Journal of Radiation Industry 9(4) : 209~216(2015)

원전사고 후 광역의 방사성 오염부지 내 거주민에 대한 시간에 따른 피폭방사선량 평가

고아라[1] · 김민준[1] · 조남찬[2] · 설증군[2] · 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과, [2]한전원자력연료 원자력안전처

Assessment of Temporal Trend of Radiation Dose to the Public Living in the Large Area Contaminated with Radioactive Materials after a Nuclear Power Plant Accident

A Ra Go[1], Min Jun Kim[1], Nam Chan Cho[2], Jeung Gun Seol[2] and Kwang Pyo Kim[1,*]

[1]*Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University*
[2]*Radiation Safety Team, Korea Electric Power Corporation Nuclear Fuel*

Abstract - It has been about 5 years since the Fukushima nuclear power plant accident, which contaminated large area with radioactive materials. It is necessary to assess radiation dose to establish evacuation areas and to set decontamination goal for the large contaminated area. In this study, we assessed temporal trend of radiation dose to the public living in the large area contaminated with radioactive materials after the Fukushima nuclear power plant accident. The dose assessment was performed based on Chernobyl model and RESRAD model for two evacuation lift areas, Kawauchi and Naraha. It was reported that deposition densities in the areas were 4.3~96 kBq m^{-2} for ^{134}Cs, 1.4~300 kBq m^{-2} for ^{137}Cs, respectively. Radiation dose to the residents depended on radioactive cesium concentrations in the soil, ranging 0.11~2.4 mSv y^{-1} at Kawauchi area and 0.69~1.1 mSv y^{-1} at Naraha area in July 2014. The difference was less than 5% in radiation doses estimated by two different models. Radiation dose decreased with calendar time and the decreasing slope varied depending on dose assessment models. Based on the Chernobyl dosimetry model, radiation doses decreased with calendar time to about 65% level of the radiation dose in 2014 after 1 year, 11% level after 10 years, and 5.6% level after 30 years. RESRAD dosimetry model more slowly decreased radiation dose with time to about 85% level after 1 year, 40% level after 10 years, and 15% level after 30 years. The decrease of radiation dose can be mainly attributed into radioactive decays and environmental transport of the radioactive cesium. Only environmental transports of radioactive cesium without consideration of radioactive decays decreased radiation dose additionally 43% after 1 year, 72% after 3 years, 80% after 10 years, and 83% after 30 years. Radiation doses estimated with cesium concentration in the soil based on Chernobyl dosimetry model were compared with directly measured radiation doses. The estimated doses well agreed with the measurement data. This study results can be applied to

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

radiation dose assessments at the contaminated area for radiation safety assurance or emergency preparedness.

Keywords : Fukushima NPP accident, Contaminated soil, Evacuation lift area, Radiation dose, Dose assessment

서 론

후쿠시마 원자력발전소(원전) 사고로 인하여 다량의 방사성물질이 환경으로 방출 및 침적되었으며, 이로 인해 광역의 방사성 오염부지가 발생하였다. 일본 원자력규제위원회에서 2013년 10월 28일부터 11월 6일 기간 동안 후쿠시마 원전으로부터 80 km 내 방사성세슘의 토양 내 침적 상황을 조사하였다. 조사 결과 ^{134}Cs의 침적 밀도는 0.83~1,100 kBq m^{-2} (평균 49 kBq m^{-2}), ^{137}Cs은 1.8~2,600 kBq m^{-2} (평균 110 kBq m^{-2}) 수준을 나타내었다(JAEA 2013).

일본 정부는 토양에 침적된 방사성세슘으로 인해 예측되는 연간 피폭방사선량에 따라 피난구역을 설정하고 있다. 연간 피폭방사선량이 50 mSv y^{-1} 이상인 지역은 귀환곤란구역, 20~50 mSv y^{-1}인 지역은 거주제한구역, 20 mSv y^{-1} 이하인 지역은 피난지시 해제 준비구역으로 설정하여 일반인의 출입을 제한하고 있으며, 피폭방사선량이 20 mSv y^{-1} 이하로 확실시되는 지역에 대해서는 피난지시가 해제된다. 일본 정부는 피난지역 내 주민들의 조속한 귀환을 위해 제염 작업을 활발히 수행하고 있다. 20 mSv y^{-1}가 넘는 지역에 대한 제염 목표는 신속하고 단계적으로 제염을 추진하여 20 mSv y^{-1} 이하로 감소시키는 것이다. 20 mSv y^{-1} 이하인 지역의 단기 제염 목표는 2011년 8월 대비 공간 방사선량률을 성인 활동 공간의 경우 50%, 어린이의 활동 공간의 경우 60% 수준까지 저감시키는 것이며, 장기적 목표는 1 mSv 이하의 연간 피폭방사선량을 실현하는 것이다(MOE 2015).

원전사고 발생으로 인해 광역의 부지가 방사성물질에 오염되는 경우 피난구역 및 제염 목표를 설정하기 위해 오염부지 내 거주민에 대한 피폭방사선량 평가가 필요하다. 세계보건기구(WHO)에서는 일본 국민 그리고 전 세계 인구를 대상으로 후쿠시마 원전 사고 이후 1년 동안의 피폭방사선량을 평가하였으며, 유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR)에서는 일본 및 인근 국가 국민들을 대상으로 피폭방사선량을 평가하였다(WHO 2012; UNSCEAR 2014). 국제원자력기구(IAEA)에서는 개인선량계 측정값을 이용하여 외부피폭 방사선량을 평가하였으며, 후쿠시마 현 내 주민들을 대상으로 전신계수기(WBC) 측정값을 이용하여 내부피폭 방사선량 평가를 수행하였다(IAEA 2014). 국제원자력기구에서 피폭방사선량을 평가한 결과, 일반인에 대한 내부피폭 방사선량은 매우 미미하므로 외부피폭만을 고려할 것을 권고하였다. 거주민에 대한 피폭방사선량은 현시점에 대한 평가도 필요하며, 주민들의 귀환시기 등을 판단하기 위해서는 향후 시간 경과에 따라 예측되는 피폭방사선량 평가도 필요하다. Jacob 등은 체르노빌 원전 사고 이후 토양 내 세슘 농도를 이용하여 거주민의 피폭방사선량을 평가하는 모델을 개발하였다(Jacob *et al*. 1987; Jacob and Likhatarev 1996; Golikov *et al*. 1999; Golikov *et al*. 2002; Likhtarev *et al*. 2002; Golikov *et al*. 2007).

후쿠시마 사고 이후 대략 5년 정도의 시간이 흘렀다. 후쿠시마 원전사고 초기, 많은 연구에서는 일본 현지 거주민에 대한 피폭방사선량 평가를 수행하였다(WHO 2012; IAEA 2014; UNSCEAR 2014). 현시점에서는 방사성 오염부지 내 거주민에 대한 피폭방사선량 정보는 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 원전사고 후 광역의 방사성 오염부지 내 거주민에 대한 피폭방사선량을 평가하였다. 이를 위해 후쿠시마 원전사고 이후 최근 피난지시가 해제된 후쿠시마현 내 가와우치, 나라하 지역을 대상으로 거주민에 대해 현시점의 피폭방사선량 수준을 평가하였다. 또한 향후 시간 경과에 따라 예측되는 피폭방사선량을 평가하였다. 부지 오염 이후 시간 경과에 따른 피폭방사선량 감소에 영향을 미치는 주요 인자인 방사성세슘의 환경거동에 의한 기여도를 평가하였다. 그리고 광역의 부지 오염 시 피폭방사선량 평가에 사용되는 모델이 미래에 대한 방사선량을 얼마나 정확하게 예측할 수 있는지 평가하였다.

재료 및 방법

피난지시 해제지역의 거주민에 대한 피폭방사선량을 평가하였다. 가장 최근 시점의 피폭방사선량을 평가하기 위해 2014년 말을 기준으로, 후쿠시마 현 내 두 곳의 피난지시 해제지역 내 성인 거주민에 대해 피폭선량을 평가하였다. 오염지역에서의 일반인에 대한 내부피폭 방사선량은 매우 미미하기 때문에 본 연구에서는 외부피폭 방사선량만을 고려하였다. 외부피폭 방사선량 평가는 방사선량 평가 모델, 토양 내 방사성세슘의 침적 밀도, 실내 · 외 거주비율, 실내에서의 차폐 계수 등을 고려하여 평가하였다.

1. 방사선량 평가 모델

후쿠시마 원전사고와 같이 광역의 부지가 오염되는 경우 외부피폭 방사선량을 평가하는 모델은 다양하다. 외부피폭 방사선량의 경우 일본 정부에서 사용한 간이 모델, 일본 원자력연구개발기구(JAEA) 모델, 토양분포 고려 모델, 체르노빌 모델, RESRAD 모델 등이 있다. 이 중 체르노빌 및 RESRAD 방사선량 평가 모델의 경우에는 토양 내 방사성 핵종의 농도를 이용하여 시간의 경과에 따른 피폭방사선량 예측 모델을 제시하고 있지만, 타 모델의 경우에는 측정 시점에 대한 평가만이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 체르노빌 모델 및 RESRAD 선량 평가 모델을 이용하여 피폭방사선량을 평가하였다.

1) 체르노빌 선량 평가 모델

체르노빌 선량 평가 모델은 체르노빌 원전사고 이후 개발되었다. 모델에 의하면 토양이 오염되었을 경우 외부피폭 방사선량은 다음과 같이 계산할 수 있다(Jacob *et al*. 1987; Jacob and Likhatarev 1996; Golikov *et al*. 1999; Golikov *et al*. 2002; Likhtarev *et al*. 2002; Golikov *et al*. 2007).

$$\dot{E}_i(t) = r(t) \cdot A_{Cs137} \cdot \sum_m \left(\frac{A_m}{A_{Cs137}} \right) \cdot k_m \cdot \exp(-\lambda_m t) \cdot k_i \cdot \sum_j f_j(t) \cdot p_{i,j} \quad (1)$$

$$E_i(T) = 10^{-6} \cdot \int_t^{t+T} \dot{E}_i(t) dt \quad (2)$$

여기서 첨자 i는 피폭그룹 대상, 첨자 m은 방사성핵종, j는 지역을 의미한다. 따라서 $\dot{E}_i(t)$는 피폭대상 그룹 i의 시간 t에서의 유효선량률(nSv h^{-1}), r(t)는 시간에 따른 감쇠함수, A_m는 방사성핵종 m의 토양 침적 밀도(kBq m^{-2}), k_m은 핵종 m의 커마율 환산인자(nGy h^{-1} per kBq m^{-2}), λ_m은 핵종 m의 붕괴상수, k_i는 i 그룹에 대한 유효선량 환산인자(Sv Gy^{-1}), $f_j(t)$는 지역인자, $p_{i,j}$는 j 지역에 거주하는 i 그룹의 실내 · 외 거주비율이다.

감쇠함수 r(t)는 ^{137}Cs과 같이 반감기가 긴 방사성핵종의 토양 내 수직이동으로 인한 감마선량률의 감쇠를 나타내며, 감쇠함수는 다음과 같다(Golikov *et al*. 2002; Likhtarev *et al*. 2002).

$$r(t) = p_1 \cdot \exp\left(-\frac{\mathrm{Ln}\,2}{T_1} \cdot t \right) + p_2 \cdot \exp\left(-\frac{\mathrm{Ln}\,2}{T_2} \cdot t \right) \quad (3)$$

여기서 p_1, p_2, T_1, T_2는 체르노빌 사고 이후 1986년부터 2003년까지 러시아, 스웨덴, 우크라이나 지역의 토양시료 분석을 통하여 경험적으로 유도된 상수이다. 본 연구에서는 후쿠시마 원전사고 이후 유엔방사선과학위원회에서 제시한 값인 $p_1 = 0.5$, $p_2 = 0.5$, $T_1 = 1.5$ y, $T_2 = 50$ y를 사용하였다(UNSCEAR 2014).

커마율 환산인자 k_m는 기준 밀도인 0.5 g cm^{-2} 깊이의 토양에서 방사성핵종 m의 침적 밀도에 대한 1 m 높이의 커마율 비이다. 본 연구에서는 ^{134}Cs의 경우 4.68 nGy h^{-1} per kBq m^{-2}, ^{137}Cs의 경우 1.72 nGy h^{-1} per kBq m^{-2}을 사용하였다(Jacob and Likhtarev 1996).

유효선량 환산인자 k_i는 지표면으로부터 1 m 높이의 공기 중 커마 값을 유효선량으로 환산하는 인자이다. 본 연구에서는 유효선량 환산인자로 0.72 Sv Gy^{-1} 값을 이용하였다(Golikov *et al*. 2007).

지역인자 $f_j(t)$는 교란이 없는 평평한 땅에 대한 관심 지역 j의 커마율 비이다. 본 연구에서는 실내의 경우 1~3층으로 된 목조건물에 대한 지역인자를 사용하였으며, 실외의 경우 잔디 또는 목초지 같은 비포장 지역에 대한 지역인자를 사용하였다. 각각의 경우에 대해 지역인자는 다음과 같이 계산할 수 있다(Golikov *et al*. 2002; UNSCEAR 2014).

$$f_{build} = 0.2 \cdot \exp\left(-\frac{\mathrm{Ln}\,2}{1.8\,\mathrm{y}} \cdot t \right) + 0.2 \quad (4)$$

$$f_{unpaved} = 0.5 \cdot \exp\left(-\frac{\mathrm{Ln}\,2}{2.2\,\mathrm{y}} \cdot t \right) + 0.25 \quad (5)$$

2) RESRAD 선량 평가 모델

RESRAD는 오염부지에 대한 복원 기준과 오염토양으로 인한 피폭방사선량 및 위해도 평가를 위하여 미국 아르곤 국립연구소(ANL)에서 개발되었다. RESRAD는 다양한 피폭경로에 대한 피폭방사선량을 계산하기 위하여 선원, 부지 특성, 외부피폭 및 내부피폭에 관한 인자를 고려한다(Yu *et al*. 2001). 특히 부지 특성을 반영하기 위해 부지의 물리적 인자, 수문학적 인자, 지화학적 인자, 기상학적 인자 등을 고려한다. 본 연구에서는 물리적 인자인 오염토양의 면적은 민감도 분석을 통하여 외부피폭 방사선량에 영향을 주지 않는 포화 상태의 값을 사용하였으며, FGR-12 선량환산인자를 사용하였다(Eckerman *et al*. 1993; Yu *et al*. 2001). 오염두께는 일본 원자력규제위원회의 시료 채취 두께인 5 cm를 따랐으며 복토층은 없다고 가정하였다. 기상학적 인자인 풍속 및 강수량은 2014년도의 일본 통계청 자료를 바탕으로 설정하였다(JMA 2014). 이 외의 부지 특성자료는 RESRAD에서 제공하는 기본값을 채택하였다. 본 연구에서 적용한 RESRAD 선량 평가 코드의 입력인자는 Table 1에 요약하였다.

2. 방사선량 평가

Fig. 1에 후쿠시마 원전 인근 제염지역 현황을 나타내었다. 후쿠시마 원전사고 후 현재 다무라, 가와우치, 나라하 등 세 곳에서 피난지시가 해제되었다(Table 2 참조). 이 중 가장 최근 피난지시가 해제된 가와우치, 나라하 지역에 대하

여 피폭방사선량 평가를 실시하였다. 두 지역 모두 2014년 3월 제염이 종료되었으며, 가와우치는 2014년 10월 그리고 나라하는 2015년 9월 피난지시가 해제되었다.

체르노빌 및 RESRAD 선량 평가 모델의 경우 토양 내 방사성핵종의 농도를 이용하여 피폭방사선량을 평가한다. 본 연구에서는 일본원자력규제위원회에서 2014년 7월 측정한 토양 내 세슘 침적 밀도를 이용하였다. Table 3에 가와우치 및 나라하 지역에서 측정한 토양 내 방사성세슘의 침적 밀도를 나타내었다. RESRAD 선량 평가 모델의 경우 입력인자로 침적 밀도 대신 토양 내 방사능 농도(Bq g^{-1})가 사용된다. 토양 내 세슘의 방사능 농도는 아래의 관계식을 이용하

Table 1. Input parameter values used for RESRAD dosimetry program to assess radiation dose to the public

Input Parameter (unit)	Value
DCF's for external ground radiation (mSv y^{-1} per Bq g^{-1})	
- ^{134}Cs	2.56
- ^{137}Cs	2.03×10^{-4}
Area of contaminated zone (m^2)	1.0×10^5
Thickness of contaminated zone (m)	0.05
Wind speed (m y^{-1})	
- Kawauchi village	1.2
- Naraha town	1.6
Precipitation (m y^{-1})	
- Kawauchi village	1.5
- Naraha town	1.6
Cover depth (m)	0
External gamma shielding factor	0.4
Indoor time fraction	0.7
Outdoor time fraction	0.3

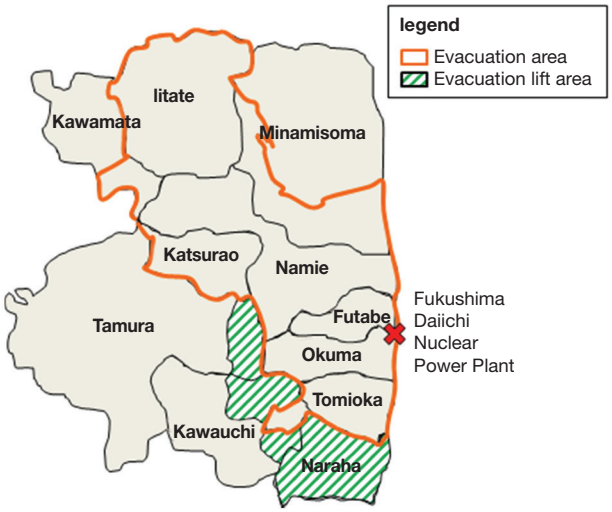

Fig. 1. Evacuation area and evacuation lift area in Fukushima prefecture. The area with green deviant crease lines in Tamura town, Kawauchi village, and Naraha town was established as evacuation area after the Fukushima accident. Recently Japan government has lifted an evacuation order for the area.

Table 2. Date of decontamination completion and evacuation order lift

Area	Date	
	Completion of decontamination	Evacuation order lift
Tamura town	2013.06	2014.04
Kawauchi village	2014.03	2014.10
Naraha town	2014.03	2015.09

Table 3. Radioactive cesium deposition density at Kawauchi village and Naraha town

Area	Measurement location	Radionuclide	Deposition density (kBq m^{-2})	
			July 2013	July 2014
Kawauchi village	A	^{134}Cs	1.6	4.3
		^{137}CS	3.5	14
	B	^{134}Cs	7.8	6.8
		^{137}CS	16	21
	C	^{134}Cs	55	30
		^{137}CS	110	92
	D	^{134}Cs	170	96
		^{137}CS	330	300
	E	^{134}Cs	55	23
		^{137}CS	110	72
Naraha town	A	^{134}Cs	160	47
		^{137}CS	320	150
	B	^{134}Cs	35	34
		^{137}CS	71	110
	C	^{134}Cs	49	29
		^{137}CS	97	93
	D	^{134}Cs	66	35
		^{137}CS	130	110

여 도출하였다(Matsuda *et al*. 2014).

$$A_{con} = \{\beta \cdot (10{,}000/1{,}000)\} \cdot A_m \quad (6)$$

여기서 A_{con}은 토양 내 세슘 방사능 농도(Bq g^{-1}), A_m는 토양 내 세슘 침적 밀도(kBq m^{-2}), β는 단위면적당 경감질량(g cm^{-2})이다. 본 연구에서는 2014년 7월 기준 β에 대해 3.09 g cm^{-2}을 적용하였으며, 이는 일본원자력연구개발기구에서 측정한 2013년 7월과 2013년 11월의 β값을 바탕으로 보간법을 이용하여 도출한 값이다(NRA 2015).

외부피폭 방사선량 평가는 성인을 대상으로 하였다. 성인은 실내 근무자와 실외 근무자로 나눌 수 있으며, 본 연구에서는 보수적 평가를 위하여 실외 근무자를 피폭대상으로 선정하였다. 실외 근무자의 실내 · 외 거주비율은 유엔방사선과학위원회에서 조사한 값을 사용하였다(UNSCEAR 2014). 유엔방사선과학위원회에서는 피폭대상을 실내 근무자, 실외 근무자로 분류하였으며, 일본 통계청 자료를 바탕으로 실내 · 외 거주비율을 조사하였다. 실외 근무자의 실내 · 외 거주비율은 실내에서 70%, 실외에서 30%로 조사되었다.

실내 차폐계수는 일본의 주거형태 조사를 통해 결정하였다. 일본의 주거형태별 점유율은 단독주택(55%), 다세대주택(42%), 연립주택(3%) 순으로 나타났다(Statics Japan 2014). 이 중 주거형태 점유율이 가장 높은 단독주택은 약 90%가 목조건물로 나타났다. 따라서 일본의 대표적인 주거형태는 목조건물로 선정하였으며, 목조건물의 차폐계수는 현재 일본 정부에서 적용하고 있는 0.4로 가정하였다.

오염부지 내 체류기간 동안 야기되는 피폭방사선량을 평가하기 위하여 피난지시 해제지역에서 향후 100년 동안 피폭방사선량의 시간의 경과에 따른 경향을 평가하였다. 시간에 따른 경향을 파악하기 위해서 세슘의 침적 밀도가 가장 높은 가와우치 지역에서는 D 지점, 나라하 지역에서는 A 지점의 측정값을 사용하였다.

결 과

1. 현시점에서 피폭방사선량

Fig. 2에 2014년 11월 기준 피난지시 해제구역 거주민에 대한 피폭방사선량 평가 결과를 나타내었다. 체르노빌 선량평가 모델과 RESRAD 선량 평가 모델을 이용하여 평가한 피폭방사선량 평가 결과는 그 차이가 5% 이내로 비슷하였다. 연간 피폭방사선량은 토양 내 방사성세슘의 농도에 따라 다르게 나타났는데, 가와우치 지역에서는 0.11~2.4 mSv y^{-1} 수준이었으며, 나라하 지역에서는 0.69~1.1 mSv y^{-1} 수준이었다.

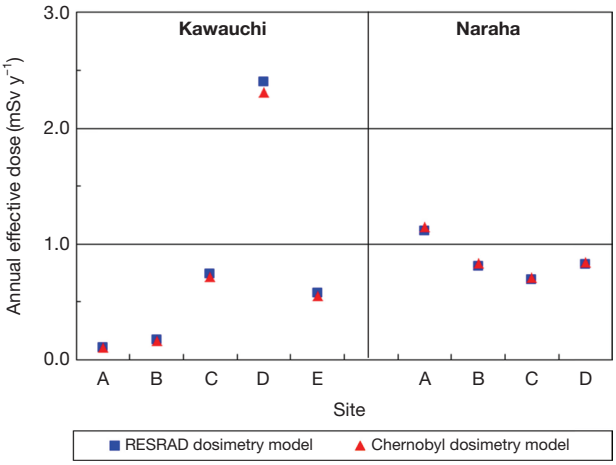

Fig. 2. Annual effective dose to the public living in evacuation lift area. The radiation doses were assessed with radioactive cesium concentration in the soil using two different dosimetry models, including Chernobyl model and RESRAD model.

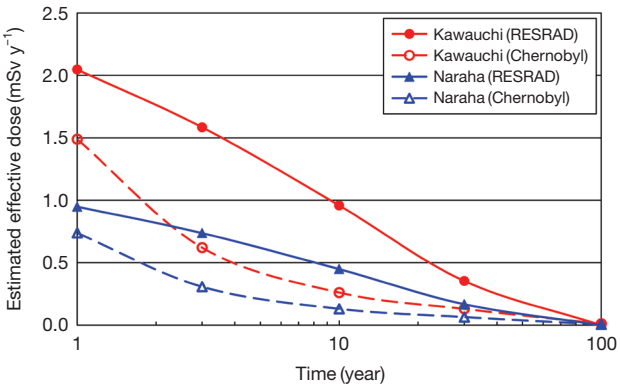

Fig. 3. Temporal trend of annual effective dose to the public living in evacuation lift area. The radiation doses were assessed using two different dosimetry models, including Chernobyl model and RESRAD model.

2. 시간 경과에 따른 피폭방사선량

Fig. 3에 향후 100년 동안 시간의 경과에 따라 예측되는 피폭방사선량을 평가 결과를 나타내었다. 체르노빌 선량 평가 모델과 RESRAD 선량 평가 모델은 모두 시간에 따라 피폭방사선량이 감소하는 경향을 보였으나, 감소의 정도는 두 모델의 결과가 상이하였다. 두 모델의 상대적인 평가를 위해 괄호 안에 2014년 말을 기준으로 피폭방사선량의 상대적 비율을 나타내었다. 가와우치 D 지점에서 체르노빌 모델의 경우 2014년 말 2.3 mSv, 1년 후 1.5 mSv (65%), 3년 후 0.62 mSv (27%), 10년 후 0.26 mSv (11%), 30년 후 0.13 mSv (5.6%), 100년 후 0.011 mSv (0.48%)로 나타났다. RESRAD 선량 평가 모델의 경우에는 2014년 말 2.4 mSv, 1년 후 2.1 mSv (85%), 3년 후 1.6 mSv (66%), 10년 후 0.96 mSv (40%),

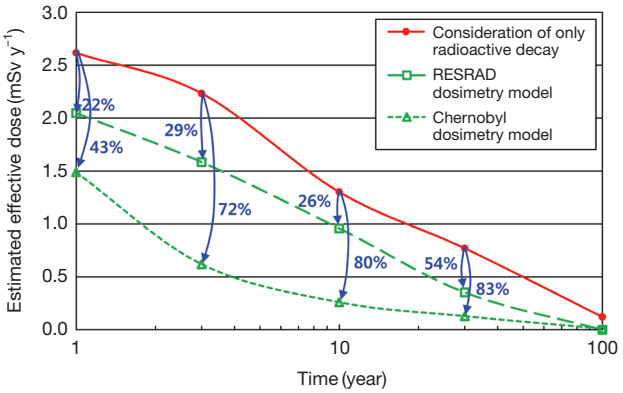

Fig. 4. Contribution of radioactive decays and environmental transport of the radioactive cesium in decrease of radiation dose with calendar time. Only environmental transport of radioactive cesium without consideration of radioactive decays can additionally decrease radiation dose by up to 83% after 30 years.

30년 후 0.35 mSv (15%)로 평가되었다. 나라하 A 지점에서는 체르노빌 모델의 경우 1년 후 0.74 mSv (65%), 10년 후 0.13 mSv (11%)로 나타났다. RESRAD 선량 평가 모델의 경우에는 1년 후 0.95 mSv (85%). 10년 후 0.45 mSv (40%)로 평가되었다. 최종 제염 목표 관점에서 가와우치 D 지점의 경우, 체르노빌 모델은 2년 경과 후 연간 1 mSv 기준을 만족시켰으며, RESRAD 모델은 10년 경과 후 이를 만족시켰다.

3. 방사성물질의 환경거동이 피폭방사선량 감소에 미치는 영향

오염부지 내 시간 경과에 따른 피폭방사선량 감소는 방사성세슘의 방사성붕괴 이외에 날씨 효과 및 방사성핵종의 토양 내 침투 현상과 같은 환경거동에 의한 것이다. 비교를 위해 가와우치 지역 D 지점에 대해 방사성붕괴만을 고려했을 때 예측되는 방사선량의 감소 정도와 체르노빌 및 RESRAD 선량 평가 모델을 기반으로 예측되는 방사선량의 감소 정도를 비교하였다(Fig. 4 참조). 방사성붕괴만 고려하는 경우 피폭방사선량은 2014년 말 2.8 mSv, 1년 후 2.6 mSv (원년인 2014년을 기준으로 92% 수준), 3년 후 2.2 mSv (79%), 10년 후 1.3 mSv (46%), 30년 후 0.77 mSv (28%), 100년 후 0.12 mSv (4%)로 나타났다. 체르노빌 선량 평가 모델을 기반으로 하여 방사성핵종의 환경거동에 의한 추가적인 피폭방사선량의 감소 수준을 살펴보면, 방사성붕괴만을 고려한 것을 기준으로 하여 1년 후에는 43%, 3년 후에는 72%, 10년 후에는 80%, 30년 후에는 83% 정도의 추가적인 피폭방사선량의 감소가 있었다. 환경거동에 의한 추가적 피폭방사선량 감소는 시간이 지남에 따라 더 증가하는 경향을 보였다.

Table 4. Measured ambient dose rates at Kawauchi village and Naraha town. The measurements were conducted in July 2014

Area	Measurement location	Ambient dose rate (μSv h^{-1})
Kawauchi village	A	0.11
	B	0.26
	C	0.16
	D	0.9
	E	0.24
Naraha town	A	1.1
	B	0.32
	C	0.31
	D	0.34

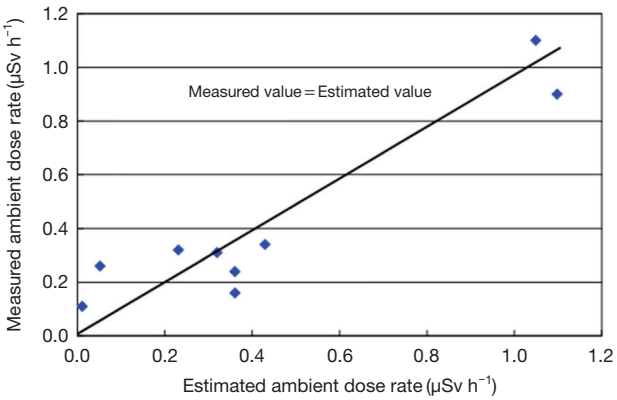

Fig. 5. Comparison of radiation doses in 1 year later estimated with current cesium concentrations in the soil using Chernobyl dosimetry model and directly measured radiation doses in 1 year later.

4. 방사선량 향후 예측값과 실측값 비교

광역의 부지 오염 시 피폭방사선량 평가에 사용되는 모델이 미래에 대한 방사선량을 얼마나 정확하게 예측할 수 있는지 평가하기 위해, 토양 내 방사성세슘 농도를 이용하여 예측한 피폭방사선량과 실측한 방사선량을 비교하였다. 가와우치, 나라하 지역에서 2013년 7월 측정한 토양 내 방사성핵종의 농도를 이용하여 1년 후 예측되는 공간 방사선량률을 평가하였다. 이를 2014년 7월 실측한 공간 방사선량률과 비교하였다. 체르노빌 선량 평가 모델을 이용하여 커마율을 계산하고, 이를 공간 방사선량률로 변환하였다(ICRP 1997).

모델을 이용하여 예측 평가한 공간 방사선량률은 실측한 값과 비교하여 전체적으로는 비슷한 경향을 보여, 체르노빌 모델의 경우 일단 단기간에 대해서는 시간 경과에 따른 방사선량을 잘 예측할 수 있는 것으로 판단되었다. 그리고 향후 장기간에 걸쳐 측정 데이터가 축적된다면 일본 지역에 대한 체르노빌 모델의 장기간에 걸친 적합성을 판단할 수

있을 것이다. 또한 후쿠시마 지역에 적합한 방사성핵종의 환경거동 인자, 피폭방사선량 평가 모델도 개발할 수 있을 것이다.

고 찰

1. 현시점에서 피폭방사선량

본 논문에서는 피난지시 해제구역 거주민에 대해 현시점에서 피폭방사선량을 평가하였다. 가와우치, 나라하 지역의 피폭방사선량 계산 결과는 피난지시 해제 기준치인 20 mSv y^{-1}를 모두 만족하였다. 가와우치 D, 나라하 A 지점을 제외한 대부분의 지역은 최종 제염 목표인 1 mSv y^{-1}도 모두 만족하였다.

2. 시간 경과에 따른 피폭방사선량

체르노빌 방사선량 평가 모델의 경우, RESRAD 선량 평가 모델에 비해 상대적으로 1년 후에는 1.9배, 3년 후에는 2.5배, 10년 후에는 3.1배, 30년 후에는 1.5배 더 많이 피폭방사선량이 감소하는 것으로 평가되었다. 이처럼 방사선량 평가 모델에 따라 예측되는 피폭방사선량이 다르게 나타나는 것은 방사성핵종의 환경거동을 나타내기 위해 고려하는 인자가 다르기 때문이다. RESRAD 선량 평가 모델에서는 기상학적 요인에 의한 침식 현상과 지하수로 인한 침출 현상을 통해 방사성핵종의 환경거동을 고려하였다. 체르노빌 선량 평가 모델은 주로 토양 내 방사성핵종의 수직이동을 통한 방사성핵종의 환경거동을 고려하였는데, 방사성세슘의 수직이동에 따른 피폭방사선량 감소 정도를 체르노빌에서 실측한 자료를 바탕으로 결정하였다. 따라서 시간 경과에 따른 피폭방사선량의 변화를 예측함에 있어서, 체르노빌 선량 평가 모델은 시간에 따라 측정한 방사선량 자료를 주요 기반하였고, RESRAD 선량 평가 모델은 시간에 따른 방사성핵종의 환경거동을 주요 기반으로 하였다.

3. 방사성물질의 환경거동이 피폭방사선량 감소에 미치는 영향

방사성붕괴만을 고려했을 때 예측되는 방사선량의 감소 정도와 체르노빌 및 RESRAD 선량 평가 모델을 기반으로 예측되는 방사선량의 감소 정도를 비교하였다. 이를 통해 방사성물질의 환경거동이 피폭방사선량 감소에 미치는 영향을 평가하였다. 환경거동에 의한 추가적 피폭방사선량 감소는 시간이 지남에 따라 더 증가하는 경향을 보였다. RESRAD 선량 평가 모델의 경우에는 체르노빌 선량 평가 모델에 비해 상대적으로 환경거동의 영향이 작게 나타났는데, 1년 후에서 30년 후 정도까지 대략 22~54% 정도의 추가적인 피폭방사선량 감소가 있었다. Likhtarev 등은 방사성핵종의 토양 내 수직이동으로 인하여 피폭방사선량이 10년 후에는 대략 70% 감소하는 것으로 보고하였는데, 이는 본 연구의 예상치와 비슷한 수준이다.

결 론

후쿠시마 사고 이후 대략 5년 정도의 시간이 흘렀다. 본 연구에서는 후쿠시마 원전사고 이후 최근 피난지시가 해제된 후쿠시마 현 내 가와우치, 나라하 지역을 대상으로 거주민에 대해 현시점의 피폭방사선량 수준을 평가하였다. 또한 향후 시간 경과에 따라 예측되는 피폭방사선량을 평가하였다. 부지 오염 이후 시간 경과에 따른 피폭방사선량 감소에 영향을 미치는 주요인자인 방사성세슘의 환경거동에 의한 기여도를 평가하였다. 그리고 광역의 부지 오염 시 피폭방사선량 평가에 사용되는 모델이 미래에 대한 방사선량을 얼마나 정확하게 예측할 수 있는지 평가하였다.

2014년 말 기준 거주민에 대한 연간 피폭방사선량은 토양 내 방사성세슘의 농도에 따라 다르게 나타났으며, 가와우치 지역에서는 0.11~2.4 mSv y^{-1}, 나라하 지역에서는 0.69~1.1 mSv y^{-1}이었다. 체르노빌 모델과 RESRAD 모델을 이용하여 평가한 현시점에 대한 피폭방사선량 평가 결과는 5% 이내로 비슷하였다. 시간의 경과에 따른 피폭방사선량의 감소경향은 모델에 따라 상이하였다. 현시점의 피폭방사선량을 기준으로, 체르노빌 모델의 경우에는 1년 경과 후 65%, 10년 경과 후 11%, 30년 경과 후 5.6% 수준으로 감소하였으며, RESRAD 모델의 경우에는 1년 경과 후 85%, 10년 경과 후 40%, 30년 경과 후 15%로 감소하였다. 이러한 감소경향은 방사성세슘의 방사성붕괴 이외에 날씨 효과 및 방사성핵종의 토양 내 침투 현상과 같은 환경거동에 의한 것이다. 방사성붕괴에 의한 효과를 고려하지 않고, 방사성핵종의 환경거동에 의한 피폭방사선량의 감소 수준을 살펴보면, 체르노빌 선량 평가 모델의 경우 1년 후에는 43%, 3년 후에는 72%, 10년 후에는 80%, 30년 후에는 83% 정도의 추가적인 피폭방사선량 감소가 있었다. 토양 내 방사성세슘 농도를 이용하여 예측한 피폭방사선량과 실측한 방사선량을 비교하였다. 체르노빌 모델의 경우 시간 경과에 따른 방사선량을 잘 예측할 수 있는 것으로 판단되었다. 종합하면, 체르노빌 모델 및 RESRAD 모델 등은 방사성붕괴 이외에도 환경적 요인들을 고려하므로, 오염부지 내에서 피폭방사선량을 잘 예측할 수 있는 것으로 판단된다. 따라서 광역의 부지가 방사능물질로 오염되는 경우, 피폭 저감을 위한 방호조치의 도입 또는 피난지시 해제 등의 판단에 대한 기초정보를 제공할 수 있을 것이다. 그리고 본 연구의 결과는 방

사선학적 안전성 확인 또는 방사능방재대책을 목적으로 오염지역에 대한 피폭방사선량 평가에 활용될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 한국에너지기술평가원의 에너지기술개발사업(No.20141510101630)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Golikov V, Balonov M, Erkin V and Jacob P. 1999. Model validation for external doses due to Environmental contaminations by the Chernobyl accident. *Health. Phys.* **77**(6):654-661.

Golikov V, Wallstrom E, Whoni Y, Tanaka K, Endo S and Hoshi M. 2007. Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms. *Radiat. Environ. Bioph.* **46**(4):375-382.

Golikov VY, Balonv MI and Jacob P. 2002. External exposure of the population living in areas of Russia contaminated due to the Chernobyl accident. *Radiat. Environ. Bioph.* **41**(3):185-193.

IAEA. 2014. The follow-up IAEA international mission on remediation of large contaminated areas off-site the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. International Atomic Energy Agency. Vienna.

ICRP. 1997. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74. International Commission on Radiological Protection. Oxford. Pergamon Press.

ICRU. 1994. Gamma-ray spectrometry in the environment. ICRU Report 53. International Commission on Radiation Units and Measurements. Bethesda.

Jacob P and Likhtarev I. 1996. Pathway analysis and dose distributions. EUR 16541 EN. European Commission. Brussels.

Jacob P, Meckbach R and Muller HM. 1987. Reduction of external exposure from deposited Chernobyl activity by runoff, weathering, street cleaning and migration in the soil. *Radiat. Prot. Dosim.* **21**(1):51-57.

JAEA. 2013. Deposition of gamma emitting nuclides in the distribution survey of radioactive substances. Japan Atomic Energy Agency homepage, Available from: http://emdb.jaea.go.jp/emdb/en/portals/b211. Accessed on October 19.

JMA. 2014. Annual wind speed and precipitation. Japan Meteorological Agency Homepage, Available from: http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=36&block_no=0295&year=2014&month=&day=&view=. Accessed on October 19.

Likhtarev IA, Kovgan LN, Jacob P and Anspaugh LR. 2002. Chernobyl accident: Retrospective and prospective estimates of external dose of the population of Ukarine. *Health. Phys.* **82**(2):290-303.

Mastuda N, Satoshi M, Shinoura S, Takahashi J, Nakano M, Shimada K, Uno K and Hagiwara S. 2015. Depth profiles of radioactive cesium in soil using a scraper plate over a wide area surrounding the Fukushima Dai-ich nuclear power plant. *J. Environ. Radioact.* **139**:427-434.

MOE. 2015. Priority, goal and roadmap of decontamination. Ministry of the Environment Homepage. Available from: http://josen.env.go.jp/en. Accessed on October 19.

NRA. 2015. Extension Site of Distribution Map of Radiation Dose. Nuclear Regulation Authority Homepage. Available from: http://ramap.jmc.or.jp/map/eng/agreement.html. Accessed on October 19.

Satoh D, Furuta T, Takahashi F, Endo A, LEE CS and Bolch W. 2014. Calculation of dose conversion coefficients for external exposure to radioactive cesium distributed in Soil. JAEA-Research 2014-017. Japan Atomic Energy Agency. Ibaraki.

Statistics Japan. 2014. Housing and land survey data. Statistic Japan Homepage. Available from: http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2013/10_2.htm. Accessed on July 8.

Takahara S, Iilima M, Shimada K, Kushida T and Shiratori Y. 2015. Development of deterministic approach to assess doses to the public from external exposure in area contaminated by the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. JAEA-Research 2014-024. Japan Atomic Energy Agency. Ibaraki.

UNSCEAR. 2014. Report of the United Scientific Committee on the effects of atomic radiation to the general assembly. UNSCEAR 2013 Report. Vol 1. United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. New York.

WHO. 2012. Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 great east japan earthquake and tsunami. World Health Organization. Geneva.

Yu C, Zielen A, Cheng J, LePoire E, Gnanapragasam E, Kamboj S, Amish J, Wallo A, Williams WA and Peterson H. 2001. User's manual for RESRAD version 6. ANL/EAD-4. Argonne National Laboratory. Illinois.

Received: 11 December 2015
Revised: 16 December 2015
Revision accepted: 17 December 2015