JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

17(1) : 83-92 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.1.83

결정론적 및 확률론적 방법을 이용한 방사성폐기물 운반 위험도 평가 비교 · 분석

곽민우[1], 김혁재[1], 오가은[1], 이신동[1], 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Comparison of Radioactive Waste Transportation Risk Assessment Using Deterministic and Probabilistic Methods

Min Woo Kwak[1], Hyeok Jae Kim[1], Ga Eun Oh[1], Shin Dong Lee[1] and Kwang Pyo Kim[1,*]

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

Abstract When assessing the risk of radioactive wastes transportation on land, computer codes such as RADTRAN and RISKIND are used as deterministic methods. Transportation risk assessment using the deterministic method requires a relatively short assessment time. On the other hand, transportation risk assessment using the probabilistic method requires a relatively long assessment time, but produces more reliable results. Therefore, a study is needed to evaluate the exposure dose using a deterministic method that can be evaluated relatively quickly, and to compare and analyze the exposure dose result using a probabilistic method. The purpose of this study is to evaluate the exposure dose during transportation of radioactive wastes using deterministic and probabilistic methods, and to compare and analyze them. For this purpose, the main exposure factors were selected and various exposure situations were set. The distance between the radioactive waste and the receptor, the size of the package, and the speed of vehicle were selected as the main exposure factors. The exposure situation was largely divided into when the radioactive wastes were stationary and when they were passing. And the dose (rate) model of the deterministic overland transportation risk assessment computer code was analyzed. Finally, the deterministic method of the RADTRAN computer code and the RISKIND computer code and the probabilistic method of the MCNP 6 computer code were used to evaluate the exposure dose in various exposure situations during transportation of radioactive wastes. Then we compared and analyzed them. As a result of the evaluation, the tendency of the exposure dose (rate) was similar when the radioactive wastes were stationary and passing. For the same situation, the evaluation results of the RADTRAN computer code were generally more conservative than the results of the RISKIND computer code and the MCNP 6 computer code. The evaluation results of the RISKIND computer code and the MCNP 6 computer code were relatively similar. The results of this study are expected to be used as basic data for establishing the radioactive wastes transportation risk assessment system in Korea in the future.

Key words: Radioactive wastes, Transportation risk assessment, RADTRAN, RISKIND, MCNP 6

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2023 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 7 March 2023 **Revised** 10 March 2023 **Accepted** 14 March 2023

1. 서 론

현재 국내에서는 원자력발전소, 연구로 등 원자력이용시설에서 지속적으로 방사성폐기물이 발생되고 있으며, 2019년 200 L 드럼 기준으로 방사성폐기물 누적량은 14만 5,213드럼에 이르렀다. 특히, 고리 1호기, 월성 1호기, 연구용원자로 1, 2호기가 영구정지 됨에 따라, 향후 대량의 해체폐기물이 발생될 것으로 예상된다[1]. Fig. 1에 국내 방사성폐기물 누적 발생량 전망을 나타내었다. 방사성폐기물 발생량이 증가됨에 따라 방사성폐기물 처분을 위한 운반 수요가 증가할 것으로 예상된다. 방사성폐기물 운반은 작업자 및 운반경로를 공유하거나 주변에 있는 일반인의 방사선 피폭을 유발할 수 있다. 따라서 운반에 앞서 방사선 위험도를 평가하여 그 수준이 높지 않음을 확인할 필요가 있다. 현재 육상 운반 위험도 평가 시, RADTRAN, RISKIND 등의 전산코드가 가장 범용적으로 활용되고 있다[2,3].

이와 관련하여, RADTRAN 전산코드와 RISKIND 전산코드를 활용한 비교·분석 연구가 다수 수행되었다. Steinman 등은 실제 운반차량에 방사성물질을 적재하여 차량을 이동시키면서, 그에 따른 피폭방사선량을 측정하였다. 그리고 동일한 상황에 대해 RADTRAN 전산코드와 RISKIND 전산코드에 대한 입력인자를 도출하고 피폭방사선량을 평가하여 측정값과 비교하였다[4,5]. Weiner 등은 RADTRAN 전산코드의 평가결과와 PATHRAE 전산코드 평가결과 및 측정값을 비교함으로써 RADTRAN 전산코드의 선선원 모델에 대한 보수성을 확인하였다[6]. Biwer 등은 RISKIND 전산코드의 선량률 곡선에 대하여, RADTRAN, MCNP, MicroShield 4 전산코드의 선량률 곡선과의 비교를 통해 검증하였다[7]. Brumburgh 등은 RADTRAN 전산코드와 RISKIND 전산코드의 사용자 친화성을 분석하고, 타 전산코드와의 연동성을 검증하였다[8]. Maheras 등은 RADTRAN 전산코드와 RISKIND의 전산코드의 평가결과를 수계산과의 비교를 통해 검증하였다[9].

기존 연구에서는 현재 가장 범용적으로 사용되고 있는 방사성폐기물 육상 운반 위험도 평가 전산코드인 RADTRAN 및 RISKIND 전산코드의 평가결과를 측정값과의 비교, 타 전산코드와의 비교 등을 통해 검증하였다. 그러나 측정실험을 통한 검증은 다양한 조건에서 실험하기에는 한계가 있다. 그리고 타 전산코드와의 비교를 통한 기존의 연구 역시 특정 조건에서의 평가가 이루어졌으며,

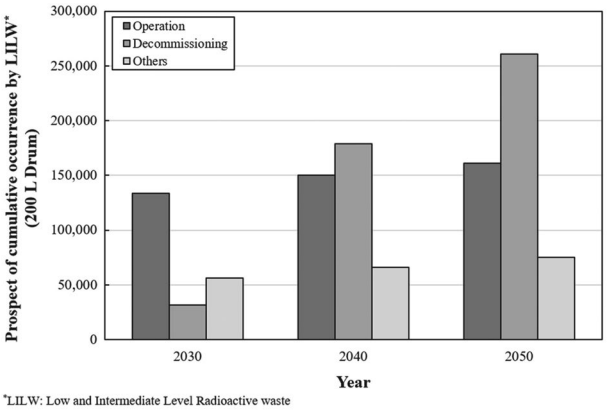

Fig. 1. Prospect of cumulative occurrence by low and intermediate level radioactive waste in Korea.

대부분 방사성폐기물 정지 시 피폭방사선량에 대한 분석으로, 방사성폐기물 이동 시 피폭방사선량에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 그리고 방사성폐기물과의 거리, 운반용기의 크기, 운반차량의 속도 등에 따라 방사선학적 영향은 상이하게 나타날 수 있는데, 이러한 주요 피폭인자에 따른 피폭방사선량 변화 역시 분석할 필요가 있다. 확률론적 방법을 이용한 운반 위험도 평가는 상대적으로 긴 평가시간이 요구되지만 보다 정확한 결과를 도출한다. 반면 결정론적 방법을 이용한 운반 위험도 평가는 상대적으로 짧은 평가시간이 요구된다. 이에, 상대적으로 신속한 평가가 가능한 결정론적 방법을 이용하여 피폭방사선량을 평가하고, 확률론적 방법을 이용한 피폭방사선량 결과와 비교·분석하는 연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 다양한 피폭상황에서 결정론적 방법을 이용한 육상 운반 위험도 평가결과와 확률론적 방법을 이용한 육상 운반 위험도 평가결과를 비교·분석하는 것이다. 이를 위해, 피폭방사선량에 영향을 미치는 주요인자를 선정하고 다양한 피폭상황을 설정하였다. 그리고 결정론적 방법을 이용한 육상 운반 위험도 평가 전산코드를 분석하였다. 최종적으로 다양한 피폭상황에서 결정론적 방법과 확률론적 방법을 활용하여 피폭방사선량을 평가하여 이를 비교·분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 피폭상황 설정

본 연구에서는 방사성폐기물 정지 시 피폭방사선량률

Table 1. Parameters for various exposure situations

Source	Case number	Distance (m)	Speed (km hr^{-1})	Package		Dose rate at 1 m (mSv hr^{-1})
				Length (m)	Radius (m)	
Stationary radioactive waste	A1	1~1000	-	5	1	0.1
	B1	20	-	1	0.5	0.1
	B2	20	-	3	0.5	0.1
	B3	20	-	5	0.5	0.1
	C1	20	-	5	0.5	0.1
	C2	20	-	5	1	0.1
	C3	20	-	5	1.5	0.1
Passing radioactive waste	A1	1~1000	72	5	1	0.1
	B1	20	72	1	0.5	0.1
	B2	20	72	3	0.5	0.1
	B3	20	72	5	0.5	0.1
	C1	20	72	5	0.5	0.1
	C2	20	72	5	1	0.1
	C3	20	72	5	1.5	0.1
	D1	20	18	5	1	0.1
	D2	20	36	5	1	0.1
	D3	20	72	5	1	0.1

과 방사성폐기물 이동 시 피폭방사선량을 평가하였다. 평가에 앞서, 주요 피폭 영향인자를 설정하였다. 본 연구에서는 피폭방사선량(률)에 영향을 줄 수 있는 주요 영향인자로서, 방사성폐기물의 선량률, 방사성폐기물~피폭자 간 거리, 운반차량의 이동속도, 운반용기의 크기 및 형태 등을 선정하였다[2,3]. 그리고 주요 피폭 영향인자에 따라 다양한 피폭상황을 설정하였다. 방사성폐기물의 감마 선량률은 1 m 지점에서 0.1 mSv hr^{-1}으로 설정하였다. 방사성폐기물로부터 거리에 따른 선량변화를 확인하기 위해 방사성폐기물~피폭자 간 거리는 1~1,000 m로 설정하였다. 운반차량의 이동속도는 18 km hr^{-1}, 36 km hr^{-1}, 72 km hr^{-1}로 설정하여 운반차량 이동속도에 따른 선량변화를 확인하였다. RISKIND 전산코드의 경우, 사용후핵연료 운반에 따른 방사선 위험도를 평가하기 때문에 운반용기의 형태는 원통형으로 제한된다. 따라서, 운반용기의 형태는 원통형으로 가정하였으며, 운반용기의 길이와 반경을 변화시키면서 운반용기의 크기에 따른 선량변화를 확인하였다. 방사성폐기물의 길이는 1 m, 3 m, 5 m로 설정하였으며, 반경은 0.5 m, 1 m, 1.5 m로 설정하였다. Table 1에 본 연구에서 설정한 피폭상황을 나타내었다.

2.2. 결정론적 방법을 이용한 육상 운반 위험도 평가

본 연구에서는 결정론적 방법을 이용한 육상 운반 위험도 평가 시, RADTRAN 전산코드와 RISKIND 전산코드를 활용하였다. RADTRAN 전산코드는 미국 에너지부(DOE)와 원자력규제위원회(NRC)의 지원으로 샌디아 국립연구소(SNL)에서 1977년 최초로 개발되었다. RADTRAN 전산코드는 사용후핵연료를 포함한 방사성물질 운반에 대한 방사선학적 위험도를 평가하기 위하여 개발되었다[2,10-15]. RISKIND 전산코드는 DOE 민간방사성폐기물관리국(OCRWM)의 지원을 받아 아르곤 국립연구소(ANL)에서 1993년 최초로 개발되었다. RISKIND 전산코드는 사용후핵연료 운반에 따른 개인 및 특정 인구집단의 방사선학적 영향을 평가하기 위하여 개발되었다[3,16].

2.2.1. 방사성폐기물 정지 시, 외부피폭 방사선량률 모델

RADTRAN 전산코드의 경우, 방사성폐기물 정지 시 방

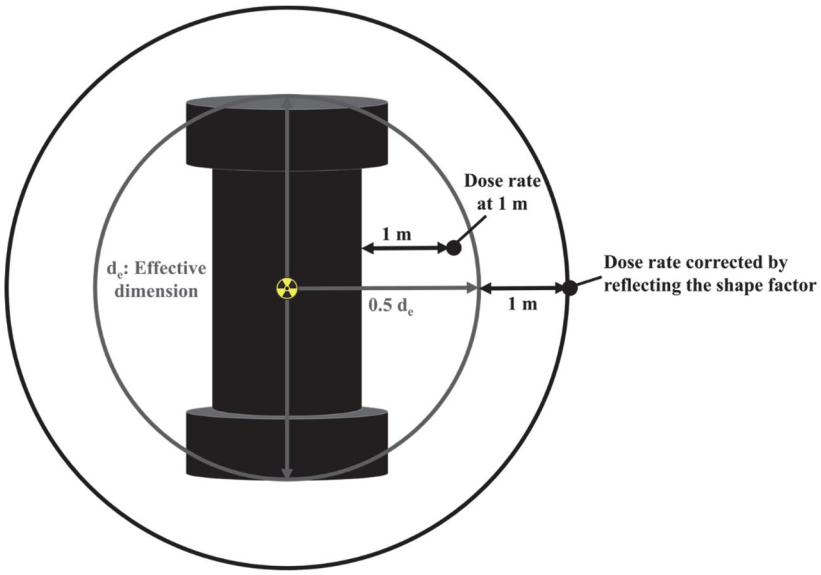

Fig. 2. Concept of shape factor in RADTRAN.

사성폐기물로부터의 거리가 방사성폐기물 유효치수의 두 배보다 작을 경우 선선원으로 가정하며, 두배 이상일 경우 점선원으로 가정한다. RADTRAN 전산코드는 실제 방사성폐기물 주변의 불균일한 방사선장을 방사성폐기물의 중심에 위치한 점선원 또는 선선원으로부터 발생된 것으로 보정하기 위해 형상인자(Shape factor)를 도입하였다. Fig. 2에 형상인자 개념도를 나타내었다. 형상인자는 방사성폐기물의 1 m 이격거리에서 외부피폭 방사선량률을 1 m에 방사성폐기물 유효치수(Effective dimension) 절반의 길이를 더한 위치에서의 방사선량률로 보정하기 위한 인자이다. 유효치수는 일반적으로 방사성폐기물의 길이 중 가장 긴 길이를 의미하며, 원통형의 경우, 원기둥의 높이가 유효치수가 된다. 다만, 방사성폐기물의 크기가 클 경우, 매우 보수적으로 선량을 평가할 수 있기 때문에 유효치수는 식(1)과 같이 계산한다.

$$d_e = \begin{cases} d_p, & d_p < 4\,\mathrm{m} \\ 2(1+0.5d_p)^{\frac{3}{4}} - 0.55, & d_p \geq 4\,\mathrm{m} \end{cases} \quad (1)$$

- d_e = 방사성폐기물의 유효치수(m)
- d_p = 방사성폐기물의 가장 긴 길이(m)

최종적으로 RADTRAN 전산코드에서 방사성폐기물 정지 시, 외부피폭 방사선량률은 식(2)와 같이 계산된다.

$$DR(r) = DR_{1m} \times e^{-\mu r} \times B(r) \times \left[\frac{k}{r}\right]^n \quad (2)$$

- $DR(r)$ = 방사성폐기물로부터의 거리 r에서 외부피폭 방사선량률($\mathrm{mSv\,hr^{-1}}$)
- DR_{1m} = 방사성폐기물로부터의 거리 1 m에서 외부피폭 방사선량률($\mathrm{mSv\,hr^{-1}}$)
- $e^{-\mu r}$ = 방사선이 공기 내에서 거리 r만큼 이동하는 동안 감쇠되는 정도(−)
- $B(r)$ = 방사선이 공기 내에서 거리 r만큼 이동하는 동안의 축적인자(−)
- k = 형상인자: $(1+0.5d_e)$ (m)
- d_e = 방사성폐기물의 유효치수(m) 1 또는 2 ($r < 2d_e$: 1, $r \geq 2d_e$: 2)
- r = 방사성폐기물~피폭자 간 거리(m)
- $n = r \geq 2d_e$일 때 2, $r < 2d_e$일 때 1

식(3)은 RISKIND 전산코드의 방사성폐기물 정지 시, 외부피폭 방사선량률 모델이다. 선량률 곡선 계수 A_0~A_7는 사용후핵연료 캐스크(Cask)에 대해 몬테카를로(Monte Carlo) 방법을 사용하여 계산된 통계적 선량률을 기반으로 도출되었다[17].

$$\log[DR(\mathrm{r})] = \sum_{i=0}^{7} A_i [\log r]^i \quad (3)$$

2.2.2. 방사성폐기물 이동 시, 외부피폭 방사선량 모델

Fig. 3에 방사성폐기물 이동 시, 피폭상황 모식도를 나타내었다. RADTRAN 전산코드와 RISKIND 전산코드 모두 방사성폐기물 이동 시 외부피폭 방사선량 모델은 방

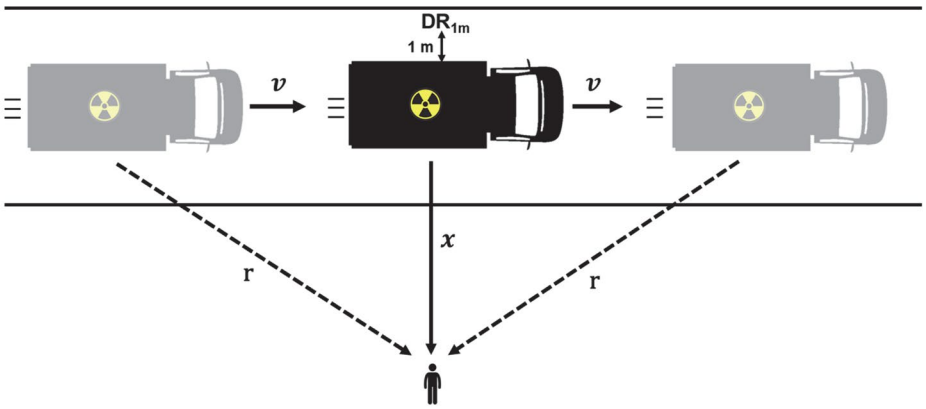

Fig. 3. Exposure situation when passing radioactive waste.

사성폐기물 정시 시 외부피폭 방사선량률 모델을 기반으로 하며, 운반차량 이동에 따른 방사성폐기물로부터의 거리 r의 변화에 대한 적분을 통해 도출된다. RADTRAN 전산코드는 방사성폐기물 이동 시 방사성폐기물을 점선원으로 가정한다. 식 (4), (5)는 각각 방사성폐기물 이동 시 RADTRAN 전산코드와 RISKIND 전산코드의 외부피폭 방사선량 모델이다.

$$D(r)=\frac{2\times k^2\times DR_{1m}}{v}\int_x^{\infty}\frac{e^{-\mu r}B(r)}{r\sqrt{r^2-x^2}}\,dr \quad (4)$$

$$D(r)=\frac{2}{v}\int_x^{\infty}DR(r)\,\frac{r}{\sqrt{r^2-x^2}}\,dr \quad (5)$$

· v = 방사성폐기물 운반차량의 이동속도 (m hr^{-1})
· x = 방사성폐기물과 피폭자 간의 가장 가까운 거리 (m)

2.3. 확률론적 방법을 이용한 육상 운반 위험도 평가

본 연구에서는 확률론적 방법을 이용한 육상 운반 위험도 평가 시, MCNP 6 전산코드를 활용하였다. MCNP 전산코드는 미국 로스앨러모스 국립 연구소(LANL)에서 개발되었으며, 몬테카를로 기법을 이용하여 방사선의 수송해석 문제를 해결하는데 활용된다[18]. 몬테카를로 기법은 확률론적 방법으로, 다양한 경우에 대한 난수 생성을 반복함으로써 결과를 확률적으로 계산하는 방법이다. 몬테카를로 기법은 방사선과 물질 사이의 상호작용을 모사하는 것에 대하여 가장 정확한 기법으로 알려져 있다.

MCNP 6 전산코드를 활용하여 방사성폐기물 운반 위험도 평가 시, 선원항은 방사성폐기물의 모양과 크기에 맞게 원통형의 부피선원으로 설정하였다. 일반적으로 방사성폐기물 운반 위험도 평가 시, 감마선의 관심 영역 에너지는 0.4~0.9 MeV이다[19,20]. 따라서 감마선의 에너지는 0.9 MeV로 설정하였다. Tally는 f5 tally를 사용하였으며, nps는 2×10^8로 설정하였다. 최종적으로 계산결과는 1 m 지점에서 선량률이 0.1 mSv hr^{-1}가 되도록 정규화(Normalization)하였다.

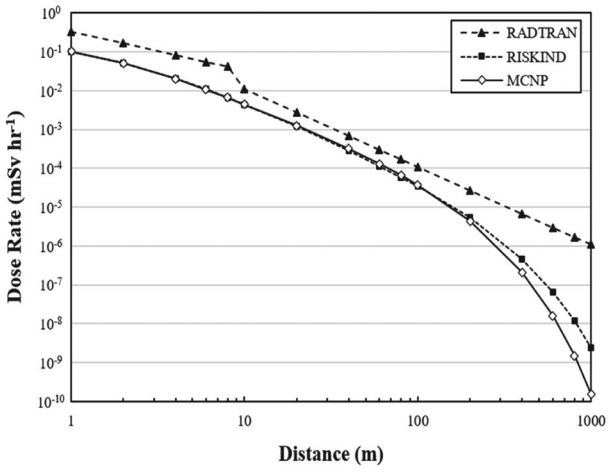

Fig. 4. Exposure dose rate according to distance when radioactive waste is stationary.

3. 결 과

3.1. 방사성폐기물 정지 시 피폭방사선량률 평가

3.1.1. 방사성폐기물로부터의 거리에 따른 피폭방사선량률 평가 결과

Fig. 4에 방사성폐기물 정지 시 방사성폐기물로부터의 거리에 따른 피폭방사선량률 평가 결과를 나타내었다.

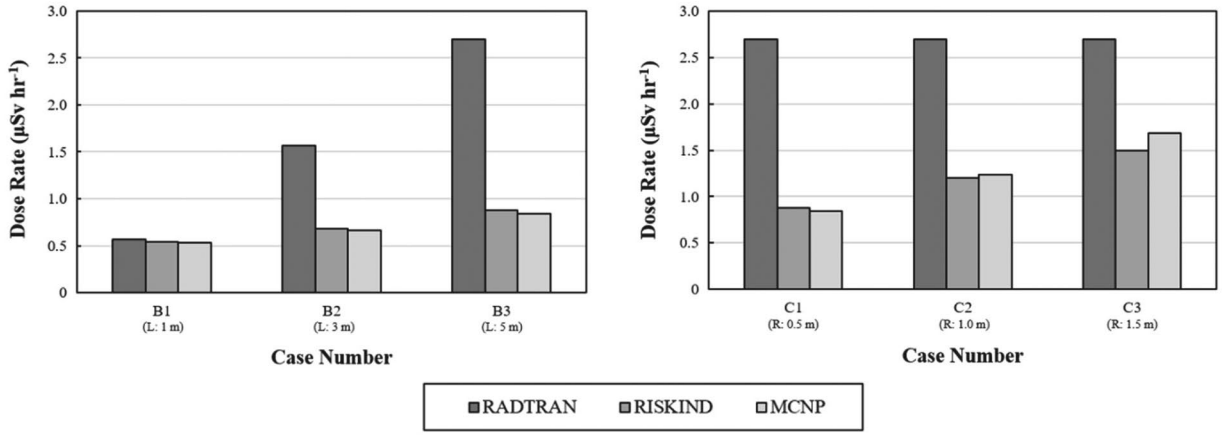

Fig. 5. Exposure dose rate when radioactive waste is stationary in various exposure situations.

RADTRAN 전산코드의 경우, 피폭방사선량률 평가결과는 거리에 따라 1.08×10^{-6}~3.28×10^{-1} mSv hr^{-1}로 나타났다. 방사성폐기물로부터 1~8 m 범위에서 피폭방사선량률은 거리에 반비례하여 감소하였다. 그리고 8~10 m 범위에서 피폭방사선량은 급격하게 감소하였고, 10 m 이후 거리의 제곱에 반비례하여 감소하였다. RISKIND 전산코드와 MCNP 6 전산코드의 결과는 매우 유사하게 나타났는데, 두 전산코드 모두 RADTRAN 전산코드에 비해 거리가 점점 멀어짐에 따라 피폭방사선량률이 급격하게 감소하였다. 특히, MCNP 6 전산코드 결과의 경우, 방사성폐기물로부터 약 600 m 거리에서 RISKIND 전산코드에 비해 피폭방사선량률이 빠르게 감소하였다. RISKIND 전산코드의 평가결과는 거리에 따라 2.4×10^{-9}~1.00×10^{-1} mSv hr^{-1}로 나타났으며, MCNP 6 전산코드의 경우 1.57×10^{-10}~1.00×10^{-1} mSv hr^{-1}로 나타났다.

3.1.2. 방사성폐기물 운반용기 크기에 따른 피폭방사선량률 평가 결과

Fig. 5에 방사성폐기물 운반용기 길이 및 반경에 따른 피폭방사선량률 평가결과를 나타내었다. RADTRAN 전산코드의 경우, 피폭방사선량률은 운반용기의 길이에 따라 5.63×10^{-1}~2.70 μSv hr^{-1}로 나타났다. RISKIND 전산코드의 경우, 운반용기의 길이에 따라 5.40×10^{-1}~8.80×10^{-1} μSv hr^{-1}로 나타났으며, MCNP 6 전산코드는 5.29×10^{-1}~8.44×10^{-1} μSv hr^{-1}로 나타났다. 운반용기의 길이가 1 m일 때 세 전산코드의 결과는 유사하게 나타났으며, 운반용기의 길이가 길어짐에 따라 RADTRAN 전산코드의 평가결과가 나머지 두 전산코드의 평가결과에 비해 급격하게 증가하였다.

RADTRAN 전산코드의 경우, 방사성폐기물 정지 시 피폭방사선량률은 운반용기 반경에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. RADTRAN 전산코드의 피폭방사선량률은 운반용기 반경에 상관없이 2.70 μSv hr^{-1}로 나타났다. 반면에, RISKIND 전산코드와 MCNP 6 전산코드는 운반용기 반경이 길어질수록 피폭방사선량률이 증가하였다. RISKIND 전산코드 평가결과는 운반용기 반경에 따라 8.80×10^{-1}~1.50 μSv hr^{-1}로 나타났으며, MCNP 6 전산코드의 경우 8.44×10^{-1}~1.69 μSv hr^{-1}로 나타났다.

3.2. 방사성폐기물 이동 시 피폭방사선량 평가

3.2.1. 방사성폐기물로부터의 거리에 따른 피폭방사선량 평가 결과

Fig. 6에 방사성폐기물 이동 시 방사성폐기물로부터의 거리에 따른 피폭방사선량 평가결과를 나타내었다. RADTRAN 전산코드의 경우, 피폭방사선량 평가결과 거리에 따라 4.71×10^{-5}~4.71×10^{-2} μSv로 나타났으며, 피폭방사선량은 방사성폐기물로부터 거리에 반비례하여 감소하였다. RISKIND 전산코드의 경우, 피폭방사선량은 거리에 따라 1.00×10^{-7}~8.30×10^{-3} μSv로 나타났으며, MCNP 6 전산코드의 경우, 1.87×10^{-9}~2.89×10^{-2} μSv로 나타났다. RISKIND 전산코드와 MCNP 6 전산코드의 모두 거리가 멀어짐에 따라 피폭방사선량이 급격하게 감소하였다. 피폭방사선량은 방사성폐기물로부터의 모든 위치에서 RADTRAN 전산코드가 가장 높게 나타났다. RISKIND 전산코드와 MCNP 6 전산코드는 방사성폐기물로부터 약

600 m까지 대체로 유사한 결과를 보였으며, 600 m 이후로는 MCNP 6 전산코드 결과가 RISKIND 전산코드 결과에 비해 빠르게 감소하였다.

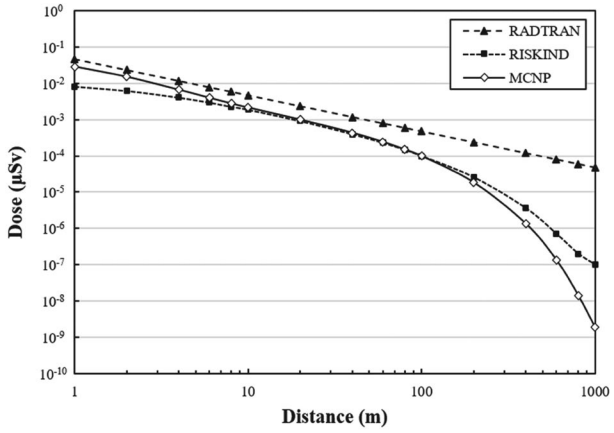

Fig. 6. Exposure dose according to distance when passing radioactive waste.

3.2.2. 방사성폐기물 운반용기 크기에 따른 피폭방사선량 평가 결과

Fig. 7에 방사성폐기물 운반용기 크기 및 운반차량 이동속도에 따른 피폭방사선량 평가결과를 나타내었다. RADTRAN 전산코드의 경우, 피폭방사선량은 운반용기의 길이에 따라, 4.91×10^{-4}~2.35×10^{-3} μSv로 나타났다. RISKIND 전산코드의 결과는 4.10×10^{-4}~6.80×10^{-4} μSv로 나타났으며, MCNP 6 전산코드의 결과는 4.25×10^{-4}~6.81×10^{-4} μSv로 나타났다. 방사성폐기물 정지 시와 마찬가지로 운반용기의 길이가 1 m일 때 세 전산코드의 결과는 유사하게 나타났으며, 운반용기의 길이가 길어짐에 따라 RADTRAN 전산코드의 평가결과가 나머지 두 전산코드에 비해 급격하게 증가하였다.

RADTRAN 전산코드의 경우, 피폭방사선량은 운반용기 반경에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 운반용기 반경에 상관없이 피폭방사선량은 2.35×10^{-3} μSv로 나타났다. 반면에, RISKIND 전산코드와 MCNP 6 전산코드는 운

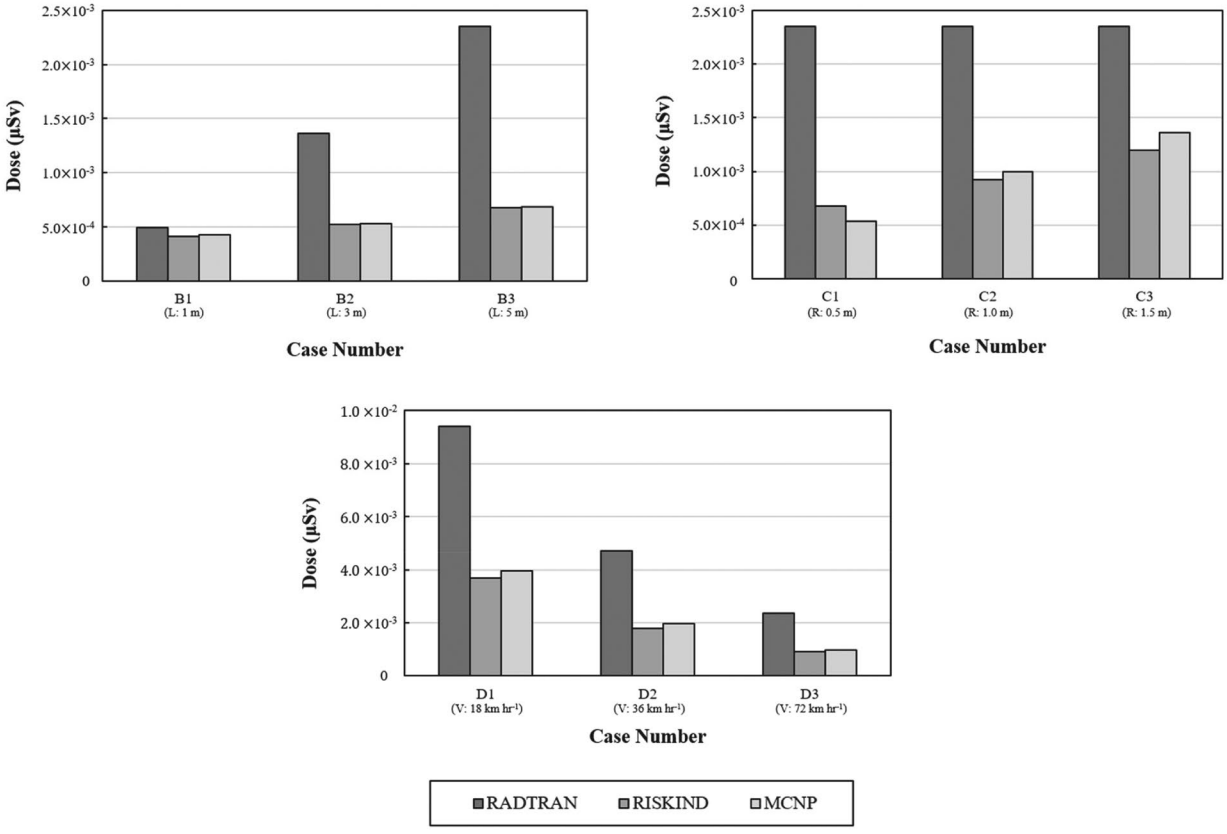

Fig. 7. Exposure dose when passing radioactive waste in various exposure situations.

반용기 반경이 길어질수록 피폭방사선량이 증가하였다. RISKIND 전산코드 평가결과는 운반용기 반경에 따라, 6.80×10^{-4}~1.20×10^{-3} μSv로 나타났으며, MCNP 6의 경우 5.32×10^{-4}~1.36×10^{-3} μSv로 나타났다.

3.2.3. 방사성폐기물 운반차량 이동속도에 따른 피폭방사선량 평가 결과

방사성폐기물 이동속도에 따른 피폭방사선량 평가결과는 RADTRAN 전산코드에서 가장 높게 나타났으며, RISKIND 전산코드와 MCNP 6 전산코드의 평가결과는 유사하게 나타났다. RADTRAN 전산코드의 경우, 피폭방사선량 평가결과는 이동속도에 따라, 2.35×10^{-3}~9.41×10^{-3} μSv로 나타났다. 그리고 RISKIND 전산코드의 경우, 이동속도에 따라 9.20×10^{-4}~3.70×10^{-3} μSv으로 나타났으며, MCNP 6 전산코드의 경우 9.87×10^{-4}~3.97×10^{-3} μSv로 나타났다. 세 전산코드 모두 피폭방사선량은 방사성폐기물 운반차량의 이동속도에 반비례하여 감소하였다.

4. 고 찰

평가결과, 방사성폐기물 정지 및 이동 시, 평가결과의 경향성은 유사하게 나타났다. 따라서, 본 연구에서 분석한 주요 피폭인자인 방사성폐기물~피폭자 간 거리, 방사성폐기물 운반용기 크기, 운반차량의 이동속도를 기준으로 평가결과를 분석하였다.

4.1. 방사성폐기물로부터의 거리에 따른 피폭방사선량(률) 분석

방사성폐기물로부터의 거리에 따른 피폭방사선량(률) 평가결과, RADTRAN 전산코드의 평가결과가 가장 높게 나타났다. 이는 RADTRAN 전산코드의 형상인자로 인해 보수적으로 평가되었기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 방사성폐기물 운반 위험도 평가 시, 감마선 관심 영역 에너지는 0.4~0.9 MeV인데, 이때 공기에서 감마선의 감쇠율과 축적인자의 곱은 1보다 작다[19,20]. 하지만 기본적으로 RADTRAN 전산코드에서는 감마선의 공기 감쇠와 축적을 고려하지 않기 때문에, 이 둘의 곱을 1이라고 가정한다[2]. 반면, RISKIND 전산코드와 MCNP 6 전산코드에서는 감마선의 공기 감쇠와 축적을 고려한다. 따라서, RADTRAN 전산코드의 평가결과가 거리가 멀어질수록 더욱더 보수적으로 평가된다고 판단된다.

방사성폐기물 정지 시 RADTRAN 전산코드의 피폭방사선량률 평가결과, 방사성폐기물로부터 1~8 m 거리에서 피폭방사선량률은 거리에 반비례하여 감소하며, 10~1,000 m에서는 거리의 제곱에 반비례한다. 그리고 8~10 m에서 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 1~8 m 지점에서 방사성폐기물을 선선원으로 가정하고, 10~1,000 m 지점에서는 점선원으로 가정하기 때문이다.

RISKIND 전산코드와 MCNP 6 전산코드의 평가결과, 방사성폐기물로부터 비교적 근거리에서는 상당히 좋은 일치를 보여준다. 하지만 거리가 멀어질 때, MCNP 6 전산코드의 평가결과는 RISKIND 전산코드의 평가결과에 비해 급격하게 감소하였다. 본 연구에서는 MCNP 6 전산코드의 선원항 설정 시 감마선 에너지는 0.9 MeV로 설정하였다. 하지만 RISKIND 전산코드의 경우, 실제 사용후핵연료의 감마선 에너지 스펙트럼을 고려하여 선량률 곡선을 도출하였다. 실제 사용후핵연료의 감마선 에너지는 약 0.3~2.0 MeV에 이르기 때문에 이로 인한 차이로 판단된다[21].

4.2. 방사성폐기물 운반용기 크기에 따른 피폭방사선량(률) 분석

방사성폐기물 운반용기 크기에 따른 피폭방사선량(률) 평가결과 운반용기의 길이가 1 m일 때 세 전산코드의 평가결과는 유사하게 나타났다. 하지만 운반용기의 길이가 길어질수록 RADTRAN 전산코드의 평가결과가 RISKIND 전산코드와 MCNP 6 전산코드에 비해 급격하게 증가하였다. 이는 RADTRAN 전산코드의 형상인자로 인해 운반용기 길이에 따른 RADTRAN 전산코드의 선량(률) 증가율이 RISKIND 및 MCNP 6 전산코드의 증가율에 비해 큰 것으로 판단된다. 하지만 RADTRAN 전산코드의 경우, 운반용기의 반경이 증가하여도 피폭방사선량(률)이 증가하지 않았다. RADTRAN의 형상인자 계산 시, 운반용기의 가장 긴 길이를 고려한다[2]. 따라서, 운반용기의 반경이 증가하더라도 운반용기의 길이보다 작다면 형상인자는 증가하지 않기 때문으로 판단된다.

4.3. 방사성폐기물 운반차량 이동속도에 따른 피폭방사선량 분석

세 전산코드 모두, 방사성폐기물 운반차량의 속도가 빨라질수록 피폭방사선량은 운반차량의 속도에 반비례하여

감소하였다. 방사성폐기물 이동 시, 피폭시간은 식(6)과 같이 표현할 수 있다. 따라서, 방사성폐기물 운반차량 속도가 증가하면 속도에 반비례하여 피폭시간도 줄어들기 때문에 피폭방사선량도 감소한 것으로 판단된다.

$$t = \frac{DIST}{v} \quad (6)$$

· t = 방사성폐기물 이동 시, 피폭시간(hr)
· $DIST$ = 방사성폐기물 이동거리(m)

5. 결 론

본 연구에서는 결정론적 방법과 확률론적 방법을 이용하여 방사성폐기물 육상 운반 시 피폭방사선량(률)을 평가하였다. 결정론적 방법으로 RADTRAN, RISKIND 전산코드를 활용하였으며, 확률론적 방법으로 MCNP 6 전산코드를 활용하였다. 평가 시, 주요 피폭 영향인자인 방사성폐기물~피폭자 간 거리, 방사성폐기물 운반용기의 크기, 운반차량의 이동속도 변화에 따른 피폭방사선량(률)을 확인하였다.

동일한 피폭상황에 대해 대체적으로 RADTRAN 전산코드의 평가결과가 RISKIND 전산코드 및 MCNP 6 전산코드의 결과보다 보수적으로 나타났다. 이는 RADTRAN 전산코드의 형상인자에 대한 영향과 감마선의 공기 감쇠 및 축적을 고려하지 않기 때문으로 판단된다. 이에 반해, RISKIND 전산코드와 MCNP 6 전산코드의 평가결과는 비교적 유사하게 나타났다. 방사성폐기물로부터 거리가 멀어질수록 RADTRAN 전산코드에 비해 RISKIND 전산코드와 MCNP 6 전산코드의 평가결과가 더욱더 빠르게 감소하였다. RADTRAN 전산코드의 경우 방사성폐기물 운반용기 길이가 길어질수록 평가결과가 증가하였지만, 운반용기 반경의 경우, 길이가 길어지더라도 평가결과는 증가하지 않았다. 반면에, RISKNID 전산코드와 MCNP 6 전산코드의 경우, 운반용기의 길이 또는 반경이 길어졌을 때 모두 평가결과가 증가하였다. 운반차량 이동속도의 경우, 세 전산코드 모두 이동속도에 반비례하여 피폭방사선량이 감소하였다.

결정론적 방법을 이용한 방사성폐기물 운반 시 피폭방사선량(률) 평가결과는 확률론적 방법을 이용한 방사성폐기물 운반 시 피폭방사선량(률) 평가결과와 유사하거나 보수적으로 평가되었다. 따라서, 방사성폐기물 운반 위험도 평가 시, 비교적 신속한 평가가 가능한 결정론적 방법은 보수적인 안전성 평가수단으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 수행한 결과는 향후 국내 방사성폐기물 운반 위험도 평가체계 정립을 위한 기반자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다(No. 2106041).

참고문헌

1. MOTIE. 2020. Korean 2nd Basic Plan for the Management of LILW.
2. Weiner RF, Neuhauser KS, Heames TJ, O'Donnell BM and Dennis ML. 2014. RADTRAN 6 Technical Manual. Sandia National Laboratories. SAND2014-0780.
3. Yuan YC, Chen SY, Biwer BM and LePoire DJ. 1995. RISKIND - A Computer Program for Calculating Radiological Consequences and Health Risks from Transportation of Spenct Nuclear Fuel. Argonne National Laboratory. ANL/EAD-1.
4. Steinman RL and Kearfott KJ. 2000. A Comparison of the RADTRAN 5 and RISKIND 1.11 Incident-Free Dose Models. WM'00 Conference.
5. Steinman RL, Weiner RF and Kearfott KJ. 2002. A Comparison of Transient Dose Model Predictions and Experimental Measurements. *Health Physics* **83**(4):504-511. https://doi.org/10.1097/00004032-200210000-00008
6. Weiner RF and Neuhauser KS. 1991. Conservatism of RADTRAN Line-Source Model for Estimating Worker Exposures. PATRAM'92.
7. Biwer BM, Arnish JJ, Kamboj S and Chen SY. 1997. RISKIND Verification and Benchmark Comparisons. Argonne National Laboratory. ANL/EAD/TM-74.
8. Brumburgh GP and Alesso HP. 1993. A Comparison of RISKIND and RADTRAN 4. Lawrence Livermore National Laboratory. UCRL-ID-115618.
9. Maheras SJ and Pippen HK. 1995. Validation of the Transportation Computer Codes HIGHWAY, INTERLINE, RADTRAN 4, and RISKIND. Idaho National Engineering Laboratory. DOE/ID-10511.
10. NRC. 1977. Final Environmental Statement on the Transportation

of Radioactive Material by Air and Other Modes. NUREG-0170.
11. Taylor JM and Daniel SL. 1977. RADTRAN: A Computer Code to Analyze Transportation of Radioactive Material. Sandia National Laboratories. SAND76-0243.
12. Taylor JM and Daniel SL. 1977. RADTRAN II: Revised Computer Code to Analyze Transportation of Radioactive Material. Sandia National Laboratories. SAND80-1943.
13. Madsen MM, Taylor JM and Ostmeyer RM. 1986. RADTRAN III. Sandia National Laboratories. SAND84-0036.
14. Neuhauser KS and Kanipe FL. 1992. RADTRAN 4: User Guide. Sandia National Laboratories. SAND89-2370.
15. Neuhauser KS, Kanipe FL and Weiner RF. 2000. RADTRAN 5 Technical Manual. Sandia National Laboratories. SAND2000-1256.
16. Yuan YC, Chen SY, LePoire DJ and Rothman R. 1993. RISKIND - A Computer Program for Calculating Radiological Consequences and Health Risks from Transportation of Spenct Nuclear Fuel. Argonne National Laboratory. ANL/EAIS-6, Rev. 0.
17. Chen SY and Yuan YC. 1988. Calculation of Radiation Dose Rates from a Spent Nuclear Fuel Shipping Cask. *Transactions of the American Nuclear Society* **56**:110-112.
18. LANL. 2017. MCNP User's Manual Code Version 6.2. Los Alamos National Laboratory Tech. Rep. LA-UR-17-29981.
19. Sandquist GM, Rogers VC, Sutherland AA and Merrel GB. 1985. Exposures and Health Effects from Spent Nuclear Fuel Transportation. Rogers and Associates Engineering Corporation. RAE-8339/12-1.
20. Weiner RF and Neuhauser KS. 1991. Near-Field Radiation Doses from Trnasported Spent Nuclear Fuel. Sandia National Laboratories. SAND91-2060C.
21. RSIC. 1981. CASK-81: 22 Neutron, 18 Gamma-Ray Group, P3, Cross Sections for Shipping Cask Analysis. Radiation Shielding Information Center, Oak Ridge National Laboratory. DLC-23F.