

# Preliminary Study of Cosmic-ray Shielding Material Design Using Monte-Carlo Radiation Transport Code

Chang-Woo Kang, Yeong-Chan Kim\*

CBRN Defense Research Institute

Received: September 29, 2022. Revised: October 24, 2022. Accepted: October 31, 2022.

## ABSTRACT

The radiation shielding characteristic of neutron shielding material has been studied as the preliminary study in order to design cosmic-ray shielding material. Specially, Soft Magnetic Material, known to be effective in EMP and radiation shielding, has been investigated to check if the material would be applicable to cosmic-ray shielding. In this work, thermal neutron shielding experiment was conducted and the Monte Carlo N-Particle(MCNP) was applied to employ skymap.dat, which is cosmic-ray data embedded in MCNP. As a result, polyethylene, borated polyethylene, and carbon nano tube, containing carbon or hydrogen, have been found to be effective in reduction of neutron flux below 20 MeV (including thermal, epithermal, evaporation). In contrast, the materials composed of iron such as SS316 and Soft Magnetic Material show a good shielding performance in the cascade energy range (above 20 MeV). Since Soft Magnetic Material is consisting of 13% of boron, it can also decrease thermal neutron flux, so it is expected that it would show a significant reduction on the entire range of neutron energy if the Soft Magnetic Material is used with hydrogen and carbon, so called low Z material.

Keywords: Cosmic-ray, Aerospace, Radiation Shielding, Monte-Carlo Modeling

## I. INTRODUCTION

우주방사선(cosmic-rays)은 태양계 외부와 태양에서 생성되는 고에너지 입자를 의미하며 입자들의 기원(origination)에 따라 1차 우주방사선(primary cosmic-rays)이라고도 알려진 우주기원방사선(galactic cosmic-rays)과 태양기원방사선(solar cosmic-rays)으로 구분된다<sup>[1]</sup>. 양성자와 알파입자 등의 고에너지 입자들로 구성된 우주방사선이 지자기(Earth's magnetic field)와 충돌하게 되면 입자들의 이동 방향이 바뀌거나 지구의 자기장에 갇히게(trapped) 된다<sup>[2]</sup>. 충분한 에너지를 보유한 입자들만이 이를 뚫고 지구의 대기권으로 들어올 수 있으며, 충분한 에너지 값은 지구좌표(terrestrial coordinate)별 상이한 지자기적 임계세기(geomagnetic cutoff rigidity)에 따라 결정된다<sup>[3]</sup>. 1차 우주방사선이 지구 대기상의 물질과 반응

하면 중성자, 양성자, 뮤온, 파이온 등 다양한 입자들로 구성된 2차 우주방사선(secondary cosmic-rays)이 생성되고 그 중 핵반응을 일으킬 만큼 충분한 에너지를 보유하고 있는 입자들은 대기상의 다른 원자들과 계속 충돌하여 상당한 양의 입자를 생성하는 캐스케이드 샤워(cascade shower)를 형성하게 한다<sup>[3]</sup>. 1차 및 2차 우주방사선의 고에너지 입자들은 우주 및 항공 고도의 전자부품과 충돌하여 오작동에 영향을 미치기 때문에 고신뢰성을 요구하는 우주, 항공 분야의 장비 및 부품 등에는 방사선 차폐가 고려되어야 한다<sup>[4]</sup>.

우주급 전자부품은 일반 전자부품과 비교했을 때 낮은 고장률을 보장해야 하고 극한의 우주 환경을 고려하여 사용온도 범위, 압력환경, 방사선 등을 견딜 수 있어야 한다. 이를 위해 우주급 전자부품은 불량품 시험(screening test), 품질 시험(qualification test),

\* Corresponding Author: Yeong-Chan Kim E-mail: valentine93@mnd.go.kr  
Address: CBRN Defense Research Institute, 69-37 Shinheungmal-gil, Seocho-gu, Seoul

건전성 시험(quality conformance inspection), 파괴시험(destructive Physical analysis) 등을 비롯하여 내방사선성 시험(radiation verification test)을 거친다<sup>[5]</sup>. 우주급 전자부품의 내방사선성 시험은 방사선의 장기축적효과인 총이온화선량(TID; Total Ionizing Dose)과 단일사건효과(SEE; Single Event Effect) 등을 고려하여 고에너지 양성자빔과 감마선 등의 조사를 통해 수행하고 있다<sup>[6]</sup>. 1차 우주방사선뿐만 아니라 항공고도의 2차 우주방사선도 반도체 등 전자부품의 SEE와 승무원 등 인체 외부피폭을 일으킬 수 있으며, 2차 우주방사선의 주요 구성요소인 중성자는 항공기의 미세 전자장비에서 발생하는 SEE를 일으키는 주요한 원인이라고 알려져 있고<sup>[7,8]</sup>, 해당 고도에서 중성자와 유사한 에너지를 보유하고 있는 양성자도 중성자와 유사하게 SEE를 통한 반도체의 고장을 야기할 수 있다<sup>[9]</sup>.

현재까지 기존 위성 구조물과 전자장비의 하우징은 알루미늄 합금(aluminium alloy)을 주로 사용하고 있으나, 최근 위성의 경량화 요구가 증가하면서 알루미늄을 대체할 수 있는 경량 재료에 대한 관심이 증대<sup>[10]</sup>되고 있으며 반도체가 소형·집적화되며 위성체 등에 미치는 우주방사선의 영향이 커지고 있다<sup>[4]</sup>. Tomasz Blachowicz와 Andrea Ehrmann<sup>[11]</sup>은 수소, 붕소, 질소를 함유한 질화붕소(BN; boron nitride), 탄화붕소(B<sub>4</sub>C; boron carbide), 탄소섬유(carbon fiber) 등이 우주방사선 차폐효과가 있다는 연구결과를 발표한 바 있으며, 최근 미국 항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)에서도 수소를 함유한 BN에 대한 우주방사선 차폐성능 연구를 수행하였다<sup>[11]</sup>. Estanislao Aguayo et al.<sup>[12]</sup>은 철과 납이 특히 양성자 차폐에 효과가 있으며 폴리에틸렌과 붕소폴리에틸렌, 콘크리트 등이 중성자 차폐에 효과가 있다고 하였다. 장태성과 이주훈<sup>[10]</sup>은 위성구조체 방호를 위한 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics) / W(Tungsten) / CFRP 형태의 다물질 다층 차폐물질을 설계하고 우주방사선 차폐효과에 대한 연구를 수행하기도 하였다. 또한, Ju Hyuk Lee et al.<sup>[13]</sup>은 항공고도 2차 우주방사선으로 인한 메모리 반도체의 고장 가능성을 식별하고 알루미늄으로 구성된 항공화물 탑재용기의 보강방법을 제안하였다. 그럼에도 우주방사선의 강

한 에너지에 대한 차폐력과 차폐체의 경량화를 동시에 만족하기 위해서는 추가적인 연구의 필요성이 지속 제기된다.

본 연구는 우주급 전자부품의 방사선 차폐 물질 설계를 위한 선행연구 차원에서 우주방사선에 대한 물질별 방사선 차폐특성을 확인하고 반도체 등 전자장비의 방사선 손상 경감을 위한 차폐방안을 모색하고자 하였다. 이를 위해 한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS)의 열중성자 조사시설에서 차폐 실험을 수행하고 몬테카를로 기법인 Monte Carlo N-Particle(MCNP)을 활용한 시뮬레이션을 통해 반도체의 방사선 손상 메커니즘에 입각한 차폐성능을 분석하였다. 특히, 본 연구에서는 기존 문헌에서 전자기파(EMP; Electromagnetic Pulse Effect) 및 방사선 차폐소재로 제안된 적이 있던 철과 붕소가 함유된 경량 연자성 복합소재<sup>[14]</sup>에 대해 중성자 차폐성능을 실험으로 증명하였고 해당 물질을 활용한 우주방사선 차폐체 설계 가능성을 시뮬레이션으로 분석하였다. 우주급 부품의 방사선 차폐물질 설계는 열, 압력, 강도, 연성 등 다양한 요소들이 고려되어야만 하나, 본 연구에서는 현재 우주급 소재에 활용되고 있는 차폐물질과 경량 연자성 복합소재 등 단일물질을 차폐물질로 가정하였고 2차 우주방사선의 중성자만을 고려하여 수행되었으므로 실제 우주에 적용하기 위해서는 양성자에 대한 영향을 비롯하여 앞서 언급한 다양한 성능시험과 세밀한 설계가 필요함을 밝혀둔다.

## II. NEUTRON SHIELDING EXPERIMENT

### 1. 시험체 물성치 및 특성

일반적으로 연자성 물질은 높은 자기 포화도와 낮은 보자기력에 의해 EMP 차폐에 효과적이라고 알려져 있다<sup>[15]</sup>. 본 연구에서 사용한 경량 연자성 복합소재는 비정질(amorphous) 및 나노결정질(nano-crystalline) 기반 소재로 얇고 유연하여 가공이 용이한 특성이 있는 것으로 알려져 있다<sup>[14]</sup>. 본 소재의 원소 구성비는 철 78%, 규소 9%, 붕소 13%이고 밀

도는 7.19 g/cm<sup>3</sup>다. 시험체 한 장의 두께를 20 μm로 제작할 수 있고 인성(toughness)이 우수하여 다양한 장소에서 활용할 수 있는 장점이 있으며, 가연성 소재를 사용하지 않아 연소의 위험성도 낮다<sup>[4]</sup>. 해당 소재는 열중성자 반응 단면적이 높아 원자로 등에서 출력제어 및 임계도 제어 등의 목적으로 활용되는 붕소를 함유하고 있어 특히 열중성자 차폐물질로서의 활용 가능성이 기대되는 물질이다.

## 2. 실험 방법

시험체의 두께를 0.8 mm, 1.6 mm, 2.4 mm, 3.2 mm로 제작하여 해당 시험체에 대하여 열중성자 차폐실험을 수행하였다. KRISS는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 AmBe 중성자 선원을 기준으로 외부에 1m 이상 두께의 그래파이트(graphite)를 둘러싸 선원으로부터 발생하는 중성자를 감속시킨 Maxwell-Boltzmann 분포의 열중성자 표준장을 제공하고 있으며 검출기로는 SP9 He-3 비례계수기를 사용하고 있다. 해당 실험은 2022년 3월 2일부터 6일까지 진행되었다. 실험일 기준 AmBe의 방사능은 173,482 MBq, 기준 위치에서의 열중성자속은 2,676 cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> (불확도 1.5%, k=1)였으며 실험실 온도는 20 ± 3°C, 상대 습도는 50 ± 10% 였다.



Fig. 1. Thermal neutron shielding experiment facility in Korea Research Institute of Standards and Science.

열중성자 차폐율을 측정하기 위해 우선 시험체가 없는 상태에서의 열중성자 계수한다. He-3 비례계수기를 열중성자 표준장 내에 설치하고 중성자를 계측할 검출기의 전면부를 제외하고 0.6 mm

두께의 카드뮴으로 차폐한다. 그리고 계수율을 측정하고, 이를 R<sub>t</sub>라고 한다. 이후 검출기 전면부를 카드뮴 덮개로 차폐하고 중성자를 측정하면 열외중성자(E<sub>n</sub> > 0.6 eV)에 대한 계수율인 R<sub>e</sub>를 측정할 수 있다. 이 차이를 이용하여 열중성자의 계수율인 R<sub>th</sub>를 결정할 수 있다. 같은 방법으로 시험체를 검출기와 열중성자 선원 사이에 위치시켜놓고 진행하면 시험체를 통과한 열중성자의 계수율인 S<sub>th</sub>를 측정할 수 있다. 이를 수식으로 표현하면 Eq. (1)과 같다.

$$P = 1 - \frac{S_{th}}{R_{th}} = 1 - \frac{(S_t - S_e)}{(R_t - R_e)} \quad (1)$$

P : 시험체의 차폐율

S<sub>th</sub>: 시험체를 통과한 열중성자의 계수율(s<sup>-1</sup>)

S<sub>t</sub>: 시험체를 통과한 전체 중성자의 계수율(s<sup>-1</sup>)

S<sub>e</sub>: 시험체를 통과한 열외중성자의 계수율(s<sup>-1</sup>)

R<sub>th</sub>: 열중성자의 계수율(s<sup>-1</sup>)

R<sub>t</sub>: 전체 중성자의 계수율(s<sup>-1</sup>)

R<sub>e</sub>: 열외중성자의 계수율(s<sup>-1</sup>)

## 3. 실험결과

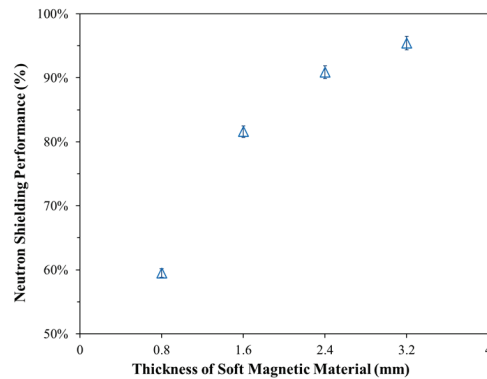


Fig. 2. Thermal neutron performance for the different thickness of Soft Magnetic Material samples.

Fig. 2는 KRISS의 열중성자 표준장에서 경량 연자성 복합소재의 두께별 열중성자 차폐성능을 보여준다. 실험결과에서 보듯이 시험체의 두께가 증가할수록 열중성자 차폐성능이 향상함을 확인할 수 있었고 약 2 mm 두께의 시험체로도 약 90%의 열중성자 차폐가 가능한 것으로 추정된다. 이는 경량 연자성 복합소재에 열중성자 흡수 단면적이 약

3840 barns인 붕소-10이 상당량 함유되어 있어 나타난 현상으로 열중성자의 차폐가 필요한 환경에서 해당 소재를 활용할 수 있을 것으로 보인다. 해당 소재의 대부분은 철로 구성되어 있는데 철은 엑스선, 감마선 등에 우수한 차폐효과가 있을 뿐만 아니라 비탄성산란을 통해 고속중성자의 에너지를 효과적으로 저속중성자 영역으로 감속할 수 있다. K. V. Sathish et. al.<sup>[16]</sup>은 붕소의 농도를 달리한 Ferro-boron 합금 중  $Fe_{0.95}B_{0.05}$ 를 x-ray, 감마선, 중성자의 차폐에 가장 좋은 물질이라는 연구결과를 발표하기도 하였다. 따라서 경량 연자성 복합소재의 고에너지 우주방사선 환경 사용 가능성을 확인하기 위해 우주방사선 차폐체 후보물질로 선정하였다.

### III. SECONDARY COSMIC-RAY SPECTRA

#### 1. MCNP6 모델링 & 시뮬레이션

MCNP에 내장되어 있는 skymap.dat라는 데이터 라이브러리 파일을 활용하여 우주방사선 환경을 모델링하였다<sup>[17]</sup>. MCNP6의 우주방사선 모델링 옵션은 두 개의 서로 다른 스펙트럼 형상인 Lal 스펙트럼과 BRI 스펙트럼을 제공하고 있다<sup>[18,19]</sup>. 본 연구에서는 지자기적 차단 임계세기를 모사하기 위해 BRI 스펙트럼을 활용하였다<sup>[3]</sup>.

우주방사선 스펙트럼은 넓은 폭의 에너지 영역을 보유하고 있어 대기 중 고에너지 입자들의 상호작용을 묘사하기 위해서는 고에너지 물리 모델을 고려해야 한다. 따라서 Intra-Nuclear Cascade(INC) physics model인 CEM과 고에너지 영역 모델인 LAQGSM(Los Alamos Quark-Gluon String Model)을 사용하였다<sup>[17]</sup>. 150 MeV 이하의 중성자 에너지 영역의 중성자 수송을 모사하기 위한 핵데이터로는 ENDF/B-VII이 활용하였고, 폴리에틸렌 등 수소를 함유한 물질의 반응 단면적을 고려하기 위해 중성자 산란 매트릭스(neutron scattering matrices)인  $S(\alpha, \beta)$ 를 적용하였다. 또한, MCNP6이 제공하는 분산감소기법(variance reduction technique)인 기하학적 분열(geometry splitting)을 적용하여 불확실성을 감소하였다<sup>[20]</sup>.

#### 2. 12.4 km 상공 중성자 및 양성자 스펙트럼

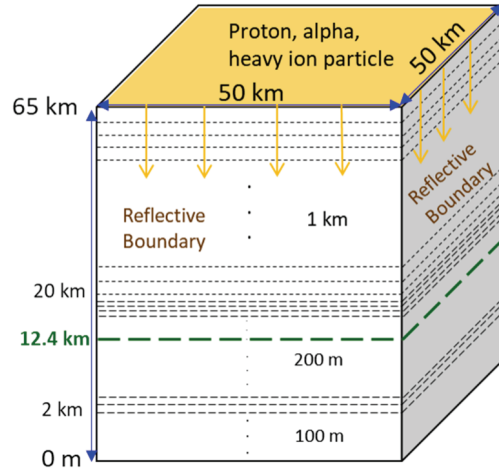
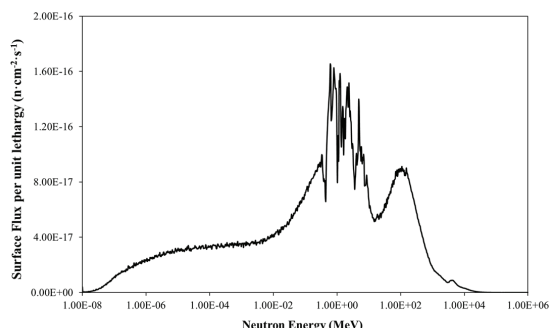


Fig. 3. The prism describes MCNP6 modeling for the secondary cosmic-ray spectra employing skymap.dat.

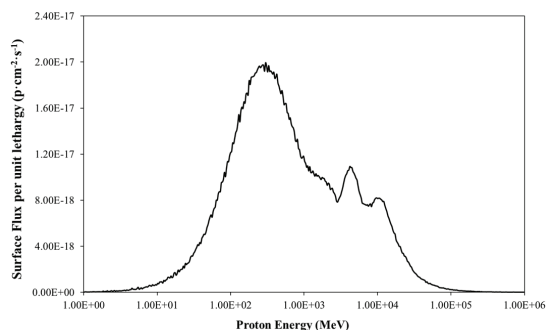
MCNP6의 skymap.dat은 지구좌표에 따라 65km 상공의 우주방사선 데이터를 제공하기 때문에 MCNP는 65km 상공 이하의 우주방사선 스펙트럼에 대해서만 산출할 수 있다. 다수의 연구자는 항공고도에서의 인체 피폭선량 산출 및 반도체 소자의 SEE 가능성 확인 등을 위해 10 ~ 20 km 고도를 선정하였다<sup>[3,13,17,21,22]</sup>. 따라서 본 연구에서는 임의의 고도인 12.4km 상공의 고도에 존재하는 우주방사선을 산출하기 위해 Fig. 3과 같이 50 km × 50 km × 65 km 규모의 직육면체 공간을 MCNP에 모델링하고 지표면과 수직인 면에 반사 경계선(reflective boundary)을 적용하여 반사 경계선에 도달하는 입자들이 모델링한 공간 외부로 빠져나가지 못하게 함과 동시에 입자들을 반사시켜 해당 공간 내부의 입자 수가 일정하게 유지되도록 해 실제 대기과 유사한 환경을 모사하였다. 직육면체 공간은 고도마다 다른 대기 밀도와 원소비를 적용하기 위해 155개의 각기 다른 층으로 구분하였다. 0~2 km까지는 100 m 단위로, 2~20 km 구간은 200 m로, 20~65 km 구간은 1 km로 구분하였으며, 각각의 대기 밀도는 미국 국립해양대기청(NOAA; National Oceanic and Atmospheric Administration) 데이터를 참고하였다<sup>[23]</sup>. Skymap.dat에서 제공하는 우주방사선 입자 옵션은 양성자, 알파 입자, 중하전 입자 등이 있으며



관심 있는 입자만 설정하여 우주방사선 환경을 모델링할 수도 있다<sup>[17]</sup>. 본 연구에서는 skymap.dat가 제공하는 모든 입자가 65 km 고도에서 지상 원점 방향 수직으로 입사하도록 설정하였고 12.4 km 상공의 대기층에 F2 tally를 적용하여 해당 고도의 2차 우주방사선 중성자와 양성자 스펙트럼을 산출하였다.



(a) Neutron spectrum



(b) Proton spectrum

Fig. 4. Neutron and proton spectrum the 12.4 km altitude using F2 tally function embedded in MCNP6.

Fig. 4(a)는 12.4 km 고도의 중성자 스펙트럼이고, Fig. 4(b)는 양성자 스펙트럼을 산출한 것이다. 우주방사선 중성자는 일반적으로 보유하고 있는 에너지 영역에 따라서 열중성자(0.55 eV 이하), 에피서멀 중성자(0.55 eV ~ 0.1 MeV), 증발(evaporation) 중성자(0.1 ~ 20 MeV), 캐스케이드(cascade) 중성자(20 MeV)로 구분할 수 있다<sup>[13]</sup>. Fig. 4의 중성자 스펙트럼을 보면 약 1 MeV와 100 MeV에서 에너지 피크(peak)가 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 양성자는 약 100 MeV와 1 GeV 정도에서 에너지 피크가 생기는 것을 알 수 있다. 각각의 스펙트럼은 우주방사선 차폐에 적합한 차폐물질 선정에 위한 방사

선 에너지 데이터로 활용되었는데 양성자는 각 차폐물질과 반응하여 생성하는 2차 중성자를 고려하기 위해서만 사용하였다.

## IV. NEUTRON SHIELDING ANALYSIS OF THE SELECTED MATERIALS

### 1. 차폐물질 선정

위성구조체의 하우징 등 우주 구조물과 항공화물의 탑재용기는 알루미늄으로 구성되어 있다<sup>[10,13]</sup>. 그러나 앞서 언급한 바처럼 우주 구조물의 경량화가 요구되고 있기 때문에 알루미늄을 대체할 수 있는 것으로 연구되고 있는 폴리에틸렌과 붕소 폴리에틸렌, 탄소나노튜브를 선정하였다. 또한, 고속중성자 영역에서 중성자의 차폐에 효과적인 것으로 알려진 SS316과 열중성자 차폐성능을 실험하였던 경량 연자성 복합소재도 차폐 후보물질로 정하였으며 각 물질의 구성비와 밀도는 Table 1에서 확인할 수 있다.

Table 1. Constituent element fraction and densities of the seven investigated materials

Materials	Element	Fraction(%)	Density(g/cm <sup>3</sup> )
Polyethylene	H	14.3724	0.93
	C	85.6276	
Borated Polyethylene	H	12.5355	1
	B	10	
	C	77.4645	
Soft Magnetic Material	B	13	7.19
	Si	9	
	Fe	78	
	C	0.08	
	Mn-55	2	
Stainless Steel 316	P-31	0.045	8.00
	S	0.03	
	Si	1	
	Cr	17	
	Ni	12	
	Mo	2.5	
Carbon Nano Tube	Fe	65.345	1.7
	C	100	
Aluminium	Al	100	2.7

### 2. MCNP 모델링

선정된 차폐 후보물질의 2차 우주방사선 중성자 차폐성능을 분석하기 위해 높이 20 cm, 폭 3 m의 직육면체를 모델링 하였다. 앞서 산출한 12.4 km 고도의 중성자 및 양성자 스펙트럼을 방사선원으로 활용하였고, Fig. 5처럼 Z축과 평행한 아래 방향으로 입사하도록 했다. 대기 구성은 12.4 km 고도의 대기 밀도와 원소비를 적용하고 차폐물질의 두께는 3 cm로 설정하였다. F4 tally를 사용하여 1 cm 두께의 진공 공간의 평균 중성자 선속을 측정하였다.

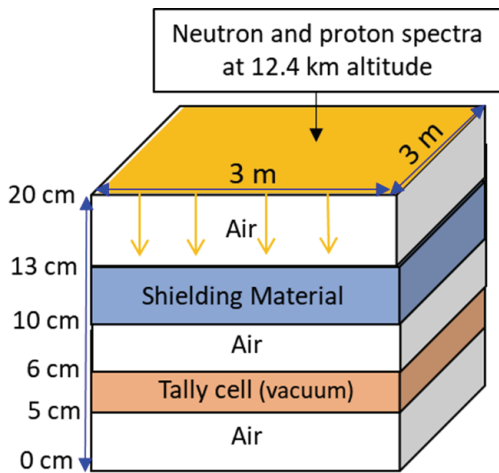
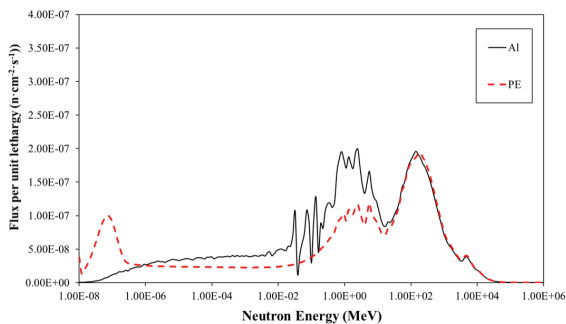


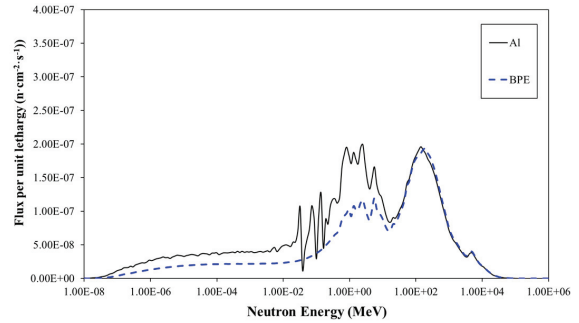
Fig. 5. MCNP6 geometry for evaluating the neutron shielding performance of the materials selected.

### 3. 결과분석

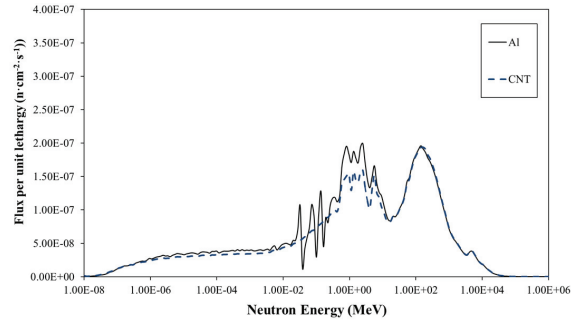
Fig. 6은 (a) 폴리에틸렌(PE), (b) 붕소 폴리에틸렌(BPE), (c) 탄소나노튜브(CNT), (d) 경량 연자성 복합소재(SMM), (e) SS316의 알루미늄 대비 우주방사선 차폐성능을 비교하기 위한 중성자 스펙트럼이다.



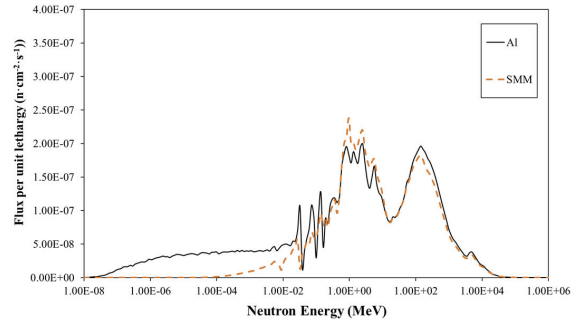
(a) Polyethylene



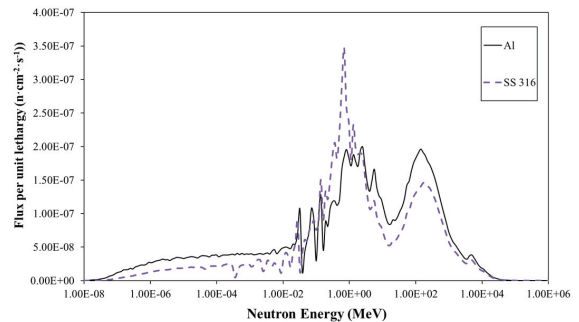
(b) Borated polyethylene



(c) Carbon nano tube



(d) Soft Magnetic Material



(e) Stainless Steel 316

Fig. 6. Neutron flux spectra of the selected material compared with aluminium used as shielding material.

폴리에틸렌(PE)과 붕소폴리에틸렌(BPE)은 열중성자, 에피서멀 중성자, 증발 중성자 영역에서의 중

성자속을 감소시켰는데 폴리에틸렌의 경우 열중성자속이 높게 측정되었다. 이는 수소와 탄소의 탄성산란으로 인해 고속중성자가 감속되어 열중성자속 증가에 기여한 것으로 분석된다. 붕소폴리에틸렌의 경우 열중성자에 대해 높은 흡수단면적을 보유하고 있는 붕소-10이 존재하기 때문에 다섯가지 후보물질 중 증발 중성자 에너지 영역대 이하의 중성자에 대한 가장 높은 차폐성능을 보여주었다. 탄소나노튜브(CNT)의 경우 알루미늄 대비 증발 중성자 영역에서 유의미한 중성자 차폐능력이 나타났는데 이는 탄소의 탄성산란 반응 때문인 것으로 보이며 폴리에틸렌보다 차폐능력이 낮은 이유는 낮은 원자번호 물질인 수소가 부재하기 때문으로 판단된다. 경량 연자성 복합소재(SMM)와 SS316의 경우 캐스케이드 중성자에 대한 차폐효과를 보여줬는데 이는 비탄성산란에 따른 중성자 감속 영향으로 보인다. 다만, 이로 인해 증발 중성자 영역의 중성자속이 증가하였는데 붕소, 탄소 및 수소가 함유한 물질과 다층구조를 이룬 차폐소재를 만든다면 우주방사선 중성자 전 영역에서의 중성자속 감소 효과를 기대할 수 있을 것으로 예상된다. 경량 연자성 복합소재의 경우 다섯 가지 후보물질 중 가장 높은 붕소의 함유량을 보유하고 있기 때문에 열중성자 및 에피서멀 중성자 등 저속중성자 영역에서 기타 후보물질에 비해 월등히 높은 중성자 차폐성능을 보유한 것으로 확인하였다. 경량 연자성 복합소재의 원소 구성을 보았을 때 탄소 및 수소 등의 중성자 탄성산란 물질이 추가된다면 우주방사선 차폐 능력이 보장될 것으로 예상된다.

우주방사선 차폐 또는 중성자 차폐로 현재 이용되고 있는 단층구조 단일물질 중 일부를 본 연구에서 분석하였는데, 차폐체의 일정 두께로는 우주방사선 중성자 에너지대 전 영역에서 중성자속을 감속시키는 효과를 제공할 수 없었다. 이는 우주방사선이 다양한 에너지를 포함하고 있고, 특히 고에너지 중성자속이 감속되더라도 낮은 영역대의 중성자속이 증가하는 기본적인 차폐원리 때문이었다. 따라서 우주방사선 차폐를 위해서는 방사선 종류와 에너지 범위에 맞게 다물질 다층구조의 경량화 차폐 소재를 설계하여 전 영역대의 중성자를 차폐하는 연구가 필요할 것으로 예상된다.

## V. CONCLUSION

본 연구는 몬테카를로 시뮬레이션 코드인 MCNP와 중성자 차폐실험을 통해 우주방사선 중성자 차폐에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 붕소 폴리에틸렌, 알루미늄, 탄소나노튜브 등의 현재 활용되고 있는 물질과 경량 연자성 복합소재라는 새로운 물질에 대한 고에너지 중성자 차폐성능을 비교 분석하였다.

이번 연구결과를 통해 중성자의 에너지 영역대에 따른 물질별 상이한 차폐효과를 확인하였다. 알루미늄 대비 폴리에틸렌과 붕소폴리에틸렌, 탄소나노튜브는 증발 중성자 에너지 영역대 이하의 중성자 영역에서 높은 차폐율을 보여줬으며, 특히 붕소 폴리에틸렌의 경우 상당량의 붕소가 함유되어 있어 열중성자 영역까지 중성자를 감소할 수 있었다. 반면에 다수의 철 등 높은 원자번호 물질을 함유한 SS316은 중성자의 에너지가 증가할수록 그 차폐능력이 향상되었으며 이는 78%로 철로 구성된 경량 연자성 복합소재의 경우에도 유사한 결과를 확인할 수 있었다.

또한, 다층 다물질 복합구조 차폐물질 설계의 필요성을 식별하였다. 중성자 차폐물질별 특성이 명확하기 때문에 본 연구에서 제안한 단일물질로는 고에너지부터 저에너지 중성자 전 영역의 중성자 차폐는 제한되는 것으로 확인하였다. 따라서 적절한 두께 및 밀도 조절을 통한 경량화된 다층 다물질 복합구조 차폐물질 설계가 필요할 것으로 보인다. 본 연구에서 제안한 물질들의 차폐특성을 분석한 결과 비탄성산란 반응으로 중성자의 에너지를 감속하는 철 등 높은 원자번호 물질과 탄성산란 반응을 일으키는 폴리에틸렌, 그리고 중성자 흡수물질로 구성된 물질 등 최소 3개 이상의 층(layer)로 구성된 차폐물질을 설계해야만 고에너지 중성자로 구성된 우주방사선 차폐에 효과적일 것으로 보인다.

본 연구는 12.4 km 고도에 존재하는 우주방사선을 전제로 차폐체 설계에 대한 선행연구를 수행하였다. 지상, 항공고도, 위성 궤도 등 환경에 따른 방사선의 종류와 에너지가 상이하기 때문에 방사선 손상 최소화를 위해서는 방사선 환경 및 인체 장비

손상 특성을 고려한 최적의 방사선 차폐물질 선정과 설계가 필요할 것으로 보인다. 더불어, 우주급 전자부품 설계에는 내방사선성 시험뿐만 아니라 다양한 열, 기계적 성질에 대한 내구성 시험이 필요한 바, 본 연구에서 제시한 경량 연자성 복합소재 등 다양한 차폐소재에 대한 추가 연구가 필요하며 특히 고에너지 영역의 중성자를 차폐하기 위해 스테인리스강 등 높은 원자번호 물질로 구성된 물질에 대한 중성자 차폐 연구와 다물질 다층구조로 구성된 차폐물질 설계에 대한 연구가 필요하겠다.

### Reference

- [1] Kyle Copeland, "CARI-7 Documentation: Radiation Transport in the Atmosphere(No. DOT/FAA/AM-21/05)", United States, 2021.
- [2] G. W. McKinney, "MCNP6 Cosmic & Terrestrial Background Particle Fluxes-Release 3", Proceedings of the American Nuclear Society Winter Meeting, Washington, D.C., pp. 1194-1197, 2013.
- [3] J. Palomares, G. W. McKinney, "MCNP Simulation of Background Particle Fluxes from Galactic Cosmic Rays", Transactions of the American Nuclear Society Annual Meeting, Atlanta, Vol. 108, pp. 651-654, 2013.
- [4] Y. S. Lee, S. K. Jeong, I. R. Hwang, Y. S. Yang, M. L. Lee, D. W. Suh, "ICT Device Impacts and Development Trends on Cosmic Radiation Environment", Electronics and Telecommunications Trends, Vol. 37, No. 2, pp. 21-29, 2022. <http://doi.org/10.22648/ETRI.2022.J.370203>
- [5] W, J. Han et. al., "Space Parts Radiation Impact Assessment Technology Development", Korean Association For Radiation Protection Winter Workshop, pp. 43-50, 2022.
- [6] J. Y. Jeong, Y. S. Yoon, K. J. Min, "Study on Space Radiation Effect Technology of Space Structural Materials", Current Industrial and Technological Trends in Aerospace, Vol. 14, No. 2, pp. 99-105, 2016.
- [7] C. S. Dyer, F. Lei, S. N. Clucas, D. F. Smart, M. A. Shea, "Solar Particle Enhancements of Single-Event Effect Rates at Aircraft Altitudes", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 50, No. 6, pp. 2038-2045, 2003. <http://doi.org/10.1109/TNS.2003.821375>
- [8] E. Normand, T. J. Baker, "Altitude and Latitude Variations in Avionics SEU and Atmospheric Neutron Flux", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 40, No. 6, pp. 1484-1490, 1993. <http://doi.org/10.1109/23.273514>
- [9] A. Taber, E. Normand, "Single Event Upset in Avionics", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 40, No. 2, pp. 120-126, 1993. <http://doi.org/10.1109/23.212327>
- [10] Tae Seong Jang, Juhun Rhee, "Domestic Study Trend of Radiation Shielding Structure", Current Industrial and Technological Trends in Aerospace, Vol. 15, No. 2, pp. 109-117, 2017.
- [11] Tomasz Blachowicz, Andrea Ehrmann, "Shielding of Cosmic Radiation by Fibrous Materials", Fibers, Vol. 9, No. 10, 2021. <http://doi.org/10.3390/fib9100060>
- [12] A. N. Estanislao, K. Richard T, A. Austin S, O. John L, B. Timothy J, T. Meredith D, "Cosmic Ray Interactions in Shielding Materials", United States, 2011. <http://doi.org/10.2172/1025678>
- [13] J. H. Lee, H. N. Kim, H. Y. Jeong, S. O. Cho, "Optimization of Shielding to Reduce Cosmic Radiation Damage to Packaged Semiconductors during Air Transport using Monte Carlo Simulation", Nuclear Engineering Technology, Vol. 52, No. 8, pp. 1817-1825, 2020. <http://doi.org/10.1016/j.net.2020.01.016>
- [14] S. K. Lee, S. M. Lee, G. J. Choi, B. H. Lee "Analysis of Radiation Shielding Effect of Soft Magnetic Material applied to Military Facility", Journal of Korean Society of Radiology, Vol. 15, No. 2, pp. 191-199, 2021. <http://doi.org/10.7742/jksr.2021.15.2.191>
- [15] D. C. Choi, M. S. Choi, J. G. Kim, "Magnetic Properties of FeSiAl Oxide Nanoparticles and Magneto-Dielectric Properties of Their Composite Sheets", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 50, No. 11, pp. 1-4, 2014. <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2014.2325867>
- [16] K. V. Sathish, H. C. Manjunatha, L. Seenappa, K. N. Sridhar, N. Sowmya, S. Alfred Cecil Raj, "Gamma, X-ray and Neutron Shielding Properties of



- Iron Boron Alloys", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 49, No. 3, pp. 613-619, 2022.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.516>
- [17] G. W. McKinney, H. J. Armstrong, M. R. James, J. M. Clem, P. Goldhagen, "MCNP6 Cosmic-Source Option", the American Nuclear Society Annual Meeting, Chicago, United States, 2012.
- [18] G. C. Castagnoli, D. Lal, "Solar Modulation Effects in Terrestrial Production of Carbon-14", *Radiocarbon*, Vol. 22, No. 2, pp. 133-158, 1980.  
<http://doi.org/10.1017/S0033822200009413>
- [19] J. M. Clem, P. Goldhagen, J. W. Wilson, G. De Angelis, "New Calculations of the Atmospheric Cosmic Radiation Field-Results for Neutron Spectra", *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 110, No. 1-4, pp. 423-428, 2004.  
<http://dx.doi.org/10.1093/rpd/nch175>
- [20] J. K. Shultis, R. E. Faw, *An MCNP Primer*, pp. 1-42, 2011.
- [21] M. T. Pazianoto, M. A. Cortes-Giraldo, C. A. Federico, O. L. Gonzalez, J. M. Quesada, B. V. Carlson, "Determination of the Cosmic-ray-incuded Neutron Flux and Ambient Dose Equivalent at Flight Altitude", *Journal of Physics: Conference Series* 630, 2015.  
<http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/630/1/012022>
- [22] M. T. Pazianoto, M. A. Cortes-Giraldo, C. A. Federico, G. Hubert, O. L. Gonzalez, J. M. Quesada, B. V. Carlson, "Extensive Air Shower Monte Carlo Modeling at the Ground and Aircraft Flight Altitude in the South Atlantic Magnetic Anomaly and Comparison with Neutron Measurements", *Astroparticle Physics*, Vol. 88, pp. 17-29, 2017.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2016.12.004>
- [23] C. M. Johnson, "Examination of Natural Background Sources of Radioactive Noble Gases with CTBT Significance", University of Texas at Austin, Master of Science in Engineering, 2013.

## 몬테카를로 방사선 수송 모델을 활용한 우주방사선 차폐체 설계 관련 선행연구

강창우, 김영찬\*

국군화생방방어연구소

### 요 약

본 연구는 우주방사선 차폐물질 설계를 위한 선행연구 차원에서 우주방사선에 대한 물질별 방사선 차폐 특성을 분석하였다. 특히 EMP 및 방사선 차폐에 효과가 있다고 알려진 경량 연자성 복합소재에 대한 우주 방사선 차폐물질 활용 가능성을 확인하고자 하였다. 이를 위해 Monte Carlo N-Particle(MCNP) 모델링 기법과 열중성자 차폐실험을 수행하였으며, MCNP의 우주방사선 모델인 Skymap.dat를 활용하였다. 연구결과 폴리에틸렌, 붕소폴리에틸렌, 탄소나노튜브 등 탄소와 수소를 함유한 물질의 경우 증발 중성자 에너지 영역 대 이하의 중성자 감소에 효과적인 것으로 나타났으며 SS316, 경량 연자성 물질 등 철을 함유한 물질은 캐스케이드 중성자 차폐성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있었다. 특히 경량 연자성 물질의 경우 붕소를 함유하고 있어 저속중성자 영역의 중성자 감소에도 효과적인 것으로 나타났으며, 향후 탄소 및 수소 등 탄성산란 물질을 보강한다면 우주방사선 중성자 전 영역에서 유의미한 차폐효과를 보여줄 것으로 기대된다.

중심단어: 우주방사선, 항공우주, 방사선 차폐, 몬테카를로 모델링

### 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	강창우	국군화생방방어연구소	연구원(과장)
(교신저자)	김영찬	국군화생방방어연구소	연구원