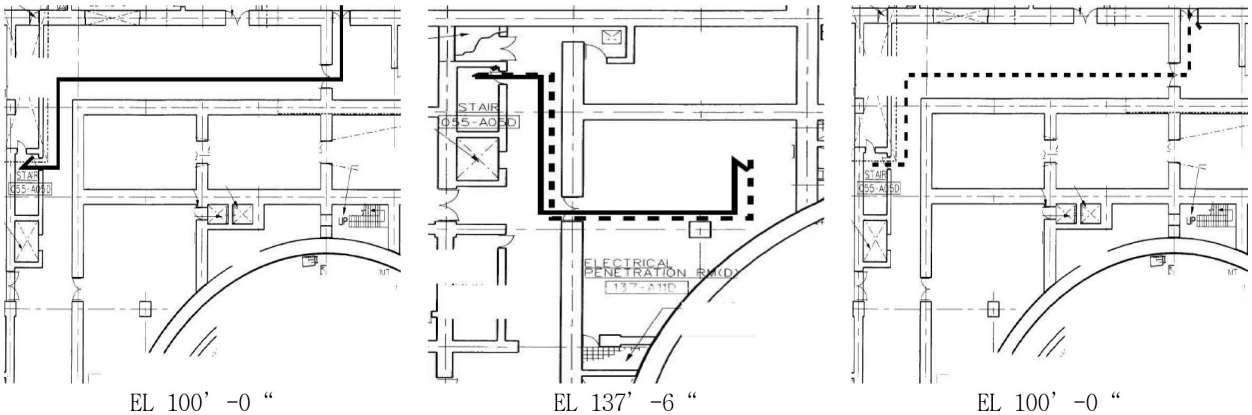

Fig. 1. Worker’s Path for Action 1

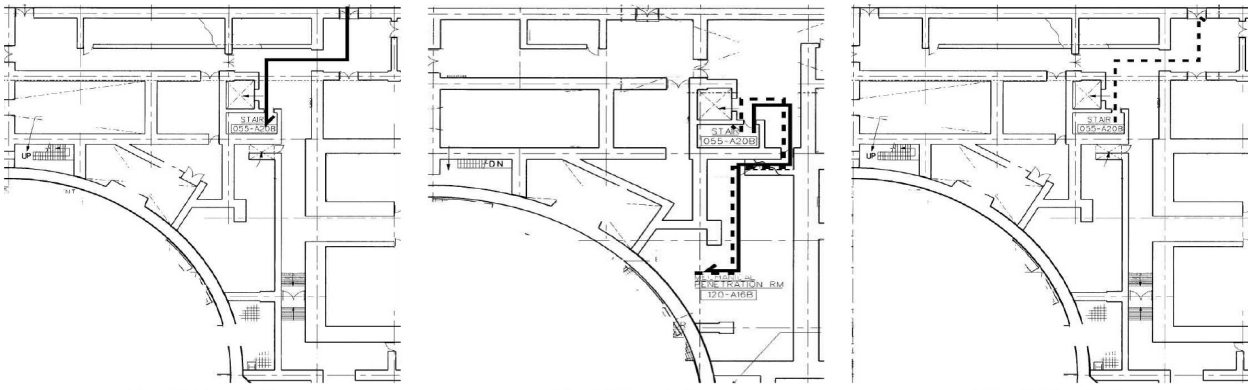

Fig. 2. Worker’s Path for Action 2

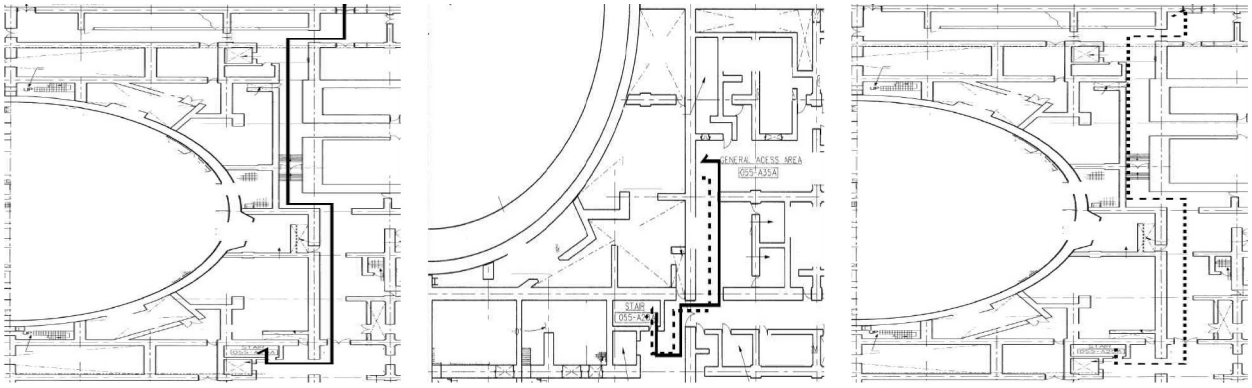

Fig. 3. Worker’s Path for Action 3

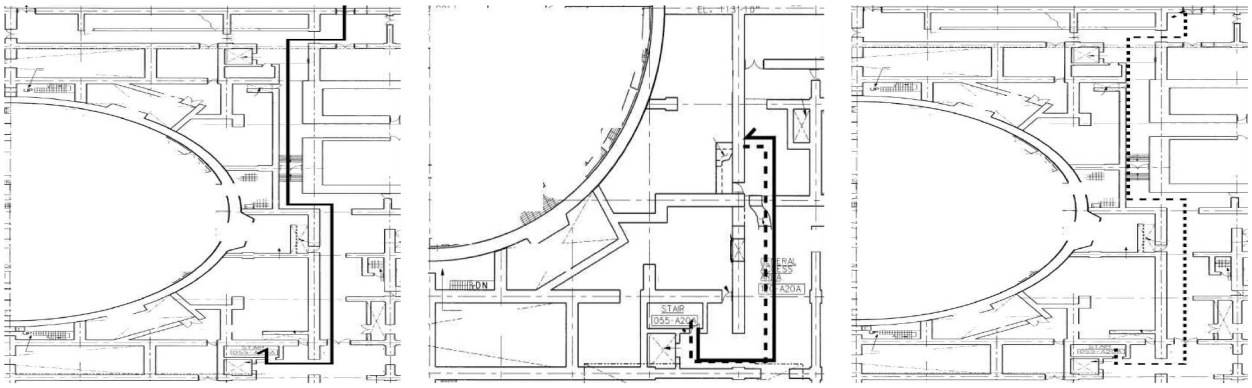

Fig. 4. Worker’s Path for Action 4

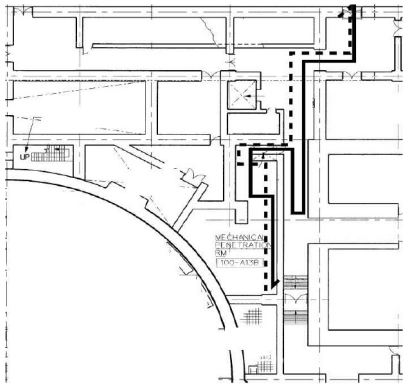

Fig. 5. Worker’s Path for Action 5

Table 7. List of Compartments Selected for Evaluation

No.	Room	Remark
1	55ft Quad A	
2	055-A35A	
3	100ft Quad. A,B	
4	100-A13B	
5	120ft Quad A	
6	120ft Quad B	
7	120-A16B	
8	137 Quad. B	Assumed to be identical to 137 Quad. D
9	137-A11D	

3. 결 과

침적 방사선원항은 Mo, I, Cs, Te에 대해 평가하였으며, 중대사고 시 선량 평가에 주요한 기여를 하는 요오드(I)의 격실별 방사선원항을 Fig. 6에 대표적으로 제시하였다. 공기 중 방사선원항은 Xe와 I에 대해 분석을 수행하였으며, 피폭선량 기여도가 높은 제논(Xe)의 결과를 Fig. 7에 도식화하여 제시하였다.

계산 결과, 공기 중 방사선원항은 시나리오별로 큰 차이를 보이지 않았다. 세 시나리오 모두에서 시간 경과에 따라 유사한 변동 경향을 보였으며, 이는 기체 핵종의 방출 및 누설 경로가 유사하

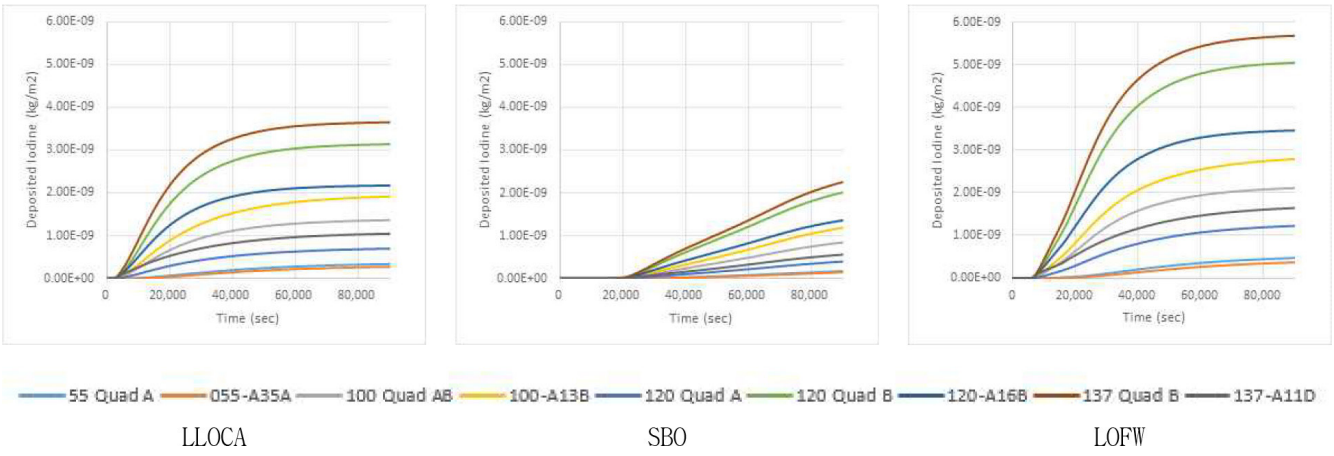

Fig. 6. Deposited Iodine (kg m^{-2})

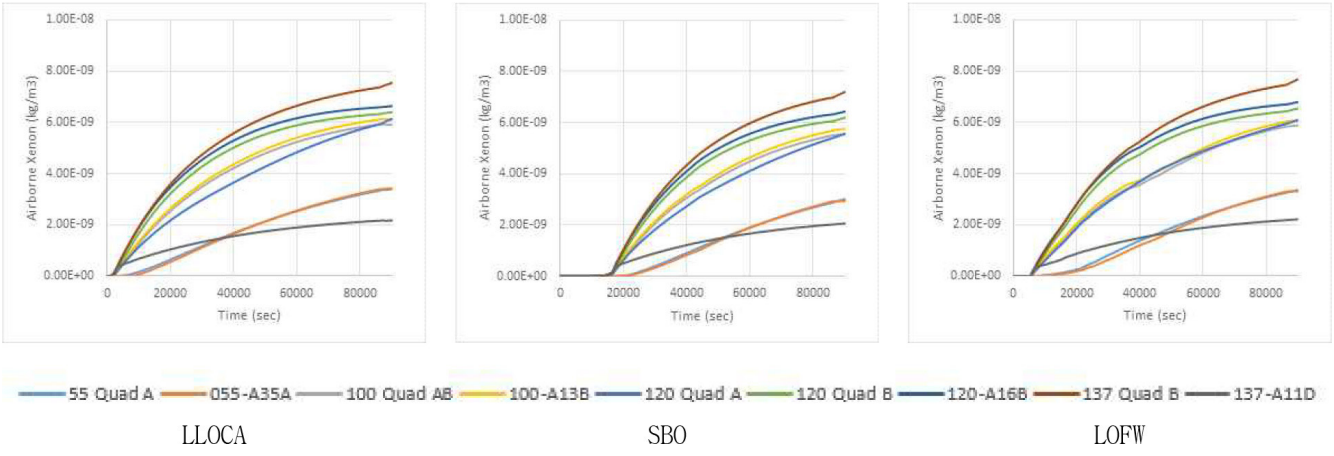

Fig. 7. Airborne Xenon (kg m^{-3})

기 때문으로 판단된다.

반면 침적 방사선원항은 시나리오별로 뚜렷한 차이를 보였다. SBO 시나리오는 중대사고 진입이 늦어 가장 낮은 값을, LLOCA는 중간 수준을, LOFW는 상대적으로 높은 침적량을 나타냈다.

이는 사고 진행 특성과 격납건물 내부 환경 차이에 따른 요오드 침착 거동의 차이에 기인한 것으로 해석된다. 또한 모든 시나리오에서 지하층(55 ft)의 방사선원항은 지상층보다 낮게 평가되었으며, 이는 원자로건물로부터의 누설이 주로 지상층에서 발생하기 때문이다.

결과적으로, 보조건물 내 방사선 환경은 시나리오별로 시간적 변화 양상과 공간적 분포가 상이하게 나타났으며, 이는 실제 사고 상황에서 작업 위치와 시점에 따라 방사선 노출 수준이 크게 달라질 수 있음을 시사한다.

4. 고 찰

본 연구에서는 세 가지 대표 중대사고 시나리오에 대해 보조건물 내 격실별 방사선원항을 비교·분석하였다. 그 결과, 공기 중 방사선원항은 시나리오 간 유사한 농도 추이를 보였으나, 침적형 방사선원항은 사고 유형에 따라 차이를 보이는 경향을 확인하였다. 이는 사고 진행 과정에서의 격납건물 내부 조건, 누설 시점, 그리고 에어로졸 체류시간 등의 복합적인 요인에 의해 방사선원항의 형성이 영향을 받았음을 시사한다.

또한, 격실별 방사선원항은 공간적으로 균질하지 않으며, 지하층보다 지상층의 관통부 주변에서 높은 값을 나타냈다. 이로써 원자로건물에서의 누설 경로가 보조건물 내 방사선 환경의 분포에 가장 큰 영향을 미치는 요인임이 확인되었다.

이러한 결과는 단일 선량 산출값만으로는 실제 피폭환경을 충분히 설명하기 어렵고, 시간적 변화와 공간적 분포를 함께 고려한 평가체계가 필요함을 의미한다. 특히, 실제 작업자가 수행하는 조치 시나리오별 이동경로와 체류시간이 피폭선량에 직접적으로 영향을 미칠 수 있으므로, 향후 연구에서는 본 연구에서 도출된 격실별 방사선원항을 기반으로 작업자별 피폭선량을 정량적으로 평가하는 단계로 확장할 예정이다.

5. 결 론

본 연구에서는 중대사고 발생 시 보조건물 작업자의 방사선 환경을 평가하기 위해 대표 사고 시나리오(LLOCA, SBO, LOFW)를 선정하고, MAAP5.06 코드를 이용하여 격실별 방사선원항을 도출하였다.

평가 결과, 공기 중 방사선원항은 시나리오 간 큰 차이를 보이지 않았으나, 침적 방사선원항은 사고 유형에 따라 뚜렷한 차이를 나타냈다. 또한, 지하층은 원자로건물 누설 경로로부터 이격되어 있어 모든 시나리오에서 상대적으로 낮은 방사선원항이 형성되었다. 이러한 결과는 보조건물 내 방사선 환경이 시간적·공간적으로 불균일하게 분포함을 보여주며, 작업자의 위치와 체류시간에 따라 피폭선량이 달라질 가능성을 시사한다.

향후 연구에서는 본 연구에서 도출된 격실별 방사선원항을 기반으로 MCNP 및 Dose-Sim 코드를 이용한 정량적 선량평가를 수행함으로써, 중대사고 시 보조건물 작업자의 방사선 안전 확보 및 ALARA 의사결정 지원 시스템 구축에 기여할 예정이다.

사 사

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. RS-2022-KP002860).

참고문헌

1. Kim JH, Kim BJ and Bai JH. 2024. Development of a Methodology for Evaluating Radiation Dose to Workers in Auxiliary Building under Severe Accidents. *Journal of Radiation Industry* **18**(3):217-221. https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.3.217.
2. EPRI. 2019. Modular Accident Analysis Program version 5.06. User Manual.
3. EPRI. 2021. Volume 1. Section 7, Calculation of In-plant and Ex-plant Dose and Dose Rates. In: Modular Accident Analysis Program version 5.06. User Manual.
4. LANL. 2017. MCNP–A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 6.2, LA-UR-17-2998.
5. Jung SK, Kang SY and An KI. 2025. Development of a Radiation Dose Prediction and Management System for Enhancing the Safety of Radiation Workers. *Journal of Radiation Industry* **19**(1):81-90. https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.1.81.
6. KINS. 2016. Regulatory Guideline 16.4. Accident Consequence Assessment. Rev.0. KINS/RG-N16.04.
7. KHNP. 2019. Shin-Kori Nuclear Power Plant Unit 3&4 Severe Accident Management Guideline.
8. Waters RL, Lunsford BR, Perry J and Byrd R. 1988. Energy-speed relationship of walking: standard tables. *Journal of Orthopaedic Research* **6**(2):215-222. https://doi.org/10.1002/jor.1100060208.