

# ICRP 103 권고기반의 밀착형·비밀착형 가공제품 사용으로 인한 몬테칼로 전산모사 피폭선량 평가체계 개발

고호정\*, 노시완†, 이재호†, 염연수†, 이재기†

\*한국원자력안전기술원 방사선·폐기물평가실, †한양대학교 원자력공학과

2015년 3월 31일 접수 / 2015년 5월 20일 1차 수정 / 2015년 6월 26일 2차 수정 / 2015년 7월 1일 채택

원료물질 또는 공정부산물을 가공하거나 이를 원료로 하여 제조된 제품인 가공제품은 함유된 천연방사성핵종(우라늄, 토륨, 포타슘 등)으로부터 감마선 방출로 외부피폭을 유발할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 방사성핵종 농도 우라늄·토륨 1 Bq·g<sup>-1</sup>, 포타슘 10 Bq·g<sup>-1</sup>을 가정하고 평형상태의 감마선방출을 가정하여 최종사용자의 사용환경을 반영하여 몬테칼로 전산모사로 복셀팬텀인 ICRP 기준팬텀과 ICRP 권고 103을 적용하여 가공제품의 연간피폭선량을 계산하고 체계를 개발하였다. 가공제품은 사용환경에 따라 피부비밀착형(석고보드, 음이온 벽지, 음이온 페인트)과 피부밀착형(팔찌, 목걸이, 벨트, 땀질기)으로 구분하였고 기하학적 모델링은 일반가구가 거주하는 주택의 유형 분포 추이와 설계지침을 반영하여 룬모델링(3 m×4 m×2.8 m 보수적으로 밀폐된 방)과 복셀팬텀 분할면에 직접 가공제품을 모사하였다. 사용시간은 한국형 노출지수 개발 및 운영체계 구축 보고서를 참고하였으며 알 수 없는 제품은 보수적으로 24시간을 가정하였다. 본 연구에서 가공제품의 연간 유효선량은 0.00003 ~ 0.47636 mSv로 평가되었으며 벨트류 장기등가선량률을 확인하여 복셀팬텀에 가공제품을 직접 모사하는 것의 의미를 확인하였다.

중심어 : 가공제품, 복셀팬텀, 피폭선량평가

## 1. 서론

원자력안전위원회는 2012년 7월 26일부터 「생활주변 방사선 안전관리법」과 동 법의 시행령, 규칙 및 고시 등의 제정·시행을 통하여, 방사선 안전관리의 범위를 기존의 원자력발전소, 연구소, 병원 등에서 발생하는 인공 방사선 중심에서 원료물질(우라늄 235, 우라늄 238, 토륨 232와 각각의 붕괴계열 내의 핵종 또는 포타슘 40 등 천연방사성핵종이 포함된 물질), 공정부산물 및 가공제품(원료물질 또는 공정부산물을 가공하거나 이를 원료로 하여 제조된 제품)까지 확대하여 생활주변에서 접할 수 있는 방사선에 대해서도 안전관리를 하고 있다(생활주변 방사선안전관리법, 동법 시행령, 시행규칙, 고시 등). 가공제품에는 내화벽돌, 캐스터블 등 산업현장에서 사용하는 제품과 콘크리트, 석고보드, 음이온 페인트 등과 같이 건축현장에서 사용하는 제품과 일반인이 건강보조 등의 목적으로 피부에 밀착하여 사용하는 팔찌, 목걸이, 벨트, 땀질기 등의 제품이 있다.

유엔과학위원회(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR)는 천연 방사성핵종이 포함된 석고의 건축자재 사용이 사용자에

게 피폭을 유발할 수 있다고 보고한다[1]. 유럽위원회(European Commission, EC)는 건축자재인 콘크리트, 벽돌, 석고보드의 사용으로 인해 실내공간에서의 연간선량이 0.3 mSv 또는 1 mSv 선량을 초과할 수 있는 경우에 대해 보고하였다[2]. 핀란드 방사선 및 원자력안전청(Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety, STUK)에서는 천연방사성핵종이 함유된 콘크리트로 시공된 실내공간에 대해 사용자의 피폭선량을 평가하기도 하였다[3]. 일본 문부과학성(Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, MEXT)은 피부와 거리를 고려하여 가공제품에 대한 연간 피폭선량 평가 가이드라인을 제시하고 있다[4]. 이처럼 가공제품에 함유된 천연방사성핵종인 우라늄, 토륨, 포타슘에서 발생하는 감마선으로 인해 외부피폭을 유발할 수 있다.

기존 국내 선행연구에서는 가공제품 들침대로부터 나오는 알파선, 베타선, 감마선의 최소·중간·최대 에너지를 각 선원항으로 사용하였고 ICRP 기준팬텀을 인체 전산모의체로 사용하여 가공제품 내 천연방사성핵종으로 인한 외부피폭선량을 평가하였다[5]. 본 연구에서는 기존연구를 발전시켜 보다 다양한 가공제품에 대해 피부 비밀착형 가공제품과 피부 밀착형 가공제품으로 구분하여, 함유된 천연방사성핵종들로부터 발생하는 감마선만을 피폭원으로 하여 사용자의 사용 환경과 시간을 조사

책임저자 : 이재기, jklee@hanyang.ac.kr  
서울 성동 행당동 17 한양대학교 원자력공학과

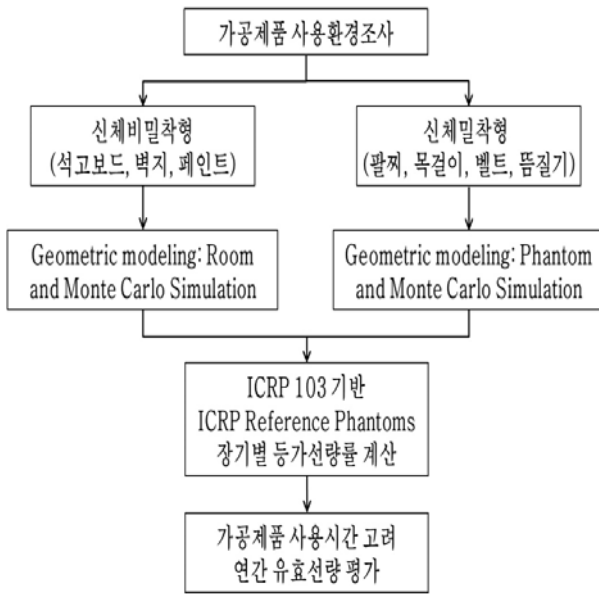


Fig. 1. Radiation dose assessment procedure for NORM added consumer product based on ICRP 103 using monte carlo simulation.

하고 가공제품에 따라 몬테칼로 전산모사기법을 적용하여 최종적으로 ICRP 103 권고기반의 일반인의 연간 유효선량을 계산하였다. 일부 변수에 대해서는 관련 문헌을 참고하였으며 다른 변수들에 대해서는 보수적인 가정들을 적용하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 가공제품 사용환경조사 및 평가방법선정

일반인이 가공제품을 사용하는 환경은 석고보드와 같이 인체로부터 어느 정도 떨어진 원거리 사용과 팔찌, 목걸이, 찻질기처럼 피부에 접촉하여 사용하는 환경으로 크게 구분할 수 있다. 본 연구에서는 가공제품의 크기, 무게, 사용환경, 연간 사용시간을 조사하고 사용환경에 따라 기하학적모델링 방법을 선정하여 MCNPX 버전 2.7으로 몬테칼로 전산모사를 수행하였고 이를 체계화하여

Fig. 1로 나타내었다. 피부 비밀착형 가공제품은 유럽위원회, 핀란드 방사선 및 원자력안전청에서 실내주거를 가정한 룸모델링(room model)[2,3]을 국내요건에 맞게끔 적용하였고 피부에 밀착하여 사용하는 가공제품은 피부에 밀착한 상태로 사용하는 제품의 특성을 고려하여 인체 모의체인 복셀팬텀에 직접 모델링하는 3D segmentation and visualization 방법을 적용하였다.

일반인이 가공제품을 사용하는 시간은 한국형 노출지수 개발 및 운영체계 구축[6]에 따라 장소별 소요시간인 실내 1,281분, 실외 76분, 교통수단 83분을 반영하여 석고보드, 음이온 벽지, 음이온 페인트 가공제품을 실내에 시공하여 하루 1,281분 사용함을 가정하였다. 실내는 집의 실내(819분)와 집 밖의 실내장소(사무실, 백화점 등 499분) 중 하루에 머무르는 시간이 큰 집의 실내로 가정하였다. 피부에 밀착하여 사용하는 제품은 개인별로 차이가 있고 별도의 노출계수 권고값이 없음을 감안하여 보수적인 관점에서 하루 24시간 사용함을 가정하였다.

가공제품 피폭선량계산을 위한 평가방법은 사용환경에 따라 다르며 전산모사 방법 또한 달라진다. 본래 내부피폭 선량계산에 이용하기 위해 제작된 단순화된 대수방정식으로 이뤄진 MIRD형 팬텀은 ICRP 103 권고기반 피폭선량계산에 부적합하다. 따라서, 본 연구에서는 기존선행연구[5]를 따라 인체 조직, 장기가 보다 사실적으로 묘사되고 가공제품을 피부에 직접 밀착시키는 기하학적 모델링을 통해 정밀한 선량평가가 가능하며 ICRP 간행물 110에서 제공하는 ICRP 성인남녀 기준 모의체(ICRP reference phantoms)[7] 복셀팬텀을 이용하여 유효선량을 평가하였다.

### 2.2 가공제품별 몬테칼로 전산모사

#### 2.2.1 피부 비밀착형 가공제품 몬테칼로 전산모사

본 연구에서 피부 비밀착형 가공제품에 대한 몬테칼로 전산모사로, 먼저 3차원 사용공간의 기하학적 모델과 모델링을 위한 제품데이터(Table 1)를 고려하였다. 집의 실내에서 가공제품을 사용하는 3차원 사용공간의 기하학적 모델 선정을 위해 국내 일반가구가 거주하는 주택의

Table 1. The List of NORM added Consumer Product and Geometric-modeling Method.

Product	Product size (m)	Product weight (g)	Hours of use (h)	Geometric modeling
Gypsum board	0.7x0.9	3500	7811	Room
Anion wallpaper	0.1x0.1	31.4	7811	Room
Anion paint	0.2 kg · m <sup>-2</sup>	1000	7811	Room
Bracelet	-	6.9	8760	Phantom <sup>†</sup>
Necklace	-	20.54	8760	Phantom <sup>†</sup>
Belt(wrist)	-	4.03	8760	Phantom <sup>†</sup>
Belt(ankle)	-	8.06	8760	Phantom <sup>†</sup>
Belt(knee)	-	23.25	8760	Phantom <sup>†</sup>
Moxa stone	-	360	8760	Phantom <sup>†</sup>

\* Product recommendation of use(amount · area<sup>-1</sup>)

<sup>†</sup> ICRP 110 reference phantoms

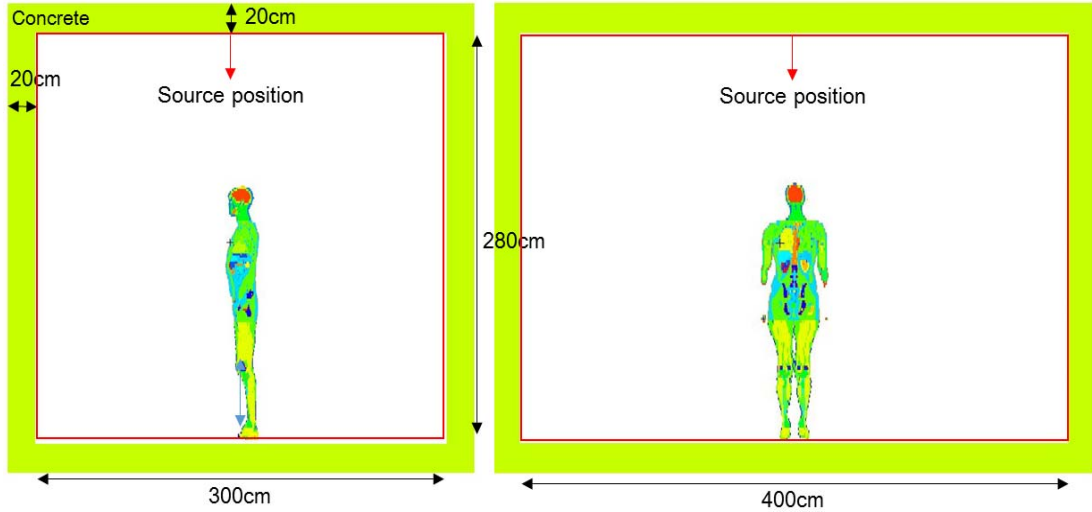


Fig. 2. A geometric room modeling(3 m×4 m×2.8 m) of gypsum board, anion wallpaper, anion paint.

유형 분포 추이[8]를 조사하였다. 국내 일반가구가 거주하는 주택 유형 분포는 아파트 46.9%, 단독주택 39.6%, 다세대 주택 7.2%, 연립 주택 3.0%, 비거주용 건물내 주택 1.7%, 주택이외의 거처 1.7%로 단독주택 거주 비율은 점차감소하고 아파트 거주 비율은 증가하는 추세[8]로 본 연구에서는 가장 비율이 큰 아파트를 선정하였다. 아파트에서 3차원 사용공간은, 한국토지주택공사의 주택분야 건축설계 지침[9]을 반영하여, 3 m × 4 m × 2.8 m인 보수적으로 밀폐된 방을 가정하여 전산모사를 수행하였다(Fig. 2). 크기 · 사용량은 제품별로 고려하였으나 가공제품 종류에 따라 화학적 조성 및 밀도가 상이하고 이를 알 수 없어 산란 따위를 고려하기 위해 콘크리트 밀도 2.3 g · cm<sup>-3</sup>, 화학적조성을 적용[10]하여 콘크리트 위에 해당선원이 균일하게 분포된 형태로 가정하였다. 벽체의 두께는 EU의 Radiation Protection 112 실내 공간 선량평가시 적용된 콘크리트 두께 20 cm을[2] 적용하였으며 이는 한국토지주택공사의 주택분야 건축설계 지침[9]인

최소 18 cm 이상을 만족시키는 것으로 확인되었다.

2.2.2 피부 밀착형 가공제품 몬테칼로 전산모사 팔찌, 목걸이, 땀질기, 손목, 무릎, 발목 벨트 등 피부에 밀착해 사용하는 가공제품은 ICRP 기준 모의체(성인

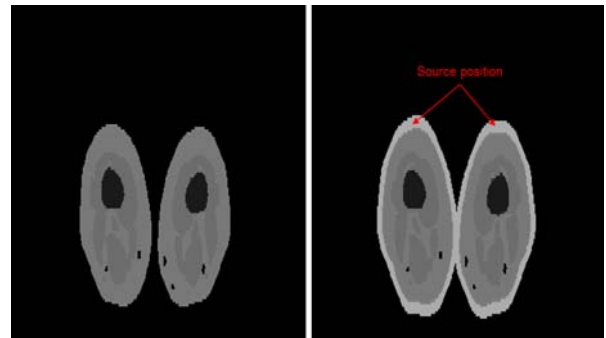


Fig. 3. Voxel phantom segmentation modeling.

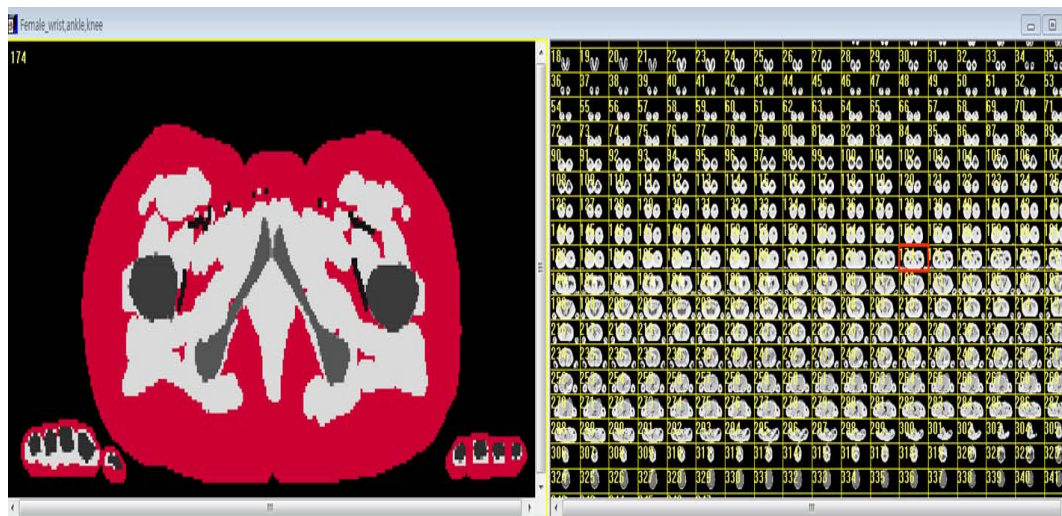


Fig. 4. Interactive segmentation for 3D-visualization on female\_belt\_knee.

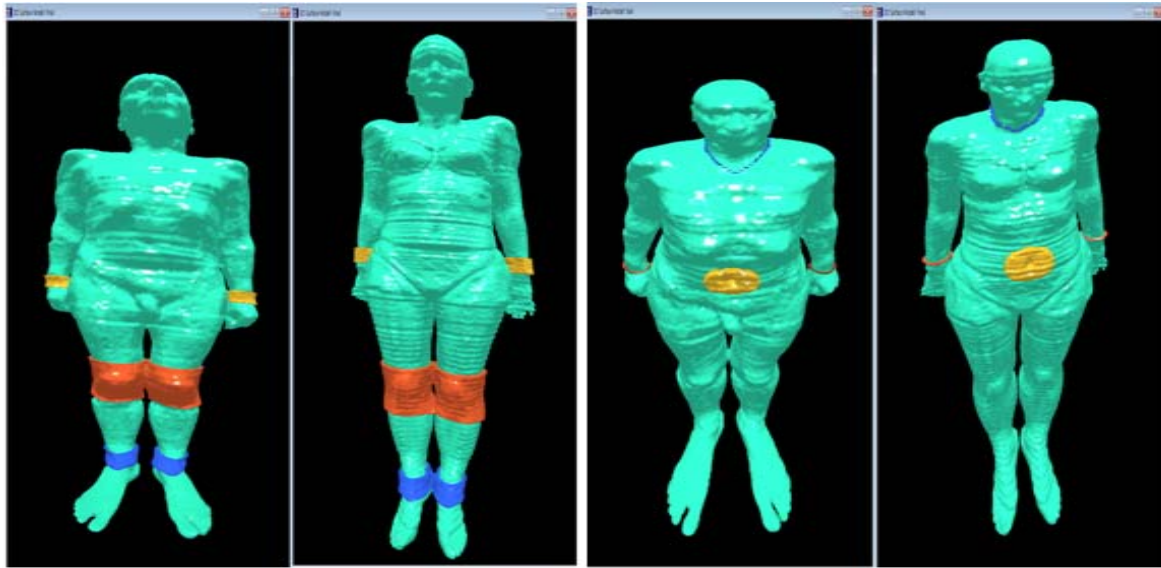


Fig. 5. Geometric-modeling of bracelet, necklace, belt, moxa stone to ICRP 110 reference phantoms.

남성, 성인여성)에 해당 제품을 직접 모사하는 방법으로 3차원 기하학적 모델링을 수행하였다. 물질정보가 없는 상태로 화학적 조성과 밀도는 고려하지 않았으며 가공제품에 균질하게 선원이 분포되어 있음을 가정하였다.

ICRP adult reference computational phantoms은 CT 영상을 바탕으로 제작되었으며, 남성은 222 개, 여성은 348 개의 분할면들로 구성되어 있다. 이러한 팬텀의 분할면은 2차원적 이미지로서 미세한 직육면체인 복셀이 인체의 뼈, 조직, 장기들을 나타낸다. 가공제품을 복셀 팬텀에 직접모사하기 위해, 2차원 이미지 분할면 데이터에 가공제품을 사용하는 위치를 고려하여 x축과 y축별로 복셀을 선택하여 선택된 복셀에 해당 가공제품을 모사하였다(Fig. 3). 가공제품은 완전히 피부에 밀착된 상태로 팬텀의 피부바깥을 둘러싸는 형태로 가정하였다(Fig. 4). 이렇게 가공제품 사용부위별로 복셀에 모사가 완료된 분할면들은 3D imaging, modeling and measurement software, 3D-DOCTOR[11]로 피부와 가까운 조직의 형태로 밀착된 완전한 가공제품으로 Fig. 5와 같이 구현하였다.

2.3 ICRP 103 권고기반 유효선량평가

본 연구에서 일반인의 피폭선량 측정 계산은 ICRP 103 권고기반으로 수행되었다[12]. 구성된 지오메트리 가운데 또는 인체 모의체에 직접 모사하여 밀착한 형태로, ICRP adult reference computational phantoms 남성(176 cm, 73 kg), 여성(163 cm, 60 kg)에 대해 성 평균 유효선량으로 계산하였다. 장기 별 흡수선량을 계산하기 위해 MCNP의 F6 tally 카드를 사용하고 광자와 전자(뚝질기)를 수송하는 경우에 대해 정의하고 주요 장기의 경우 남녀 동일하게 정의하였으며 남성의 경우 고환과 전립선을, 여성의 경우 난소와 자궁을 따로 정의하여 계산하였다. 적색골수(red bone-marrow)와 뼈 표면(bone surface)에 대한 선량 계산은 뼈 부위 및 에너지에 따라 다르므로 ICRP 간행물 116의 값을 계산에 적용하였다[13].

$$D_{skel}(r_T) = \sum_x \frac{m(r_T, x)}{m(r_T)} D(r_T, x)$$

적색골수와 뼈 표면의 경우 부위별 tally 결과 값을 위식을 이용해 합산하였다. 여기서  $r_T$ 는 적색골수 또는 뼈를 의미하고  $x$ 는 뼈 부위를 의미한다. 이 때 부위별 질량( $m(r_T, x)$ )과 총 질량( $m(r_T)$ )은 ICRP 간행물 116을 참고하였다.[13] 잔여조직(remainder) 선량은 부신, 흉외기도,

Table 2. Gamma-ray Energy and Emission of <sup>235</sup>U Series Calculated by DECDATA.

Nuclide		Energy (keV)	Emission (%)
Parent	Daughter		
<sup>235</sup> U	<sup>235</sup> U	143.76	10.96
		185.72	57.2
		205.31	5.01
	<sup>227</sup> Th	235.96	12.9
		256.23	7.0
		329.85	2.94
	<sup>219</sup> Rn	271.23	10.8
		401.81	6.59
	<sup>223</sup> Ra	269.46	13.9
		323.87	3.99
		338.28	2.84
	<sup>211</sup> Pb	404.85	3.78
		832.01	3.52
		223Fr	50.09
	<sup>215</sup> Bi	293.5	35.2
776.9		1.2	
1023.1		0.9	
<sup>211</sup> Bi	1104.5	2.2	
	1294.5	0.9	
	1399.2	1.2	
<sup>211</sup> Bi	351.06	12.88	

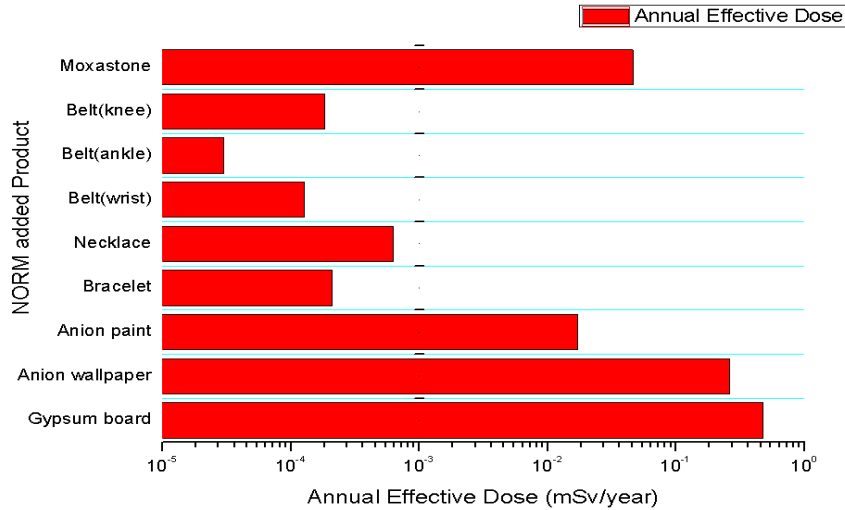


Fig. 6. The result of annual effective dose to voxel phantom by NORM added product.

쓸개, 심장, 신장, 림프절, 근육, 구강점막, 췌장, 전립선, 소장, 비장, 흉선, 자궁·자궁경부의 선량을 산술평균하여 계산하였다.

각 제품군별 구성된 지오메트리(벽, 천장 등)에 선원은 균일분포를 가정하였고 가공제품에 포함된 천연방사성핵종의 농도는 IAEA Safety Standard Series No. RS-G-1.7에 따라 우라늄, 토륨은  $1 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$  포타슘은  $10 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$  로 가정 [14]하였으며 평형상태로 광자, 전자(뚝질기) 방출을 가정하였다. MCNP 계산에 사용된  $^{238}\text{U}$  계열,  $^{232}\text{Th}$  계열,  $^{40}\text{K}$ 에 대한 감마에너지와 방출률은 methods for evaluation of radiation from building materials을[15] 참고하였고  $^{235}\text{U}$  계열 감마에너지와 방출률 (Table 2) 및 각 핵종별 베타스펙트럼은 방출률을 고려하여 ICRP 107 DECDATA를[16] 통해 산출하였다.

MCNP 계산결과를 일반인의 피폭선량평가를 위한 단위인 유효선량계산을 위해, 흡수선량률( $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ )로 변환하고 광자에 의한 피폭임을 고려하여 방사선가중치 (radiation weighting factor,  $W_R$ ) 1로서 등가선량률 ( $\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}$ )을 계산하였다.

남성과 여성 팬텀 각각에 대한 등가선량률 값을 장기별로 산술평균하여 성평균 등가선량을 계산하였다. 성평균 등가선량 계산결과에 ICRP 권고 103 조직가중치 (Table 3, tissue weighting factor,  $W_T$ )를 적용하여 최종적으로 유효선량률을 계산하고 여기에 가공제품 사용시간에 따른 연간 유효선량을 계산하였다.

### 3. 결과 및 논의

#### 3.1 피부 비밀착형 가공제품의 유효선량

본 연구에서 가공제품에 우라늄, 토륨  $1 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ , 포타슘  $10 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$  함유를 가정하여 발생하는 감마선으로 인한 연간 유효선량을 계산하였다. 피부 비밀착형 가공제품 석고보드, 음이온 벽지, 음이온 페인트는 실내  $3 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 2.8 \text{ m}$  크기의 밀폐된 공간에 콘크리트(두께 20

cm, 밀도  $2.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) 위에 해당선원이 균일하게 분포된 형태로 가정하여 연간 실내점유율 89%로 연 사용시간은 7811 시간 사용으로 ICRP 110 기준팬텀을 이용하여 연간 유효선량을 계산하여 Fig. 6으로 나타내었다. 피부에 밀착해 이용하지 않는 가공제품의 내부피폭을 고려하지 않은 가정하의 연간 유효선량은, 석고보드는  $0.47636 \text{ mSv}$ , 음이온 벽지  $0.25971 \text{ mSv}$ , 음이온 페인트  $0.01701 \text{ mSv}$ 으로 제품별 사용량에 따라 차이가 있었다. 유엔과학위원회의 public exposure 보고[1]에 따르면, 하루 80%의 실내점유율을 가정하여, 실내  $0.41 \text{ mSv}$ , 실외  $0.07 \text{ mSv}$ 으로 연간 유효선량은  $0.48 \text{ mSv}$ 이며 대부분 세계 국가에서 연간 유효선량은  $0.3 \sim 0.6 \text{ mSv}$  수준으로 보고[1] 하였는데 이는 본 연구결과를 만족하는 비슷한 수준이다.

#### 3.2 피부 밀착형 가공제품의 선량평가

본 연구에서 물질정보를 알 수 없는 가공제품의 전자로 인한 체동복사선의 영향을 파악하기 위해 뚝질기를 토르말린 Chromdravite의 화학적 조성  $\text{Na}(\text{Mg}_3)\text{Cr}_6^{3+}(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3(\text{OH})$ 으로 가정하고 핵종별 방출률을 고려하여 합산한 베타스펙트럼을 이용하여 연간유효선량을 계산하였다. 전자에 의한 각 핵종별 선량을 평가한

Table 3. Tissue Weighting Factors of ICRP 103.

Tissues	Weighting factors ( $W_T$ )	Sum
Bone marrow(red), Colon, Lung, Stomach, Breasts, Remainder	0.12	0.72
Gonads	0.08	0.08
Bladder, Oesophagus, Liver, Thyroid	0.04	0.16
Bone surfaces, Brain, Salivary glands, Skin	0.01	0.04
Total		1.0

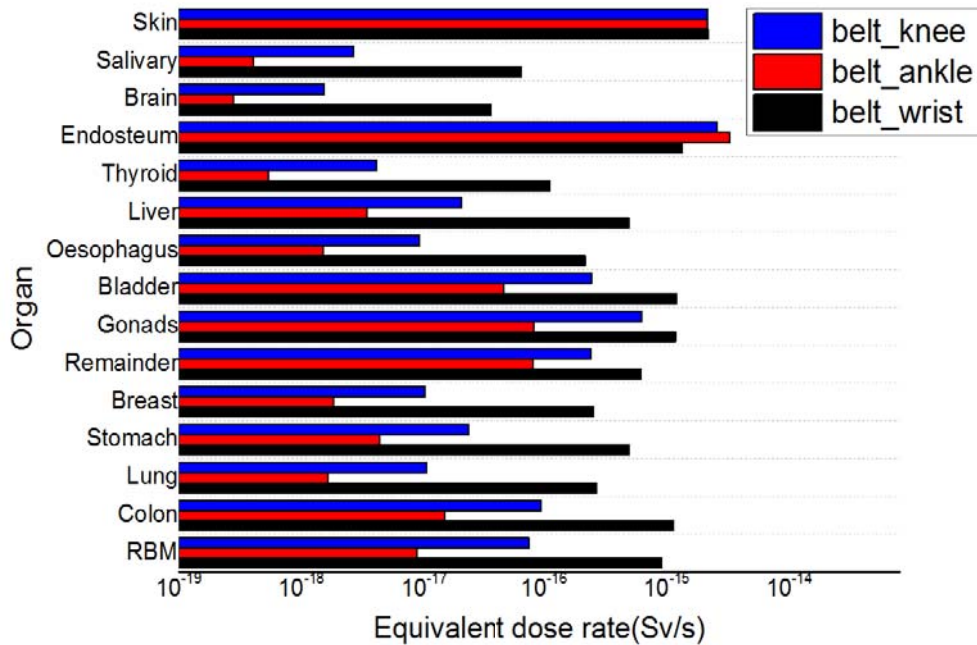
Remainder: adrenals, extrathoracic tissue, gall bladder, heart wall, kidneys, lymph nodes, muscle, oral mucosa, pancreas, prostate, small intestine, spleen, thymus, uterus/cervix

**Table 4.** Comparison of Effective Dose per Year Contributed by Photon and Electron from Moxa Stone.

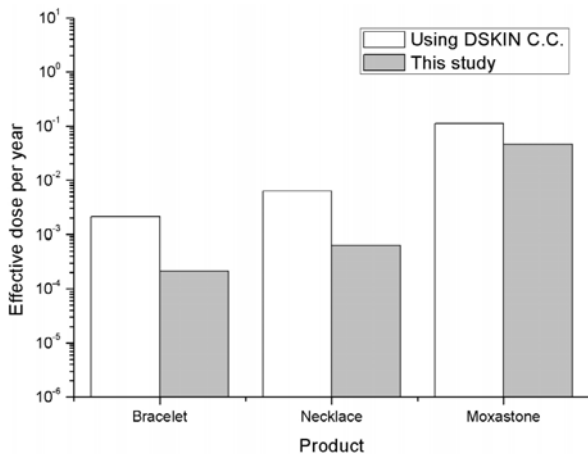
Nuclide	Photon (mSv · y <sup>-1</sup> )	Electron (mSv · y <sup>-1</sup> )
<sup>238</sup> U	0.013548	0.000164
<sup>235</sup> U	0.003894	0.000068
<sup>232</sup> Th	0.016278	0.000056
<sup>40</sup> K	0.0123	0.00016
Total	0.04602	0.000448

결과, 땀질기의 연간 유효선량에 대한 전자의 기여량은 광자에 비해 약 1% 수준(Table 4)으로 작았다. 따라서 나머지 가공제품에 대해서는 광자만을 고려하여 발생되는 감마선으로 인한 연간 유효선량을 계산하였다.

피부에 밀착해 사용하는 가공제품인 팔찌, 목걸이, 벨트류, 땀질기는 ICRP 110 기준편람을 이용하여 보수적으로 피부에 완전히 밀착하여 연 8670시간(1년) 사용을 가정으로 연간 유효선량을 계산하였다. 함유된 천연방사성 핵종의 농도는 마찬가지로 우라늄, 토륨 1 Bq · g<sup>-1</sup>, 포타슘 10 Bq · g<sup>-1</sup> 로 가정하였다. 연간 유효선량은 팔찌 0.00021 mSv, 목걸이 0.00063 mSv, 손목벨트 0.00013 mSv, 발목 벨트 0.00003 mSv, 무릎 벨트 0.00018 mSv, 땀질기 0.04602 mSv (Fig. 6)이다. 땀질기는 사용환경의 기하학적 위치에 따라 조작가중치가 큰 장기인 위, 결장, 잔여조직 등에 가깝고 사용량이 많아서 다른 밀착형 제품과 차이가 발생함을 확인하였다. 본 연구에서 계산된 밀착형 가공제품군의 연간유효선량은 일반인의 연간 선량한도 1 mSv를 초과하지 아니하였다.



**Fig. 7.** Organ equivalent dose rate by belts(knee, ankle, wrist).



**Fig. 8.** Comparison of effective dose per year for bracelet, necklace, moxastone.

본 연구에서 유효선량 계산에 사용된 장기등가선량 값 중, 서로 사용 위치가 다른 가공제품 벨트류의 장기 등가선량률(Fig. 7)로서 기하학적 모델링에 따른 장기별 등가선량의 경향과 인체 전산모의체에 해당 제품을 정확하게 모사함의 의의를 확인 할 수 있었다. 가공제품 벨트류는 서로 제품크기와 형태가 유사하며 무게(weight)는 무릎 > 발목 > 손목 순으로, 함유된 천연방사성핵종 농도 또한 이와 같다. 반면에, 본 보고서의 계산결과에서 연간 유효선량의 크기는 무릎 > 손목 > 발목 순을 보였다. 이는 장기별 등가선량 차이로 인해 발생하였다. 손목과 무릎에 위치한 벨트는 발목에 위치한 벨트보다 조작가중치가 큰 적색골수, 결장, 폐, 위 등을 비롯하여 거리가 먼 뇌, 갑상선 등 전체적으로 장기등가선량이 높았다. 이는 단순한 수식을 통한 선원으로부터 거리에 따른 유효선량 계산 보다는 해당 가공제품이 기하학적으로 위치

한 특성과 사용환경을 고려하여 복셀팩텀에 가공제품을 직접적으로 모사하여 장기 등가선량을 계산해야 보다 정확한 연간 유효선량을 평가할 수 있음을 의미한다.

본 연구의 팔찌, 목걸이, 땀질기 연간 유효선량결과를 일본 가이드라인의 일반소비재에 대한 계산<sup>[4]</sup> 결과와 비교하였다. 일본 가이드라인의 “피부에 밀착해 이용하는 일반소비재에 의한 유효선량의 계산식”은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Effective Dose} \\ & = DSKIN[mSv/h/Bq] \times C(Bq/g) \times M(g) \times T(h/y) \end{aligned}$$

여기서, DSKIN은 1 Bq당 환산계수로, 토륨  $9.6 \times 10^{-9}$ , 우라늄  $1.3 \times 10^{-8}$ [4]이며, C는 일반소비재중의 방사능 농도( $Bq \cdot g^{-1}$ ), M은 일반소비재 중량(g), T는 일반소비재의 연간 이용시간( $h \cdot y^{-1}$ )이다.

DSKIN 환산계수를 이용해 피부에 밀착하여 사용하는 팔찌, 목걸이, 땀질기에 대해 동일무게와 동일시간 사용에 대해 연간 유효선량을 계산한 결과 2배 이상 큰 차이가 나타났다(Fig. 8). 이는 일본 가이드라인에서, 일반소비재에 의한 피폭선량 계산은 기존 EC, Radiation Protection 65 [17]을 통해 도출된 우라늄, 토륨 1 Bq 당 선량환산계수를 적용하였으며 이로 인해 전체 유효선량 차이가 발생한 것으로 판단된다. 특히 팔찌, 목걸이와 같이 중량이 작은 제품일수록 큰 차이가 발생해, 인체에 대한 피폭선량평가 시 보수적으로 평가된 선량환산계수를 적용하는 것에서 인체 모의체를 통해 장기별 등가선량을 계산해 유효선량을 평가하는 체계를 적용하는 것이 보다 의미 있는 것으로 확인 되었으며 지속적인 연구개발을 통해 핵종별 환산계수 구축이 필요한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

ICRP 103 권고를 적용하여 피부 비밀착형, 밀착형 가공제품에 대해 ICRP 110 기준팩텀을 이용한 연간 유효선량을 계산하였다. 평가 결과, 밀착형 가공제품은 비밀착형 가공제품 보다 보수적인 사용시간(1년)임에도 사용량과 무게(Table 1)가 적어 가공제품에 함유된 방사능량 또한 적어져, 연간 유효선량은 0.047 mSv 이하 수준이었다. 또한 동일 제품군별 장기등가선량률 차이를 확인하여 인체 전산모의체에 직접 가공제품을 모사하는 것의 의미를 확인하였다. 피부 비밀착형 가공제품 중 석고보드의 연간 유효선량은 0.476 mSv로 평가되었다. 이는 밀착형 제품보다 적은 사용시간과 거리가 있는 피폭환경(Fig. 2)임에도 사용환경에 따라 전체적인 사용제품의 사용량이 많을 때 함유된 방사능량이 커져 피폭선량에 영향을 끼친다는 점을 확인하였다. 추후 본 연구의 과정과 결과를 집목하여 다양한 가공제품에 대한 천연방사성핵종으로 인한 피폭을 고려한 종합적인 연간 유효선량평가

에 활용 할 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 원자력안전위원회의 2014년도 생활주변방사선안전관리사업 “2014년도 생활주변방사선 실태조사” 사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation. Vol. I, UNSCEAR 2008, 2008.
2. EC. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. Radiation Protection 112, 1999.
3. STUK. Radiation dose assessments for materials with elevated natural radioactivity. STUK-B-STO 32, 1995.
4. MEXT. Guideline for ensuring safety of raw materials and products containing uranium or thorium, 2009.
5. Yoo DH, Lee HC, Shin WG, Choi HJ, Min CH. Characteristic evaluation of exposed dose with NORM added consumer product based on ICRP reference phantom. J Radiat Prot. 2014;39(4): 159-167.
6. Ministry of Environment. Development and application of korean exposure factors. 091-042-037, 2007.
7. ICRP. Adult reference computational phantoms. ICRP Publication 110, 2007.
8. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. Korea housing survey. 11-16110000-000436-01, 2012.
9. Korea Land Housing Corporation. Guideline of housing architectural design. 2010-17, 2010.
10. U.S. Homeland Security. Compendium of material composition data for radiation transport modeling. revision 1. PNNL-15870, 2011.
11. Able Software corporation. 3D-doctor user's manual, 3D imaging, modeling and measurement software. ASC-3DDR-BN#120710, 2012.
12. ICRP. The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection. ICRP Publication 103, 2008.
13. ICRP. Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures. ICRP Publication 116, 2010.
14. IAEA. Application of the concepts of exclusion, exemption and clearance. IAEA RS-G-1.7, 2004.
15. Mustonen R. Methods for evaluation of radiation from building materials. Radiat Prot Dosim, 1984; 7(1-4):235-238.
16. ICRP. Nuclear decay data for dosimetric calcula-

tions, ICRP Publication 107, 2007.  
17. EC. Principles and methods for establishing concentrations and quantities (exemption values) be-

low which reporting is not required in the european directive, Radiation protection 65, 1993.

## Development of the Monte Carlo Simulation Radiation Dose Assessment Procedure for NORM added Consumer Adhere-Non-Adhere Product based on ICRP 103

Ho-Jung Go\*, Siwan Noh†, Jae-Ho Lee†, Yeon-Soo Yeom†, and Jai-Ki Lee†

\*Department of Radiation Protection and Radioactive Waste Safety, Korea Institute of Nuclear Safety

†Department of Nuclear Engineering, Hanyang University

**Abstract** - Radiation exposure to humans can be caused by the gamma rays emitted from natural radioactive elements (such as uranium, thorium and potassium and any of their decay products) of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) or Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials (TENORM) added consumer products. In this study, assume that activity of radioactive elements is  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  1 Bq · g<sup>-1</sup>,  $^{40}\text{K}$  10 Bq · g<sup>-1</sup> and the gamma rays emitted from these natural radioactive elements radioactive equilibrium state. In this study, reflected End-User circumstances and evaluated annual exposure dose for products based on ICRP reference voxel phantoms and ICRP Recommendation 103 using the Monte Carlo Method. The consumer products classified according to the adhere to the skin (bracelet, necklace, belt-wrist, belt-ankle, belt-knee, moxa stone) or not (gypsum board, anion wallpaper, anion paint), and Geometric Modeling was reflected in Republic of Korea "Residential Living Trend-distributions and Design Guidelines For Common Types of Household," was designed the Room model (3 m × 4 m × 2.8 m, a closed room, conservatively) and the ICRP reference phantom's 3D segmentation and modeling. The end-user's usage time assume that "Development and Application of Korean Exposure Factors," or conservatively 24 hours; in case of unknown. In this study, the results of the effective dose were 0.00003 ~ 0.47636 mSv per year and were confirmed the meaning of necessary for geometric modeling to ICRP reference phantoms through the equivalent dose rate of belt products.

**Keywords** : NORM added consumer product, Voxel phantom, Exposure dose evaluation