

Preliminary Assessment of Radiological Impact on the Domestic Railroad Transport of High Level Radioactive Waste

고준위 방사성폐기물의 국내철도운반에 관한 방사선영향 예비평가

Myunghwan Seo*, Ho-Seog Dho, Sung-Wook Hong, and Jin Beak Park

Korea Radioactive Waste Agency (KORAD), 174 Gajeong-ro, Yuseong-Gu, Daejeon, Republic of Korea

서명환*, 도호석, 홍성욱, 박진백

한국원자력환경공단, 대전광역시 유성구 가정로 174

(Received August 9, 2017 / Revised October 25, 2017 / Approved October 31, 2017)

In Korea, commercial nuclear power plants and research reactors have on-site storage systems for the spent nuclear fuel, but it is difficult to expand the facilities used for the storage systems. If decommissioning of nuclear power plants starts, an amount of high level radioactive waste will be generated. In this study, a radiological impact assessment of the railroad transport of high level radioactive waste was carried out considering radiation workers and the public, using the developed transport container as the transport package. The dose rates for workers and the public during the transport period were estimated, considering anticipated transport scenarios, and the results compared with the regulatory limit. A sensitivity analysis was also carried out by considering the different release ratios of the radioactive materials in the high level radioactive waste, and different distances between the transport container and workers during loading and unloading phases and while attaching another freight car. For all the anticipated transport scenarios, the radiological impacts for workers and the public met the regulatory limits.

Keywords: High level radioactive waste (HLW), RADTRAN, Railroad transport, Spent nuclear fuel

* Corresponding Author.

Myunghwan Seo, Korea Radioactive Waste Agency (KORAD), E-mail: mhseo@korad.or.kr, Tel: +82-42-601-5325

ORCID

Myunghwan Seo <http://orcid.org/0000-0002-0774-2029>

Sung-Wook Hong <http://orcid.org/0000-0002-1037-1467>

Ho-Seog Dho <http://orcid.org/0000-0001-9635-3932>

Jin Beak Park <http://orcid.org/0000-0003-3050-2565>

국내 원자력발전소의 사용후핵연료는 소내저장시설에 보관되어 있으나 저장시설의 용량 확장이 어려움이 있으며, 연구기관의 연구로에서 발생하는 고준위 방사성폐기물도 자체 보관중이나 영구적으로 저장할 수 없다. 또한 원전의 해체 시에도 고준위 방사성폐기물이 발생할 것으로 예상된다. 이에 따라, 본 연구에서는 현재 개발된 사용후핵연료 운반용기를 사용하여 고준위 방사성폐기물을 가상의 관리시설로 철도를 통하여 운반하는 경우에 대하여 작업자 및 운반경로 주변 일반인의 예상 피폭선량을 평가하였으며, 그 결과를 국내 법적기준치와 비교하였다. 또한, 고준위 방사성폐기물의 상하차 작업 시 작업자와 운반용기 간 거리와 운반사고 시 방사성핵종의 누출율의 변화에 따른 피폭선량의 변화에 따른 피폭선량 추이와 운반에 사용되는 열차의 구성에 따른 운반작업자의 피폭선량 변화를 분석하였다. 본 연구에서 설정한 모든 조건에서의 예상피폭선량은 국내 법적제한치 이하임을 확인하였다.

중심단어: 고준위 방사성폐기물, RADTRAN, 철도운반, 사용후핵연료

1. 서론

우리나라는 2015년 말 기준 20기의 경수로형 원자력발전소에서 16,297다발과 중수로형 원자력발전소에서 408,797다발의 사용후핵연료가 발생하여 소내저장시설에 저장되어 있으며, 별도의 조치가 이루어지지 않는다면 소내저장시설은 포화될 것으로 예상된다[1]. 또한, 연구용 원자로에서도 사용후핵연료를 포함하는 고준위 방사성폐기물이 발생하고 있다. 이에 따라 고준위 방사성폐기물의 처분을 위한 별도의 시설의 건설이 필요한 상황이며, 처분시설로 운반은

사용후핵연료 관리의 중요한 부분이다. 본 연구에서는 고준위 방사성폐기물(이하 폐기물)의 철도육상운반에 따른 방사선적 영향의 예비평가를 위하여 폐기물의 운반 작업자 및 운반차량 주변의 일반인에 대한 예상피폭선량을 예측하고 그 결과를 국내 법적기준치와 비교하였다.

정상 운반조건과 육상운반 시 발생할 수 있는 사고조건 중 방사선영향이 가장 클 것으로 예상되는 운반수단의 충돌에 의하여 폐기물 운반용기가 손상되어 방사성핵종이 대기로 방출되는 경우를 설정하였으며, 사고 시 주변사람들의 피폭선량을 RADTRAN 전산프로그램[2]을 사용하여 계산하였다.

Table 1. Specification of the transport container considered in this study [3]

Item	Value
Type of package	B(U) type / Fissile class III
Loaded weight (tons)	37
Outside diameter (m)	1.35
Height (m)	4.82
Material of inner shell	SS 304 (Stainless Steel)
Material of outer/intermediate shells	SS 304 (Stainless Steel)
Material of fuel basket	Boral +SS or borated SS
Material of gamma rays shield	Lead
Material of neutron shield	Hydrogenous Resin & Boron
Material of shock absorber	Balsa/Red wood
Capacity	4 PWR Spent Fuel Assemblies (WH 17×17)

RADTRAN 전산프로그램[2]은 방사성물질 운반 중 방사선적 위험도를 계산하는 프로그램으로, 개발 초기에는 항공기를 포함한 운반수단에 의한 방사성물질의 이동에 대한 방사선 영향평가를 수행하기 위한 계산 도구로 사용되었으나, 개선을 통하여 다양한 이동모델, 경로, 운반시나리오에 따라 안전성평가에 사용되고 있다. RADTRAN 전산프로그램[2]은 미국에서 방사성물질의 운반 인허가 시 평가프로그램으로 활용되고 있다.

또한, 운반사고 시 운반용기의 손상 부위에서 방출되는 방사성핵종의 방출률과 운반열차의 운반용기 상하차 작업 시 작업자와 운반용기 간 거리 변화, 그리고 운반열차의 연결차량 구성에 따른 예상피폭선량의 민감도분석을 수행하였다.

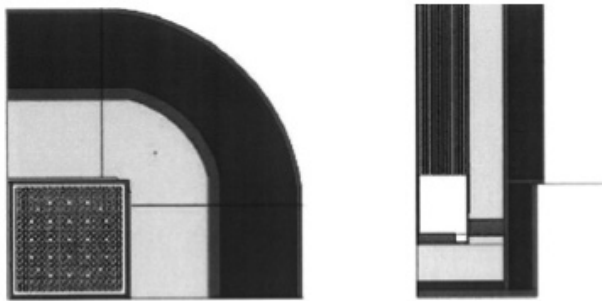


Fig. 1. 1/4 Cross section of spent nuclear fuel array in the transport container (left : radial, right : vertical) [14].

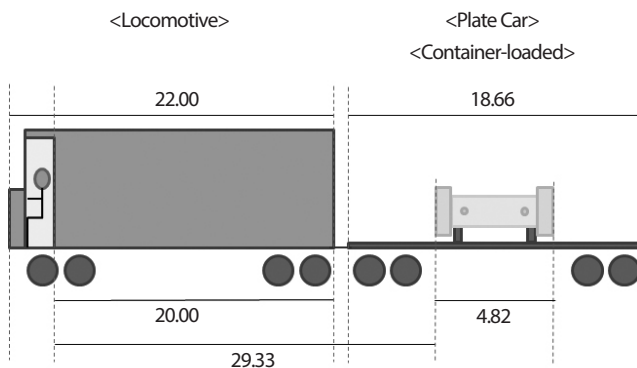


Fig. 2. Description of the train used to transport the radioactive waste container in this study (unit : meter).

2. 운반대상 폐기물과 운반방법

운반용기는 사용후핵연료의 운반을 고려하여 KSC-4 용기의 제원[3]을 적용하였으며, 적용한 운반용기의 제원은 Table 1에 나타내었다. 운반용기 내에는 4다발의 사용후핵연료가 적재되며, 운반용기 1개를 전용 열차를 통하여 가상의 처분시설로 운반하는 것으로 설정하였다. 열차의 제원[4][5]과 운반용기 내 사용후핵연료의 배치를 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 제시하였다.

운반용기 내 사용후핵연료의 주요 핵종별 방사능량은 SCALE (Standard Computer Analysis for Licensing Evaluation) 전산프로그램[6][7]을 사용하였다. SCALE 전산프로그램[6][7]은 미국의 ORNL (Oak Ridge National Laboratory)에서 개발한 사용후핵연료 동위원소 분석, 방사화, 핵임계 및 불확실도 계산 등 매우 광범위한 계산을 수행할 수 있으며, 계산 시 다양한 운전 이력을 반영할 수 있다는 장점[6]기 때문에 안전 및 규제 검증을 위한 인허가용 전산프로그램으로 널리 사용되고 있다. 특히 SCALE 전산프로그램[6][7] 내의 여러 계산모델 중 사용후핵연료의 연소특성에 따른 악티늄족 핵종의 함량의 분석에 널리 사용된다. 선원형 생산을 위하여 적용한 사용후핵연료 제원은 Table 2에 제시하였다. 또한 SCALE 전산프로그램을 통하여 계산된 주요핵종별 방사능량은 Table 3에 제시하였다.

3. 운반경로 설정

운반경로는 현재까지 방사성폐기물 운반이 실제로 수행된 경로를 참고하여, 한국원자력환경공단이 2015년에 수행한 중저준위 방사성동위원소 폐기물의 육상운반의 경로[8]와

Table 2. Specification of the spent fuel as waste contained in the transport container

Item	Value
Burnup (MWD/MTU)	38,000
Enrichment (%)	3.2
Cooling time (yr)	3
Decay heat (kW)	7

Table 3. Amount of radioactivity in the transport container used as the source term in this study

Radioactive isotopes (Actinides)	Amount of radioactivity (Bq)	Radioactive isotopes (non-Actinides)	Amount of radioactivity (Bq)
²⁴¹ Pu	1.96×10 ¹⁶	¹³⁷ Cs	1.68×10 ¹⁶
²⁴⁴ Cm	5.79×10 ¹⁴	^{137m} Ba	1.59×10 ¹⁶
²³⁸ Pu	5.20×10 ¹⁴	⁹⁰ Y	1.14×10 ¹⁶
²⁴¹ Am	1.28×10 ¹⁴	⁹⁰ Sr	1.14×10 ¹⁶
²⁴⁰ Pu	8.57×10 ¹³	¹⁴⁷ Pm	1.15×10 ¹⁶
²³⁹ Pu	5.15×10 ¹³	¹³⁴ Cs	9.44×10 ¹⁵
²⁴² Cm	7.47×10 ¹³	¹⁰⁶ Rh	1.14×10 ¹⁶
²³⁹ Np	4.84×10 ¹²	¹⁰⁶ Ru	1.14×10 ¹⁶
²⁴³ Am	4.84×10 ¹²	¹⁴⁴ Pr	1.11×10 ¹⁶
²⁴³ Cm	3.14×10 ¹²	¹⁴⁴ Ce	1.11×10 ¹⁶
^{242m} Am	1.62×10 ¹²	⁸⁵ Kr	1.30×10 ¹⁵
²³⁷ U	4.69×10 ¹²	¹⁵⁴ Eu	8.88×10 ¹⁴
²⁴² Pu	3.99×10 ¹¹	¹²⁵ Sb	6.49×10 ¹⁴
²³⁴ U	1.44×10 ¹¹	¹⁵⁵ Eu	3.11×10 ¹⁴
²⁴⁵ Cm	5.70×10 ¹⁰	^{125m} Te	1.59×10 ¹⁴
²³⁷ Np	5.32×10 ¹⁰	³ H	8.20×10 ¹³
²³³ Pa	5.32×10 ¹⁰	¹⁵¹ Sm	6.21×10 ¹³
²³⁴ Th	4.67×10 ¹⁰	^{144m} Pr	1.55×10 ¹⁴
²³⁸ U	4.67×10 ¹⁰	^{110m} Ag	2.51×10 ¹³
²³⁶ U	4.11×10 ¹⁰	⁹⁹ Tc	2.27×10 ¹²
²³⁶ Pu	2.83×10 ¹⁰	^{121m} Sn	2.22×10 ¹²
²⁴⁶ Cm	1.07×10 ¹⁰	¹⁵² Eu	9.76×10 ¹¹
²³⁸ Np	7.30×10 ⁹	⁹³ Zr	2.94×10 ¹¹
²³² U	2.33×10 ⁹	^{119m} Sn	8.65×10 ¹¹
²³⁵ U	2.10×10 ⁹	¹²⁶ Sn	9.27×10 ¹⁰
²¹² Pb	1.36×10 ⁹	¹³⁵ Cs	6.88×10 ¹⁰
²²⁴ Ra	1.36×10 ⁹	^{113m} Cd	7.41×10 ¹⁰
²²⁸ Th	1.36×10 ⁹	¹³⁵ Cs	6.88×10 ¹⁰
²³⁵ Np	4.30×10 ⁸	^{113m} Cd	7.41×10 ¹⁰
²³⁴ Pa	6.07×10 ⁷	¹³⁵ Cs	6.88×10 ¹⁰
		^{113m} Cd	7.41×10 ¹⁰
		¹³⁵ Cs	6.88×10 ¹⁰
		^{113m} Cd	7.41×10 ¹⁰
		¹³⁵ Cs	6.88×10 ¹⁰
		^{113m} Cd	7.41×10 ¹⁰
		¹²³ Sn	5.79×10 ¹⁰

Table 4. Distances and population densities of the districts along the transport route [9][10]

Section number	Starting and end locations of the sections	Distance (km)	Adapted population density (persons·km ⁻²)
1	Sintanjin Station ~ Yeongdong Station	59.7	3,024 (Daedeok-gu, Daejeon)
2	Yeongdong Station ~ Gimcheon Station	42.2	136 (Gimcheon-si)
3	Gimcheon Station ~ Waegwan Station	42.2	686 (Gumi-si)
4	Waegwan Station ~ Dongdaegu Station	30.3	4,813 (Buk-gu, Daegu)
5	Dongdaegu Station ~ Yeongcheon Station	36.1	614 (Gyeongsan-si)
6	Yeongcheon Station ~ Gyeongju Station	41.5	204 (Gyeongju-si)

Table 5. Train accident rates along the transport route [11]

Year	Number of accidents [accidents]	Number of operations [train·km]	Daily Accident Rate [accidents/train·km]
2015	3	132,459,000	6.205×10 ⁻¹¹

유사하게 적용하였다. 운반경로는 대전의 한국원자력환경공단 기술연구소 인근 역에서 처분시설이 있는 지역의 역 사이의 일반 철도로 가정하여 신탄진역-경주역 구간으로 설정하였다. 운반경로는 약 250 km의 길이로, 운반경로가 통과하는 행정구역의 인구밀도, 운반경로의 길이 등을 고려하여 총 6개 운반구간으로 나누었다. 운반경로의 인구밀도는 사고 시 피폭대상인구를 고려하여 구간 별 최댓값을 적용하였다. 운반구간 별 평균 인구밀도는 행정자치부에서 발간한 2013 한국도시통계자료[9]와 통계청 국가통계포털 제공자료[10]를 적용하였다. 일일평균 사고발생 수는 한국철도공사에서 발간한 2015년 철도통계연보[11]에 기재된 2015년 국내 화물열차 운행량과 국내 화물열차 사고발생건수를 통하여 계산하였으며 운반경로 전체에 같은 값을 적용하였다. 일일평균 사고발생률은 단위길이 철도에서의 운반열차 1량당 사고발생률로, 다음 수식에 따라 도출되었다.

$$\text{Dail Accident Rate} \left[\frac{\text{Accidents}}{\text{train} \cdot \text{km}} \right] = \frac{\text{Number of Accidents in 2015} [\text{Accidents}]}{\text{Number of train operations in 2015} [\text{Train} \cdot \text{km}]} \div 365$$

운반경로 통과 행정구역의 세부사항, 구간별 길이 및 대표 인구밀도, 사고발생률은 Table 4와 Table 5에 각각 나타내었다.

4. 운반 시나리오

운반 조건에 따라 정상운반 및 운반사고 시나리오를 각각 도출하였으며 시나리오 별 가정사항은 다음과 같다.

4.1 정상운반 시나리오

정상운반 시 운반용기는 손상되지 않으며, 고려되는 잠재적 피폭은 감마선과 중성자선에 의한 외부피폭을 고려하였다. 운반열차 운전자를 위한 열차 내 차폐장치는 고려하지 않으며, 운반열차 탑승자는 2명으로 설정하였다. 열차 이동속도는 화물열차 허용 최고속도[12]와 안전을 고려하여 80 km·hr⁻¹로 설정하였다. 운반경로의 피폭대상은 열차로부터 반경 800 m 범위 내 일반인과 운반작업자로 설정하였다. 피폭대상 중 일반인은 철도 주변 거주민으로 구성하였다. 열차 주변 일반인은 운반경로 구간별 최대 인구밀도를

Table 6. Dose rates of gamma and neutron ray from the container surface [14]

Rays	2 m apart from the surface (mSv·hr ⁻¹)	1 m apart from the surface (mSv·hr ⁻¹)	Ratio in the whole dose rate
Gamma	0.0401	0.1604	0.851
Neutron	0.007	0.028	0.149
Sum	0.0471	0.1884	-

Table 7. Result of radiological impact assessment for normal transport scenario in this study

Exposure group	Collective dose rate (person-mSv)	Personal dose rate (mSv)	Annual dose limit (mSv·hr ⁻¹)	Result
Vehicle drivers	7.27×10 ⁻²	3.64×10 ⁻²	12	Satisfied
Loading Workers	1.23×10 ⁰	1.23×10 ⁻¹	20	Satisfied
Unloading Worker	1.23×10 ⁰	1.23×10 ⁻¹	20	Satisfied
Public	1.55×10 ⁻¹	7.12×10 ⁻³	1	Satisfied

통하여 산출하였으며, 운반열차 반대편에서 지나가는 열차에 탑승한 일반인의 수는 철도이용객이 없는 새벽에 운반이 이루어지는 것으로 가정하여 여객 없는 기관차만 고려하였으며, 구간 당 기관차 1량, 기관차 1량당 2명의 열차탑승자가 있는 것으로 설정하였다.

운반용기의 상차 및 하차 작업은 각각 10명의 작업자가 용기로부터 5 m 거리에서 1시간 동안 수행하는 것으로 설정하였다.

운반 중 열차 운전자의 휴식을 위하여 운반 1회당 경로 상 존재하는 역에서 30분 간 1회 정차한다고 설정하였으며, 정차 시 정차역의 면적을 고려하여 수하물과 피폭대상 일반인 간 최소거리는 1 m, 최대거리는 70 m로 설정하였다. 이때 피폭대상은 운반작업자 및 일반인으로 설정하였으며, 정지 상태인 열차의 차폐기능 및 별도 차폐장치는 없는 것으로 보수적으로 가정하였다.

정상운반 시나리오에서 피폭선량을 계산하는 데 사용된 외부 방사선량률과 감마선-중성자선 비율은 운반용기 제원으로 적용한 KSC-4 운반용기의 차폐평가 결과[13]인 용기표면 및 이격지점별 감마선 및 중성자선의 선량에서 도출된 용기표면 1 m 이격지점에서의 감마선과 중성자선의 선량률을 적용하였다. 용기 표면 1 m에서의 선량률은 Table 6에 나타내었다.

4.2 운반사고 시나리오

운반 중 열차의 사고에 의하여 운반용기에 물리적 충격이 가해져 운반용기와 폐기물이 손상되는 경우를 고려하였다. 운반사고는 운반경로의 각 구간에서 일어나는 것으로 설정하였다.

운반사고 발생 후 운반용기 손상에 의한 방사성핵종의 누출량은 NUREG [14]에서 제시하고 있는 낙하사고 시 운반용기 내 방사성핵종 대기방출율인 운반대상 폐기물 전체 방사성핵종의 0.1%로 가정하였으며, 누출되는 방사성핵종은 모두 에어로졸 형태로 설정하였다. 누출되는 방사성핵종 중 기체상 누출핵종(³H)을 제외한 나머지 핵종의 지면 침적속도는 RADTRAN 전산프로그램[2]의 기본값인 0.1 m·s⁻¹로 설정하였다.

피폭대상은 운반작업자 및 주변 일반인으로 설정하였으며, 피폭대상의 방사선 피폭은 에어로졸 형태로 방출되는 방사성물질의 호흡에 의한 내부피폭과 재부유되거나 공기 중에 떠있거나, 혹은 지면에 침적된 방사성물질로부터 방출되는 방사선에 의한 외부피폭을 고려하였다. 운반사고 발생 후 사고지점 주변의 일반인의 대피시간은 사고발생 후 24시간으로 설정하였다.

Table 8. Results of radiological impact assessment for accident transport scenario considering the train accident rate along the route in this study

(Unit : collective (person-mSv), personal (mSv))

Section number	Dose type	Exposure by inhalation	Exposure by resuspension	Exposure by cloudshine	Exposure by groundshine	Total
1	Collective	4.57×10^{-2}	3.82×10^{-4}	2.42×10^{-6}	2.88×10^{-5}	4.61×10^{-2}
	Personal	1.08×10^{-8}	9.02×10^{-11}	5.72×10^{-13}	6.80×10^{-12}	1.09×10^{-8}
2	Collective	5.01×10^{-4}	4.18×10^{-6}	2.65×10^{-8}	3.16×10^{-7}	5.06×10^{-4}
	Personal	2.63×10^{-9}	2.20×10^{-11}	1.39×10^{-13}	1.66×10^{-12}	2.66×10^{-9}
3	Collective	2.53×10^{-3}	2.11×10^{-5}	1.34×10^{-7}	1.59×10^{-6}	2.55×10^{-3}
	Personal	2.63×10^{-9}	2.20×10^{-11}	1.40×10^{-13}	1.66×10^{-12}	2.66×10^{-9}
4	Collective	3.70×10^{-2}	3.09×10^{-4}	1.96×10^{-6}	2.33×10^{-5}	3.73×10^{-2}
	Personal	5.49×10^{-9}	4.59×10^{-11}	2.91×10^{-13}	3.46×10^{-12}	5.54×10^{-9}
5	Collective	1.93×10^{-3}	1.62×10^{-5}	1.02×10^{-7}	1.22×10^{-6}	1.95×10^{-3}
	Personal	2.25×10^{-9}	1.88×10^{-11}	1.19×10^{-13}	1.42×10^{-12}	2.27×10^{-9}
6	Collective	7.39×10^{-4}	6.17×10^{-6}	3.91×10^{-8}	4.65×10^{-7}	7.46×10^{-4}
	Personal	2.59×10^{-9}	2.16×10^{-11}	1.37×10^{-13}	1.63×10^{-12}	2.61×10^{-9}

운반사고 시 기상조건은 중립 조건인 Pasquill Category D 구간으로 설정하였다[2].

5. 예비평가결과

정상운반 및 운반사고 시 일반인, 상·하차 및 운반작업자에게 발생하는 집단피폭선량을 RADTRAN 전산프로그램 [2]을 이용하여 계산하였다. 또한 계산된 집단피폭선량과 운반경로 주변 및 열차 정차지 주변의 예상인구수를 바탕으로 하여 개인피폭선량을 산출하고 이를 법적기준치와 비교하였다.

정상운반조건 및 폐기물의 상하차 시 피폭대상 별 피폭선량 평가결과를 Table 7에 나타내었다. 열차 운전자의 개인피폭선량은 3.64×10^{-2} mSv, 일반대중의 개인피폭선량은 7.12×10^{-3} mSv, 상·하차 작업자의 개인피폭선량은 1.23×10^{-1} mSv이다. 이는 각각의 법적기준치와 비교하면 각각 0.30%, 0.71%, 0.62% 수준으로 정상운반 시 피폭대상자인 열차 운전자, 일반인 및 상·하차 작업자의 연간 개인피폭선량은 모두 선량한도 이내에 있음을 확인하였다.

운반사고 시 운반용기로부터 누출된 방사성물질의 거동에 따른 시나리오 별 예상피폭선량을 예측하였다. 각 구간

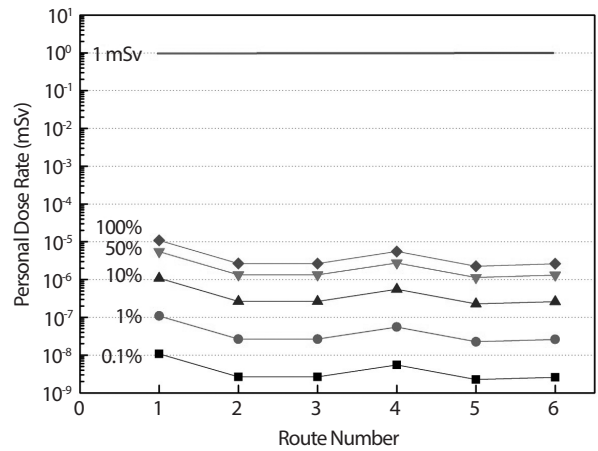


Fig. 3. Sensitivity analysis results of accident transport scenario for the variation of release fraction in this study.

별 사고발생률이 고려된 구간 별 피폭선량을 Table 8에 나타내었다. 본 결과는 충돌에 의한 방사성물질의 누출을 고려한 것이며, 인구수를 고려한 각 구간 별 개인피폭선량은 $1.37 \times 10^{-13} \sim 1.08 \times 10^{-8}$ mSv로 일반인의 선량한도인 연간 1 mSv 값과 비교하면 낮은 값을 확인하였다.

운반사고 시 방사성핵종 누출을 증가에 따른 피폭선량의 변화는 Fig. 3에 나타내었다. 운반대상 핵종재고량 전체에

Table 9. Sensitivity analysis results of accident transport scenario for the variation of distances between worker and container surface

Distance (m)	Personal dose rate (mSv)	Source Type
1	6.10×10^{-1}	Line Source
2.5	2.45×10^{-1}	Line Source
5	1.23×10^{-1}	Line Source
7.5	8.24×10^{-2}	Line Source
10	2.01×10^{-2}	Point Source
15	9.00×10^{-3}	Point Source
20	5.10×10^{-3}	Point Source
25	3.29×10^{-3}	Point Source
30	2.30×10^{-3}	Point Source

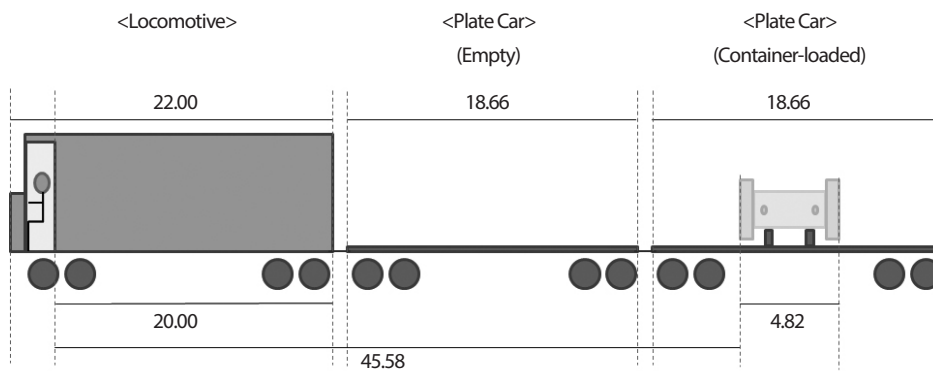


Fig. 4. Description of the train used to transport the radioactive waste container with an empty plate car in this study (unit : meter).

해당하는 누출율 100 %일 때 첫번째 구간에서 개인선량률은 최대 $1.08 \times 10^{-5} \text{ mSv} \cdot \text{yr}^{-1}$ 를 나타내었으나 일반인 선량 한도인 연간 1 mSv 값과 비교하면 낮은 값을 확인하였다.

운반차량에서의 운반용기 상하차 작업 시 작업자와 용기 사이의 거리에 따른 피폭선량 변화를 분석하였다. 평가에 적용된 입력데이터 중 작업자와 용기 사이의 거리를 기존 평가에서 적용한 5 m 외에 1, 2.5, 7.5, 10, 15, 20, 25, 30 m로 설정하여, 각각의 거리에 대한 상하차 작업자 피폭선량을 예측하고 Table 9에 나타내었다.

작업자-운반용기 간 거리가 7.5 m까지 늘어날 경우, 거리와 개인피폭선량은 반비례함을 확인할 수 있었으며, 10 m 이상의 거리에서의 개인피폭선량의 관계는 거리의 제곱에

반비례함을 확인할 수 있었다. 이는 본 평가에서 사용한 RADTRAN 전산프로그램[2]의 특성에 기인한다. 선원의 길이에 비하여 가까운 거리인 경우 선원이 선선원(Line Source)으로 반영되어 운반용기의 길이가 반영되지만, 일정 거리 이상에서는 선원의 길이에 비하여 거리가 멀어지면 선원이 점선원(Point Source)으로 전환되어 계산되기 때문이다.

계산 결과 작업자-운반용기 간 거리가 1 m일 경우 개인 피폭선량은 $6.11 \times 10^{-1} \text{ mSv}$ 로 나타났으며, 이는 5 m 거리에서의 개인피폭선량의 5배의 값이다. 또한, 15 m에서의 개인피폭선량은 $2.01 \times 10^{-2} \text{ mSv}$, 20 m에서의 개인피폭선량은 $5.10 \times 10^{-3} \text{ mSv}$, 30 m에서의 개인피폭선량은 $2.30 \times 10^{-3} \text{ mSv}$ 로 각각 나타났으며, 5 m 거리에서의 개인피폭선량의 16.3%,

4.15%, 1.87% 수준이다.

철도를 이용한 운반 시 열차의 구성에 따라 운전자의 피폭선량이 달라질 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 기관차와 운반용기 적재 화물차 사이에 본 연구에 적용된 것과 동일한 규격의 빈 화물차 1량을 추가로 연결하여 운반할 경우에 대한 운전자의 피폭선량 계산결과를 빈 화물차가 없는 경우와 비교하였다.

비교 결과, 빈 화물차를 추가할 경우 열차 운전자의 개인 피폭선량은 1.30×10^{-2} mSv로, 운반용기 적재 화물차를 직접 연결할 경우의 선량의 약 35.6% 수준임을 확인하였다.

6. 결론

본 연구에서는 철도를 이용한 국내 고준위 방사성폐기물의 육상운반경로에 대한 예비방사선영향평가를 수행하였다. 운반대상 폐기물을 설정된 운반경로를 통해 정상적으로 운반하였을 경우 열차 운전자의 개인피폭선량은 3.64×10^{-2} mSv, 일반인의 연간 개인피폭선량은 7.12×10^{-3} mSv, 상·하차 작업자의 개인피폭선량은 1.23×10^{-1} mSv로, 일반인 및 작업자에 대한 법적기준치 대비 0.30%, 0.71%, 0.62% 수준이며, 운반차량 사고에 의한 개인피폭선량은 일반인의 선량한도인 연간 1 mSv 값에 크게 못 미치는 것으로 평가되었다.

또한, 운반사고조건에 적용된 방사성물질의 누출율 변화에 따른 피폭선량 민감도 분석에서는 운반대상 폐기물 내 방사성물질 누출율이 100%일 경우에 개인피폭선량은 최대 1.08×10^{-5} mSv로 일반인 연간피폭선량인 1 mSv에 비하여 낮은 값으로 예측되었다. 또한 상하차 작업자-운반용기 간 거리의 변화에 따른 피폭선량 민감도 분석 결과, 30 m 거리에서의 개인피폭선량은 5 m 지점에서의 선량의 1.87% 수준으로 나타났다. 한편 기관차와 운반용기 적재 화물차 사이에 빈 화물차를 연결할 경우 열차 운전자의 개인피폭선량은 빈 화물차가 없는 경우의 35.6% 수준으로 떨어짐을 확인하였다.

본 연구 결과에 따르면 일반인 및 작업자에 대한 방사선 영향은 국내 법적제한치에 비해 낮은 것으로 나타났다. 그러나 운반용기의 차량 상하차 시 가까운 거리에서의 작업은 지양하여야 할 것으로 판단되며, 빈 화물차를 기관차와 운반용기 적재 화물차를 연결하는 방안은 운전자의 피폭선량

저감에 효과적임을 확인하였다.

본 연구에 적용한 운반특성과 실제 운반특성이 다를 경우, 운반 작업자와 피폭범위 내 일반인에 대한 별도의 차폐장치 설치와 상하차 작업자의 피폭선량 최소화를 고려한 연구가 추가로 수행되어야 할 것이다. 또한 본 연구에서 적용한 경로 이외에 가상의 처분시설의 위치에 따른 추가경로를 고려하여야 한다.

REFERENCES

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy, "A Plan of High Level Radioactive Waste Management" (2016).
- [2] R.F. Weiner, D. Hinojosa, T.J. Heames, C.O. Farnum, and E.A. Kalinina, "Radtran 6 / Radcat 6 User Guide", Sandia National Laboratories, SAND2013-8095 (2013).
- [3] H.Y. Kang, H.Y. Lee, K.S. Seo, J.H. Koo, and J.C. Lee, "Safety Analysis Report of KSC-4 Transport Cask", Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), KAERI/TR-137-89 (1989).
- [4] Korea Railroad Information Center, Posted at Jan. 5. 2009. Accessed at Oct. 25. 2017. Available from: http://www.kric.go.kr/jsp/industry/tei/techdocDetail.jsp?menuId=M01010106&objectId=0900271a8000d104&docId=M01010905&sel_org_cd=&q_data_typ_cd=&q_docId=M01010905&q_menuId=M01010106&q_firstKey=1601050900271a8017ab4d&q_lastKey=0611140900271a80009e19&q_totalPage=6&q_frPage=6&q_menuId=M01010106&q_docId=M01010905
- [5] Hyundai-Rotem, Railway System, Project Record, Accessed at Oct. 25. 2017. Available from: https://www.hyundai-rotem.co.kr/Business/Rail/Business_Record_View.asp?brid=74
- [6] ORIGEN-ARP : Automatic Rapid Processing for Spent Fuel Depletion, Decay, and Source Term Analysis, ver.6, Oak Ridge National Laboratory (2005).
- [7] T.M. Kim, C.Y. Baeg, G.Y. Cha, W.G. Lee, and S.Y. Kim, "Preliminary Assessment of Radiation Impact from Dry Storage Facilities for PWR Spent Fuel", JRPR, 37(4),

- 197-201 (2012).
- [8] M.H. Seo, S.W. Hong, and J.B. Park, “Radiological Impact Assessment for the Domestic On-road Transportation of Radioactive Isotope Wastes”, *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, 14(3), 279-287 (2015).
- [9] Ministry of Government Administration and Home Affairs, “2013 Statistics City Yearbook of Korea”, 22-33 (2014).
- [10] Statistics Korea, Sep. 22 2012. Korean Statistical Information Service (KOSIS), Accessed April 10 2015. Available from: http://kosis.kr/statisticList/statisticList_02List.jsp?vwcd=MT_ATITLE01&parmTabld=M_02_01_01
- [11] Korea Railroad and Korea Rail Network Authority, “2015 Statistical Yearbook of Railroad”, 6, 1166 (2016).
- [12] Korea Railroad, “Detailed Rules for Operation of the Railroad”, Attached Table 13-14, 176-178 (2013).
- [13] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, “Update of 10 CFR Part 61 Impact Analysis Methodology vol.1”, 100-101, NUREG/CR-4370 (1985).
- [14] J.K. Kim, K.H. Kim, C.H. Shin, H.D. Kim, and D.H. Lee, “Verification of Radiation Shielding and Criticality Safety for KSC-4 Spent Nuclear Fuel Transport Cast Using MCNP and Scale Code System”, Spring Conference of Korea Nuclear Society, Jeju University, Jeju (2001).