Journal of Radiation Industry 13(4) : 327~332(2019)

국내 고유 건강영향 평가를 위한 방사선유발 갑상선암 리스크 모델 적용방안

김건민[1,*] · 이승희[1,2] · 김혜진[1] · 김석훈[1]

[1](주)미래와도전, [2]서울대학교 원자핵공학과

Application Plan of the Radiation-induced Thyroid Cancer Risk Model for the Domestic-specific Health Effect Assessment of the Koreans

Keonmin Kim[1,*], Seunghee Lee[1,2], Hyejin Kim[1] and Sukhoon Kim[1]

[1]*FNC Technology Co., Ltd., 32F, 13, Heungdeok 1-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 16954, Republic of Korea*

[2]*Department of Nuclear Engineering, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Seoul 08826, Republic of Korea*

Abstract - As part of various efforts to improve safety since the Fukushima disaster, a level 3 PSA was enacted as a notice in Korea. For the domestic level 3 PSA, it is essential to formulate the Korean-specific health effect assessment model typically aimed at deriving lifetime risk resulting from radiation exposure using cancer incidence model for each cancer site. Of the cancer sites to be evaluated, more attention is required for the thyroid cancer since there is an obvious relationship between the cancer risk and exposure dose. In this study, for the purpose of developing the Korean model for assessing thyroid cancer risk, the following models that were widely used around the world have been reviewed as the reference; (1) BEIR VII, (2) EPA 2011, (3) Veiga *et al.* (2016), and (4) Preston *et al.* (2007). In this review process, the following points were considered: (1) consideration of relationship between time since exposure and thyroid cancer risk, (2) similarity of ethnic characteristics with the Koreans, and (3) exclusion of medical exposure data. From this point of view, the Preston *et al.* (2007) was chosen as the most appropriate reference model. Unlike other models, to include both ERR and EAR models in assessing the cancer risk, the weighting factor for risk transfer must be considered. In this study, it is suggested to use the 0.5 of weighting factor for each model with reference to the WHO model. However, the cancer risk estimates using this factor should be supplemented by the uncertainty analysis. In future, the thyroid cancer risk model proposed in this study is supposed to be installed as part of the health effect assessment module in the Korean level 3 PSA code system, and be utilized to estimate the radiation-induced thyroid cancer risk reflecting ethnic and regional characteristics of the Korean population.

Key words : Radiation-induced thyroid cancer, Cancer risk model, Health effects, Off-site consequence analysis

*Corresponding author: Keonmin Kim, Tel. +82-31-8005-7976, Fax. +82-31-8065-5111, E-mail. kkm0117@fnctech.com

서 론

2011년 일본 후쿠시마 사고 이후 원전 안전성 향상을 위한 후속조치의 일환으로 국내에서는 확률론적 안전성평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA)를 법제화하였으며, 이에 따라 원자력발전소 인허가 과정에서 중대 사고를 포함한 사고관리계획서에 PSA 결과를 포함하도록 법률이 개정되었다(원자력안전위원회고시 2017). 이 중 3단계 PSA는 주로 사고 이후 원전 주변의 환경 및 사회적 특성을 고려하여 방사선 피폭 및 그에 따른 건강영향(초기사망 및 암사망 위험도 등)을 평가하고, 이러한 결과가 관련 안전 목표를 충족하는가를 평가하기 위해 수행된다.

현재까지 국내 고유 3단계 PSA의 대부분은 미국 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission, NRC)에서 개발된 MACCS (MELCOR Accident Consequence Code System) 코드를 이용하여 수행되었다. 그러나 해당 코드는 현재 거의 사용되지 않는 NUREG/CR-4214 기반의 암위험 평가모델을 내장하고 있을 뿐만 아니라 미국민 인구 특성을 기초로 하여 도출된 암 위험계수(즉, 단위 피폭선량당 암 발생 또는 암 사망 리스크)를 사용하여 인체영향을 평가하므로 국내 인구 특성을 반영한 건강영향 평가에 적용하기에는 고유의 한계점을 내재하고 있다(Evans *et al*. 1993). 이에 따라, 국내 인구집단 특성자료(기저 암 발생 및 사망 자료, 생존율, 인구 분포 등)를 반영한 한국형 건강영향 평가모델 개발이 필요하며, 이와 관련된 연구가 진행되고 있다.

건강영향 평가는 일반적으로 암 발생 모델을 이용하여 방사선 피폭에 따른 생애기인위험(Lifetime Attributable Risk, LAR)을 도출하는 것을 최종 목표로 한다. BEIR VII (Biological Effect of Ionizing Radiation VII) 및 U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency) 2011년 보고서에서는 방사선 피폭 시 다양한 암종(위암, 결장암, 간암, 폐암, 전립선암, 자궁암, 난소암, 유방암, 방광암, 기타 고형암, 갑상선암, 백혈병 등)에 대한 위험도 평가와 관련된 세부적인 내용을 제시하고 있다(National Academy of Sciences 2006; U.S. Environmental Protection Agency 2011). 특히, 갑상선암은 다양한 역학 연구를 근거로 방사선 피폭과의 연관성이 명백하게 확인되어 방사선유발 건강영향 평가를 위한 필수 암종으로 고려되고 있다(Ron *et al*. 1995).

갑상선암 발생 모델은 일본 원자폭탄 생존자(Life Span Study, LSS) 또는 의료피폭 등의 역학 자료를 기반으로 다양한 기관에서 개발되었다. 국내 고유 건강영향 평가모델 개발 목적에 부합하기 위해서는 모델 도출과정에서 사용된 기반자료가 국내 인구 특성을 적절히 반영할 수 있어야 하며, 원전 사고 시 발생 가능한 피폭 시나리오를 암 발생 모델에서 포괄적으로 고려할 수 있어야 한다. 따라서 이미 개발된 갑상선암 모델이 상기 조건에 부합하는가에 대한 논의가 필요하다. 이와 더불어 국내 통계자료에 따르면 갑상선암 발생은 2016년을 기준으로 100,000명당 51명으로 제시되어 있는데 이는 2006년(33명) 대비 약 54% 증가한 수치이므로 갑상선암 모델 설정에 추가적인 검토가 필요한 것으로 판단하였다(KOSIS 2019).

이에 본 연구에서는 국내 고유 인구 특성을 반영한 갑상선암 모델을 설정하기 위해 우선적으로 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 4가지 모델(즉, ① BEIR VII, ② EPA 2011, ③ Veiga *et al*., ④ Preston *et al*.)의 특징을 검토 및 분석하였으며, 이를 토대로 최종적인 국내 방사선유발 갑상선암 발생 모델 적용방안을 제시하였다(National Academy of Sciences 2006; Preston *et al*. 2007; U.S. Environmental Protection Agency 2011; Veiga *et al*. 2016).

재료 및 방법

1. 수학적 모델

방사선 피폭에 의한 초과 암위험은 일반적으로 초과상대위험(Excess Relative Risk, ERR) 및 초과절대위험(Excess Absolute Risk, EAR)으로 정의된다. ERR은 초과 암위험이 기저 암위험에 비례함을 가정하는 반면, EAR은 기저 암위험에 무관하게 선량에 따라 일정 수치로 증가하는 것으로 가정한다. 즉, 방사선 피폭 시 위험은 ERR 및 EAR 모델에 따라 각각 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

ERR 모델:

$$\lambda(s,a,e,D)=\lambda_0(s,a,e)+\underline{ERR(s,e,a,D)\times\lambda_0(s,a,e)} \quad (1)$$

EAR 모델:

$$\lambda(s,a,e,D)=\lambda_0(s,a,e)+\underline{EAR(s,e,a,D)} \quad (2)$$

여기서, $\lambda(s,a,e,D)$는 성별(s), 도달연령(a), 피폭연령(e), 피폭선량(D)에 따른 암위험, $\lambda_0(s,a,e)$는 기저 암위험, 밑줄로 표시한 부분은 각 모델에 따른 초과 암위험을 의미한다.

또한, ERR 및 EAR 모델은 식 3과 같이 선량-반응함수($\rho(D)$)와 보정함수($\epsilon(x)$)의 곱의 형태로 표현할 수 있다.

$$ERR \text{ or } EAR=\rho(D)\epsilon(x) \quad (3)$$

상기 식에서 선량-반응함수는 역학 자료 분석결과를 기초로 식 4와 같이 선량에 따른 선형 1차, 선형 2차, 이차 함수 등의 형태 또는 비선형 함수가 사용될 수 있으며, 보정함수는 식 5와 같이 관련 변수 x(피폭연령, 도달연령, 성별 등)에 대한 지수함수 형태로 표현할 수 있다.

$$\rho(D)=\alpha D(\text{선형 1차}),\ \text{또는}\ \alpha D+\beta D^2(\text{선형 2차}),\ \text{또는}\ \beta D^2(\text{2차}) \quad (4)$$

$$\epsilon(x) = e^{\theta x} \text{ (단, } \theta \text{: 변수 } x \text{에 대한 벡터)} \quad (5)$$

앞서 기술한 ERR 및 EAR 모델은 일본 원자폭탄 생존자(LSS) 또는 의료 피폭 자료 등을 기초로 하여 도출되었으므로, 이를 다른 인구집단에 적용하기 위해서는 집단 간 전이과정(Risk transfer)이 필요하다. 이는 인구집단의 특성 차이(인구분포, 기저 암발생 등)에 기인하는 암위험 추정값의 차이를 보정하기 위한 조치로 역학 자료 집단(일례로, LSS)과 다른 인구 집단(일례로, 국내)에 대해 ERR이 동일하다고 가정하는 곱하기 전이(Multiplicative transfer)와 EAR이 동일하다고 가정하는 더하기 전이(Additive transfer) 방식으로 구분되며, 이를 수식으로 나타내면 식 6, 7과 같다.

곱하기 전이:

$$ERR_{KR\text{-}multi} = ERR_{LSS},\ EAR_{KR\text{-}multi} = ERR_{LSS} \times \lambda_{KR} \quad (6)$$

더하기 전이:

$$EAR_{KR\text{-}add} = EAR_{LSS},\ ERR_{KR\text{-}add} = ERR_{LSS} / \lambda_{KR} \quad (7)$$

여기서, "*LSS*"는 일본 원자폭탄 생존자, "*KR-multi*" 및 "*KR-add*"은 각각 곱하기 및 더하기 전이방식에서 국내 인구집단을 나타내기 위한 첨자이며, λ_{KR}은 국내 기저 암위험을 의미한다.

곱하기 전이 및 더하기 전이에서는 방사선을 각각 암 유발제(그 자체로 암을 유발하는 인자) 및 암 촉진제(그 자체로 암을 유발하지 않지만 기저 암위험에 비례하는 추가 암위험을 제공하는 인자)로 가정한다. 최종적인 암위험 모델은 생물학적 근거 등을 통해 전이방식별 타당성을 평가한 후 각 방식에 대한 가중인자(ω)를 적용하여 아래와 같이 도출된다.

$$EAR_{KR} = ERR_{KR} \times \lambda_{KR} = \omega \times EAR_{KR\text{-}multi} + (1-\omega) \times EAR_{KR\text{-}add} = \omega \times ERR_{LSS} + (1-\omega) \times EAR_{LSS} \quad (8)$$

2. 검토대상 갑상선암 평가모델

2. 1 BEIR VII 모델(National Academy of Sciences 2006)

BEIR VII 모델은 미국민을 대상으로 하여 방사선 피폭 시 암발생 위험을 추정하기 위한 목적으로 미국국립과학아카데미(National Academy of Science, NAS)에서 개발되었으며, 그중 갑상선암 모델에 대해서는 미국 국립보건원(National Institutes of Health, NIH)이 제시한 모델을 채택하였다. 해당 모델은 원자폭탄 생존자 및 의료피폭 사례 등을 포함한 5개의 인구집단으로부터 획득한 자료를 토대로 개발된 암발생 모델(NIH 2003)로 식 9와 같이 나타낼 수 있다. BEIR VII 위원회는 갑상선암의 초과 위험에 대해 방사선 피폭은 암 촉진제로서의 역할을 한다는 근거를 제시하였으며, 이는 ERR 모델을 통한 추가 암위험 평가가 보다 적합함을 의미하므로 ERR 모델만 갑상선암 모델로 포함하였다.

Table 1. Coefficients for thyroid incidence risk model provided in BEIR VII (2006)[a)]

Models		β_s		γ	η
		Male	Female		
BEIR VII (2006)*	ERR	0.53	1.05	−0.083	−

[a)] $ERR(D, e, s) = \beta_s \cdot \mathrm{D} \cdot \exp[\gamma(e-30)]$

$$ERR(D, e, s) = \beta_s \cdot D \cdot \exp[\gamma(e-30)] \quad (9)$$

여기서, β_s는 성별에 따른 선형-선량 계수, γ는 피폭연령 계수를 의미하며, 상세한 수치는 Table 1에 제시하였다. 상기 식을 통해 BEIR VII의 갑상선암 모델에서 피폭선량당 ERR은 성별(s)과 피폭연령(e)에만 의존적임을 확인할 수 있다.

2. 2 EPA 2011 모델(U.S. Environmental Protection Agency 2011)

EPA 2011 모델은 미국 환경보호청(EPA)이 방사선 방호 차원에서 환경 피폭을 규제하기 위해 개발한 것으로, 미국방사선방호위원회(National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP)가 권고한 모델과 매우 유사하다. 그중 갑상선암 모델은 Ron 등이 7개의 인구집단 자료를 통해 도출한 모델(Ron *et al*. 1995)에 근거하여 개발되었다. 해당 모델은 식 10과 같이 나타낼 수 있으며, 이는 NCRP에서 2008년에 권고한 ERR 모델에 의거하여 도출되었다. 해당 모델은 BEIR VII 모델과 동일하게 방사선 피폭으로 인한 갑상선암의 초과 위험은 ERR 모델로 적절하게 표현할 수 있다는 관점을 유지하고 있다.

$$ERR(D, e, t) = \beta \cdot D \cdot A(e) \cdot T(t) \quad (10)$$

$$\beta = 10.7$$

$$A(e) = \begin{cases} 1.0 & e \le 4 \\ 0.6 & 5 \le e \le 9 \\ 0.2 & 10 \le e \le 14 \\ 0.2\exp[-0.083(e-15)] & 15 \le e \le 19 \\ 0.2\exp[-0.083(e-15)] & 20 \le e \end{cases}$$

$$T(t) = \begin{cases} 0 & t \le 4 \\ 1.15 & 5 \le t \le 9 \\ 1.9 & 15 \le t \le 14 \\ 1.2 & 20 \le t \le 24 \\ 1.6 & 25 \le t \le 29 \\ 0.47 & 30 \le t \end{cases}$$

여기서, β는 선형-선량 계수, $A(e)$및 $T(t)$는 각각 피폭연령 및 피폭 후 기간에 대한 보정함수를 의미한다. 상기 식을 통

Table 2. Coefficients for thyroid incidence risk model provided in Veiga *et al*. (2016)[a)]

Modifier		β	γ_1	γ_2	γ_3
Age at exposure (e)	<1	9.17	0.019	−0.001	−0.290
	1~4	7.80			
	5~9	4.18			
	10~14	3.88			
	15~19	1.51			
Attained age (a)	<20	11.54	−0.021	−0.001	−0.162
	20~29	12.23			
	30~39	11.41			
	40~49	3.59			
	50~59	2.06			
	60+	1.40			

a) $ERR(D, e, a) = \beta_{e,a} \cdot D \cdot \exp[\gamma_1 D + \gamma_2 D^2 + \gamma_3 \ln(D)]$

해 EPA 2011의 갑상선암 모델에서 피폭선량당 ERR은 피폭연령(e)과 피폭 후 기간(t)에만 의존적임을 확인할 수 있다.

2. 3 Veiga *et al.* 모델(Veiga *et al.* 2016)

Veiga 등은 기존에 Ron 등이 평가모델 개발 시 고려한 7개 집단(Ron *et al*. 1995) 이외에 의료피폭 사례 등 5개 집단을 추가한 총 12개의 인구집단(피폭 당시 연령이 20세 미만인 사례만 취사선택)에 대한 분석을 통해 갑상선암 발생 모델을 도출하였다.

Veiga 등에 따르면 방사선 피폭에 의한 초과 암위험은 선형 모델에 비해 비선형 선량-반응 모델로 보다 양호하게 모사할 수 있다. 또한, 갑상선암에 대한 초과 상대 암위험은 식 11과 같이 나타낼 수 있으며, 성별에 따른 차이는 나타나지 않고 도달연령(a) 및 피폭연령(e)이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 두 인자의 영향을 고려하기 위해 선형-선량계수(β)에 특정 범위의 도달연령 및 피폭연령에 따라 상이한 값을 할당하였다.

$$ERR(D, e, a) = \beta_{e,a} \cdot D \cdot \exp[\gamma_1 D + \gamma_2 D^2 + \gamma_3 \ln(D)] \quad (11)$$

여기서, $\beta_{e,a}$는 피폭연령 및 도달연령에 따른 선형-선량계수, $\gamma_{1\sim3}$은 각각 비선형-선량계수를 의미하며, 각 계수에 대한 상세한 수치는 Table 2에 제시하였다.

초과 암위험이 피폭선량에 대해 선형적으로 증가한다고 제시한 다른 모델과는 달리 Veiga *et al*. 모델은 20 Gy에서 최대값을 나타내며, 그 이상의 선량에서는 점차 감소하는 양상을 나타낸다. 또한, 2 Gy 미만의 선량 영역에서 선형 선량모델이 방사선 피폭에 의한 위험을 과소평가할 수 있다고 언급하였다.

2. 4 Preston *et al.* 모델(Preston *et al.* 2007)

Preston 등은 일본 원자폭탄 생존자(LSS) 코호트 자료만을 활용하여 갑상선암을 비롯한 고형암에 대한 발생 모델을 도출하였으며, 2007년 발표한 논문을 통해 1994년에 발표한 모델에 11년간 추가로 누적된 사례를 포함한 암발생 모델을 제시하였다. 그중 갑상선암 모델은 앞서 기술한 다른 모델과 달리 초과 암위험을 식 12와 같이 ERR 모델 이외에 EAR 모델로도 표현하였으며, LSS 코호트 중 갑상선암을 진단받은 환자수가 상대적으로 작기 때문에 10,000명당 EAR이 크지 않지만 방사선 피폭과 EAR 증가 간의 상관성이 크다고 주장했다.

Table 3. Coefficients for thyroid incidence risk model provided in Preston *et al*. (2007)[a)]

Models		β_s		γ	η
		Male	Female		
Preston *et al*. (2007)	ERR	0.49	0.65	−0.31	−1.5
	EAR	0.5	1.9	−0.46	0.6

a) $ERR(D, e, a)$ or $EAR(D, e, a) = \beta_s \cdot D \cdot \exp\left[\left(\frac{e-30}{10}\right)\ln(1+\gamma)\right]\left(\frac{a}{70}\right)^{\eta}$

$$ERR(D, e, a) \text{ or } EAR(D, e, a) = \beta_s \cdot D \cdot \exp\left[\left(\frac{e-30}{10}\right)\ln(1+\gamma)\right]\left(\frac{a}{70}\right)^{\eta} \quad (12)$$

여기서, β_s는 성별에 따른 선형-선량 계수, γ 및 η는 각각 피폭연령 및 도달연령에 관련된 계수를 의미하며, 각 계수에 대한 상세한 수치는 Table 3에 제시하였다.

결과 및 고찰

본 연구에서는 한국형 건강영향 평가모델 중 방사선 피폭에 의한 갑상선암 모델을 선정하기 위해 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 기존 모델에 대한 검토 및 분석을 수행하였으며, 그 결과를 요약하여 Table 4에 제시하였다.

BEIR VII 갑상선암 모델의 경우 ERR이 피폭선량 및 피폭연령만의 함수로 표현되지만, 이는 NCRP의 분석결과(NCRP 2008)와 상이하다. NCRP에 따르면 피폭 후 기간(즉, 도달연령-피폭연령)이 증가함에 따라 갑상선암 위험은 감소하는 경향을 나타내며, BEIR VII 모델을 제외한 나머지 3가지 모델에서는 피폭 후 기간 또는 도달연령과 갑상선암 위험의 이러한 경향성을 고려하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 NCRP 연구결과와의 일관성을 위해 BEIR VII의 모델을 국내 갑상선암 모델의 선택지에서 제외하기로 결정하였다.

Veiga *et al*. 모델은 12개의 인구집단 중 방사선 피폭 당시 연령이 20세 미만인 사례만을 대상으로 하므로, 전 연령에 대한 암위험 평가를 전제로 하는 국내 건강영향 평가에 적용하기에는 적절하지 않은 것으로 판단된다. 또한, 해당 모델은 수식에 사용된 계수에 대한 불확실성 관련 정보를 제

Table 4. Summary and comparison of thyroid cancer risk models reviewed

Item	BEIR VII (2006)	EPA 2011 (2011)	Veiga *et al*. (2016)	Preston *et al*. (2007)
Basic data	• LSS(1958∼1987) • Medical exposure (including 4 studies)	• LSS (1958∼1987) • Medical exposure (including 6 studies)	• LSS (1958∼2002) • Medical exposure (including 11 studies)	• LSS (1958∼1998)
Mathematical model	• ERR model	• ERR model	• ERR model	• ERR model • EAR model
Dose-response	• First-order linear	• First-order linear	• Non-linear	• First-order linear
Modification factor	• Exposure age • Gender	• Exposure age • Time since exposure	• Exposure age • Attained age	• Exposure age • Attained age • Gender

공하지 않으므로, 적용 시 불확실성 평가를 수행할 수 없다.

BEIR VII, EPA 2011 및 Veiga *et al*. 모델은 LSS 코호트 자료 이외에 미국 및 서유럽 지역의 인구자료를 포함하여 개발되었다. 특히, 방사선 피폭에 의한 갑상선암 발생에 대한 분석 대상 사례 중 미국 및 서유럽권의 자료가 LSS 코호트에 비해 훨씬 많이 포함되었으며, Kocher 등은 이와 같은 통합 자료를 이용하여 평가된 ERR의 경우 이미 인구 특성의 차이(즉, 방사선에 대한 위해도의 차이, 기저 암위험 등)를 반영하고 있으므로 미국 및 서유럽권 인구집단에 특별한 보정과정 없이 적용될 수 있다고 언급하였다(Kocher *et al*. 2008). 그러나, 한국 인구를 대상으로 한 암위험 평가 시 인구 특성의 차이로 인한 불확실성이 발생할 수 있다. 또한, 상기 세 가지 모델의 경우 만성(Chronic) 또는 지연(Protracted) 피폭으로 간주되는 의료 방사선 피폭에 의한 갑상선암 발생 사례를 포함하여 개발되었는데, 이는 동일 수준의 피폭선량을 가정하는 경우 3단계 PSA에서 고려되는 고에너지의 광자(Photon) 피폭에 비해 위해성이 낮을 것으로 예상된다. 따라서 의료피폭 사례를 포함하여 개발된 모델을 사고로 인한 소외결말 분석에 적용한다면 상당한 오차가 발생할 것으로 판단된다.

Preston 등에 의해 개발된 모델은 도달연령을 영향인자로 포함하여 피폭 후 기간과 갑상선암의 상관관계를 고려하고 있으며, LSS 코호트 자료만을 대상으로 하므로 의료피폭 사례의 포함 또는 인구 특성의 차이에 기인하는 오차를 최소화할 수 있을 것으로 예상된다. 이에 따라, 본 연구에서는 Preston *et al*. 모델을 국내 갑상선암 모델로 채택하기로 결정하였다.

또한, 기존에는 앞서 언급한 바와 같이 방사선이 갑상선암에 대한 촉진제로 작용한다는 가정 및 미국의 갑상선암 발생률이 일본의 경우와 유사하다는 점을 근거로 ERR 모델만을 설정하였다(NAS 2006). 그러나, 국내 갑상선암 발생률은 일본에 비해 10배 정도 높기 때문에 ERR 모델만을 이용한 암위험 추정은 상당한 오차를 수반할 것으로 예상되며, Preston 등에 따르면 EAR 모델이 ERR 모델만큼 LSS 코호트 집단의 방사선에 의한 갑상선암 위험을 양호하게 모사할 수 있으므로 ERR 모델 이외에 EAR 모델 또한 포함하는 것이 적절하다고 판단된다. WHO 또한 갑상선암 모델로 Preston 등에 의해 개발된 ERR 및 ERR 모델을 적용하였으므로 이와 같은 판단이 타당하다고 볼 수 있다(World Health Organization 2013). 따라서, 국내 갑상선암 모델에는 Preston 등이 제시한 ERR 및 EAR 모델을 모두 적용하고자 한다.

수학적 모델에 대한 설명에 기술한 바와 같이 ERR 및 EAR 모델을 모두 고려하기 위해서는 암위험 전이를 고려해야 한다. WHO는 Jacob 등과 Walsh 등의 연구결과를 토대로 각 모델에 대해 0.5의 암위험 전이 가중인자를 사용하였다(Jacob *et al*. 2006; Walsh *et al*. 2009). 두 연구에서는 갑상선암에 대해 EAR 및 ERR 모델을 이용한 암위험 추정치가 거의 동일하다고 언급하였으며, WHO는 이를 근거로 2가지 모델에 동일한 가중인자를 적용한 것으로 판단된다.

전이 가중인자는 원칙적으로 국내 및 일본의 피폭 자료를 이용하여 획득된 암위험 추정치에 대한 비교를 통해 도출되어야 하지만, 국내 피폭 자료를 확보하기 어려우며 방사선에 의한 갑상선암의 생물학적 기저를 완벽하게 분석할 수 없다는 점에서 정확한 가중인자를 확정하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 WHO의 적용사례를 근거로 EAR 및 ERR 모델에 대한 가중인자를 0.5로 동일하게 결정하되, 이로 인한 불확실성 평가를 통해 추정결과를 보완할 것을 제안하는 바이다.

결 론

방사선 피폭 시 국내 건강영향 평가를 위한 암위험 모델 중 갑상선암 발생 모델을 선정하기 위해 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 4가지 모델(즉, ① BEIR VII, ② EPA 2011, ③ Veiga *et al*., ④ Preston *et al*.)에 대한 검토를 수행하였으며, 다음과 같은 사항을 종합적으로 고려하여 Preston 등에 의해 개발된 모델을 적용하기로 결정하였다.

- 피폭 후 기간과 갑상선암 위험의 상관관계 고려
- 일본 원자폭탄 생존자(LSS) 코호트 자료만을 활용:

서구권 피폭 사례 배제
- 의료피폭 자료 제외

검토대상 모델 중 ①~③은 방사선이 갑상선암에 대한 촉진제로 작용한다는 가정 및 미국의 갑상선암 발생률이 일본의 경우와 유사하다는 점을 근거로 ERR 모델만을 채택하였다. 그러나 국내 갑상선암 발병률은 일본에 비해 매우 높으므로 ERR 모델만을 이용하여 암위험을 추정할 경우 상당한 오차가 발생할 것으로 예상될 뿐만 아니라 Preston 등에 따르면 EAR 모델 또한 방사선에 의한 갑상선암 발생을 양호하게 모사할 수 있으므로 국내 모델에는 Preston 등이 제시한 ERR 및 EAR 모델을 모두 적용하고자 한다.

이와 같이 암위험 평가 시 ERR 및 EAR 모델을 모두 포함하기 위해서는 암위험 전이를 고려해야 하며, 본 연구에서는 WHO의 연구결과를 토대로 2가지 모델에 동일한 가중인자(즉, 0.5)를 적용하기로 결정하였다. 단, 해당 수치는 국내 및 일본 피폭자료 비교를 통해 도출된 것이 아니므로 이로 인한 불확실성이 존재할 것으로 예상된다. 따라서 암위험 추정 시 이와 관련된 불확실성 분석을 수행하는 방식으로 결과를 보완할 것을 제안한다.

본 연구를 통해 선정된 국내 갑상선암 평가모델은 향후 현재 개발 중인 국내 고유 3단계 PSA 전산코드의 건강영향 평가모듈의 일부로 구현될 것이며, 이를 이용하여 원전 사고 시 방사선유발 갑상선암 리스크를 인종 및 지역적 특성을 반영하여 보다 현실적으로 추정할 수 있을 것으로 예상된다.

사 사

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017M2A8A4015292).

참 고 문 헌

원자력안전위원회. 2017. 사고관리 범위 및 사고관리능력 평가의 세부기준에 관한 규정. 원자력안전위원회고시 제2017-34호.

Evans JS, Abrahamson S, Bender MA, Boecker BB, Gilbert ES, and Scott BR. 1993. Health Effects Models for Nuclear Power Plant Accident Consequence Analysis, NUREG/CR-4214. Rev.2. pp. 26-44. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC.

Jacob P, Bogdanova TI, Buglova E, Chempurniy M, Demidchik Y, Gavrilin Y, Kenigsberg J, Meckbach R, Schotala C, Shinkarev S, Tronko MD, Ulanovsky A, Vavilov S and Walsh L. 2006. Thyroid Cancer Risk in Areas of Ukraine and Belarus Affected by the Chernobyl Accident. *Radiat. Res.* **165**:1-8.

Kocher DC, Apostoaei AI, Henshaw RW, Hoffman FO, Schubauer-Berigan MK, Stancescu DO, Thomas BA, Trabalka JR, Gilbert ES and Land CE. 2008. Interactive Radio-Epidemiological Program (IREP): A Web-based Tool for Estimating Probability of Causation/Assigned Share of Radiogenic Cancers. *Health Phys.* **95**:119-147.

Korean Statistical Information Service (KOSIS). http://kosis.kr/index/index.do, 2019.3.8.

NAS (National Academy of Sciences). 2006. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII-Phase 2. pp. 267-291. The National Academies Press, Washinton DC.

NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements). 2008. Risk to the Thyroid from Ionizing Radiation. NCRP Report No. 159. pp. 290-293. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.

NIH (National Institutes of Health). 2003. Report of the NCI-CDC Woking Group to Revise the 1985 NIH Radioepidemiological Tables. NIH Publication No. 03-5387. pp. 23-29. National Academy Press, Bethesda, MD.

Preston DL, Ron E, Tokuoka S, Funamoto S, Nishi N, Soda M, Mabuchi K and Kodama K. 2007. Solid Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors: 1958-1998. *Radiat. Res.* **168**:1-64.

Ron E, Lubinn JH, Shore RE, Kiyohiko M, Baruch M, Linda MP, Schneider AB, Tucker MA and John DBJ. 1995. Thyroid Cancer after Exposure to External Radiation: A Pooled Analysis of Seven Studies. *Radiat. Res.* **141**:259-277.

U.S. Environmental Protection Agency. 2011. EPA Radiogenic Cancer Risk Models and Projections for the U.S. Population. EPA Report 402-2-11-001. pp. 6-32. U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC.

Veiga LHS, Holmberg E, Anderson H, Pottern L, Sadetzki S, Adams MJ, Sakata R, Schneider AB, Inskip P, Bhatti P, Johansson R, Neta G, Shore R, de Valthaire F, Damber L, Kleinerman R, Hawkins MM, Tucker R, Lundell M and Lubin JH. 2016. Thyroid Cancer after Childhood Exposure to External Radiation: An Updated Pooled Analysis of 12 Studies. *Radiat. Res.* **5**:473-484.

Walsh. L, Jacob P and Kaiser JC. 2009. Radiation Risk Modeling of Thyroid Cancer with Special Emphasis on the Chernobyl Epidemiological Data. *Radiat. Res.* **172**:509-518.

World Health Organization. 2013. Health Risk Assessment from the Nuclear Accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami based on a Preliminary Dose Estimation. pp. 25-34. WHO Press, Geneva.

Received: 14 September 2019
Revised: 30 September 2019
Revision accepted: 14 October 2019