



pISSN 0253-4231

eISSN 2466-2461

<http://dx.doi.org/10.14407/jrpr.2016.41.1.071>

Journal of Radiation Protection and Research

Technical Paper

Received November 21, 2015 / 1st Revised February 9, 2016 / Accepted March 7, 2016

Development of Simple and Rapid Radioactivity Analysis for Thorium Series in the Products Containing Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM)

Jaeryong Yoo^{*,†}, Seyoung Park^{*}, Seokwon Yoon^{*}, Wi-Ho Ha^{*}, Jaekook Lee^{†,‡}, and Kwang Pyo Kim[†]

^{*}Korea Institute of Radiological & Medical Sciences, [†]Kyung Hee University

[‡]Korea Institute of Nuclear Safety

ABSTRACT

Background: It is necessary to analyze radioactivity of naturally occurring radioactive materials (NORM) in products to ensure radiological safety required by Natural Radiation Safety Management Act. The pretreatments for the existing analysis methods require high technology and time. Such destructive pretreatments including grinding and dissolution of samples make impossible to reuse products. We developed a rapid and simple procedure of radioactivity analysis for thorium series in the products containing NORM.

Materials and Methods: The developed method requires non-destructive or minimized pretreatment. Radioactivity of the product without pretreatment is initially measured using gamma spectroscopy and then the measured radioactivity is adjusted by considering material composition, mass density, and geometrical shape of the product. The radioactivity adjustment can be made using scaling factors, which is derived by radiation transport Monte Carlo simulation. Necklace, bracelet, male health care product, and tile for health mat were selected as representative products for this study. The products are commonly used by the public and directly contacted with human body and thus resulting in high radiation exposure to the user.

Results and Discussion: The scaling factors were derived using MCNPX code and the values ranged from 0.31 to 0.47. If radioactivity of the products is measured without pretreatment, the thorium series may be overestimated by up to 2.8 times. If scaling factors are applied, the difference in radioactivity estimates are reduced to 3-24%.

Conclusion : The developed procedure in this study can be used for other products with various materials and shapes and thus ensuring radiological safety.

Correspondence to Kwang Pyo Kim
kpkim@khu.ac.kr

Keywords: Naturally occurring radioactive material (NORM), Processed product, Thorium series, Radioactivity analysis, Gamma spectrometry, Monte Carlo simulation

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non- Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

천연방사성물질(NORM)을 함유한 가공제품 내 토륨계열 방사능 평가를 위한 간단/신속 분석법 개발

유재룡^{*†}, 박세영^{*}, 윤석원^{*}, 하위호^{*}, 이재국^{†·‡}, 김광표[†]
^{*}한국원자력의학원, [†]경희대학교, [‡]한국원자력안전기술원

2015년 11월 21일 접수 / 2016년 2월 9일 1차 수정 / 2016년 3월 7일 채택

연구배경: 생활주변방사선 안전관리법에 의한 가공제품의 방사선학적 안전성 평가를 위해서는 가공제품에 함유된 천연방사성핵종의 정량적 평가가 필요하다. 기존 분석법을 위한 파괴적 전처리는 높은 수준의 기술과 많은 시간이 소요되고, 측정 후 가공제품의 재사용을 불가능하게 하는 단점이 있다. 본 연구에서는 가공제품에 함유된 천연방사성핵종인 토륨계열의 방사능을 평가하기 위해 전처리 과정이 생략되거나 최소화된 방법인 간단/신속 분석법을 개발하였다.

재료 및 방법: 개발된 분석법은 감마분광분석 시스템을 이용하여 전처리 없이 가공제품의 방사능을 간단하고 신속하게 측정하고, 시료의 구성물질, 밀도, 기하학적 형태에 대한 보정을 통하여 방사능을 정확하게 평가할 수 있는 방법이다. 상기 요소에 대한 보정을 위해 변환상수 개념을 도입하였으며, 방사선수송 전산모사를 통해 변환상수를 도출하였다. 본 연구의 대상으로는 일반인이 흔하게 사용하고, 인체에 착용하거나 인체 접촉이 많은 가공제품, 즉 일반인에게 상대적으로 높은 피폭방사선량을 초래할 수 있는 대표적인 가공제품이 선정되었다. 본 연구에서 선정된 가공제품은 건강목걸이, 건강팔찌, 남성용 건강보조기구, 매트 형태의 가공제품에 장착된 타일이었다.

결과 및 고찰: 상기 제품에 대한 변환상수를 Monte Carlo N-Particle eXtended (MCNPX)를 이용하여 도출하였으며, 도출된 변환상수는 0.31-0.47의 범위에 분포하였다. 전처리 없이 가공제품 원형을 그대로 측정한 단순 측정 분석법의 경우 가공제품에 함유된 토륨계열의 방사능은 실제보다 약 2.8배까지 과대평가 되었다. 본 연구에서 개발한 간단/신속 분석법을 사용하는 경우에는 전처리를 통한 정밀분석법과 비교하여 그 차이가 3-24% 정도로 크게 줄어들었다.

결론: 본 연구에서 개발한 분석법은 향후 추가적인 가공제품의 재질 및 형태에 대한 변환상수의 개발을 통해 다양한 가공제품의 방사선학적 안정성 평가에 활용될 수 있을 것이다.

중심어 : 천연방사성물질, 가공제품, 토륨계열, 방사능측정, 감마분광분석, 몬테카를로 전산모사

1. 서론

국민의 생활에 광범위하게 유통되고 있는 천연방사성물질(naturally occurring radioactive materials, NORM) 함유물에 대한 국가적 차원의 관리체계인 생활주변방사선 안전관리법이 2012년 시행되었다[각주참조]. 생활주변방사선 안전관리법은 가공제품, 원료물질, 공정부산물에 함유된 천연방사성핵종으로부터 국민의 건강과 환경을 보호하여 삶의 질을 향상시키고 공공의 안전에 이바지함을 목적으로 한다. 가공제품이란 원료물질 또는 공정부산물을 가공하거나 이를 원료로 하여 제조된 제품을 의미한다. 국내 가공제품 안전기준에 의하면 가공제품에서 방출되는 방사선에 의한 일반인의 피폭방사선량은 연간 1 mSv를 초과하지 아니하여야 한다[각주참조].¹⁾²⁾ 따

라서 가공제품의 방사선학적 안전성 평가를 위해서는 가공제품의 사용으로 인한 피폭방사선량 평가가 필요하다. 또한 이러한 피폭방사선량 평가를 위해서는 가공제품에 함유된 천연방사성핵종의 정량적 평가가 필요하다.

천연방사성핵종의 방사능측정법은 일반적으로 알파분광분석기 또는 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS)를 이용한 직접측정법과 천연방사성핵종의 붕괴에 의해 생성되는 딸핵종에서 방출되는 감마선을 측정하여 모핵종의 방사능을 추정하는 간접측정법이 있다[1, 2]. 직접측정법의 경우 시료의 분쇄, 회화, 용해, 순수분리 등과 같은 파괴적 전처리법이 필요하다. 이러한 전처리 과정들은 높은 수준의 기술과 시간이 필요하며 노동집약적이기 때문에, 시험자의 숙련도 등에 의해 측정결과가 달라질 수도 있다[2]. 간접측정법에 사용되는 감마분광분석법은 모든 방사성동위원소에서 방출되는 감마선에 대한 측정 민감도가 높으며, 다량의 시료를 취급하는 경우 스크리

책임저자 : 김광표, kpkim@khu.ac.kr

경기도 용인시 기흥구 서천동 1번지 경희대학교 원자력공학과

1) 생활주변방사선 안전관리법. [시행 2012. 7. 26] [법률 제10908호, 2011. 7. 25, 제정].

2) 생활주변방사선 안전관리에 관한 규정. [시행 2014. 11. 22] [원자력안전위원회 고시 제2014-49호, 2014. 11. 21, 타법개정].

는 목적으로 사용한다[1, 3]. 간접측정법은 직접측정법에 비해 상대적으로 전처리과정이 단순하다는 장점이 있다. 그러나 시료를 측정하기 위해서는 인증표준물질과 동일한 기하학적 형태를 유지해야 하므로 직접측정법과 마찬가지로 시료의 분쇄 또는 용해 등과 같은 파괴적 전처리 과정이 필요하며, 방사능 측정 후 가공제품의 재사용이 불가능하다.

기존 방사능 분석법이 가지고 있는 제한점을 해결하기 위해서는 가공제품을 전처리하지 않고 방사능을 평가할 수 있는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 가공제품에 함유된 천연방사성핵종인 토륨계열의 방사능을 평가하기 위해 전처리 과정이 생략되거나 최소화된 간단/신속 분석법을 개발하였다. 간단/신속 분석법은 감마분광분석 시스템을 이용하여 전처리 없이 가공제품의 방사능을 측정하고, 가공제품의 구성 물질, 밀도, 기하학적 형태에

대한 보정을 통하여 방사능을 간단하고 신속하게 평가할 수 있는 방법이다. 본 연구에서는 이를 위해 변환상수 개념을 정의하였으며, 개발된 간단/신속 분석법의 결과와 감마분광분석을 통한 정밀분석 결과를 비교하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 가공제품 선정

가공제품이란 원료물질 또는 공정부산물을 가공하거나 이를 원료로 하여 제조된 제품을 의미한다[각주참조]. 원료물질은 ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th 와 각각의 붕괴계열 내의 핵종 또는 ^{40}K 등 천연방사성핵종이 포함된 물질로서 ^{40}K 은 $1 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$, 그 밖에 모든 천연방사성핵종은 $0.1 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 의 농도를 초과하고, 연간 취급하는 원료물질에

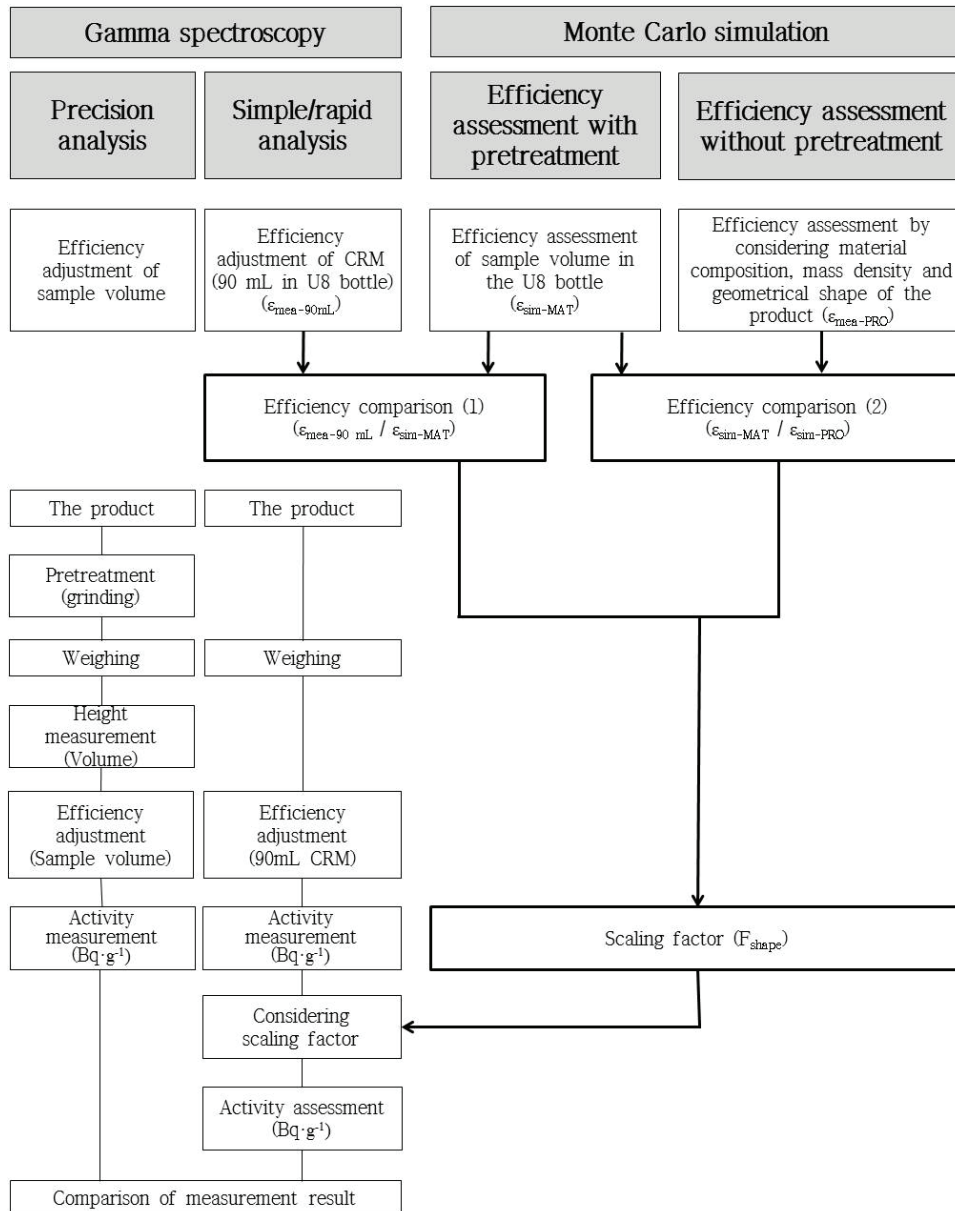


Fig. 1. Procedure of simple and rapid radioactivity measurement method for the product containing NORM developed in this study.

포함된 천연방사성핵종의 방사능량은 100 kBq을 초과하는 것을 의미한다(각주참조). 공정부산물은 원료물질 또는 그 밖의 물질을 취급하는 시설에서 부수적으로 발생하는 물질로서 ^{40}K 은 $5 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$, 그 밖에 모든 천연방사성핵종은 $0.5 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 의 농도를 초과하는 천연방사성핵종이 포함된 물질을 말한다. 천연방사성물질이 함유된 가공제품은 다양한 종류가 있으며, 사용목적에 따라 건강보조 및 신체밀착형 제품, 건축자재 및 산업제품 등으로 구분할 수 있다. 건강보조 및 신체밀착형 제품은 건강목걸이, 건강팔찌, 건강매트 등이 있으며, 건축자재에 포함되는 제품은 타일, 콘크리트 등이 있고, 산업제품에는 용접봉, 베어링 등이 있다. 본 연구에서는 일반인이 흔하게 사용하고, 인체에 착용하거나 인체 접촉이 많은 가공제품, 즉 일반인에게 상대적으로 높은 피폭방사선량을 초래할 수 있는 대표적인 가공제품인 건강목걸이, 건강팔찌, 남성용 건강보조기구, 매트 형태의 가공제품에 장착된 타일을 가공제품 대상으로 선정하였다.

가공제품은 일반적으로 모나자이트, 지르콘, 토르말린 등과 같은 원료물질을 이용하여 제조된다. 이와 같은 광물에는 우라늄계열 및 토륨계열의 방사성핵종의 농도가 상대적으로 높은 것으로 보고되고 있다(4-6). 본 연구에서 선정된 가공제품인 건강목걸이, 건강팔찌, 매트, 건강보조기구 경우에는 음이온을 발생시킬 목적으로 모나자이트가 미량 섞여 있는 경우가 보고되었다.³⁾ 모나자이트는 토륨계열의 방사성핵종의 농도가 우라늄계열보다 10 배 이상 높다(4). 따라서 본 연구에서는 가공제품에 함유된 천연방사성핵종 중 토륨계열의 방사능을 평가 하였다.

2.2 간단/신속 분석법 절차

Fig. 1에 간단/신속 분석법을 위한 변환상수 산출 및 방사능 평가를 위한 절차도를 나타내었다. 간단/신속 분석법은 가공제품에 함유된 방사능을 평가하기 위해 가공제품을 전처리 없이 단순 측정된 결과에 변환상수를 적용하여 방사능을 평가하는 방법이다. 제품을 전처리하지 않고 직접 측정하는 경우 가공제품의 구성성분, 밀도, 기하학적 형태에 대한 고려가 이루어지지 않기 때문에 측정값에 대한 보정이 필요하다. 이러한 보정을 위해 본 연구에서는 몬테카를로 방법론을 이용한 방사선수송 전산모사를 통해 변환상수를 도출하였다. 이와 같은 분석 방법은 가공제품에 대한 전처리가 필요하지 않기 때문에 방사능 측정 절차가 간단하다. 또한 방사선수송 전산모사 기법을 활용하여 방사능 직접측정에 영향을 미치는 요인들을 고려하였기 때문에 정확한 방사능 평가가 가능하다.

3) 파이낸셜 뉴스. 음이온목걸이, 건강매트에서 방사능 검출. Available at: <http://www.fnnews.com/news/201410081252461922>, 2014.
 연합뉴스. 음이온제품, 항공승무원 방사선 안전기준 만든다. Available at: <http://www.yonhapnews.co.kr/culture/2011/04/23/0911000000AKR20110423023900017.HTML>, 2011.
 경향신문. 생활방사선, 어디서나 끊임없이 나온다. Available at: http://news.khan.co.kr/kh_news/khan_art_view.html?artid=201111142140085&code=940701, 2011.

본 연구에서는 가공제품에 함유된 토륨계열 방사능 분석에 필요한 변환상수를 도출하기 위해서 인증표준물질에 대한 측정 효율, 가공제품과 동일한 원료물질에 대한 계산효율, 실제 가공제품에 대한 계산 효율을 이용하였다. 즉 변환상수는 감마분광분석 시스템을 이용한 측정효율과 방사선수송 전산모사 기법을 이용하여 계산한 효율의 비율로 나타낼 수 있다. 특히 몬테카를로 방법론을 이용한 방사선수송 전산모사 기법을 이용하여 가공제품을 구성하는 물질의 측정용기인 U8 용기 내에서의 부피에 따른 효율과 가공제품의 원형을 유지한 상태에서 밀도 및 기하학적 형태를 고려한 측정효율을 각각 계산하고 이를 비교하였다. 이와 같은 방법으로 도출된 변환상수는 전처리하지 않은 가공제품의 단순 방사능측정 결과와 함께 사용되어 가공제품의 방사능을 평가하게 된다.

2.3 방사능 측정

본 연구에서 개발한 간단/신속 분석법은 감마분광분석 시스템을 이용하여 가공제품의 방사능을 측정하였다. 감마분광분석 시스템은 p-type의 HPGe (GC3018, CANBERRA, Meriden, CT) 계측기를 포함하고 있으며, 계측기의 상대효율은 30%(3"×3" NaI(Tl) 기준)이다. 백그라운드에 의한 영향을 최소화하기 위하여 약 10 cm 두께의 합금으로 된 차폐체를 두고 있으며, 감마분광분석 시스템의 반치폭은 1,332 keV의 감마선에 대해 1.8 keV이다. 감마분광분석 시스템의 운영 및 측정결과 분석을 위해 GENIE-2000 (CANBERRA, Meriden, CT) 소프트웨어를 사용하였다.

모나자이트 내 토륨계열의 방사성 핵종은 영구평형 상태에 있다(4). 천연방사성핵종에서 방출되는 감마선의 에너지는 다양하기 때문에 상호간의 중첩에 의해 측정결과에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 토륨계열의 방사능을 평가하기 위해서는 감마선 방출 특성에 대한 평가를 통해 중첩되지 않은 감마선 에너지를 이용하여야 한다. ^{228}Ac 로부터 방출되는 911.1 keV의 감마선은 천연방사성 핵종인 우라늄계열 및 토륨계열에서 방출되는 그 외의 감마선과 중첩되지 않으며 방출률이 25.8%로 감마분광분석 시스템을 이용하여 측정하기 용이하다(7-9). 따라서 본 연구에서는 토륨계열의 방사능을 평가하기 위해 딸핵종인 ^{228}Ac 에서 방출되는 911.1 keV의 감마선을 이용하여 방사능을 측정하였다.

2.4 방사능계측 효율 평가

인증표준물질을 이용하여 감마분광분석 시스템의 계측효율을 평가하였다. 본 연구에서는 인증표준물질 및 감마분광분석 시스템을 이용하여 실측한 계측효율을 인증표준물질 실측효율(ϵ_{mea})로 정의하였다. 감마선에너지에 대한 계측효율을 평가하기 위해 59-1,836 keV 범위의 감마선을 방출하는 인증표준물질(Eckert & Ziegler Analytics Inc, Atlanta, GA)을 이용하였다. 시료의 부피에 따른 계측효율 평가를 위해 90 mL 용량의 U8 용기에 최초 5 mL의 인증표준물질 주입 후 3차 증류수를 추가

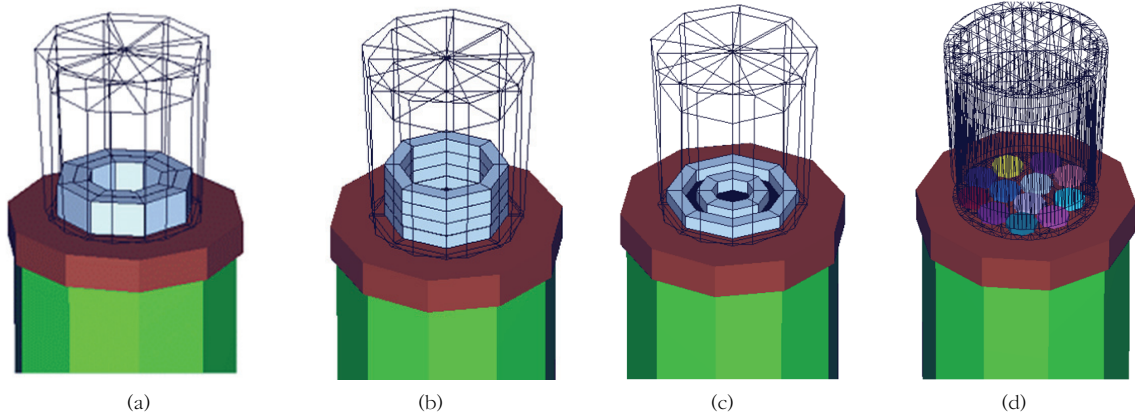


Fig. 2. Monte Carlo simulation of products placed in U8 bottle for radioactivity measurement: (a) high ring-double layer (b) low ring-quadruple layer (c) dual ring (d) mat.

로 주입하여 부피를 10 mL에서 90 mL까지 각 10 mL씩 증가시키면서 효율을 측정하였다.

본 연구에서는 변환상수 도출을 위해 실제 모양의 가공제품 그리고 원료물질이 U8 용기 내에 있는 경우에 대해 계측효율을 방사선수송 전산모사를 통해 계산하였다. 방사선수송 전산모사 기법을 이용하여 계측효율을 평가 할 경우 재현성이 좋을 뿐만 아니라 구성 물질, 밀도, 다양한 기하학적 형태에 대한 모사가 가능하기 때문에 실제 측정에 적용하기 어려운 요소에 대한 효율 계산이 가능하다[10-13]. 그러나 이와 같은 전산모사의 정확성 평가를 위해서는 실제 실험을 통한 검증과정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 인증표준물질을 이용하여 실측한 계측효율과 이를 방사선수송 전산모사를 통해 계산한 계측효율을 비교하였다. 계측효율 계산을 위해서 MCNPX 2.7를 사용하였다[14]. 에너지 구간 0-3 MeV를 8,192개의 등간격으로 설정하여, f8 tally를 이용하였다. f8 tally는 방사선에 의해 측정기에서 생성되는 펄스의 에너지 분포 즉 방사선에 대한 방사선 계측기의 효율을 나타내기 위해 사용되었다. 라이브러리는 ENDF/B-VI Release 8을 사용하였다. 계산을 위해 사용된 초기 입자 수는 10⁹개이었으며, 계산오차는 1% 미만이었다.

방사선수송 전산코드를 이용한 계측효율 계산은 일차적으로 가공제품을 구성하는 원료물질이 측정 시 인증표준물질과 동일한 기하학적 형태를 갖도록 U8 용기 내에 원기둥 형태로 존재한다고 가정하고 실시하였다. 이 경우 계측효율은 인증표준물질 계측효율과 비교하여 원료물질의 구성성분 및 밀도를 보정할 수 있다. 본 연구에서는 이렇게 계산된 계측효율을 원료물질 계측효율($\epsilon_{sim-MAT}$)로 정의하였다.

다음으로 실제 모양의 가공제품에 대한 계측효율을 방사선수송 전산코드를 이용하여 계산하였다. 이 경우 계측효율은 인증표준물질 계측효율과 비교하여 원료물질의 구성성분, 밀도, 기하학적 형태를 보정할 수 있다. 본 연구에서는 이렇게 계산된 계측효율을 가공제품 계측효율($\epsilon_{sim-PRO}$)로 정의하였다. 이에 대한 자세한 내용은 아래 “2.5 변환상수 도출”에 설명하였다. 계측효율 계산을

위해 원형의 가공제품을 U8 용기 내에 넣은 모양을 방사선수송 전산코드를 이용하여 모사 하였다(Fig. 2). 가공제품의 기하학적 형태는 기본적 도형을 이용하여 모델링 하였으며 실제 측정이 가능한 길이, 두께 등을 반영 하였다. 본 연구에서 사용된 가공제품의 구성물질은 합성고무 또는 암석재질이었다. 전산모사를 위해 합성고무 성분은 네오프렌(neoprene) 자료를 이용하였고, 암석재질은 현무암(basalt), 화강암(granite), 석회암(limestone), 사암(sandstone), 이판암(shale)의 평균값 자료를 이용하였다[15]. 토륨계열의 딸핵종인 ²²⁸Ac에서 방출되는 감마선에 대한 효율을 계산하기 위해 Gaussian energy broadening (GEB) 카드 옵션을 사용하였다[14, 16]. 측정기에서의 효율 평가를 위해 f8 tally를 사용하였으며 계산에 사용된 초기 입자 수는 10⁹ 개이며 계산오차는 1% 미만이었다.

2.5 변환상수 도출

간단/신속 분석법에서 일차적으로 인증표준물질의 계측효율을 이용하여 단순 측정된 결과는 가공제품에 대한 물질 구성성분, 밀도, 기하학적 형태에 대한 보정이 필요하다. 본 연구에서는 앞에서 정의한 방사능 계측효율을 이용하여 변환상수를 도출하였다. 가공제품에 함유된 토륨계열의 방사능 분석을 위한 변환상수는 다음과 같다.

$$F_{shape} = \left(\frac{\epsilon_{mea-90mL}}{\epsilon_{sim-MAT}} \right) \times \left(\frac{\epsilon_{sim-MAT}}{\epsilon_{sim-PRO}} \right) = \frac{\epsilon_{mea-90mL}}{\epsilon_{sim-PRO}} \quad (1)$$

여기서 F_{shape}는 변환상수, $\epsilon_{mea-90mL}$ 은 측정용기인 U8 용기 내에 90 mL 부피의 인증표준물질이 있을 때 실측 효율이다. $\epsilon_{sim-MAT}$ 는 가공제품을 구성하는 원료물질이 U8 용기 내에 원기둥 형태로 존재할 때 계측효율이며, $\epsilon_{sim-PRO}$ 는 가공제품 원형에 대한 계측효율이다. 여기서 인증표준물질과 가공제품 원료물질의 계측효율비($\epsilon_{mea-90mL} / \epsilon_{sim-MAT}$)는 가공제품의 구성성분, 밀도 및 부피를 고려한 인자이고, 원료물질 및 가공제품에 대한 효율비($\epsilon_{sim-MAT} / \epsilon_{sim-PRO}$)는 가공제품의 기하학적 형태를 고려한 인자이

다. 따라서 변환상수는 인증표준물질과 원료물질의 계측 효율비($\epsilon_{\text{mea-90mL}}/\epsilon_{\text{sim-MAT}}$)와 원료물질 및 가공제품에 대한 효율비($\epsilon_{\text{sim-MAT}}/\epsilon_{\text{sim-PRO}}$)의 곱으로 나타낼 수 있다.

2.6 방사능 분석법에 따른 평가 결과 비교

감마분광분석법을 이용하여 가공제품의 방사능을 평가하는 경우, 방사능 분석법에 따른 평가 결과를 비교하였다. 여기서 고려한 방사능 분석법은 크게 3가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 가공제품을 전처리하고, 가공제품 원료물질의 실제 부피에 대한 계측효율을 적용하여 방사능을 평가하였다. 가공제품 전처리는 Freezer mill (6770, SPEX SamplePrep, Metuchen, NJ)을 이용한 분쇄방법을 선택하였다. 두 번째는 가공제품을 전처리 없이 원형 그대로 측정하여 방사능을 평가하였다. 세 번째는 전처리 없이 가공제품을 원형 그대로 측정된 결과에 변환상수를 적용하여 방사능을 평가한 단순/신속 분석법을 적용하였다. 전처리하지 않은 상태의 가공제품은 실제 효율교정을 위해 사용된 인증표준물질과 기하학적 형태가 상이하고, 가공제품의 부피에 대한 정보가 없다. 그러므로 이 경우에는 인증표준물질 90 mL를 그 기준으로 설정하여 계측효율을 적용하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 계측효율

Fig. 3에 본 연구에서 실측한 인증표준물질의 부피 및 감마선에너지에 따른 계측효율과 방사선수송 전산모사

를 통해 계산한 계측효율을 나타내었다. 전산모사를 통해 계측 효율을 계산한 결과, 실제 감마분광분석 시스템을 이용하여 측정된 계측효율 결과에 대한 편의(bias)가 거의 0으로 동일한 결과를 나타내었다.

Fig. 4에 방사선수송 전산모사 기법을 이용하여 계산한 가공제품의 형태 및 방출 감마에너지에 따른 측정효율을 나타내었다. 각각의 가공제품은 형태에 따라 효율이 다르게 나타났으며, 측정대상 시료가 계측기와 상대적으로 가까운 거리에 있을 때 측정효율이 높게 나타났다. 원형타일 가공제품의 경우 시료는 측정용기 바닥에 밀착하여 넓게 퍼져 있는 모양이다. 즉 시료가 계측기와 상대적으로 가까운 거리에 분포하고 있기 때문에, 가장 높은 계측효율을 나타내었다. 반면 원형 4단 형태의 가공제품은 5 mm 두께의 가공제품이 20 mm 높이로 적재되어 있는 모양이다. 즉 원형타일 형태의 가공제품에 비해 계측기와 상대적으로 멀리 떨어져 있어, 상대적으로 낮은 계측효율을 나타내었다. 원형 4단 형태 가공제품의 계측 효율은 원형타일에 비해 약 60% 수준이었다.

3.2 변환상수

Fig. 1에 간단/신속 분석법을 이용하기 위한 변환상수를 나타내었다. 변환상수는 가공제품의 구성물질, 밀도, 기하학적 형태를 고려하여 산출되었다. 본 연구에서 산출된 변환상수는 0.31-0.47 범위에 분포하였다. 가공제품에 함유된 토륨계열의 방사능은 전처리 없이 측정된 가공제품의 방사능에 본 연구에서 산출한 변환상수를 곱하여 간단히 평가될 수 있다. 이번 연구에서는 일반인들이 인체에 착용하거나 인체 접촉이 많은 제품, 즉 일반

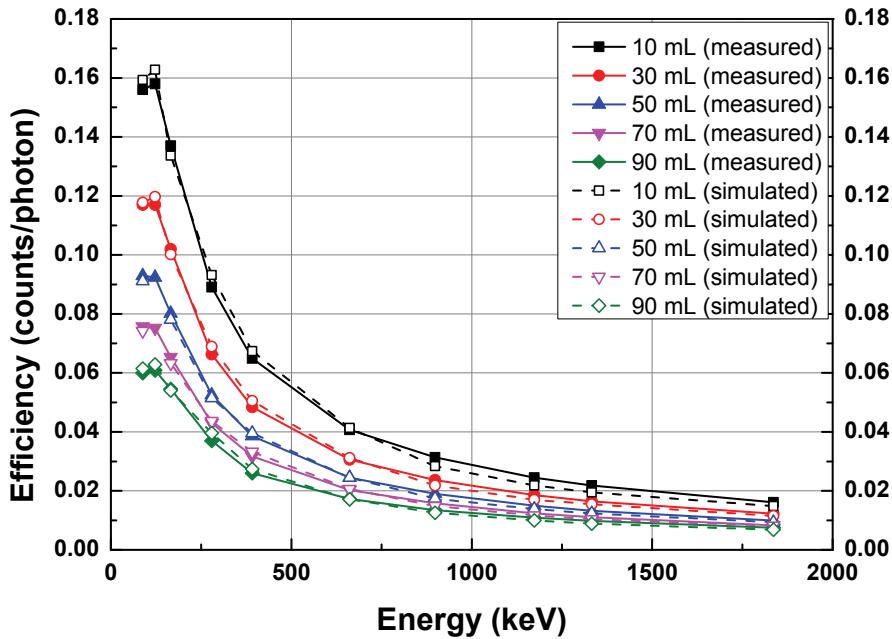


Fig. 3. Measured and simulated detection efficiencies by calibration source volume and gamma radiation energy. Solid figure and straight line stand for measured detection efficiency. A p-type HPGe detector, liquid type calibration source, and a U8 bottle with 90 mL volume were used for the calibration. Vacancy figure and dash line stand for simulated detection efficiency. Monte Carlo simulation method using MCNPX code was used for the detection efficiency calculation.

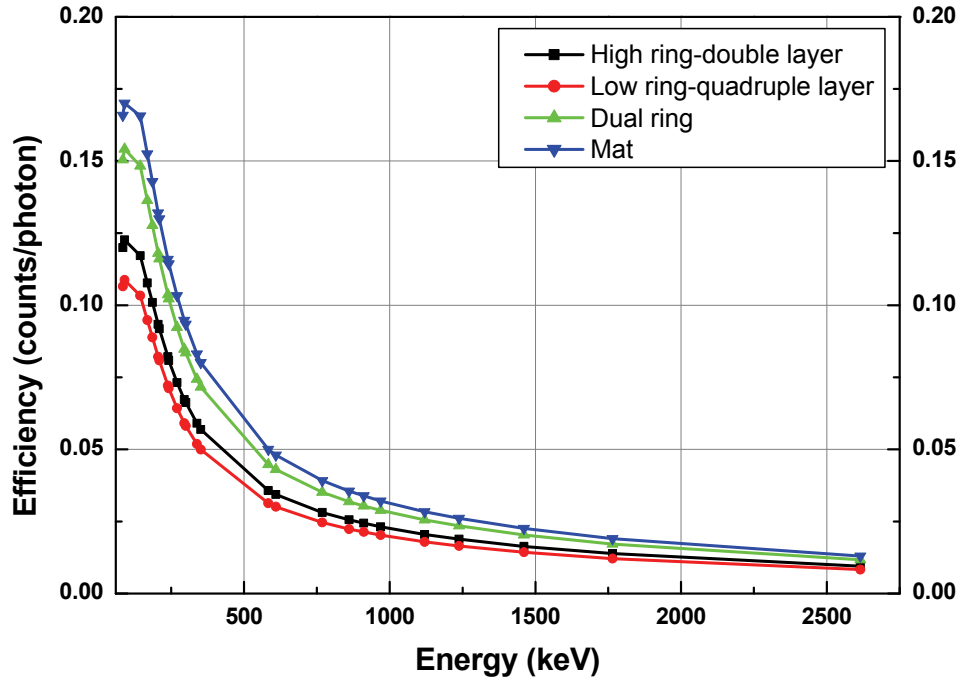


Fig. 4. Simulated detection efficiency of product type. Monte Carlo simulation method using MCNPX code were used for the detection efficiency calculation.

Table 1. Shape Factor for Simple and Rapid Radioactivity Analysis of Thorium Series in the Product Containing NORM. The Shape Factor Derivation by Material Compositions, Densities, and Geometrical Shapes Consideration

The product type	Details of the product	Conversion factor
High ring-double layer	<ul style="list-style-type: none"> Material : synthetic rubber Thickness : 5 mm The product : bracelet 	0.38
Low ring-quadruple layer	<ul style="list-style-type: none"> Material : synthetic rubber Thickness : 5 mm The product : necklace 	0.47
Dual ring	<ul style="list-style-type: none"> Material : synthetic rubber Thickness : 5 mm The product : health promotion for men 	0.32
Mat	<ul style="list-style-type: none"> Material : rock properties Diameter : 11 mm The product : tile on the mat 	0.31

인에게 상대적으로 높은 피폭방사선량을 초래할 수 있는 가공제품에 대해 변환상수를 산출하였다. 하지만 본 연구에서 제안한 방법론 또는 변환상수의 개념은 본 연구에서 대상으로 설정한 제품 외에 다양한 종류의 가공제품에 적용할 수 있을 것이다.

3.3 간단/신속 분석법과 정밀분석법 평가 결과 비교

Fig. 2에 감마분광분석법을 이용하여 가공제품의 방사능을 평가하는 경우, 방사능 분석법에 따른 평가 결과를 나타내었다. 방사능 분석법은 가공제품을 전처리하고 가공제품의 원료물질의 실제 부피를 고려하여 방사능을 평가한 정밀분석법, 가공제품을 원형 그대로 측정하여 방

사능을 평가한 단순 측정 분석법, 본 연구에서 개발한 간단/신속 분석법을 포함한다. 비교를 위해 정밀분석법에 의한 방사능 평가 결과에 대해 단순 측정 분석법 및 간단/신속 분석법의 방사능 평가 결과 비율을 같이 나타내었다. 전처리 없이 감마분광분석법을 적용하는 경우, 원형의 가공제품에 대한 부피와 밀도 등에 대한 정보가 없기 때문에 질량 측정 결과만을 고려하였다. 전처리 없이 가공제품 원형을 그대로 측정한 단순 측정 분석법의 경우 가공제품에 함유된 토륨계열의 방사능은 실제보다 약 2.8배까지 과대평가 되었다. 즉 전처리 하지 않은 가공제품의 방사능 평가를 위해 감마분광분석 시스템만을 이용할 경우 측정결과에 대한 신뢰성을 확보하기 어렵기

Table 2. Comparison of Radioactivity Analysis Results.

The product	Precision analysis after pretreatment* [Bq · g ⁻¹]	Simple measurement (non-pretreatment) [†]		Geometry for conversion factor application	Simple/rapid analysis [‡]	
		activity [Bq · g ⁻¹]	ratio [†]		activity [Bq · g ⁻¹]	ratio
Bracelet	9.52	24.24	(2.6)	High ring-double layer	9.19	(0.97)
Necklace	26.04	45.41	(1.7)	Low ring-quadruple layer	21.32	(0.82)
Health promotion for men	26.78	64.12	(2.4)	Dual ring	20.47	(0.76)
Tile on the mat	1.41	3.95	(2.8)	Mat	1.22	(0.87)

*: Radioactivity of the product was measured using gamma-spectrometry after pretreatment

†: Radioactivity of the product was measured without pretreatment

‡: Comparison of radioactivity with precision analysis result

‡: Radioactivity of the product that applied conversion factor without pretreatment

때문에 측정결과에 영향을 미칠 수 있는 밀도 및 기하학적 형태에 대한 고려가 반드시 필요하다.

또한 가공제품의 형태와 물질은 매우 다양하기 때문에 가공제품의 정확한 모델링을 통한 방사능 평가는 상대적으로 많은 노력과 시간이 필요하다. 따라서 가공제품에 함유된 천연방사성핵종의 스크리닝 목적에는 부합하지 않을 것이라 판단된다. 본 연구에서 개발한 간단/신속 분석법을 위해 산출된 변환상수는 가공제품의 형태를 구성하기 위해 가공제품 중 가장 흔하게 사용되는 일반적인 도형을 이용하였기 때문에, 유사한 형태를 가지는 다수의 가공제품에 적용이 가능하다. 본 연구에서 개발한 간단/신속 분석법을 사용하는 경우 방사능 평가값은 정밀분석법에 비해 76-97% 정도였다. 따라서 원형의 가공제품의 방사능을 평가 하기 위해 간단/신속 분석법을 적용한다면 상대적으로 신속하고 정확한 측정결과를 기대할 수 있을 것이라 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 가공제품에 함유된 천연방사성핵종인 토륨계열의 방사능을 평가하기 위해 전처리 과정이 생략되거나 최소화된 방법인 간단/신속 분석법을 개발하였다. 개발된 분석법은 감마분광분석 시스템을 이용하여 전처리 없이 가공제품의 방사능을 간단하고 신속하게 측정하고, 몬테카를로 방법론을 이용한 방사선수송 전산모사를 통해 시료의 구성물질, 밀도, 기하학적 형태에 대한 보정을 통하여 방사능을 정확하게 평가할 수 있는 방법이다. 즉 가공제품의 물질과 형태가 동일할 경우 본 연구를 통해 산출된 변환상수를 적용하여 가공제품을 전처리 하지 않고 방사능을 간단하고 신속하게 평가할 수 있다.

본 연구에서는 일반인들이 인체에 착용하거나 인체 접촉이 많은 가공제품, 즉 일반인에게 상대적으로 높은 피폭방사선량을 초래할 수 있는 가공제품인 목걸이, 팔찌, 남성용 건강 보조기구, 매트 형태의 가공제품에 장착된 타일에 대해 변환상수를 산출하였으며, 상기 가공제품의 경우 변환상수는 0.31-0.47의 범위에 분포하였다.

전처리 없이 가공제품을 원형 그대로 감마분광분석 시스템을 이용하여 단순 측정할 경우 가공제품에 함유된 토륨계열의 방사능은 실제보다 수 배까지 과대평가 될 수 있으나, 본 연구에서 개발한 간단/신속 분석법을 적용하는 경우에는 그 차이가 3-24% 정도로 크게 줄어 들었다.

본 연구에서 개발한 분석법은 향후 추가적인 가공제품의 재질 및 형태에 대한 변환상수의 개발을 통해 다양한 가공제품의 방사선학적 안정성 평가에 활용될 수 있을 것이다. 더 넓은 관점에서 직접측정과 방사선수송 전산모사를 결합한 형태의 평가방법은 가공제품뿐만 아니라 다양한 종류의 시료 또는 방사성물질에 대해 전처리가 불가능하거나 어려운 상황일 경우에 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 생활주변방사선 안전관리 이행기반기술구축사업의 위탁과제인 "가공제품 사용에 따른 피폭방사선량 평가를 위한 선원항 평가방법 개발(No. 50703-2014)" 사업의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Malling DC, Fiorucci S, Pangilinan M, Chapman JJ, Faham CH, Verbus JR. Dark matter search backgrounds from primordial radionuclide chain disequilibrium. *Astroparticle Physics* 2013;arXiv:1305.5183.
- Guogang J, Jing J. Determination of radium isotopes in environmental samples by gamma spectrometry, liquid scintillation counting and alpha spectrometry: a review of analytical methodology. *J. Environ. Radioact.* 2012;106:98-119.
- Korob RO, Nuno GAB. A simple method for the absolute determination of uranium enrichment by high-resolution γ spectrometry. *Appl. Radiat. Isot.* 2006;64:525-531.
- International Atomic Energy Agency. Extent of environmental contamination by NORM and techno-

- logical option for mitigation, IAEA technical report series No 419, Vienna, Austria, 2003;55-86.
5. International Atomic Energy Agency. Radiation protection and NORM residue management in the zircon and zirconia industries, IAEA safety report series No 51, Vienna, Austria, 2007;23-31.
 6. International Atomic Energy Agency . Radiation protection and NORM residue management in the production of rare earths from thorium counting minerals, IAEA safety reports series No 68, Vienna, Austria, 2011;8-22.
 7. Tzortzis M, Tsertos H, Determination of thorium, uranium and potassium elemental concentrations in surface soils in Cyprus, J. Environ. Radioact. 2004;77:325-338.
 8. Al-Sulaiti H, et al. Determination of the natural radioactivity level in north west of Dukhan, Qatar using high-resolution gamma-ray spectrometry. Appl. Radiat. Isot. 2012;70:1344-1350.
 9. Tsabaris C, Evangelidou N, Fillis-Tsirakis E, Sotiropoulou M, Patiris DL, Florou H, Distribution of natural radioactivity in sediment cores from Amvrakikos gulf (Western GREECE) as a part of IAEA' campaign in the Adriatic and Ionian seas, Radiat. Prot. Dosim. 2012;150(4):474-487.
 10. International Atomic Energy Agency. In direct methods for assessing intakes of radionuclides causing occupational exposure, IAEA safety reports series No 18, Vienna, Austria, 2000;49-55.
 11. Garcia-Talavera M, Laedermann JP, Decombaz M, Daza MJ, Quintana B. Coincidence summing corrections for the natural decay series in gamma-ray spectrometry. J. Radiat. Isot. 2001;54:769-777.
 12. Laborie JM, Petit GL, Abt D, Girard AM. Monte carlo calculation of the efficiency calibration curve and coincidence-summing corrections in low-level gamma ray spectrometry using well-type HPGe detectors, Appl. Radiat. Isot. 2000;53:57-62.
 13. Ozben CS, Emirhan EM. A hybrid method to determine efficiency curve of HPGe detectors, Appl. Radiat. Isot. 2009;67:1110-1113.
 14. Pelowitz DB, MCNPX User's Manual, Version 2.7.0, Los Alamos National Laboratory Report LA-CP-11-00438, Los Alamos, NM, 2011;5,106-5,171.
 15. McConn RJ, Gesh CJ, Pagh RT, Rucker RA, Williams RG. Compendium of material composition data for radiation transport modeling, PIET-43741-TM-963, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, 2011;252-264.
 16. Jin Y, Gardner RP, Verghese K. A semi-empirical model for the gamma-ray response function of germanium detectors based on fundamental interaction mechanisms, Nucl. Instr. and Meth, 1986; A242:416-426.