Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 3, pp. 305-313, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.3.305

Original article

정상조건에서의 방사성폐기물 해상운반 시 일반인 운반 위험도 평가모델 내 입력인자 민감도 분석

김재현[1] · 오가은[1] · 이동규[1] · 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Sensitivity Analysis for Factor of the Public Dose Assessment Model in Incident-Free Maritime Transportation of Radioactive Waste

Jae Hyeon Kim[1], Ga Eun Oh[1], Dong Gyu Lee[1], and Kwang Pyo Kim[1,*]

[1]Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732, Deogyeong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea

ABSTRACT The generation of low- and intermediate-level radioactive waste and spent nuclear fuel is increasing, leading to a growing demand for maritime transport of radioactive waste. During transport, radiological impacts on the public may occur, and it is therefore necessary to demonstrate prior to transport that these impacts are negligible. Currently, risk assessments for transport in Korea rely on assessment code developed abroad, but these codes incorporate the characteristics of their countries of origin, making it difficult to fully reflect domestic conditions. To address this issue, a preliminary study developed a risk assessment model that reflects domestic characteristics. When evaluating transport, uncertainties in the factors can cause variations in the results. However, since numerous factors are required in the assessment, it may be difficult for users to identify which factors should be prioritized for review when outliers occur in the results. Therefore, in order to derive results with a sufficient level of accuracy and to facilitate efficient review, sensitivity analysis is needed to establish the priority of factors. To this end, the model for estimating the maximum individual and collective doses to the public under normal transport conditions was analyzed. Subsequently, a methodology for sensitivity analysis of factors was developed. Assumptions were then established, and based on these, default values for the factors were determined. Finally, using the sensitivity analysis method, sensitivity analyses of the factors in the assessment model were conducted, and priorities of the factors were derived. These findings are expected to be useful for reviewing and analyzing input parameters when assessing public radiation exposure under normal conditions during maritime transport of radioactive waste in the future.

Key words: Radioactive waste, Maritime transportation, Incident-free, Sensitivity analysis, Assessment model

1. 서 론

현재 중·저준위 방사성폐기물, 사용후핵연료의 발생량이 증가하고 있다. 또한, 노후화된 원자력발전소 해체 계획에 따라 해체 폐기물의 발생량 역시 향후 증가할 것으로 예상된다. 국내 원전은 해안에 위치하며 이에 방사성폐기물의 해상운반 수요 또한 증가할 것으로 판단된다[1-4]. 다만 방사성폐기물 운반 시 일반인에게 방사선학적 영향을 미칠 수 있다. 따라서 운반 전 일반인에 대한 위험도 평가를 수행하여 방사선학적 영향이 낮음을 입증해야 한다. 현재 국내에서는 운반 위험도 평가 코드의 부재로 평가 시 국외 개발 평가 코드를 사용하고 있다[5,6]. 다만 이는 국민의 생활 습관을 반영하지 못하며 국내에서 고려하지 않는 평가모델이 포함된 점 등 개발국만의 특성이 반영되어 국내 특성을 반영하는 데 어려움이 있다. 이에 국내 특성을 반영한 평가 코드 개발을 위한 예비 연구를 통해 방사성폐기물 운반 시 일반인 및 작업자에 대한 피폭시나리오별 위험도 평가모델을 개발한 바 있다[7].

국제원자력기구(IAEA, International Atomic Energy Agency)와 샌디아 국립연구소(SNL, Sandia National Laboratories)는

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

Copyright© 2025 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 17 September 2025 **Revised** 30 September 2025 **Accepted** 30 September 2025

각각 방사성물질 운반 위험도 평가를 위한 전산 코드인 INTERTRAN과 RADTRAN의 입력인자에 대해 불확도 전파식 기반의 민감도 분석을 수행한 바 있다[8-10]. Kamboj 등은 부지 오염 시 일반인의 피폭 선량을 평가하기 위해 사용되는 RESRAD 코드의 입력인자를 대상으로 NDD (Normalized Dose Difference) 방법을 활용하여 민감도 분석을 수행하였다[11,12]. Mill 등과 Reardon 등은 각각 LHS (Latin Hypercube Sampling) 방법과 몬테카를로 샘플링 방법을 통해 도출한 입력인자 샘플을 활용하여 RADTRAN 전산 코드 내 사고 조건 평가모델의 입력인자 민감도 분석을 수행하였다[13,14].

예비 연구에서 개발한 방사성폐기물 운반 위험도 평가모델은 다수의 피폭시나리오를 기반으로 일반인에 대한 방사선학적 위험도를 평가하며 이에 다수의 입력인자 설정을 필요로 한다. 이로 인해 사용자는 모든 입력인자의 적절한 값을 설정하는 데 어려움을 겪을 수 있다. 또한, 평가 결과에 법적 기준치 이상의 과도하게 높은 값 등의 비정상적인 이상치가 나타날 경우 어떤 입력인자를 우선적으로 검토해야 하는지를 판단하기 어려울 수 있다. 따라서, 평가 결과를 실제로 적용할 수 있으며 판단에 활용할 수 있는 수준의 정확도를 확보하고, 이를 효과적으로 검토하기 위해서는 민감도 분석을 통해 입력인자의 우선순위를 도출하는 과정이 필요하다.

본 연구의 목적은 방사성폐기물 해상운반 중 정상조건에서 일반인 위험도 평가모델 입력인자에 대해 민감도 분석을 수행하여 입력인자 우선순위를 도출하는 것이다. 이를 위해 예비 연구로 개발한 정상조건에서의 일반인 위험도 평가모델을 분석하였다. 또한, 입력인자에 대한 민감도 분석 방법론을 도출하고, 입력인자 기본값을 설정하였다. 최종적으로 앞서 설정한 민감도 분석 기법을 활용하여 평가모델 내 입력인자에 대한 민감도 분석을 통하여 입력인자 우선순위를 도출하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 예비 연구로 개발한 해상운반 정상조건에서의 일반인 피폭 선량 평가모델에 대하여 민감도 분석을 수행하였다. 이를 위하여 우선 일반인 피폭시나리오를 1) 운반선박 정박지 주변 거주자, 2) 운반선박 정박지 주변 보행자의 세부 피폭시나리오로 구분하여 분석하였다. 또한 최대 개인 선량과 집단 선량에 대하여 분석을 수행하였다. 이후 민감도 분석 방법론인 불확도 전파식을 조사 및 분석하였다. 또한, 민감도 분석을 위해 가정사항을 수립하고 이에 대한 입력인자의 기본값을 설정하였다. 최종적으로 앞서 도출된 민감도 분석 방법론에 기반하여 평가모델 입력인자 민감도 분석을 수행하였다.

2.1. 일반인 위험도 평가모델 분석

본 연구에서 분석한 일반인 피폭시나리오는 운반선박 정박지 주변 일반인으로 단일 피폭시나리오이다. 방사성폐기물 해상운반의 경우, 해안으로부터 수 km에서 수십 km 이상 떨어져 운반이 수행된다. 이에 운반선박 경로 주변 일반인에 대한 영향을 미미할 것으로 판단되며 이에 피폭시나리오로 고려하지 않았다. 운반선박 정박지 주변 일반인 피폭시나리오는 1) 운반선박 정박지 주변 거주자와 2) 운반선박 정박지 주변 보행자 세부 피폭시나리오로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 해당 세부 피폭시나리오의 최대 개인 선량 평가모델과 집단 선량 평가모델에 대하여 분석을 수행하였다.

2.1.1. 선원 형태 가정

본 연구에서 분석한 평가모델은 선원의 형태를 피폭 대상과의 거리에 따라 점선원 또는 선선원으로 가정한다. 일반적으로 선원의 형태를 단순화할 경우, 등방성의 점선원으로 가정하게 된다. 다만 피폭 대상이 선원에 근접한 경우 선원의 형태를 점선원으로 가정하는 것에 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 일정 거리를 기준으로 선원의 형태를 선선원 또는 점선원으로 가정하였다. 이때 실제 선원 주변 방사선장의 불균일성을 보정하기 위해 형상인자 개념을 도입하였다. 형상인자는 다음 수식을 통해 계산할 수 있다.

$$k_0 = (1 + 0.5d_e)^m \tag{1}$$

- k_0 = 선원 형상인자(선선원: m, 점선원: m^2)
- d_e = 선원 유효치수(m)
- m = 상수(선선원: 1, 점선원 2)

위 수식에서 선원 유효치수는 선원의 가장 긴 치수인 임계치수가 4 m 이하인 경우 임계치수와 같은 값을 가진다. 다만 선원의 임계치수가 4 m 이상일 경우, 과대평가의 가능성이 있으므로 이를 방지하기 위하여 추가적인 계산을 수행산다. 아래 수식에 선원 유효치수 계산 수식을 나타내었다.

$$d_e = \begin{cases} d, & d < 4 \\ 2(1+0.5d)^{0.75} - 55, & d \geq 4 \end{cases} \tag{2}$$

- d_e = 선원 유효치수(m)
- d = 선원 임계치수(선원의 가장 긴 치수) (m)

2.1.2. 최대 개인 선량 평가모델

운반선박 정박지 주변 거주자는 방사성폐기물이 적재된 선박이 정박한 지역 인근에 거주하는 일반인을 의미한다. 운반선박 정박지 주변 거주자에 대한 최대 개인 선량 평가모델은 아래 식과 같다. 해당 평가모델 내 방사선원인 선박의 형태는 피폭대상과의 거리에 따라 점선원 또는 선선원으로 구분된다.

$$d_{stop,R} = \frac{DR_v \cdot k_0 \cdot BSF_{stop} \cdot T_{stop}}{x^m_{stop,R\,\min}} \times \left(\begin{matrix} FG \cdot e^{-\mu_G \cdot x_{stop,R\,\min}} \cdot B_G(x_{stop,R\,\min}) \\ +FN \cdot e^{-\mu_N \cdot x_{stop,R\,\min}} \cdot B_N(x_{stop,R\,\min}) \end{matrix} \right) \tag{3}$$

- $d_{stop,R}$ = 운반선박 정박지 주변 거주자의 피폭 선량(mSv)
- DR_v = 운반선박 1 m 거리에서의 외부 피폭 방사선량률(mSv h^{-1})
- k_0 = 운반선박의 형상인자(선선원: m, 점선원: m^2)
- BSF_{stop} = 건물 차폐 인자(–)
- T_{stop} = 운반선박의 정박 시간(h)
- $x_{stop,R\,\min}$ = 운반선박과 거주자 사이 거리(m)
- m = 선선원: 1, 점선원: 2
- FG = 감마선 비율(–)
- FN = 중성자 비율(–)
- μ_G = 감마선의 감쇠계수(–)
- μ_N = 중성자의 감쇠계수(–)
- B_G = 감마선의 축적인자(–)
- B_N = 중성자의 축적인자(–)

운반선박 정박지 주변 보행자의 경우, 거주자와 유사하게 방사성폐기물이 적재된 선박 인근에 존재하는 보행자를 의미한다. 다만 보행자의 경우, 건물 외부에서 피폭을 받게 되므로 거주자와 달리 건물로 인한 차폐 효과를 제공받지 못한다. 운반선박 정박지 주변 보행자의 최대 개인 선량 평가모델은 다음과 같다.

$$d_{stop,P} = \frac{DR_v \cdot k_0 \cdot T_{stop}}{x^m_{stop,P\,\min}} \times \begin{pmatrix} FG \cdot e^{-\mu_G \cdot x_{stop,P\,\min}} \cdot B_G(x_{stop,P\,\min}) \\ +FN \cdot e^{-\mu_N \cdot x_{stop,P\,\min}} \cdot B_N(x_{stop,P\,\min}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

- $d_{stop,P}$ = 운반선박 정박지 주변 보행자의 피폭 선량(mSv)
- DR_v = 운반선박 1 m 거리에서의 외부 피폭 방사선량률(mSv h^{-1})
- k_0 = 운반선박의 형상인자(선선원: m, 점선원: m^2)
- T_{stop} = 운반선박의 정박 시간(h)
- $x_{stop,R\,\min}$ = 운반선박과 보행자 사이 거리(m)
- m = 선선원: 1, 점선원: 2
- FG = 감마선 비율(–)
- FN = 중성자 비율(–)
- μ_G = 감마선의 감쇠계수(–)
- μ_N = 중성자의 감쇠계수(–)
- B_G = 감마선의 축적인자(–)
- B_N = 중성자의 축적인자(–)

2.1.3. 집단 선량 평가모델 분석

운반선박 정박지 주변 일반인의 집단 선량 평가 시, 인구밀도와 평가할 면적을 고려해야 한다. 일반적으로 운반선박의 주변 지역 중 절반은 바다에 접하며, 반대쪽 절반만이 일반인이 위치할 수 있는 육지와 접하게 된다. Fig. 1에 해당 운반선박 정박지 주변 지역에 대한 도식을 나타내었다. 일반인이 위치하는 구역과 인구밀도를 고려한 운반선박 정박지 주변 거주자의 집단 선량 평가모델은 다음과 같다.

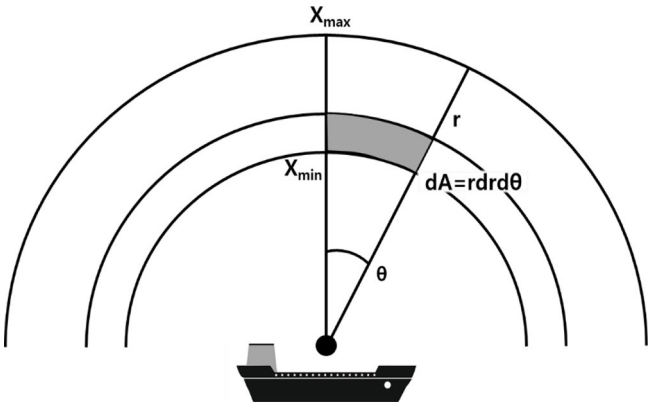

Fig. 1. Schematic Diagram for Calculating the Area Around the Docking Site.

$$D_{stop,R} = \pi \cdot Q \cdot DR_v \cdot k_0 \cdot BSF_{stop} \cdot T_{stop} \cdot PD_{stop} \times \begin{pmatrix} FG \cdot \int_{x_{stop,R\,\min}}^{x_{stop,R\,\max}} \frac{e^{-\mu_G r} \cdot B_G(r)}{r^n} dr + \\ FN \cdot \int_{x_{stop,R\,\min}}^{x_{stop,R\,\max}} \frac{e^{-\mu_N r} \cdot B_N(r)}{r^n} dr \end{pmatrix} \quad (5)$$

- $D_{stop,R}$ = 운반선박 정박지 주변 거주자의 집단 선량(person Sv)
- Q = 단위 환산 인자(10^{-9} km^2 Sv m^{-2} mSv^{-1})
- DR_v = 운반선박 1 m 거리에서의 외부 피폭 방사선량률(mSv h^{-1})
- k_0 = 운반선박의 형상인자(선선원: m, 점선원: m^2)
- BSF_{stop} = 건물 차폐 인자(–)
- T_{stop} = 운반선박의 정박 시간(h)
- PD_{stop} = 정박지 지역 인구 밀도(person km^{-2})
- $x_{stop,R\,\min}$ = 정박지 인근 거주자 최소 피폭 거리(m)
- $x_{stop,R\,\max}$ = 정박지 인근 거주자 최대 피폭 거리(m)
- n = 선선원: 1, 점선원: 2
- FG = 감마선 비율(–)
- FN = 중성자 비율(–)
- μ_G = 감마선의 감쇠계수(–)
- μ_N = 중성자의 감쇠계수(–)
- B_G = 감마선의 축적인자(–)
- B_N = 중성자의 축적인자(–)

운반선박 정박지 주변 보행자의 집단 선량은 보행자 밀도에 의존한다. 따라서 앞서 분석한 거주자 집단 선량 평가모델에 인구밀도에 대한 보행자밀도 인자를 추가로 고려해주어야 한다. 아래 운반선박 정박지 주변 보행자의 집단 선량 평가모델을 나타내었다.

$$D_{stop,P} = \pi \cdot Q \cdot DR_v \cdot k_0 \cdot BSF_{stop} \cdot T_{stop} \cdot PD_{stop} \cdot RPD \times \begin{pmatrix} FG \cdot \int_{x_{stop,P\,\min}}^{x_{stop,P\,\max}} \frac{e^{-\mu_G r} \cdot B_G(r)}{r^n} dr + \\ FN \cdot \int_{x_{stop,P\,\min}}^{x_{stop,P\,\max}} \frac{e^{-\mu_N r} \cdot B_N(r)}{r^n} dr \end{pmatrix} \quad (6)$$

- $D_{stop,P}$ = 운반선박 정박지 주변 보행자의 집단 선량(person Sv)
- Q = 단위 환산 인자(10^{-9} km^2 Sv m^{-2} mSv^{-1})
- DR_v = 운반선박 1 m 거리에서의 외부 피폭 방사선량률(mSv h^{-1})
- k_0 = 운반선박의 형상인자(선선원: m, 점선원: m^2)
- $BSFstop$ = 건물 차폐 인자(–)
- T_{stop} = 운반선박의 정박 시간(h)
- PD_{stop} = 정박지 지역 인구 밀도(person km^{-2})
- RPD = 인구 밀도에 대한 보행자 밀도 비(–)
- $x_{stop,\,P\,\min}$ = 정박지 인근 보행자 최소 피폭 거리(m)
- $x_{stop,\,P\,\max}$ = 정박지 인근 보행자 최대 피폭 거리(m)
- n = 선선원: 1, 점선원: 2
- FG = 감마선 비율(–)
- FN = 중성자 비율(–)
- μ_G = 감마선의 감쇠계수(–)
- μ_N = 중성자의 감쇠계수(–)
- B_G = 감마선의 축적인자(–)
- B_N = 중성자의 축적인자(–)

2.2. 불확도 전파식 기반 민감도 분석 방법론

민감도 분석 방법론은 크게 결정론적 분석 방법과 확률론적 분석 방법으로 구분된다. 결정론적 분석 방법으로는 불확도 전파식 기반 민감도 분석이 있으며, 확률론적 분석 방법으로는 LHS (Latin Hypercube Sampling) 방법이 있다. 결정론적 방법의 장점은 입력인자의 확률분포 정보가 없어도 기본값과 불확도를 바탕으로 분석을 수행할 수 있다는 점이다. 다만 다수의 입력인자가 동시에 변할 경우, 분석이 어렵다는 단점이 있다. 확률론적 방법의 경우 가장 민감한 입력인자를 쉽게 도출할 수 있다는 장점이 있으나, 다른 입력인자의 민감도 분석 결과가 모호하며 결정론적 방법에 비해 편향성이 크다는 단점이 있다. 본 연구에서는 평가모델의 주요 입력인자의 확률분포 확보에 어려움이 있어 불확도 전파식 기반의 민감도 분석 방법론을 선정하였다.

불확도 전파란 측정을 통해 간접적으로 물리량을 도출할 때, 측정값의 불확도가 결과값에 영향을 미치는 것을 의미한다. 다음 식에 측정값과 결과값의 불확도 간 관계를 나타내었다.

$$\epsilon_y^2 = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot \epsilon_{x_i}^2 \tag{7}$$

- ϵ_y^2 = x로부터 계산된 물리량 y의 불확도
- $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ = x에 대한 함수 f의 변화율
- ϵ_{x_i} = x의 불확도

특정 입력인자의 값이 변화함에 따라 피폭 선량이 변하는 정도를 중요도로 정의할 수 있다. 이때 피폭시나리오의 선량 평가모델에서 특정 입력인자의 중요도는 다음 식으로 통해 정의할 수 있다[8].

$$I_c = \epsilon_x \cdot x_c \cdot \sum\left(\frac{\partial d_{x_c}}{\partial x_c}\right) \tag{8}$$

- I_c = x의 중요도
- ϵ_x = x의 불확도
- x_c = x의 값
- $\sum\left(\frac{\partial d_{x_c}}{\partial x_c}\right)$ = 평가모델 내 x_c에 대한 변화율의 합

선행 연구의 경우, 입력인자에 대하여 1%의 불확도를 가정한 후 민감도 분석을 수행한 바 있다[8,10]. 이에 본 연구에서도 각 입력인자에 대하여 1%의 불확도가 존재한다고 가정한 후 민감도 분석을 수행하였다.

2.3. 평가모델 내 입력인자 기본값 설정

불확도 전파식에 기반하여 민감도 분석 시, 입력인자의 기본값을 설정할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 현재 수행 중인 중·저준위 방사성폐기물의 해상운반을 참고하여 기본값을 설정하였다. 기본값을 설정하기 어려운 경우, 평가의 용이성을 고려하여 기본값을 설정하였다. 국내 원자력안전위원회고시에 따르면 중·저준위 방사성폐기물 운반선박의 표면선량률은 시간당 2 mSv 이하여야 한다. 본 연구에서 분석한 평가모델은 운반선박과 인접한 영역의 경우 선량률은 거리에 반비례하는 것으로 가정하게 된다. 이에 해당 값을 활용하여 1 m 이격거리 선량률의 기본값을 0.2 mSv hr^{-1}로 설정하였다. 운반선박 임계치수의 경우 현재 중·저준위 방사성폐기물 운반선박으로 활용되는 한진 청정누리호의 제원을 참고하여 78.6 m로 설정하였다[15]. 감마선 비율 및 중성자 비율은 중·저준위 방사성폐기물의 특성을 고려하여 각각 1, 0으로 설정하였다. 본 연구에서는 정박지 주변의 일반인이 존재하는 지역을 대도시, 중소도시, 지방으로 구분하여 평가를 수행하였다. 이는 지역 유형별 건물 종류가 상이하여 건물 차폐 인자에 차이를 두기 위함이다. 지역 유형별 건물 차폐 인자 기본값 설정 시 국외 평가 사례를 참고하여 각각 0.018, 0.87, 1을 기본값으로 설정하였다[10]. 인구밀도의 경우, 국내 평균 인구밀도인 515.7 person km^{-2}를 기본값으로 설정하였다[16]. 또한, 앞서 분석한 평가모델은 방사선원과 피폭대상 간 거리에 따라 선원 형태 가정이 달라진다. 정박지 주변 일반인과 운반선박 간 거리가 운반선박 임계치수의 2배 미만일 경우 선원 형태를 점선원으로 가정하게 되며, 2배 이상일 경우 선원 형태를 선선원으로 가정하게 된다. 이에 본 연구에서는 선원 형태별로 평가를 수행하였다. 최소 피폭 거리와 최대 피폭 거리의 경우, 선원 형태 가정을 고려하여 기본값을 설정하였다. 선선원 가정 시, 임계치수의 2배가 약 62 m임을 고려하여 거주자와 보행자의 최소 및 최대 피폭 거리 기본값을 각각 10 m와 50 m로 설정하였다. 점선원 가정 시, 평가의 용이성 및 선행 연구 사례를 참고하여 최소 및 최대 피폭 거리 기본값을 각각 100 m와 800 m로 설정하였다[10]. 인구 밀도에 대한 보행자 밀도의 경우, 건축공간연구원의 연구 결과를 바탕으로 기본값을 설정

Table 1. Default value of input factor for public dose assessment

Input factor		Default value
1 m dose rate (mSv/hr)		0.2
Gamma-ray fraction (−)		1
Neutron fraction (−)		0
Critical dimension of ship (m)		78.6
Time (hr)		1
Building shielding factor (−)[a,b]	Urban	0.018
	Suburban	0.87
	Rural	1
Population density (people/km^2)[b]		515.7
Ratio of pedestrian density to population density (−)[b]		4
Minimum distance from ship (m)[a,b]	Line source	10
	Point source	100
Maximum distance from ship (m)[b]	Line source	50
	Point source	800

[a]For the individual exposure scenarios
[b]For the collective exposure scenarios

하였다. 해당 연구에서는 서울시의 보행자 밀도를 조사하였으며, 평균적으로 거주자 밀도의 4배에 해당하는 값이 도출되는 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 해당 값을 차용하여 4를 기본값으로 설정하였다[17].

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 예비 연구로 개발된 해상운반 시 일반인 피폭 선량 평가모델의 입력인자에 대해 민감도 분석을 수행하기 위해 불확도 전파식 기반 민감도 분석 기법을 사용하였다. 이를 위해 운반선박 정박지 주변 일반인 평가모델 입력인자의 기본값을 선정하였다. 이후, 선원 형태 가정에 따른 최대 개인 선량 평가모델과 집단 선량 평가모델에 대한 입력인자 민감도 분석을 수행하였다. 최종적으로 민감도 분석을 통해 중요도 값을 도출한 이후, 중요도 값의 절댓값에 기반하여 우선순위를 도출하였다. 어떤 입력인자의 중요도가 다른 입력인자보다 상대적으로 높은 값을 나타낼 경우, 해당 입력인자가 선량평가 결과에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다. 따라서 중요도가 가장 높은 입력 인자는 향후 실제 평가 시 우선적으로 고려해야 할 것으로 판단된다. 이에 가장 높은 중요도 값을 나타낸 입력인자를 주요 입력인자로 정의하였다.

3.1. 최대 개인 선량 평가모델 민감도 분석 결과

Fig. 2에 지역 유형별 최대 개인 선량 평가모델에 대한 입력인자 민감도 분석 결과를 제시하였다. 선선원 가정 시, 지역 유형과 무관하게 1 m 이격거리 선량률과 정박 시간의 중요도가 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 해당 입력인자가 선량 평가 결과에 선형적으로 영향을 줌에 의한 것으로 판단된다. 해당 입력인자는 거주자 또는 보행자의 피폭 선량에 모두 영향을 미치는 인자이며, 이에 거주자 또는 보행자에게만 영향을 미치는 인자에 비해 중요도가 높게 도출된 것으로 판단된다. 다만 선박 임계치수 또한 두 피폭시나리오에 모두 기여하지만 형상인자로 계산되어 간접적으로 평가모델에 반영됨에 따라 중요도는 상대적으로 낮은 값을 나타내었다.

점선원 가정 시, 지역 유형에 따라 가장 중요도가 높은 입력인자에 차이가 나타났다. 대도시의 경우 보행자 최소 피폭 거리의 중요도가 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 대도시의 건물로 인한 차폐 효과가 상대적으로 크므로 총 선량에 거주자의 선량 기여분이 작음에 의한 것으로 판단된다. 다만 중소도시와 지방의 경우 건물로 인한 차폐 효과가 적어지며 이에 총 선량에 대한 보행자의 선량 기여분이 감소하여 선박 임계치수의 중요도가 더 높아지는 것으로 나타났다. 선박 임계치수의 경우 앞서 기술한 바와 같이 형상인자로 평가모델에 포함된다. 다만 점선원 가정 시, 선량은 거리의 제곱에 반비례하게 되며, 이에 중요도 값이 증가한 것으로 판단된다.

Table 2에 지역 유형에 따른 입력인자 중요도 변화를 나타냈다. 선선원 가정 시와 점선원 가정 시 모두 지역 유형이 지방에서 대도시로 변화함에 따라 거주자 최소 피폭 거리 입력인자의 중요도 순위는 감소하는 것으로 나타났으며, 보행자 최소 피폭 거리 입력인자의 중요도 순위는 증가하는 것으로 나타났다. 지방의 경우 건물 차폐 인자의 값이 1이며, 이는 보행자와 같이 건물로 인한 차폐 효과가 없다는 것을 의미한다. 이에 두 입력인자의 중요도 순위는 같은 것으로 나타났다. 다만 지역 유형이 변화하며 건물로 인한 차폐 효과가 커지며, 거주자의 피폭이 전체 피폭 선량에 기여하는 부분이 상대적으로 낮아지게 된다. 따라서 건물로 인한 차폐에 영향을 받는 입력인자인 건물 차폐 인자와 거주자 거리의 중요도 순위가 낮아지는 것으로 판단되었다. 최종적으로 최대 개인 선량 평가 시 주요 입력인자는 선선원 가정 시 1 m 이격거리 선량률과 정박 시간, 점선원 가정 시 선박 임계치수로 나타났다.

3.2. 집단 선량 평가모델 민감도 분석 결과

Fig. 3에 지역 유형별 집단 선량 평가모델에 대한 입력인자 민감도 분석 결과를 제시하였다. 선선원 가정 시, 대도시와 중소도시의 경우 보행자 최대 피폭 거리의 중요도가 가장 높은 것으로 나타났으며, 지방의 경우 1 m 이격거리 선량률, 인구밀도, 정박 시간, 보행자 최대 피폭 거리의 중요도가 동일하게 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 앞서 분석한 최대 개인 선량 평가모델과 유사하게 총 선량에 대한 보행자 피폭의 기여분이 큰 것에 의함으로 판단된다. 중요도가 가장 낮은 인자는 거주자 최소 피폭 거리로 나타났으며, 이 또한 유사한 이유에 의한 것으로 판단된다.

점선원 가정 시, 지역 유형과 무관하게 선박 임계치수의 중요도가 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 앞서 평가한 최대 개인 선량

Table 2. Importance value and amount of change for public individual by region type

Input factor	Rural	Suburban	Urban
	Line source		
1 m dose rate	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-2} (−)	1.00×10^{-2} (−)
Critical dimension of ship	7.00×10^{-3}	7.00×10^{-3} (−)	7.00×10^{-3} (−)
Time in port	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-2} (−)	1.00×10^{-2} (−)
Building shielding factor	5.00×10^{-3}	4.65×10^{-3} (-3.48×10^{-4})	1.77×10^{-4} (-4.48×10^{-3})
Minimum distance to resident	-5.00×10^{-3}	-4.65×10^{-3} ($+3.48\times10^{-4}$)	-1.77×10^{-4} ($+4.48\times10^{-3}$)
Minimum distance to pedestrian	-5.00×10^{-3}	-5.35×10^{-3} (-3.48×10^{-4})	-9.82×10^{-4} (-4.48×10^{-3})
	Point source		
1 m dose rate	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-2} (−)	1.00×10^{-2} (−)
Critical dimension of ship	1.40×10^{-2}	1.40×10^{-2} (−)	1.40×10^{-2} (−)
Time in port	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-2} (−)	1.00×10^{-2} (−)
Building shielding factor	5.00×10^{-3}	4.65×10^{-3} (-3.48×10^{-4})	1.77×10^{-4} (-4.48×10^{-3})
Minimum distance to resident	-1.00×10^{-2}	-9.30×10^{-3} ($+6.95\times10^{-3}$)	-3.54×10^{-4} ($+8.95\times10^{-3}$)
Minimum distance to pedestrian	-1.00×10^{-2}	-1.07×10^{-2} (-6.95×10^{-3})	-1.96×10^{-2} (-8.95×10^{-3})

Numbers in parentheses represent changes in importance by area type.

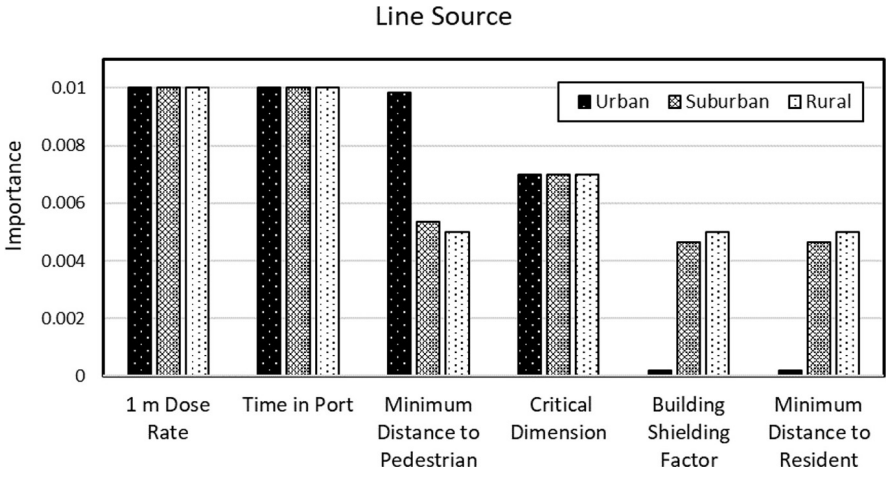

Fig. 2. Result of input factor sensitivity for public individual dose with line source.

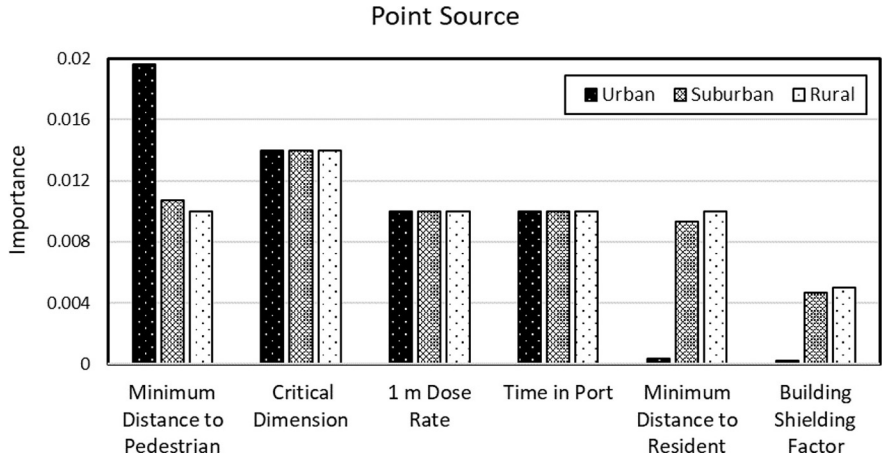

Fig. 3. Result of input factor sensitivity for public individual dose with point source.

Table 3. Importance value and amount of change for public group by region type

Input factor	Rural	Suburban	Urban
	Line source		
1 m dose rate	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-2} (−)	1.00×10^{-2} (−)
Critical dimension of ship	7.00×10^{-3}	7.00×10^{-3} (−)	7.00×10^{-3} (−)
Time in port	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-2} (−)	1.00×10^{-2} (−)
Building shielding factor	2.00×10^{-3}	1.79×10^{-3} (-2.14×10^{-4})	4.48×10^{-5} (-1.74×10^{-3})
Population density	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-2} (−)	1.00×10^{-2} (−)
Ratio of pedestrian density to population density	8.00×10^{-3}	8.21×10^{-3} ($+2.14\times10^{-4}$)	9.96×10^{-3} ($+1.74\times10^{-3}$)
Minimum distance to resident	-5.00×10^{-4}	-4.47×10^{-4} ($+5.34\times10^{-5}$)	-1.12×10^{-5} ($+4.35\times10^{-4}$)
Maximum distance to resident	2.50×10^{-3}	2.23×10^{-3} (-2.67×10^{-4})	5.60×10^{-5} (-2.18×10^{-3})
Minimum distance to pedestrian	-2.00×10^{-3}	-2.05×10^{-3} (-5.34×10^{-5})	-2.49×10^{-3} (-4.35×10^{-4})
Maximum distance to pedestrian	1.00×10^{-2}	1.03×10^{-2} ($+2.67\times10^{-4}$)	1.24×10^{-2} ($+2.18\times10^{-3}$)
	Point source		
1 m dose rate	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-2} (−)	1.00×10^{-2} (−)
Critical dimension of ship	1.40×10^{-2}	1.40×10^{-2} (−)	1.40×10^{-2} (−)
Time in port	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-2} (−)	1.00×10^{-2} (−)
Building shielding factor	2.00×10^{-3}	1.79×10^{-3} (-2.14×10^{-4})	4.48×10^{-5} (-1.74×10^{-3})
Population density	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-2} (−)	1.00×10^{-2} (−)
Ratio of pedestrian density to population density	8.00×10^{-3}	8.21×10^{-3} ($+2.14\times10^{-4}$)	9.96×10^{-3} ($+1.74\times10^{-3}$)
Minimum distance to resident	-9.62×10^{-4}	-8.59×10^{-4} ($+1.03\times10^{-4}$)	-2.15×10^{-5} ($+8.38\times10^{-4}$)
Maximum distance to resident	9.62×10^{-4}	8.59×10^{-4} (-1.03×10^{-4})	2.15×10^{-5} (-8.38×10^{-4})
Minimum distance to pedestrian	-3.85×10^{-3}	-3.95×10^{-3} (-1.03×10^{-4})	-4.79×10^{-3} (-8.38×10^{-4})
Maximum distance to pedestrian	3.85×10^{-3}	3.95×10^{-3} ($+1.03\times10^{-4}$)	4.79×10^{-3} ($+8.38\times10^{-4}$)

Numbers in parentheses represent changes in importance by area type.

평가모델과 유사한 이유에 의한 것으로 판단된다. 선박 임계치수 다음으로는 1 m 이격거리 선량률, 인구밀도, 정박시간과 같이 선량 평가결과에 선형적으로 기여하는 입력인자의 중요도가 높은 것으로 나타났다. 이는 해당 인자를 제외한 입력인자들은 거주자 또는 보행자의 피폭 선량에만 영향을 주는 인자이며, 이에 두 경우 모두에 영향을 주는 입력인자의 중요도가 상대적으로 높게 나타난 것으로 판단된다.

Table 3에 지역 유형에 따른 입력인자 중요도 변화를 나타내었다. 선선원 가정 시, 최대 개인 선량 평가모델 분석 시와 유사하게 지역 유형이 지방에서 대도시로 변화함에 따라 거주자 최소 및 최대 피폭 거리의 중요도 순위는 낮아졌으며, 보행자 최소 및 최대 피폭 거리의 중요도 순위는 증가한 것으로 나타났다. 다만 점선원 가정 시, 중요도 값의 증감은 나타났으나 중요도 값이 상대적으로 다른 인자의 값보다 낮아 순위의 변동은 없는 것으로 나타났다. 최종적으로 집단 선량 평가 시 주요 입력인자는 선선원 가정 시 보행자 최대 피폭 거리, 점선원 가정 시 선박 임계치수로 나타났다.

선행 연구의 경우 승무원, 작업자, 경로 주변 일반인, 정차지 주변 일반인 집단 선량 평가모델에 대한 민감도 분석을 수행한 것으로 나타났다[18]. 이중 정차지 주변 일반인에 대한 민감도 분석 결과의 경우, 본 연구에서 수행한 민감도 분석 결과와 유사한 것으로 나타났다. 해당 연구의 경우 피폭 인구와 정차 시간의 중요도가 1.00%로 나타났으며, 본 연구의 경우 인구밀도와 정박시간의 중요도가 1.00%로 나타났다. 다만 선행 연구의 경우, 건물로 인한 차폐 효과를 고려하지 않으며 입력인자의 종류에 차이가 있어 평가 결과에 차이가 일부 나타난 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 방사성폐기물 해상운반 시 일반인 피폭 선량 평가모델 내 입력인자의 민감도 분석으로 수행하여 입력인자의 중요도 우선순위를 도출하였다. 이를 위하여 우선 예비 연구에서 개발된 해상운반 정상조건에서의 일반인 선량 평가모델을 분석하였다. 평가모델 내 입력인자에 대한 민감도 분석 방법론을 수립한 후 각 입력인자별 기본값을 설정하였다. 이후 최대 개인 선량 평가모델과 집단 선량 평가모델에 대하여 입력인자의 민감도 분석을 수행하였다.

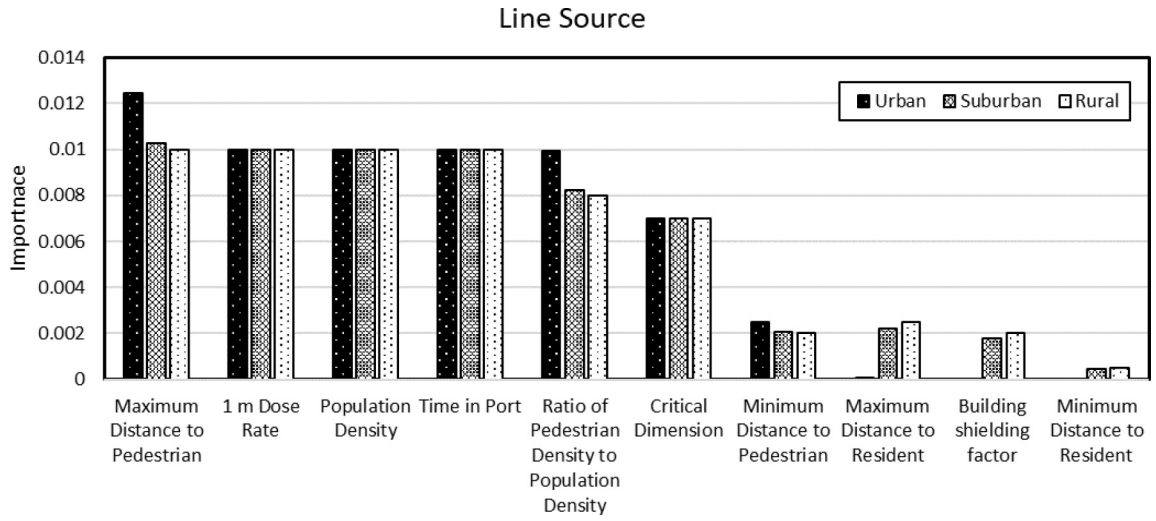

Fig. 4. Result of input factor sensitivity for public collective dose with line source.

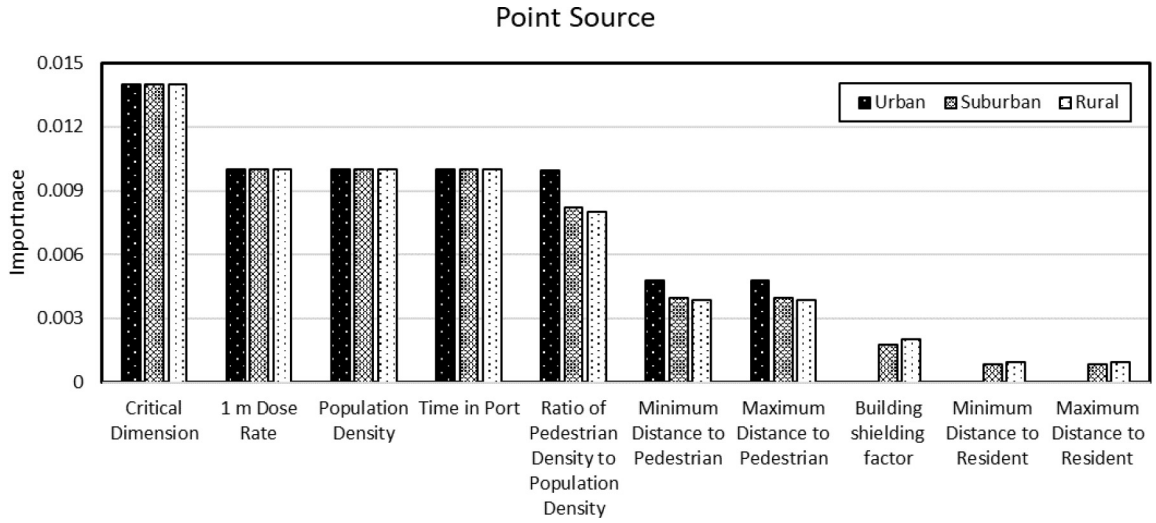

Fig. 5. Result of input factor sensitivity for public collective dose with point source.

최대 개인 선량 평가모델의 입력인자 민감도 분석 결과, 선선원 가정 시 1 m 이격거리 선량률과 정박시간 입력인자의 중요도가 높은 것으로 나타났다. 이는 해당 입력인자가 거주자와 보행자의 피폭 선량 평가에 공통적으로 포함되는 인자임에 의한 것으로 판단된다. 점선원 가정 시 보행자 최소 피폭 거리와 선박 임계치수의 중요도가 높은 것으로 나타났다. 보행자 최소 피폭 거리의 경우 점선원 가정에 따라 선량이 거리 제곱에 반비례한다는 점과 총 선량에 대한 보행자의 기여분이 크다는 점에 기인하는 것으로 판단된다. 선박 임계치수의 경우 형상인자로 평가모델에 포함된다는 점에 의한 것으로 판단된다.

집단 선량 평가모델의 입력인자 민감도 분석 결과, 선선원 가정 시, 보행자 최대 피폭 거리의 중요도가 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 앞서 최대 개인 선량 평가모델 분석 시와 유사한 이유에 의한 것으로 판단된다. 점선원 가정 시 선박 임계치수의 중요도가 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 최대 개인 선량 평가모델 분석 시와 유사하게 평가모델 내 형상인자로 포함된다는 점에 의한 것으로 판단된다. 집단 선량 평가모델의 경우 최대 개인 선량 평가모델에서 최대 피폭 거리, 인구밀도, 면적 등이 추가로 고려되며, 유사한 점이 다수 존재한다. 이에 분석 결과 또한 유사한 것으로 판단된다.

본 연구 결과는 향후 방사성폐기물의 해상운반 시 정상조건에서 일반인 피폭 선량 평가 시에 입력인자의 검토와 분석에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 향후 국내 방사성폐기물의 해상운반에 따른 위험도 평가 시 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다 (No. RS-2021-KN059910).

참고문헌

1. MOTIE. 2020. 2nd Low and High Level Radioactive Waste Management Basic Plan.
2. MOTIE. 2021. 2nd High Level Radioactive Waste Management Basic Plan.
3. KORAD. 2022. Radioactive Waste Management Plan.
4. WACID. Low and High Level Radioactive Waste Transportation result report. Accessed June 25th 2025. Available from: https://www.kins.re.kr/wacid/md-carryReport.
5. Lee JM, Jeon JS, Kim TH, Park SG and Han BS. 2007. Risk assessment for marine transport of radioactive waste by route. Proceedings of the 2007 Annual Conference of the Korean Radioactive Waste Society, pp. 367-368.
6. Yuk DS, Kim YC and Lee YG. 2009. Preliminary risk assessment for collision of ships in maritime transport of low- and intermediate-level radioactive waste using RADTRAN. Proceedings of the 2009 Annual Conference of the Korean Radioactive Waste Society, pp. 399-400.
7. Oh GE, Kwak MW, Shin SW, Choi HY and Kim KP. 2023. Development of Radiation Risk Assessment Model for Maritime Transportation of Radioactive Waste in Accident Condition, Nuclear Safety Technology Analysis Report. NSTAR-23RS22-229.
8. IAEA. 1983. INTERTRAN: A System for Assessing the Impact from Transporting Radioactive Material. IAEA-TECDOC-287.
9. SNL. 1992. RADTRAN 4: User Guide. SAND89-2370.
10. SNL. 2014. RADTRAN 6 Technical Manual. SAND2014-0780.
11. ANL. 2000. Development of Probabilistic RESRAD 6.0 and RESRAD-BUILD 3.0 Computer Codes. NUREG/CR-6697.
12. NRC. 2000. Probabilistic Dose Analysis Using Parameter Distribution Developed for RESRAD and RESRAD-BUILD Codes. NUREG/CR-6676.
13. SNL. 1995. Sensitivity Analysis for RADTRAN 4 Input Parameters. SAND95-0138C.
14. Reardon PC and Neuhauser KS. 1987. A Demonstration Sensitivity Analysis for RADTRAN 3; 417-422.
15. Shin YL and Lee JW. 2017. The Status and Experiences of LILW Disposal Facility Construction. *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng*. **54**(4):389-396. https://doi.org/10.12972/ksmer.2017.54.4.38.
16. Statistics Korea. 2024. Population and Housing Census.
17. AURI. 2013. Walking Environment and Pedestrian Behavior Field Survey Report (I).
18. SNL, 1986. A Demonstration Sensitivity Analysis for RADTRAN III. SAND85-1001.