

# 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 보호복용 방사선 차폐 소재 연구

배만재 \* · 이형민 \*\*†

\* 국방기술품질원

\*\* 한국연구재단

## A Study on Radiation Shielding Materials for Protective Garments using Monte Carlo Simulation

Bae, Manjae \*\*† · Lee, Hyungmin \*\*

\* Defense Agency Technology and Quality

\*\* National Research Foundation of Korea

### ABSTRACT

**Purpose:** Lead has been widely used in radiation shielding for its low price and high workability. Recently in several europe countries, use of lead was banned for environmental issues. Also lead can cause health problems like allergies. Alternative materials for lead are highly required. The purpose of this study was to propose lead free radiation shielding material.

**Methods:** Research of radiation shielding in Korea is not easy for certain limits such as radiation materials, experimental facilities and places. The collected data through the research were simulated using MCNPX. The simulation tools used for this study were utilized Monte Carlo method.

**Results:** we suggest new design of lead free radiation shielding material using MCNPX code comparing shielding performance of new composite materials to lead.

**Conclusion:** This newly introduced nano-scale composite of metal and polymer makes new chance for highly lightened radiation protective garments with enduring shielding performance.

**Key Words:** Protective Garments, Radiation, Monte Carlo Simulation, Shielding Material

● Received 4 August 2015, 1st revised 3 September 2015, accepted 4 September 2015

† Corresponding Author(mjbae@dtq.re.kr)

© 2015, The Korean Society for Quality Management

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 re-production in any medium, provided the original work is properly cited.

# 1. 서론

한 때 먼 외국의 사고사태 등으로만 접해 왔던 방사선의 위협은 북핵문제와 후쿠시마 원전 사고 등으로 인하여 어느새 우리 실생활에도 큰 영향을 미칠 수 있는 민감한 문제로 떠오르고 있다. 또한 그로 인해 방사선으로부터 인체를 보호해 줄 수 있는 다양한 보호 시설, 장비 등에 많은 관심이 쏟아지고 있다.

우선 방사선이란 “고 에너지의 불안한 상태에 있는 원자 또는 원자핵이 안정된 상태를 찾기 위해 방출하는 에너지의 흐름”으로 정의할 수 있으며 넓은 범위에서 정의하면 적외선, 자외선, 마이크로파, 라디오파 등 우리가 일상에서 접하고 있는 다양한 형태의 전자기파들이 이에 속하고 있다. 하지만 일반적으로 사용되는 좁은 범위에서의 방사선은 전리 방사선인 알파( $\alpha$ )선, 베타( $\beta$ )선, 감마( $\gamma$ )선과 전자기파인 X선, 입자선인 중성자선, 양성자선 등으로 정의되며 그 중에서도 대표적인 것은 알파선, 베타선, 감마선이다. 알파선에서 감마선으로 갈수록 파장이 짧아지면서 투과력이 커지기 때문에 방호하기가 어려워진다. 일반적으로 알파선은 공기 중에서도 수cm밖에 이동하지 못할 정도로 쉽게 차폐되고, 베타선은 0.1cm 두께의 알루미늄 막으로 막아낼 수 있지만, 감마선은 수cm의 납판을 투과할 정도로 강력하기 때문에 매우 위험한 것으로 알려져 있다. 만약 방사선에 인체가 노출될 경우, 직접적인 장치의 손상 뿐 아니라 암이나 유전병과 같은 심각한 후유증에 시달리게 된다.

이러한 방사선을 막기 위해 원자로나 연구시설 등의 경우는 밀도가 높은 콘크리트 등을 충분한 두께로 설치하여 방사선을 차폐시키는 것이 일반적이며 이러한 환경 하에 노출되는 개인의 경우에는 원자번호가 큰 납과 같은 금속 차폐재가 내장된 보호복을 착용하는 것이 최선으로 여겨져 왔다(Ngaile, et al 2008). 하지만 이럴 경우 무거운 중량으로 인해 활동성이 크게 떨어질 뿐만 아니라 국제적으로 사용이 기피되고 있는 납을 사용한다는 점에서 이를 대체하기 위한 다양한 연구들이 수행되어 왔다. 납 산화물( $Pb_3O_4$ )를 이용하거나 바륨(Ba), 텅스텐(W) 등 여러 가지 원소를 혼합한 소재의 사용, 납 성분을 고무에 분산시킨 후 압출하여 성형하는 등의 방법들을 통해 경량화가 시도되었지만 이러한 방법들은 제한된 수준의 경량화만이 가능했다(El-Hosiny and El-Faramawy 2000; Elbio et al 2010; Fan et al 2009).

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 구리-폴리에틸렌 나노 복합재를 이용한 새로운 방사선 차폐용 소재를 설계하였다. 실제 방사선 차폐 실험의 수행은 장소, 시설, 장비의 사용이 상당히 제한적이기 때문에 원자력 분야에서 널리 쓰이고 있는 방법인 몬테카를로 시뮬레이션(MCNPX: Monte Carlo Neutron and Photon code version X)을 이용하여 전산모사 형태로 연구를 수행하였다. 이를 통해 기존보다 경량화율을 크게 높이면서도 일정 수준의 차폐 성능을 유지할 수 있는 방사선 보호복 소재의 제작 가능성을 확인하는 것이 본 연구의 목적이다.

## 2. 이론적 배경 및 선행연구

### 2.1 방사선 차폐 설계

방사선 보호 분야에서는 차폐 및 데이터 기술에서 이루어진 발전은 새로운 장을 여는 데에 있어 큰 기여를 하여왔다. 방사선 차폐는 전반적인 분야에서 핵심적인 이슈로 떠오르고 있으며, 방사선 보호를 위한 새로운 방법들이 최적으로 활용될 수 있는지의 설계가 요구되어 진다. 차폐 계산의 속도와 효율은 지난 수십 년간 비약적으로 향상되었다. 예를 들면, 방사선 차폐 및 조사량에 관련된 평가의 정확도와 정밀도가 크게 향상되었고, 차폐 평가를 통해 방사선 보호

및 저비용 설계에 크게 기여할 수 있게 되었다. 차폐 설계는 실제 사용자와 설계자에 대한 충분한 이해를 바탕으로 한 보다 넓은 방사선 보호 분야의 한 부분으로 고려되어야 하며, 설계 반복의 최소화, 총수명 관점에서 대체 설계비용 최적화, 사용상에 있어서 설계 취지의 실현 등이 이에 해당한다. 차폐 설계 개발은 단순히 도구적인 차원이 아니라, 실제 개발과 프로세스를 염두에 두는 보다 깊은 이해가 필요하다(Chmielewski 2004).

## 2.2 방사선차폐 실험장비

방사선 차폐 실험을 수행하기 위해서는 핵과 관련된 사건을 일으킬 수 있는 핵이나 입자선을 제공해 줄 수 있는 장비인 선원과 방출되는 핵이나 입자를 검출하기 위한 검출기, 그리고 검출기에 수집된 정보를 처리하기 위한 정보 처리 장치가 필수적이다.

### 2.2.1 천연방사선원과 가속기

초기 핵물리학자들은 실험을 위해 방사성 원소에서 천연적으로 나오는  $\alpha$  및  $\beta$  입자를 사용했지만, 이런 무작위 붕괴에서 얻을 수 있는 에너지는 몇 MeV 정도로 제한되어있다. 요즘은 넓은 에너지 영역에서 정밀하게 제어된 전자와 양성자 그리고 무거운 이온등과 같은 입자 빔을 만들 수 있는 가속기가 필요하다.

이 가속기에서 얻은 빔은 주로 세 가지로 사용된다. 첫째, 고에너지의 핵이나 입자들을 표적에 충돌시켜 새로운 핵이나 입자를 만드는데 사용할 수 있고, 이것은 전자와 양전자의 충돌로 광자를 만드는 것과 같다. 둘째, 고에너지 입자의 드브로이 파장은 짧기 때문에 이 입자로 작은 크기의 다른 핵이나 입자의 내부 구조를 탐지할 수 있다. 이것은 전자현미경이 광학현미경보다 분해능이 높다는 것과 같다. 셋째, 과학적 연구나 의학적 활용을 위해 핵반응에 필요한 핵이나 입자를 제공하는데 사용되고 있다.

### 2.2.2 검출기

방사선 차폐에 대한 평가는 방사선 동위원소의 위험성으로 활용에 제한을 받는다. 해외저널에 보고된 일반적인 차폐시험 장치는 Figure 1과 같다. 방사선 동위원소를 감마선 발생원으로 사용하면, 차폐물질을 이용한 벽을 설치한다. 요구한 방향성을 위하여 collimator를 사용하며, 시료 뒤에 탐지기를 설치한다(Siqi Xu 2010).

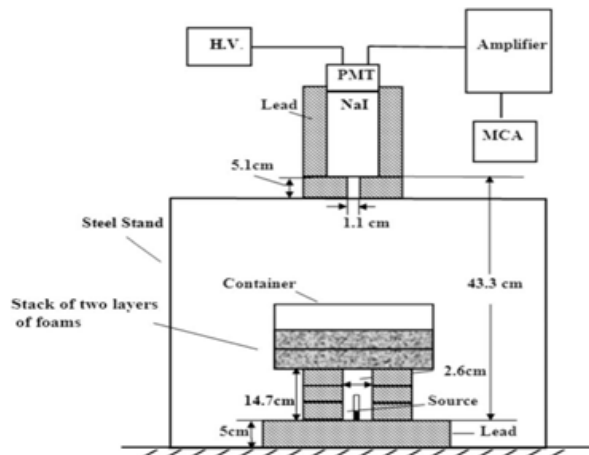


Figure 1. Schematic of the test set up

## 2.3 선행연구

중성자, 베타( $\beta$ ), 감마( $\gamma$ )선 등의 방사선에 노출될 경우, 인체에 큰 손상을 초래하여 암이나 유전병과 같이 생명을 위협하는 병을 유발할 수 있음은 이미 주지된 사실이다. 부득이한 상황이 발생하거나 업무상 방사선과 접촉하게 될 경우와 핵무기 테러 발생시에는 방사선에 대한 피폭은 최대한 제한적으로 이루어져야 한다(Takada 2005). 이를 위해서는 방사선 차폐재의 역할이 매우 중요한데 원자번호와 같은 시설의 경우는 밀도가 높은 콘크리트 등을 충분한 두께로 설치하여 방사선을 차폐하고 있지만 개인용 방호복의 경우 원자번호가 큰 납과 같은 차폐재를 활용하는 것이 일반적이었으며(Akkurt 2010), 미국 NIST(National Institute of Standard and Technology)에서는 원자번호별 방사선 차폐성능을 감쇄계수를 기준으로 홈페이지에 게시하였다.

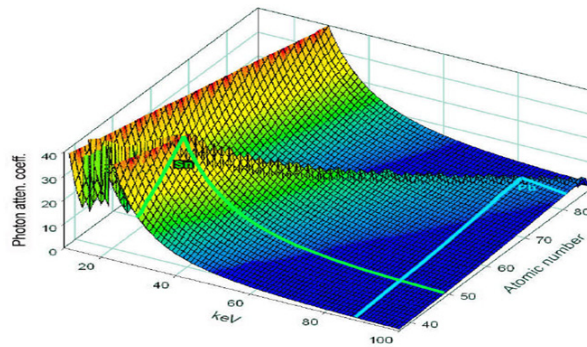


Figure 2. linear attenuation coefficients

개인용 방사선 방호복에 납을 활용할 경우 무거운 중량과 낮은 가공성으로 인해 제작에서부터 사용자의 착용 및 활동성에 이르기까지 수많은 문제점들을 내포하고 있다(McCaffrey 2007). 또한, 방사선 차폐물질로 사용되고 있는 납은 적절한 가격과 작업성으로 인해 많이 사용되어 왔으나, 최근 환경문제로 일부 유럽국가에서는 사용이 제한되고 있으며, 인체에 대한 알레르기 발생 등이 알려지면서 대체물질에 대한 연구가 필요한 현실이다(Kun et al 2009).

이를 해결하기 위해 다양한 방법들이 시도되었다. 납 산화물( $Pb_3O_4$ )을 이용한 방호복의 경우는 소폭의 물리적 경량화가 가능하지만 이미 한계에 도달하였고, Ba,  $SiO_2$ , W, Bi 등의 여러 가지 원소를 혼합한 방호복은 성능을 유지하면서 경량화를 예측할 수 있지만 결국 금속 원소를 사용하였기 때문에 마찬가지로 경량화에 제한이 있었다.(Akkurt et al 2010; Singh et al 2008; Kaewkhao and Limsuwan 2010) 납 성분을 고무에 분산시킨 후 압출하여 성형한 시트상의 가운은 방사선 차폐에는 효과적이거나 10kg에 달하는 무게로 인해 활동에 있어 여전히 제약이 컸다. 이를 해결하기 위해 최근에는 다양한 복합재들이 경량화, 가공성, 활동성 등의 다양한 장점들을 앞세워 차세대 방사선 방호복용 차폐재료의 활용을 위해 연구되고 있다(John and Andrew 2005).

방사선 관련 연구는 방사선 동위원소 및 시험장소의 제한으로 국내에서는 기초연구 단계 수준이다. 해외 선진국가 등은 몬테카를로 방법을 이용한 방사선 입자의 시뮬레이션을 많이 이용하고 있다(Nasser et al 2006; Kirk 2010). 이 시뮬레이션은 프로그램화 되어 제한적으로 공개되고 있으며, 이번 연구를 위하여 미국의 핵관련 연구기관인 LANL(Los Alamos National Laboratory)에서 배포된 프로그램을 사용하였다. 이를 활용해 다양한 방사선 차폐 소재들을 설계 후 각각의 차폐 성능을 납과 비교 평가하여 납대체 방사선 차폐소재를 제시하고자 한다.

최근의 연구는 금속광물, 고무제품, 시멘트, 투명제품, 중금속 등을 이용한 방사선 차폐재의 개발이 진행되었으며,

최근에는 환경문제를 고려한 재생섬유와 환경폐기물을 이용한 저렴한 가격의 차폐재 연구가 진행되고 있다(Elbio et al 2011; El-Sayed et al 2003; turgay et al 2011).

### 3. 실험설계

#### 3.1 시뮬레이션 코드

본 연구에서 사용된 프로그램은 몬테카를로 시뮬레이션 프로그램으로 LANL(Los Alamos National Laboratory)에서 개발된 MCNPX(Monte Carlo Neutron and Photon code version X)이다. MCNPX는 Boltzman-Fokker-Plank algorithm을 이용하여 광자(Photon)와 중성자(Neutron) 및 전자(Electron)의 수송현상을 모사하는 일반적인 Monte Carlo code로 각종 원자력 관련 시설 및 장비의 사전 설계 검토에 반영되는 등 높은 신뢰를 받고 있으며, Monte Carlo Method 등 컴퓨터를 사용하는 방법이 신뢰성평가 등에 사용되고 있다(Kirk 2010; Lee 1982; Lee 1994; Kahng 1996). 국내에서는 방사선 검출기의 구조 설계 등의 분야에 많이 활용되고 있으며 일부 영역에서는 방사선 차폐용 소재의 설계 및 검증에도 사용하고 있다.

#### 3.2 방사선원선택

방사선의 방호효과를 확인하기 위해서 Table 1과 같이 저에너지 영역의 감마선 3종을 시험대상으로 선정하였다. 실질적으로 1 MeV 이상의 Energy Level을 지니는 고에너지 감마선은 납과 같은 금속 박막으로는 차폐가 어렵기 때문에 보호복 수준의 방호재로는 실험의 의미가 없으므로 본 실험 대상에서 제외하였다.

Table 1. Radiation source and Energy Level

Radiation source	Energy Level (MeV)
<sup>241</sup> Am	0.06
<sup>57</sup> Co	0.122
<sup>137</sup> Cs	0.66

#### 3.3 복합재 설계

본 연구에서 설계한 금속-고분자 복합재는 구조는 활성탄(Activated Carbon)으로, 성분은 구리(Copper)와 폴리에틸렌(Polyethylene)으로 구성되어 있다. 활성탄은 천연 또는 합성유기물질을 탄화 및 활성화시켜 만든 다공성 탄소물질로 질량 대비 매우 넓은 표면적을 갖고 있으며(수백  $m^2/g$ ) Figure 3과 같이 매우 작은 미세기공(수~수백 nm(nanometer)이 잘 발달된 것이 특징이다.

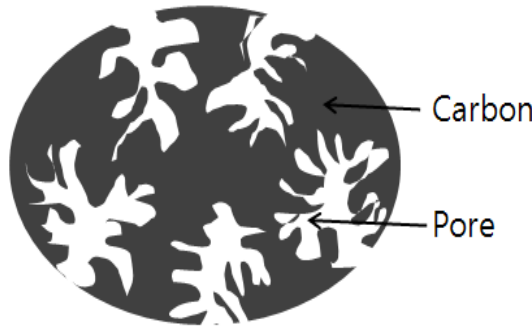


Figure 3. Activated carbon's microporous structure

본 실험에서는 이러한 미세기공 구조를 단순화시켜 공간상에 주기적으로 반복되는 단일 층상의 미세기공 배열로서 모사하였다. 또한 구리를 사용한 것은 탄소로 이루어진 활성탄의 경우 감마선에 대해 차폐 효과를 나타내는 것이 불가능하기 때문에 감마선 차폐에 효과적인 금속원소 중 손쉽게 다룰 수 있으면서도 가격경쟁력 및 경량화의 장점과 인체에 무해한 점 등이 고려되었다. 또한, 활성탄의 미세기공에 Figure 4와 같이 금속을 얇게 침착시킬 경우 질량대비 매우 높은 수준의 표면적을 가지는 금속 나노구조를 손쉽게 형성시킬 수 있다. 이를 활용하여 질량을 줄여 경량화를 달성하는 동시에 높은 표면적을 통해 감마선과의 산란 발생 횟수를 증가시켜 차폐성능을 향상시키는 것이 이 연구의 목적이다.

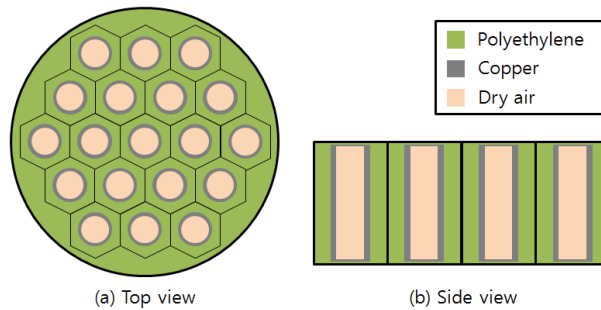


Figure 4. Internal structure of composite  
(a) Top view (b) Side view

미세기공이 수nm 수준일 경우 약간의 차이에도 표면적이 크게 증감하며 그에 따른 물성이 변화하기 때문에 Table 2와 같이 미세기공 수준을 4nm 에서 80nm에 이르기까지 총 5개 종류에 대해 시험을 수행하였다. 이 때 기공의 크기가 변해 기공의 전체 숫자가 줄어도 금속 두께가 이에 비례하여 늘어나 침착된 구리의 전체 질량은 동일하도록 설정하였으며 이를 통해 동일 질량 대비 최고의 차폐 성능을 보일 수 있는 재료의 미세구조를 확인할 수 있다.

Table 2. Types of composites

No	pore diameter (nm)	metal depth (nm)	surface area per mass(m <sup>2</sup> /g)
1	4	2	742
2	6	3	494
3	8	4	371
4	16	8	185
5	80	40	37

### 3.4 측정장치 설계

시뮬레이션 상에서의 시험 장치 구성은 Figure 5와 같다. 이는 가장 일반화된 차폐성능 시험 장치를 단순화하여 구성한 것으로 외부로의 방사선 누출을 차단할 수 있는 두꺼운 납 용기 내부에 지름 10cm 높이 50cm인 원기둥 형태의 빈 공간이 존재하며 그 바닥의 중앙에 방사선원이 위치하고 있다. 방사선원에서 수직으로 50cm 위에 평가대상인 차폐재가 위치하며 그 위에 바로 방사선 검출기가 설치되어 있다. 저에너지 감마선 영역에서는 광전효과와 콤프턴 산란이 주로 일어나는데, 광전효과가 보다 지배적일 것으로 예측하였다.

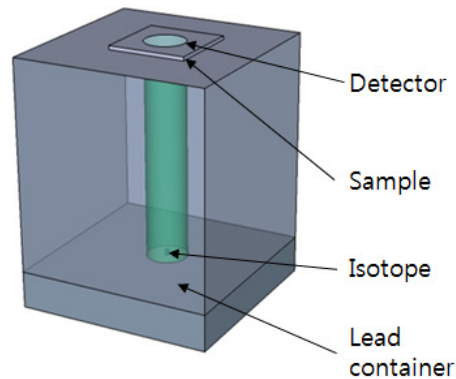


Figure 5. Structure of the experimental system used in the simulation

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 단일조성 차폐재의 차폐 성능 비교

Figure 6은 <sup>241</sup>Am 방사선원에 대한 단일 조성 차폐재들의 투과 에너지 스펙트럼을 나타낸 것이다. 차폐재가 없는 경우인 Figure 4a는 방사선원이 아무 방해도 받지 않고 검출기에 도달하기 때문에 차폐율이 0%이다. 단일 조성 차

폐재로 사용된 납, 구리, 폴리에틸렌의 차폐율(%)은 차폐재가 없는 경우와 대비하여 전체 에너지 스펙트럼 영역에 걸쳐 투과된 에너지의 총합을 투과율(%)로 정의할 때, [100-투과율](%)로 정의될 수 있으며 이는 스펙트럼 곡선 아래 면적의 합을 통해 계산될 수 있다. 이러한 방법으로  $^{241}\text{Am}$  방사선원에 대해 계산된 차폐율은 납의 경우 100%, 구리의 경우 96%, 폴리에틸렌의 경우 2.2%이며, 금속인 납과 구리가 대부분의 방사선을 차폐하는 데 비해 고분자 재료인 폴리에틸렌은 차폐효과가 거의 없는 것으로 나타났다.

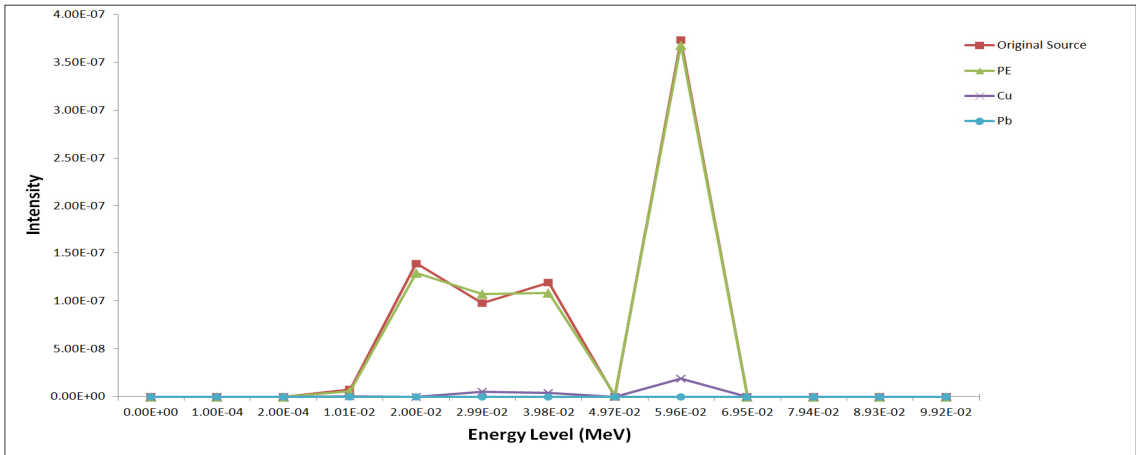


Figure 6. Transmission energy spectrum of shielding material for  $^{241}\text{Am}$  Source

Figure 7과 Figure 8은 각각  $^{57}\text{Co}$ 와  $^{137}\text{Cs}$  방사선원에 대한 단일 조성 차폐재들의 투과 에너지 스펙트럼을 나타낸 것이다. 이들은 앞서 Figure 6에서 분석한  $^{241}\text{Am}$ 보다 높은 에너지를 갖는 방사선원이기 때문에 상대적으로 차폐율이 낮게 나타난다.  $^{241}\text{Am}$ 에 대해 96%의 차폐율을 보였던 구리는  $^{57}\text{Co}$ 에 대해서는 39%의 차폐율을,  $^{137}\text{Cs}$ 에 대해서는 13%의 차폐율을 갖는 것으로 측정되었다. 폴리에틸렌의 경우 세 가지 방사선원 모두에 대해 차폐효과가 5%미만으로 단독 사용 시에는 차폐재로서 기능을 수행하지 못하는 것으로 확인되었다.

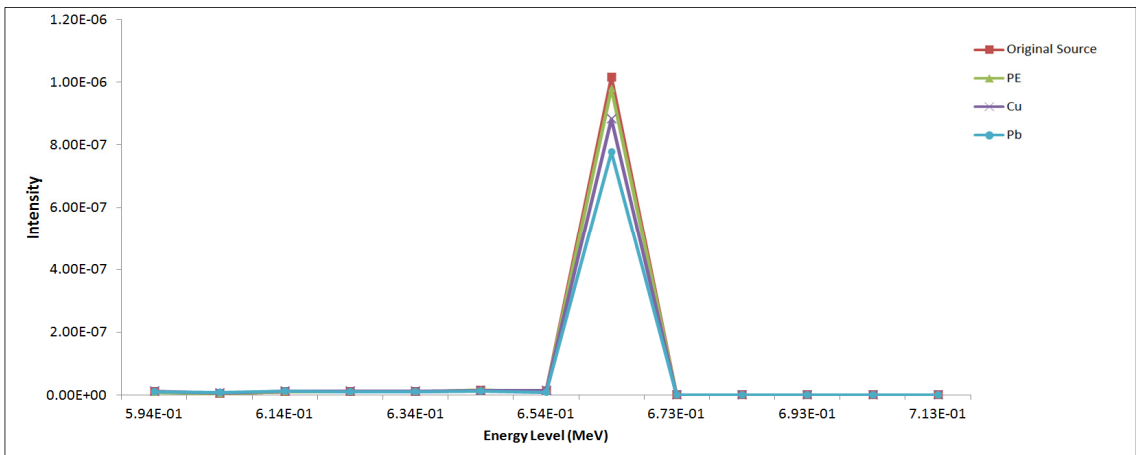


Figure 7. Transmission energy spectrum of shielding material for  $^{57}\text{Co}$  Source



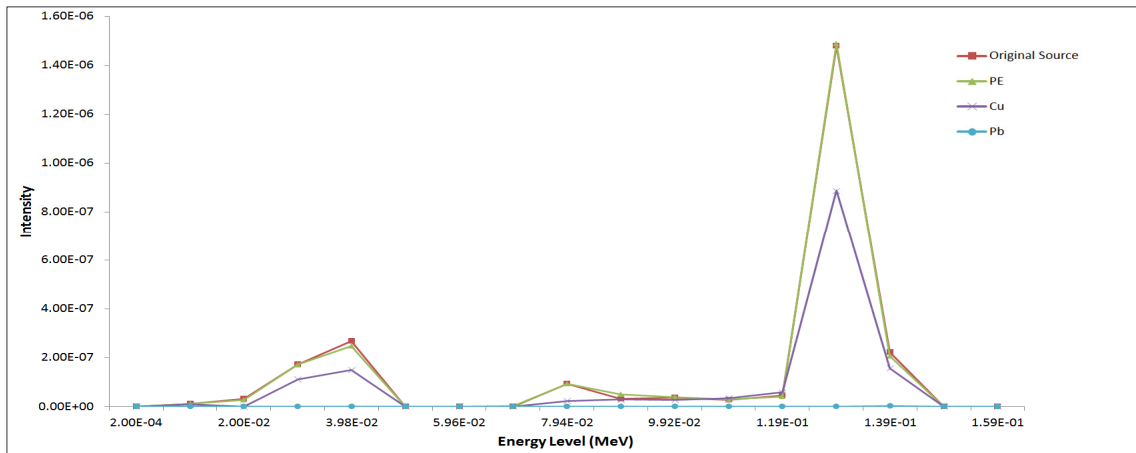


Figure 8. Transmission energy spectrum of shielding material for  $^{137}\text{Cs}$  Source

Table 3는 실험에 사용된 차폐재들의 방사선원에 대한 차폐 성능을 보여준다. 모든 차폐재들의 크기와 형태는 동일하며 구성 원소에 따라 질량이 다르다.

Table 3. Shielding Effectiveness of shielding material

Material	$^{241}\text{Am}$ Shielding rate(%)	$^{57}\text{Co}$ Shielding rate(%)	$^{137}\text{Cs}$ Shielding rate(%)	Mass (g)
Pb	100	99.9	23.6	44.5
Cu	96.2	38.6	13.2	35.1
PE	2.2	0.2	3.4	3.7

단일 조성 차폐재들의 차폐 성능 차이는 각 차폐재들의 원자량 차이에 기인하는 것으로 상대적으로 큰 원자량을 가지는 납이나 구리가 일정 수준의 차폐 성능을 보이는 반면 탄소와 수소와 같이 작은 원자로 구성된 폴리에틸렌은 차폐재로서 기능을 수행하기 어렵다. 하지만 경량화된 차폐복의 제작을 위해서는 폴리에틸렌과 같은 고분자 재료의 활용이 필수적이며 이를 위해 금속-고분자 복합재의 도입이 필요하다.

## 4.2 구리-폴리에틸렌 복합재의 차폐 성능 비교

앞서 ‘실험’에서 기술한 바와 같이, 구리-폴리에틸렌 복합재의 최적 설계를 위하여 Table 3과 같이 균일한 미세기공의 직경이 4~80nm에 이르는 5 종류의 차폐재를 설계하였다. Figure 9는  $^{241}\text{Am}$  방사선원에 대한 구리-폴리에틸렌 복합재들의 투과 에너지 스펙트럼을 나타낸 것이다. 복합재들의 차폐율은 74% 이상으로 측정되었는데, 이들의 구리 함량이 동일 부피 금속 차폐재의 40%에 불과하며 폴리에틸렌의 경우 단독으로 사용 시 차폐효과가 거의 없다는 것을 고려할 때 매우 높은 수치이다. 즉 미세기공 복합재의 차폐 성능은 단순히 두 소재 특성의 선형 결합이 아니며 이는 미세기공으로 인한 단위질량당 표면적의 증가로 인해 방사선이 금속 원소와 산란 횟수가 늘어나 차폐 성능이 향상된 것으로 볼 수 있다.

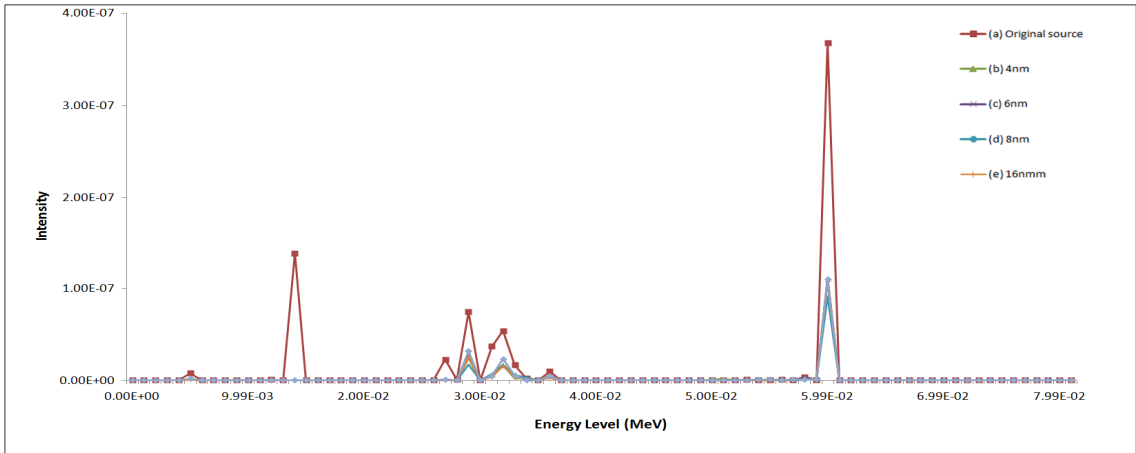


Figure 9. Transmission energy spectrum of copper-polyethylene composite for <sup>241</sup>Am Source

Figure 10과 Figure 11은 각각 <sup>57</sup>Co와 <sup>137</sup>Cs 방사선원에 대한 구리-폴리에틸렌 복합재들의 투과 에너지 스펙트럼을 나타낸 것이다. 앞서 단일 조성 차폐재에서 살펴본 바와 같이 고에너지 영역에서는 구리 뿐 아니라 납의 차폐 성능도 떨어지기 때문에 복합재들의 차폐 성능도 <sup>241</sup>Am에 비해 상대적으로 감소하였다. 하지만 이 경우에도 구리-폴리에틸렌 복합재들은 질량 대비 높은 차폐 성능을 보여준다.

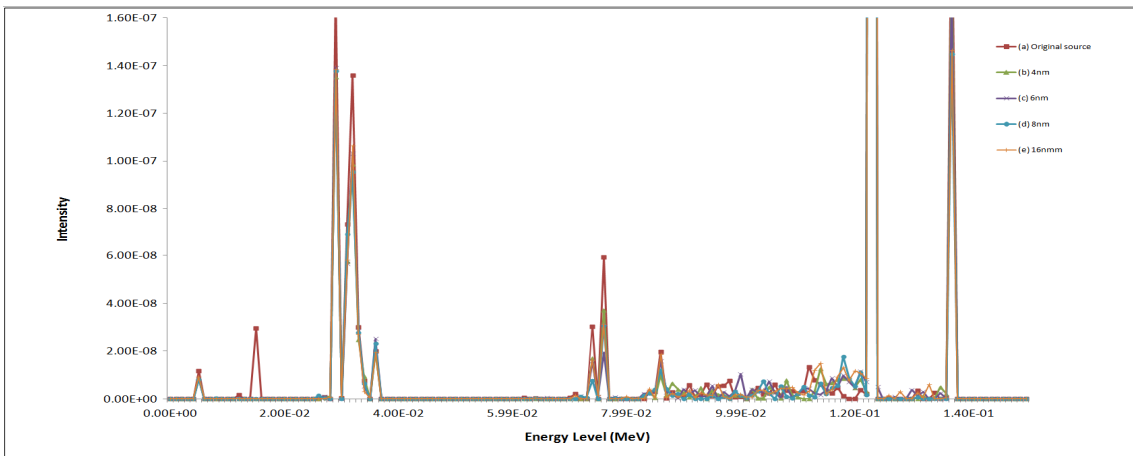


Figure 10. Transmission energy spectrum of copper-polyethylene composite for <sup>57</sup>Co Source

Table 4는 실험에 사용된 차폐재들의 방사선원에 대한 차폐 성능을 보여준다. 미세기공의 크기가 변해도 그에 비례해서 구리 박막의 두께가 변하도록 설계하였기 때문에 복합재들의 질량은 모두 일정한 값을 가진다. 이를 통해 구리 함량 효과를 제외하고 순수한 미세기공 구조에서 나오는 표면적 효과로 인한 차폐 성능을 확인할 수 있다.

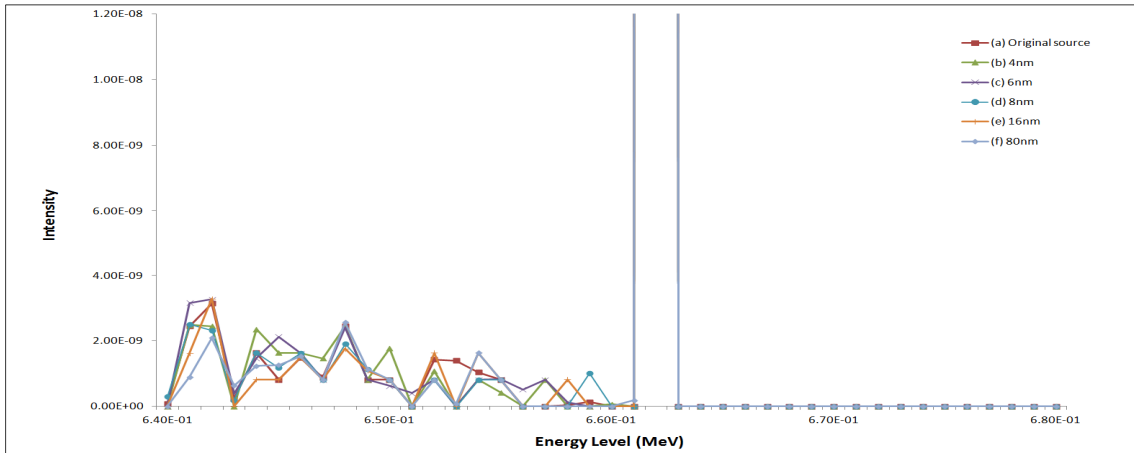


Figure 11. Transmission energy spectrum of copper-polyethylene composite for <sup>137</sup>Cs Source

Table 4. Shielding Effectiveness of metal-polymer composite

Micropore diameter(nm)	<sup>241</sup> Am Shielding rate(%)	<sup>57</sup> Co Shielding rate(%)	<sup>137</sup> Cs Shielding rate(%)	Mass (g)
4	76.7	19.4	6.6	17.1
6	76.1	20.5	8.5	17.1
8	79.6	24.1	8.1	17.1
16	77.6	20.1	6.9	17.1
80	74.6	17.4	7.0	17.1

금속-고분자 복합재들의 질량은 17.1g으로 동일 부피의 납이 44.5g, 구리가 35.1g인 것에 비해 가볍지만 3.7g의 폴리에틸렌 보다 무겁다. 하지만 폴리에틸렌 단독으로는 차폐 성능을 거의 발휘하지 못하는 데 비해 금속-고분자 복합재는 일정 수준의 차폐 성능을 발휘하면서도 높은 경량화 수준을 달성하였다. 이는 미세기공 구조를 활용하여 구현된 높은 수준의 단위질량당 표면적에 기인한 것이며 특히 저에너지 영역인 <sup>241</sup>Am에 대해서는 평균적으로 75% 이상의 높은 차폐 성능을 나타냈다. 고에너지 영역인 <sup>57</sup>Co와 <sup>137</sup>Cs에 대해서는 차폐재로 사용되기에는 부족한 성능을 나타냈지만 <sup>137</sup>Cs의 경우 납도 차폐율이 23%에 불과해 차폐재로 사용되기에 부적합한 것으로 확인되었다.

다양한 크기의 미세기공을 갖는 복합재 중에서 8nm의 직경을 갖는 복합재는 다른 복합재들에 비해 높은 차폐 성능을 나타낸다. 이는 복합재의 차폐성능이 단순히 단위질량당 표면적의 크기에 비례하기보다는 차폐성능을 최대로 발휘하는 최적 설계점이 존재함을 알려준다. 이러한 최적점은 미세기공의 형상과 종횡비에 따라 달라질 수 있기 때문에 향후 실제 차폐 소재의 제작 시 원하는 형태와 크기에 적합한 미세구조를 확인하기 위해서는 그에 적합한 시뮬레이션이 수행되어야 할 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 몬테카를로 시뮬레이션 코드를 이용한 구리-폴리에틸렌 복합재 전산모사를 통해 방사선 차폐 성능을 추정하였다. 실험 결과, 폴리에틸렌과 같은 비금속은 차폐재로서의 특성이 매우 떨어지기 때문에 단독으로 활용되기보다는 구리와 같은 금속재와 복합재의 형태로 구성될 때 보다 효과적인 것으로 확인되었다. 또한, 구리-폴리에틸렌 복합재는 기존의 차폐재로 널리 이용되는 납 대비 38%에 불과한 무게로 높은 수준의 경량화를 달성하면서도 저에너지 영역에서는 납 대비 80% 수준의 차폐 성능을 구현하였으며 이를 통해 새로운 방사선 보호복용 차폐 소재로서의 가능성을 확인하였다. 구리-폴리에틸렌과 같은 복합재의 설계에 있어서 복합재의 내부 구조에 따라 목적에 부합하는 차폐 효과가 다르게 나타난다는 것을 밝혀낼 수 있었다.

특히, 이 복합재는 기존에 다양한 분야에서 사용되는 활성탄의 미세구조에 구리를 침착시킨 형태이기 때문에 향후 실제 소재의 제작이 용이하며 대량 생산의 가능성도 열려 있다고 할 수 있으며, 기존의 무겁고 활동에 불편하며 인체 유해성을 내포한 납 방호복 대신 금속/비금속 복합재를 이용하여 가볍고 활동성이 뛰어나며 납을 포함하지 않은 새로운 개념의 방사선 방호복의 제작 가능성을 확인해 볼 수 있었다.

## REFERENCES

- A. El-Sayed Abdo, M. A. M. Ali, and M. R. Ismail. 2003. "Natural fibre high-density polyethylene and lead oxide composites for radiation shielding." *Radiation Physics and Chemistry* 66:185-195.
- A. G. Chmielewski, M. Haji+Saeid. 2004. "Radiation technologies: past, present and future." *Radiation and Chemistry* 71:16-20.
- B. L. Kirk. 2010. "Overview of Monte Carlo radiation transport codes." *Radiation Measurements*. doi:10.1016/j.radmeas.2010.05.037.
- Byoungki Lee. 1994. "Variation Stack-Up Analysis Using Monte Carlo Simulation for Manufacturing Process Control and Specification." *J Korean Soc Qual Manag* 22(4):79-101.
- ChangHo Lee. 1982. "Estimation of a Cyclic or Acyclic Network System Reliability and MTTF by the Monte-Carlo Simulation Method." *J Korean Soc Qual Manag* 10(2):18-24.
- Elbio Calzada, Florian Gruauer, Burkhard Schillinger and Harald Turck. 2011. "Reusable shielding material for neutron- and gamma-radiation." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. doi:10.1016/j.nima.2010.12.239.
- F. I. El-Hosiny, N. A. El-Faramaway. 2000. "Shielding of gamma radiation by hydrated Portland cement-lead pastes." *Radiation Measurements* 32:93-99.
- G. H. Fan, L. Geng, G. S. Wang and Z. Z. Zheng. 2009. "Anovel radiation protection material: BaPbO3/Al composite." *Materials and Design* 30:862-866.
- I. Akkurt, H. Akyildirim, B. Mavi, S. Kilincarslan and C. Basyigit. 2010. "Radiation shielding of concrete containing zeolite." *Radiation Measurements* 45:827-830.
- I. Akkurt, H. Akyildirim, B. Mavi, S. Kilincarslan and C. Basyigit. 2010. "Gamma-ray shielding properties of concrete including barite at different energies." *Progress in Nuclear Energy* 52:620-623.
- J. E. Ngaile, 2008. "Use of lead shields for radiation protection of superficial organs in patients undergoing head CT examinations." *Radiation Protection Dosmetry* 130:490-498.
- J. Kaewkhao, and P. Limsuwan. 2010. "Mass attenuation coefficients and effective atomic numbers in phosphate glass

- containing Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PbO and BaO at 662 keV." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 619:295-297.
- John Hobson, and Andrew Copper. 2005. "Radiation Protection and Shielding Design-Strengthening the Link." *Radiation Protection Dosimetry* 115(1-4):251-253.
- J. P. McCaffrey, H. Shen, B. Downton and E. Maninegra-Hing. 2007. "Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments." *Med.Phys* 34(2). doi:10.1118/1.2426404.
- Jun Takada. 2005. "Radiation hazard and protection for the nuclear weapon terrorism." *International Congress Series* 1276:245-246.
- K. J. Singh, N. Singh, R. S. Kaundal, and K. Singh. 2008. "Gamma-ray shielding and structural properties of PbO-SiO<sub>2</sub> glasses." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 266:944-948.
- Kun Yue, Wenyun Luo, Xiaoqing Dong, Chuanshan Wang, Guohua Wu, Mawei Jiang, and Yuanzi Zha. 2009. "A New Lead-free Radiation Shielding Material for Radiotherapy." *Radiation Protection Dosimetry* 133(4): 256-260.
- Myung-wook Kahng. 1996. "Computational Methods for Optional Designs in Nonlinear Models using the Simulated Annealing Algorithm." *J Korean Soc Qual Manag* 24(4):59-69.
- Nasser Ahmed, David E. B. Fleming, and Joanne M. O'Meara. 2006. "Monte Carlo simulations of in vivo K-shell X-ray fluorescence bone lead measurement and implications for radiation dosimetry." *Applied Radiation and Isotopes* 64:1036-1042.
- Siqi Xu, Mohamed Bourham, and Afsaneh Rabiei. 2010. "A novel ultra-light structure for radiation shielding." *Materials and Design* 31:2140-2146
- Thrgay Korkut, Hatun Korkut, Abdulhalik Karabulut, and Gokhan Budak. 2011. "A new radiation shielding material: Amethyst ore." *Annals of Nuclear Energy* 38:56-59.

