JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

16(3) : 231-240 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.3.231

한국과 미국의 원전 중대사고 시 소외 사고결말평가 시스템 비교 연구

윤상혁[1,2], 김민성[2], 김광표[2,*]

[1]㈜엔에스이, [2]경희대학교 원자력공학과

Comparative Study of Off-site Consequence Assessment System of Nuclear Power Plant Severe Accident in Korea and U.S.

Sang Hyuk Yun[1,2], Min Seong Kim[2] and Kwang Pyo Kim[2,*]

[1]NSE Technology, 5F Convergence Technology Research Commercialization Center, 218 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Republic of Korea

[2]Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deokyoungdae-ro, Giheoung-gu, Yonginin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea

Abstract Having experienced the TMI, the Chernobyl, and the Fukushima accident, NPPs are being forced to follow stricter safety procedures. Korea and the US are using S-REDAP and RASCAL off-site consequence assessment systems based on relevant laws. In accordance with the Act on Physical Protection and Radiological Emergency, domestic NPP operators use the assessment system to determine emergency resident protection measures. For accurate resident protection measures, high reliability of the domestic consequence assessment system and methodology is important. The purpose of this study is to compare methodologies of consequence assessment systems in Korea and US and to compare and analyze assessment results. In this case, the result comparison analysis used an assessment code that uses the domestic consequence assessment methodology. To achieve this, first, the methodologies of the two countries were compared. Second, a simulation scenario was established. Finally, assessment was conducted based on the simulated scenario. It was found that there are differences in the source term assessment in the inventory and radioactive decay method, the core emission fraction applied unit, and the core damage input method. In the atmospheric diffusion assessment, the diffusion model was the same as the Gaussian model, but the domestic assessment models were AERMOD and CALPUFF, and the US was TADPLUME and TADPUFF. In the dose assessment, there were differences in the duration of the derived results and the dose conversion factor. The simulation scenario was set as a scenario in which radioactive material was released outside the NPP, and the leakage rate at the time of release was set at 5% hr^{-1}, and the core damage was set at 5% of the core melt. As a result of the total emission amount, assessment code was evaluated 1.8 times more conservatively than RASCAL. The initial dose was evaluated 5 to 9 times more conservatively on assessment code, and 2 to 4 times more conservatively on RASCAL for the mid- to long-term dose. The initial dose was due to the difference between the emission amount and the assessment period, and the mid- to long-term dose was considered to be due to the difference in the terrain effect. The results of this study are expected to prove the reliability of domestic accident assessment system and methodologies and to be used in the prediction of doses in case of severe accidents.

Key words: Severe accident, Consequence assessment, Radioactive disaster prevention, Source term assessment, Dose assessment

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author.** Kwang Pyo Kim
Tel. +82-31-201-2560 Fax. +82-31-273-3592 E-mail. kpkim@khu.ac.kr

Received 31 August 2022 **Revised** 17 September 2022 **Accepted** 20 September 2022

1. 서 론

원자력발전소는 설계 단계부터 안전을 고려하여 여러 가지 안전 장치를 부가하고 철저한 안전 절차를 준수하도록 하고 있다. 이는 미국의 Three mile island (TMI) 원전 사고, 구소련의 체르노빌 원전 사고, 일본의 후쿠시마 원전 사고 등을 경험하면서 원자력발전에 있어서 안전성은 무엇보다 중요함을 인식할 수 있었기 때문이다. TMI 원전 사고 이후 미국 원자력규제위원회(NRC, Nuclear Regulatory Commission)는 1988년 NUREG-1228을 발간하여 중대사고 연구 결과와 선원항평가 방법을 수립하였으며 NUREG-1228은 NRC 비상대응 매뉴얼의 근간이 되었다[1]. 이후 NRC는 원전의 이상사태 발생에 효율적으로 대응하기 위한 절차서 NUREG/BR-0150을 발간하고 2001년 NUREG-1741과 함께 소외 사고결말평가 시스템인 RASCAL 3.0을 개발하였다[2,3]. RASCAL 3.0 이후에 NRC는 여러 개선을 거쳐 2012년 NUREG-1940과 함께 RASCAL 4.0을 개발하였다[4]. 국내에서도 2004년 원자력시설 등의 방호 및 방사능방재대책법과 관련 시행령, 시행규칙 및 고시를 제정하여 시행하였으며 2006년 방사선 비상 시 주민보호조치 권고를 위한 방사선량 프로그램(K-REDAP)을 개발하여 사용하기 시작했다[5-8]. 그 후 미국과 동일하게 여러 개선을 거쳐 2015년에 현재 사용 중인 원전 사고 시 방사선량평가 통합시스템(S-REDAP)을 개발하여 방사선 비상대응용 소외 사고결말평가 시스템(이하 사고평가시스템)으로 사용하고 있다[9].

국내와 미국의 사고평가시스템 비교·분석 및 이를 사용한 소외 사고결말평가는 과거 몇 차례 수행된 적 있다. Yang 등은 고리 1호기와 Kewaunee 원전을 대상으로 S-REDAP과 RASCAL의 Long Term Station Blackout (LTSBO) 중대사고 선원항평가 결과를 비교·분석하였다. 그 결과, State of the Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA) 보고서에 제시된 거동현상을 잘 재현함을 확인하였다[10]. Uddin 등은 신고리 3호기를 대상으로 장기정전사고와 냉각재상실사고를 가정하여 사고평가를 수행하였다. RASCAL로 수행한 선량평가 결과는 5 km 지점에서 총 유효 선량 당량의 최대값이며, 각각 14 mSv, 0.08 mSv로 평가되었다[11]. Lee 등은 대기확산의 지표면 침적농도를 집중적으로 분석하였고, RASCAL로 평가된 선원항 결과는 ^{137}Cs 총 8.7×10^{13} Bq, ^{131}I은 총 9.2×10^{15} Bq로 나타났다[12].

한국과 미국의 사고평가시스템 비교에 대한 선행 연구는 LTSBO 중대사고 상황에서 선원항평가 결과에 국한된 연구이다. 또한 몇 차례 수행된 국내 원전을 대상으로 한 사고결말평가는 모두 미국의 시스템인 RASCAL을 사용하여 평가를 수행하였다. 국내 원자력발전소 사업자는 원자력시설 등의 방호 및 방사능방재대책법 제29조에 언급된 긴급 주민 보호 조치의 결정을 수행하기 위해 사고평가시스템을 활용한다. 비상 상황에 적합한 긴급 주민 보호 조치의 결정을 수행하기 위해서는 국내 사고평가시스템과 사고결말평가 방법론의 평가 정확도가 높은 수준을 유지해야 하며, 이를 확인하기 위해 유사 시스템인 미국 RASCAL과의 전체적인 방법론 비교, 검증이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 국내 사고평가시스템과 미국 사고평가시스템의 방법론 및 소외 사고결말평가 결과 비교를 수행하여 각 시스템에 적용된 모듈을 비교·분석하였다. 또한 본 연구의 국내 사고평가시스템 평가 결과는 S-REDAP의 계산 모듈을 활용하여 별도 개발한 프로그램(이하 사고평가 코드)을 사용하여 도출하였다.

본 연구의 목적은 한국과 미국의 사고평가시스템 방법론 비교 및 모의 시나리오에 따른 소외 사고결말평가 결과 비교·분석이다. 연구 목적을 달성하기 위해 첫 번째로 두 사고평가시스템의 방법론을 비교하였다. 방법론 비교는 선원항평가, 대기확산평가, 선량평가로 나누어 수행하였다. 두 번째로 중대사고 수준의 모의 시나리오를 설정하였다. 대상 원전은 신고리 1호기로 설정하였고 각 이벤트는 관련 연구자료를 참고하였다. 마지막으로 모의 시나리오를 사용하여 국내 사고결말평가 방법론 기반 사고평가 코드와 RASCAL의 평가를 수행하고 두 결과를 비교·분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 사고평가시스템 방법론 비교

본 연구에서는 소외 사고결말평가에 앞서 한국과 미국의 사고평가시스템의 방법론을 비교·분석하였다. 사고결말평가는 선원항평가, 대기확산평가, 선량평가의 순서로 구성된다. 선원항평가 단계에서는 사고 지점의 방출량을 평가하고 대기확산평가 단계에서는 사고가 일어난 기간의 대기확산인자를 계산한다. 선량평가 단계에서는 선원

항평가에서 계산된 방출량과 대기확산평가에서 구한 대기확산인자를 조합하고 초기, 중장기 방사능 피폭의 특성 등을 고려하여 선량을 계산한다. 국내에서는 선량평가 결과를 사용하여 주민 보호 조치의 결정기준에 해당하는 지역평가를 별도로 수행한다. 하지만 미국의 사고평가시스템에는 지역평가에 대한 기능이 존재하지 않으므로 사고평가시스템 방법론 비교는 선원항평가, 대기확산평가, 선량평가를 각각 비교하는 방식으로 진행되었다.

선원항평가를 위해 필요한 인자는 크게 재고량, 노심방출분율, 저감인자, 환경방출분율로 구분할 수 있다. 기본적으로 한국과 미국의 사고평가시스템은 NUREG-1465 기반의 동일한 선원항평가 방법론을 사용하기에 방출량을 계산하기 위한 평가 방법은 유사하다[13]. 하지만 국내 실정에 맞추며 재고량 등 계산에 필요한 일부 입력 인자에서 차이가 발생한 부분이 존재하므로 서로 상이한 측면에 대해 중점적으로 조사하였다.

대기확산평가는 확산모델의 차이점을 비교하였다. 또한 같은 확산모델 기반이라고 하여도 평가모델이 상이하면 결과에 영향을 미칠 수도 있기에 각 사고평가시스템의 평가모델 또한 조사하였다. 국내 사고평가시스템은 S-REDAP 구축보고서를 활용하였고 RASCAL은 RASCAL 4.0과 함께 발간된 NUREG-1940을 참고하여 분석을 수행하였다.

선량평가는 계산에 사용되는 방법론을 조사하고 방법론에 사용되는 인자들을 조사 및 비교하였다. 또한 각 사고평가시스템은 도출하는 선량의 결과가 국가 법령에 따라 서로 다를 것으로 예상되므로 도출하는 선량의 종류를 비교하였다.

2.2. 중대사고 수준 모의 시나리오 설정

소외 사고결말평가를 위한 모의 시나리오를 설정하기 위해 후쿠시마 사고 데이터와 중국, 일본, 대만의 원전 사고 방사능방재훈련 시나리오를 참고하였다[14,15]. 후쿠시마 사고 데이터는 한국원자력학회 후쿠시마위원회의 원전 사고 분석 보고서를 사용하였고, 각 국의 방재훈련 시나리오는 한국원자력안전재단의 인접국 원전 사고 방사능방재 훈련체계 구축 최종보고서를 분석하여 사용하였다. 일반적인 중대사고 시나리오는 자연재해 등의 발생, 백색비상, 청색비상, 적색비상, 방사성물질 누출의 순서로 진행된다. 이에 따라 본 연구의 모의 시나리오는 해당 순서로 진행되도록 설정하였고 사고가 발생한 원자력발전소는 원자로에 대한 공개된 데이터가 있는 신고리 1호기로 가정하였다. 또한 각 사고 이벤트에서 사고평가시스템 활용 시 사용할 수 있는 인자들은 따로 정리하여 표기하였다.

백색비상은 방사성물질의 누출로 인한 영향이 원자력시설 건물 내에 국한될 것으로 예상되는 비상사태로 자연재해의 발생 및 인지와 동시에 발령된다. 자연 재해는 일반적으로 지진이나 해일 등이 해당되며 본 연구에서도 지진과 해일을 채택하였다. 또한 백색비상과 원자로 정지가 동시에 일어났다고 가정하여 사고결말평가에 사용되는 원자로 정지시각을 설정하였다.

청색비상은 방사성물질의 누출로 인한 영향이 원자력시설 부지 내에 국한될 것으로 예상되는 비상사태이다. 이는 보통 소내, 외 교류 전원의 일시적 상실 등 비상대응조직 운영이 요구되는 상황의 발생에 따라 발령된다. 본 시나리오에서는 비상디젤발전기(EDG) 운영에 장애를 일으켜 사고가 악화되는 상황을 설정하였다. 해당 상황에는 사고평가시스템에 사용할 수 있는 인자는 따로 존재하지 않는다.

적색비상은 방사성물질의 누출로 인한 영향이 원자력시설 부지 밖까지 미칠 것으로 예상되는 비상사태이다. 적색비상이 발령되는 시점에는 방사성물질의 누출이 일어날 수 있으며, 일어나지 않을 수도 있다. 본 연구의 시나리오에서는 적색비상 발령 시 외부 누출이 아직 일어나지 않은 것으로 설정하였다. 그리고 방사성물질의 누출은 저체적 퍼지 덕트 밀봉 상실로 인해서 일어나는 것으로 설정하였다. 해당 시점에서 사고평가시스템이 가장 많이 활용되며, 주요 인자에 대한 값을 별도로 정리하였다. 해당 시점의 기상정보는 상온(20°C)과 국내 연평균 풍속을 사용하였다[16]. 풍속은 가장 보수적인 결과가 나올 수 있는 육지 방향인 남동풍(SE)으로 설정하였다. 사고 이후의 시나리오는 방사성물질의 누출이 종료되고 사고가 안정화되는 상황을 모사하였다.

2.3. 모의 시나리오에 따른 소외 사고결말평가

설정한 모의 시나리오를 사용하여 국내 사고결말평가 방법론을 적용한 사고평가 코드와 RASCAL 두 사고평가 시스템의 사고결말평가를 수행한 뒤, 비교·분석하였다. 신고리 1호기를 가정하여 쓰여진 사고 시나리오를 평가하기 위해서는 재고량을 산정하여야 한다. 신고리 1호기의 재고량은 NUREG-1940의 표준재고량에 신고리 1호기 열

출력을 적용하여 도출하였다. 또한 RASCAL은 신고리 1호기와 최대한 동일한 가상의 데이터를 설정하기 위한 사전 작업이 필요하다. 본 연구에서는 RASCAL의 "Define a Generic Nuclear Power Plant" 기능을 사용하여 사고결말평가에 필요한 가상의 발전소를 설정하였다. 설정을 위한 입력값은 노심 집합체 수, 격납건물 부피, 냉각재 질량, 증기발생기 물 질량, 증기발생기 증기율, 열출력, 연소도가 필요하다. 해당 시나리오에서 설정한 사고 유형에 영향을 주는 입력인자는 열출력, 연소도이므로 해당 인자의 값을 신고리 1호기의 설계값과 동일하게 설정하였다[17].

모의 시나리오 설정 시에 따로 정리한 시스템 입력인자를 사용하여 평가를 진행하였으며 평가 결과를 각각 선원항과 선량으로 나누어 정리하였다. 대기확산평가는 사고평가 코드의 경우 AERMOD, RASCAL의 경우 TADPLUME 평가 모델을 사용하였다. 대기확산평가의 결과는 대기확산인자로 나타나는데 RASCAL은 대기확산인자를 볼 수 있는 기능이 존재하지 않아서 따로 비교·분석을 수행하지 않고 선량평가와 통합하여 진행하였다. 선원항평가의 결과는 원전 사고 시 대표 핵종인 ^{133}Xe, ^{131}I, ^{137}Cs에 대해서 진행하였다. 선량평가 결과는 각 시스템에서 도출하고 있는 초기, 중장기 선량 중 하나씩을 선정하여 비교하였다.

3. 결 과

본 연구에서는 한국과 미국의 사고평가시스템 비교 연구를 위해 첫 번째로 각 시스템에서 평가별로 사용된 방법론을 비교하였다. 그리고 기존의 방사능방재훈련을 참고하여 모의 시나리오를 설정하고 그 시나리오에 따른 소외 사고결말평가를 수행한 뒤 평가 결과를 비교·분석하였다.

3.1. 사고평가시스템 방법론 비교 결과

Table 1에 본 연구에서 수행한 한국과 미국 사고평가시스템의 선원항평가, 대기확산평가, 선량평가별 방법론 및 사용 인자를 나타내었다. 각 방법론 및 사용 인자의 세부사항은 평가 모듈별로 구분하여 분석을 진행하였다.

3.1.1. 선원항평가 방법론 비교 결과

선원항평가의 경우 동일하게 NUREG-1465 방법론을 사용한다. NUREG-1465 선원항평가 방법론의 인자인 재고량, 노심방출분율, 저감인자, 환경방출분율 중 일부 인자를 제외한 대부분의 인자에서는 차이점이 존재하지 않았다. 국내 사고평가시스템은 발전소의 호기별 최종안전성분석보고서(FSAR)에 수록된 노심재고량을 사용한다. 반면에 미국은 NUREG-1940에서 언급한 바와 같이 열출력 3,479 MWt 및 연소도 38,585 MWd MTU^{-1}를 가정한 표준원전을 대상으로 SCALE (Standard Computer Analysis for Licensing Evaluation)의 SAS2H 코드를 사용하여 계산한 결과를 표준 노심재고량으로 사용하며 해당 데이터를 Table 2에 나타내었다. 미국 RASCAL 코드는 해당 표준재고량을 각 원전에 따라 출력과 연소도만 다르게 적용하여 사용하고 있다. 방사성붕괴 계산 방법에서는 국내의 경우

Table 1. Methodology and using factors for each module of Korea and US Accident Assessment System

Assessment	Categorize	Korea	US
Source term assessment	Methodology	NUREG-1465	NUREG-1465
	Core inventory	FSAR	NUREG-1940
	Decay Chain	3rd generation	2nd generation
	Core release fraction	15 minutes unit	1 minute unit
	Core damage applying method	Progression of core damage, Core damage time	Core damage time
Atmospheric dispersion assessment	Dispersion model	Gaussian Plume, Puff	Gaussian Plume, Puff
	Gaussian Plume assessment model	AERMOD	TADPLUME
	Gaussian Puff assessment model	CALPUFF	TADPUFF
	Terrain information	South Korea	USA
Dose assessment	External exposure dose conversion factor	FGR-12	FGR-12
	Internal exposure dose conversion factor	ICRP-60	FGR-13
	Calculated effective dose	2 days, 7 days, 1st month, 2nd month, 70 years	4 days, 1st year, 2nd year, 50 years

Table 2. Assumed core inventory during operation for low-enriched uranium fuel

Nuclide	Core inventory (Bq MWt^{-1})	Nuclide	Core inventory (Bq MWt^{-1})
^{139}Ba	1.75×10^{15}	^{105}Rh	1.04×10^{15}
^{140}Ba	1.76×10^{15}	^{103}Ru	1.61×10^{15}
^{141}Ce	1.62×10^{15}	^{105}Ru	1.13×10^{15}
^{143}Ce	1.48×10^{15}	^{106}Ru	5.74×10^{14}
^{144}Ce	1.31×10^{15}	^{127}Sb	8.84×10^{13}
^{242}Cm	4.14×10^{13}	^{129}Sb	3.21×10^{14}
^{134}Cs	1.74×10^{14}	^{89}Sr	8.92×10^{14}
^{136}Cs	5.51×10^{13}	^{90}Sr	8.84×10^{13}
^{137}Cs	1.20×10^{14}	^{91}Sr	1.11×10^{15}
^{131}I	9.88×10^{14}	^{92}Sr	1.20×10^{15}
^{132}I	1.44×10^{15}	^{99m}Tc	1.62×10^{15}
^{133}I	2.01×10^{15}	^{127}Te	8.73×10^{13}
^{134}I	2.21×10^{15}	^{127m}Te	1.47×10^{13}
^{135}I	1.92×10^{15}	^{129}Te	3.06×10^{14}
^{83m}Kr	1.13×10^{14}	^{129m}Te	6.22×10^{13}
^{85}Kr	1.03×10^{13}	^{131m}Te	2.00×10^{14}
^{85m}Kr	2.28×10^{14}	^{132}Te	1.41×10^{15}
^{87}Kr	4.55×10^{14}	^{131m}Xe	1.35×10^{13}
^{88}Kr	6.29×10^{14}	^{133}Xe	2.01×10^{15}
^{140}La	1.82×10^{15}	^{133m}Xe	6.36×10^{13}
^{141}La	1.60×10^{15}	^{135}Xe	5.25×10^{14}
^{142}La	1.56×10^{15}	^{135m}Xe	4.26×10^{14}
^{99}Mo	1.96×10^{15}	^{138}Xe	1.69×10^{15}
^{95}Nb	1.67×10^{15}	^{90}Y	9.07×10^{13}
^{147}Nd	6.48×10^{14}	^{91}Y	1.17×10^{15}
^{239}Np	2.11×10^{16}	^{92}Y	1.21×10^{15}
^{143}Pr	1.47×10^{15}	^{93}Y	9.32×10^{14}
^{241}Pu	1.58×10^{14}	^{95}Zr	1.64×10^{15}
^{86}Rb	1.96×10^{12}	^{97}Zr	1.57×10^{15}

3세대 딸핵종까지 계산 결과를 반영하지만 미국은 2세대까지 반영하는 것으로 나타났다. 노심방출분율에서는 국내 시스템은 15분 단위로 분율을 적용하고, 미국은 1분 단위의 노심방출분율을 적용하는 것으로 나타났다. 노심손상도의 적용 방법에도 차이가 존재하였다. 노심손상의 단계를 피복재 손상, 노심용융, 원자로용기 용융 세 단계로 나누는 것은 NUREG-1465에 따라 두 나라 모두 동일하였다. 그러나 국내 시스템은 노심손상을 단계별 손상된 퍼센트를 입력하거나 노심손상 시간(노심 노출 시간)을 입력하여 평가를 진행할 수 있었고, 미국 시스템은 노심손상 시간(노심 노출 시간)으로만 평가가 가능하였다.

3.1.2. 대기확산평가 방법론 비교 결과

대기확산평가의 경우 기본적으로 플룸(Plume), 퍼프(Puff) 모델 모두 동일하게 가우시안(Gaussian) 확산모델을 사용하는 것으로 나타났다. 그러나 국내에서는 미국 환경 보호청(EPA, U.S. Environmental Protection Agency)에서 사용을 권고하고 있는 AERMOD와 CALPUFF 평가모델을 사용하고, 미국은 NRC에서 자체 개발한 TADPLUME과 TADPUFF 평가모델을 사용한다[18,19]. 각 평가모델의 큰 차이점은 σ_y(수평 방향의 표준편차)와 σ_z(수직 방향의 표준편차)의 적용 방법이다.

국내 사고평가시스템은 EPA 방법론에 따라 아래 식에 따라 표준편차를 계산한다.

$$\sigma_y = 456.11628(x)\tan(0.017453293(c-d\ln x)) \quad (1)$$

여기서, x는 풍하거리(m), c, d는 대기안정도에 따른 EPA의 실험을 통한 상수이다.

$$\sigma_z = ax^b \quad (2)$$

여기서, a, b는 대기안정도에 따른 EPA의 실험을 통한 상수이다.

미국 사고평가시스템은 NRC 자체 표준편차 식을 사용하며 해당 식은 아래와 같다.

$$\sigma_y(t) = 0.5\int_0^t \sigma_v(t)\,dt \quad (3)$$

$$\sigma_z(t) = \int_0^t \sigma_\omega(t)\left[1.0+0.9\left(\frac{t}{T}\right)^{\frac{1}{2}}\right]^{-1}dt \quad (4)$$

여기서, t는 방출 이후의 시간(sec), T는 난수의 시간 스케일, σ_v와 σ_ω은 $\frac{z_p}{H}$가 0.9보다 작을 때 아래 식으로 계산된다.

$$\sigma_v = \sigma_\omega = 1.3u_*\left(1-\frac{z_p}{H}\right) \quad (5)$$

여기서, u_*는 대기의 스케일링 속도, z_p는 플룸 높이, H는 혼합층 높이다.

3.1.3. 선량평가 방법론 비교 결과

선량평가 방법론의 경우 계산과정은 동일하지만 도출되는 유효선량의 평가 기간에 차이가 존재하였다. 국내 사고평가시스템은 긴급 주민 보호 조치 결정기준에 따라 2일, 7일, 첫째 달, 둘째 달, 70년 유효선량의 결과를 도출하는 반면에 미국 사고평가시스템은 4일, 1년, 2년, 50년 유효선량 결과를 도출한다. 선량환산인자의 경우 각 시스템의 외

부피폭, 내부피폭 선량환산인자를 서로 비교하였다. 외부피폭 선량환산인자는 FGR-12로 동일한 값을 사용하고 있었지만, 내부피폭 선량환산인자는 국내의 경우 ICRP-60 권고 기반의 ICRP Database (ICRP-68, ICRP-72) 값을 사용하고, 미국은 FGR-13 (DCPAK)을 사용하는 것으로 나타났다[20]. FGR-13은 ICRP-68, 72와 동일하게 ICRP-60 권고 기반으로 계산된 결과이므로 핵종별 선량환산인자의 차이가 결과에 주요한 영향을 미칠 정도로 크지 않다[21-23].

3.2. 중대사고 수준 모의 시나리오 설정 및 소외 사고결말평가 결과

소외 사고결말평가를 위해 사고를 모사하기 위한 모의 시나리오를 설정하였다. 그리고 해당 모의 시나리오를 국내 방법론을 적용한 사고평가 코드와 미국 RASCAL 코드로 평가하여 각 결과를 비교·분석하였다.

3.2.1. 중대사고 수준 모의 시나리오 설정 결과

Table 3에 본 연구에서 사고결말평가를 위해 설정한 모의 시나리오의 주요 사고상황과 평가 시 사용할 수 있는 각 상황별 입력인자를 정리하였다. 사고유형은 후쿠시마의 사례를 참고하여 격납건물 파단 부위를 통해 방사성물질이 직접 누출되는 원자로 사고를 채택하였다. 모의 시나리오는 지진, 해일 등 천재지변으로 인하여 원자로가 정지, 비상전원이 상실되고 노심이 가열, 손상되는 상황을 가정하였다. 그리고 방사성물질이 격납건물을 통해 직접 환경으로 누설되는 것으로 설정하기 위해 후쿠시마 사례를 참고하여 원자로건물에 수소 폭발이 발생하는 것으로 가정하였다. 해당 폭발로 인한 파단 부위를 통해 방사성물질이 유출되고, 누설률은 5% hr^{-1}, 노심손상도는 노심용융 5%로 설정하였다. RASCAL에서는 노심용융 5%를 직접 입력하지 않고 노심 노출 시간으로 환산하여 선원항평가를 진행해야 하며, NUREG-1940에 따라 해당 노심 노출 시간은 34분으로 계산된다. 여기서 34분은 피복재손상이 진행되는 30분에 5%만큼의 노심용융이 진행되는 시간인 3.9분을 더해준 결과이다. 대기확산평가 시 기상 입력인자는 방사성물질이 외부 누출될 시점의 기상정보를 선정하였으며, Table 3에 본 연구에서 활용한 기상 입력인자를 나타내었다.

Table 3. Major accident situations and system input factors of simulated scenario

Time	Accident situation	System input factors
21.10.01 09:35	Earthquake Warning Residual power transfer after reactor shutdown (UAT→SAT)	Emergency (white level) Reactor shutdown time
21.10.01 10:35	EDG B Outage	
21.10.01 10:50	EDG A Fire suppression completed Delayed arrival of mobile generators	Emergency (blue level)
21.10.01 11:30	SG Water level completely depleted RCS Pressure rises sharply	
21.10.01 11:50	Pressurizer POSRV Excess of set pressure	Emergency (red level)
21.10.01 14:00	RCB Hydrogen explosion Loss of low volume purge duct's seal (Core melt 5%, Leakage rate 5% hr^{-1}, Temperature 20°C, Wind direction SE, Wind speed 2 m s^{-1}, Atmospheric stability C, Precipitation 0 mm)	Release start time, Degree of core damage, Leakage rate, Weather information
21.10.01 18:00	Blocking the radioactive effluent leak path	Release end time
21.10.02 16:00	Reduction of alienated environmental radiation levels	
+400:00	Recommendation for emergency cancellation	
+500:00	Emergency cancellation	

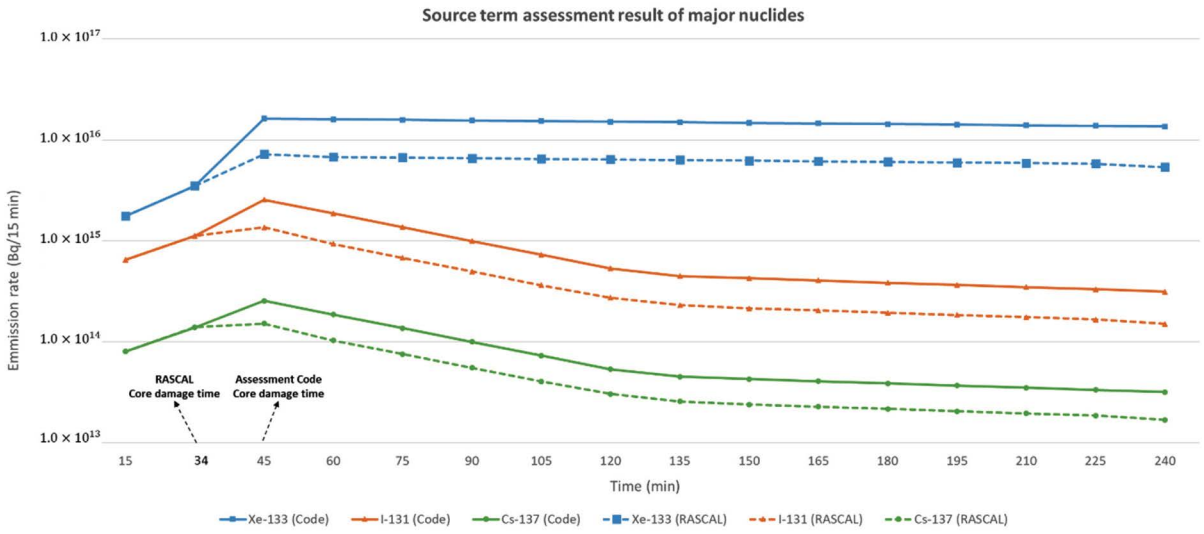

Fig. 1. Results of major nuclides source term assessment of Assessment Code and RASCAL.

Table 4. Total comparison of source term assessment (Bq/15 min)

Time (min)	15	30	45	60	75	…	195	210	225	240	Total
Assessment Code	5.56×10^{15}	1.01×10^{16}	3.52×10^{16}	3.12×10^{16}	2.81×10^{16}		1.99×10^{16}	1.95×10^{16}	1.90×10^{16}	1.86×10^{16}	3.44×10^{17}
RASCAL	7.00×10^{15}	1.27×10^{16}	2.04×10^{16}	1.68×10^{16}	1.50×10^{16}		1.00×10^{16}	9.79×10^{15}	9.52×10^{15}	8.76×10^{15}	1.91×10^{17}
Assessment Code/RASCAL	0.79	0.80	1.72	1.85	1.88		1.98	1.99	2.00	2.13	1.80

3.2.2. 모의 시나리오에 따른 선원항평가 결과

앞서 설정한 모의 시나리오로 국내 사고결말평가 방법론을 적용한 사고평가 코드, 미국 RASCAL 두 시스템의 소외 사고결말평가를 각각 수행하였다. Fig. 1에 사고 시 대표 핵종으로 뽑히는 ^{133}Xe, ^{131}I, ^{137}Cs의 각 시스템별 선원항평가 방출률 결과를 나타내었다. 사고평가 코드의 대표 핵종 평균 방출률은 ^{133}Xe은 1.33×10^{16} Bq/15 min, ^{131}I은 8.01×10^{14} Bq/15 min, ^{137}Cs은 8.29×10^{13} Bq/15 min으로 나타났다. RASCAL의 대표 핵종 평균 방출률은 ^{133}Xe은 5.82×10^{16} Bq/15 min, ^{131}I은 4.62×10^{14} Bq/15 min, ^{137}Cs은 5.27×10^{13} Bq/15 min으로 사고평가 코드의 결과가 RASCAL보다 약 2배 정도 더 보수적으로 나타났다. Table 4에 각 시스템별 모든 핵종의 결과를 합산하여 계산한 시간별 및 총합 선원항 방출량을 나타내었다. 모든 핵종을 더한 값은 대표 핵종 비교 결과값과 동일하게 시간별로 최대 2.13배, 총합은 1.8배 더 사고평가 코드가 큰 것으로 나타났다.

3.2.3. 모의 시나리오에 따른 선량평가 결과

Tables 5, 6에 각각 사고평가 코드, RASCAL의 거리별 최대 유효선량을 나타내었고, Figs. 2, 3에 각각 초기, 중장기 선량의 비교 그래프를 나타내었다. Table 5는 사고평가 코드가 도출하는 유효선량 결과 중 7일, 70년의 결과이고, Table 6은 RASCAL이 도출하는 유효선량 결과 중 4일, 50년의 결과이다. 사고평가시스템은 각 국가별 법령에 따른 기간별 선량 결과를 계산하기 때문에 사고평가 코드와 RASCAL은 동일한 평가 기간의 선량을 비교할 수 없다. 그에 따라 초기, 중장기 선량으로 나누어 비슷한 기간으로 각 시스템의 결과를 선정하였다. 초기 선량인 사고평가 코드의 7일, RASCAL의 4일 유효선량을 비교해보면 약 5~9배 정도 국내 방법론 적용 사고평가 코드가 더 높은 결과를 보인다. 중장기 선량인 사고평가 코드의 70년, RASCAL의 50년 결과는 2 km 지점을 제외하고 RASCAL이 약 2~4배 정도 크게 나타난다.

Table 5. Maximum effective dose by distance of Assessment Code (mSv) (7 days, 70 years)

Distance (km)	1	2	5	8	10	20	30	40	60	80	100
7 days	3020	3020	79.4	49.3	41.6	23.9	18.3	14.5	3.97	1.13	0.848
70 years	3160	3160	83	51.5	43.5	25	19.2	15.2	4.13	1.17	0.876

Table 6. Maximum effective dose by distance of RASCAL (mSv) (4 days, 50 years)

Distance (km)	1	2	5	8	10	20	30	40	60	80	100
4 days	305	87.9	16.0	7.35	5.90	3.57	–	–	–	–	–
50 years	5240	1510	283	133	108	66.9	–	–	–	–	–

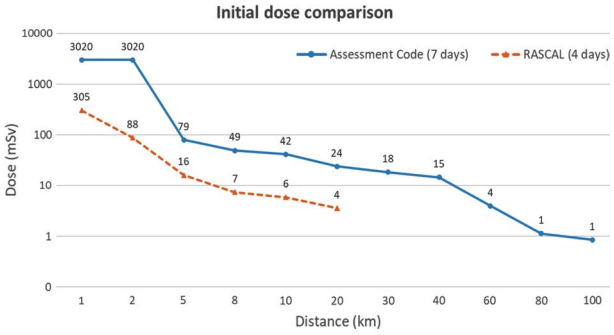

Fig. 2. Initial dose comparison of Assessment Code and RASCAL.

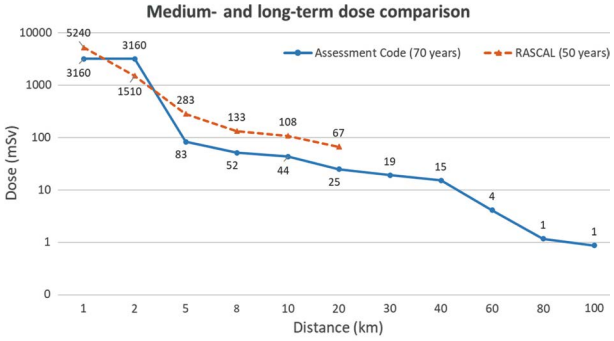

Fig. 3. Medium-and long-term dose comparison of Assessment Code and RASCAL.

4. 고 찰

4.1. 사고평가시스템 방법론 비교·분석

선원항평가의 경우 노심방출분율 적용 단위에서 가장 큰 차이가 발생할 것으로 판단된다. 국내 방법론은 노심 노출 시간을 15분 단위로 계산하기 때문에 1분~15분을 보수적으로 15분으로 통일하여 계산을 처리한다. 15분 정도의 노심 노출 시간은 최종 선량 결과에 큰 영향을 주기 않기 때문에 해당 방법은 계산 처리를 빠르게 수행할 수 있다는 장점이 존재하지만 1분 단위로 계산하는 미국의 시스템과 상이한 선원항 결과를 도출할 것으로 판단된다.

대기확산평가의 경우 각 평가모델은 수평, 수직 방향의 표준편차 외에 지형 정보에도 차이가 존재한다. 지형정보는 각각 자국의 지형 정보를 반영한다. 따라서 두 시스템에 적용된 평가모델이 서로 다르므로 같은 Gaussian 확산 모델이어도 최종 선량 결과값에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

선량평가 방법론의 경우 국내와 미국의 초기, 중장기 선량의 계산 기간이 서로 다르기 때문에 해당 부분에서 가장 큰 차이가 발생할 것으로 판단된다. 내부피폭 선량환산인자의 경우 ICRP Database (ICRP-68, ICRP-72)와 FGR-13 (DCPAK)이 서로 다른 환산인자를 도출하지만 소수점 둘째 자리 정도의 차이만 존재하므로 그 차이가 선량 결과에서 크게 드러나지는 않는다.

4.2. 모의 시나리오에 따른 소외 사고결말평가 분석

선원항평가의 결과는 시간별로 최대 2.13배, 총합은 1.8배 더 사고평가 코드가 RASCAL보다 큰 것으로 나타났다. 이러한 차이는 서로 상이한 노심방출분율 적용 단위와 방사성붕괴 적용 방법으로 인한 것으로 판단된다. 본 연구에서 설정한 모의 시나리오에서 노심손상도는 노심용융 5%이고 이를 노심 노출 시간으로 환산하면 0.565시간으로 약 34분으로 나타난다. Fig. 1에 따르면 방출 시간이 30분을 지나면서 두 시스템의 차이가 벌어지기 시작하는 것을 확인할 수 있다. 이는 서로 다른 노심방출분율 적용 단위로 인해서 사고평가 코드는 45분까지 노심이 노출

이 된 것으로 평가하고 RASCAL은 34분까지 노출된 것으로 평가하기 때문이며 평가 결과에 가장 지배적인 요인 중 하나로 판단된다.

Fig. 2와 같이 초기 선량인 사고평가 코드의 7일, RASCAL의 4일 유효선량을 비교해보면 일부 구간을 제외하고 약 5~9배 정도 국내 방법론 적용 사고평가 코드가 더 큰 결과를 보인다. 선량평가의 결과값은 선원항평가와 대기확산평가의 결과를 종합하여 도출된 값이다. 따라서 더 크게 평가된 사고평가 코드의 선원항평가 결과가 선량평가에도 반영되어 초기 선량이 더 크게 평가된 것으로 판단된다. 또한 4일과 7일로 결과를 반영하는 기간이 다르기 때문에 더 긴 기간의 평가 결과인 국내의 결과가 더 크게 나타난다.

Fig. 3과 같이 중장기 선량인 사고평가 코드의 70년, RASCAL의 50년 결과를 비교해보면 2 km 지점을 제외하고 RASCAL이 약 2~4배 정도 크게 나타난다. 이 차이에 대한 원인은 지형 효과 때문임으로 판단할 수 있다. 국내 사고결말평가 방법론에 따라 사고평가 코드의 선량 결과는 국내 지형 정보를 반영하고 있는 반면에 미국에 맞춰져 있는 RASCAL은 국내 지형 정보를 반영하지 못한다. 국내와 미국에서 설정하는 초기 유효선량(국내: 7일, 미국: 4일)도 2 km를 제외한 구간에서 두 시스템의 차이가 더 적었는데, 침적 및 재부유를 제외한 초기 선량에서 이러한 차이의 발생은 지형효과가 반영되기 때문임을 알 수 있다. 실제 신고리 1호기 기준으로 북서쪽 2 km 구역에는 길천리 마을이 존재한다. 그리고 북서쪽 1 km, 5 km 등의 다른 거리에는 산이 존재하였으며, 이러한 지형의 특성이 평가 결과에 반영되었음을 확인할 수 있다. RASCAL은 40 km 이상 거리에 대해서는 평가가 되지 않기 때문에 전체 거리에 대한 비교는 불가하였다. 하지만 두 시스템의 결과는 각 국의 주민보호조치 기준에 따라 설정한 소개 지역이 3 km 이내의 오차를 보이므로 합리적인 수준의 차이로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 한국과 미국의 사고평가시스템 방법론 비교 및 모의 시나리오에 따른 소외 사고결말평가 결과 비교·분석을 수행하였다. 이를 위해 두 사고평가시스템의 방법론을 비교하고, 중대사고 수준의 모의 시나리오를 설정하였다. 그리고 설정한 모의 시나리오를 사용하여 사고결말평가를 수행한 뒤 결과를 비교·분석하였다.

첫 번째로 두 사고평가시스템의 평가 모듈별 방법론을 비교하였다. 선원항평가의 경우 재고량과 방사성붕괴 계산 방법, 노심방출분율 적용 단위를 제외한 다른 부분은 동일한 것으로 나타났다. 대기확산평가는 동일하게 Gaussian 확산모델을 사용하는 것으로 나타났지만, 국내는 AERMOD와 CALPUFF 평가모델을 사용하고 미국은 TADPLUME과 TADPUFF 평가모델을 사용하는 것으로 나타났다. 각 평가모델은 수평, 수직 방향의 표준편차를 계산하는 식과 지형 정보 반영 유무에서 차이가 존재하였다. 선량평가는 각 국가의 법령에 따라 도출되는 유효선량의 기간별 차이가 드러났고 적용되는 내부피폭 선량환산인자는 ICRP-60 기반의 ICRP Database와 FGR-13 (DCPAK)으로 서로 상이한 것으로 나타났다.

다음으로 사고결말평가에 사용될 중대사고 수준의 모의 시나리오를 설정하였다. 본 연구의 시나리오는 후쿠시마 원전 사고 데이터와 인접국 방사능방재훈련 시나리오를 참고하여 설정하였다. 사고의 흐름은 천재지변으로 인하여 원자로가 정지, 비상전원이 상실되고 노심이 가열, 손상되어 결국 방사성물질이 외부로 방출되는 것으로 구성된다. 대상원전은 신고리 1호기로 가정하였고 방출시점에서의 누설률은 5% hr^{-1}, 노심손상도는 노심용융 5%로 설정하였다.

마지막으로 국내 사고결말평가 방법론을 적용한 사고평가 코드와 미국 방법론이 적용된 RASCAL 코드를 사용하여 앞서 설정한 모의 시나리오의 평가 결과를 도출하고 서로 비교하였다. 평가에 사용된 재고량은 동일하지만, 노심방출분율 적용 단위와 방사성붕괴 적용 방식이 다르기 때문에 사고평가 코드의 선원항평가의 결과가 RASCAL보다 약 2배 정도 더 보수적으로 나타났다. 그리고 선량평가는 서로 다른 기간의 결과를 도출함을 고려하여 초기, 중장기로 나누어 국내의 7일과 70년, 미국의 4일과 50년의 결과를 서로 비교하였다. 그 결과 초기 선량은 사고평가 코드가 RASCAL보다 평균적으로 5~9배 정도 더 높은 결과를 보였다. 이는 선원항평가의 결과가 사고평가 코드가 더 크고 선량을 계산하는 기간 또한 사고평가 코드가 7일로 RASCAL의 4일보다 더 길기에 나타나는 현상으로 판단된다. 중장기 선량은 RASCAL이 더 큰 결과를 도출함을

알 수 있었다. 이러한 현상은 국내 지형 효과의 반영 유무로 인해서 발생되는 것으로 판단된다.

본 연구의 수행 결과, 선원항평가에서 발생한 결과값의 차이와 선량 계산 기간의 차이가 선량평가의 결과에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 정확한 선량평가를 수행하기 위해서는 선원항평가 결과값에 가장 큰 영향을 미치는 노심 재고량의 값을 각 원전의 특성을 반영한 정확한 값으로 선정해야 한다. 본 연구의 결과는 국내 사고평가시스템의 신뢰도를 증명하고 국내 원전 중대사고 시 선량 예측에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1. U.S. NRC. 1988. Source Term Estimation During Incident Response to Severe Nuclear Power Plant Accidents. NUREG-1228. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Washington, DC.
2. U.S. NRC. 1996. RTM-96, Response Technical Manual. NUREG/BR-0150. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Washington, DC.
3. U.S. NRC. 2001. RASCAL 3.0: Description of Models and Methods. NUREG-1741. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Washington, DC.
4. U.S. NRC. 2012. RASCAL 4.0: Description of Models and Methods. NUREG-1940. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Washington, DC.
5. Law No. 10910. 2011. Act on Physical Protection and Radiological Emergency.
6. Presidential Decree No. 23248. 2011. Enforcement Decree of Act on Physical Protection and Radiological Emergency.
7. Ministry of Science and Technology Decree No. 1. 2008. Enforcement Rule of Act on Physical Protection and Radiological Emergency.
8. KEPCO E&C. 2006. Radiation Dose Assessment for Recommendation of Resident Protection Measures in a Radiation Emergency.
9. KHNP. 2015. Development of an Integrated System for Assessment of Radiation Dose in case of a Nuclear Accident.
10. Yang YH, Lee GB, Son SH and Lee YJ. 2015. Comparative Analysis of the Evaluation of Source Terms to Reflect S-REDAP in case of LTSBO Severe Accident. *In*: Proceedings of the Korean Radioactive Waste Society Conference. pp. 517-518.
11. Borhan Uddin GM and Kim J. 2019. Nuclear Emergency Management using Accident Consequence Analysis Code. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.* **19**(4):215-225. https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.4.215.
12. Lee JO, Kwon J, Ryu GW, Jang JH and Kim KP. 2019. Analysis of Surface Deposition Concentration by Atmospheric Dispersion Model Using RASCAL and HYSPLIT Computer Codes for Nuclear Power Plant Accident. *J. Radiat. Ind.* **13**(2):163-171. https://doi.org/10.23042/radin.2019.13.2.163.
13. U.S. NRC. 1995. Accident Source Terms for Light Water Nuclear Power Plants. NUREG-1465. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Washington, DC.
14. KNS Committee on the Fukushima Accident. 2013. Fukushima Nuclear Accident Analysis Final Report.
15. Nuclear Safety and Security Commission. 2019. Final Report on the Establishment of a Radioactive Disaster Prevention Training System for Nuclear Accident in Neighboring Countries.
16. Meteorological Agency Comprehensive Climate Change Monitoring Information. http://www.climate.go.kr/home/09_monitoring/wdws/wvs
17. KHNP. 2018. Shin-Kori Units 1 and 2, Final Safety Analysis Report (Public).
18. EPA. 2000. A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model. EPA-454/B-95-006. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC.
19. EPA. 2004. AERMOD: Description of model formulation. EPA-454/R-03-004. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC.
20. EPA. 1993. Federal Guidance Report No.12: External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil. EPA-402-R-93-081. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC.
21. EPA. 1999. Federal Guidance Report No.13: Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides. EPA-402-R-99-001. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC.
22. ICRP. 1994. Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 68. Ann. ICRP 24(4).
23. ICRP. 1995. Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients. ICRP Publication 72. Ann. ICRP 26(1).