

군 방호시설에 자철석 콘크리트 적용 시 감마선 차폐효과 분석

Analysis of Shielding Effect on Gamma Radiation of Magnetic Aggregate Concrete Applied to Protective Facility

이 상 규¹

이 호 찬²

이 건 우³

한 다 희⁴

박 영 준^{5*}

Lee, Sang-Kyu¹

Lee, Ho-Chan²

Lee, Gun-Woo³

Han, Da-Hee⁴

Park, Young-Jun^{5*}

Assistant professor, Korea Military Academy, Nowon-Gu, Seoul, 01805, Korea¹

Associate professor, Korea Military Academy, Nowon-Gu, Seoul, 01805, Korea²

Lecturer, Korea Military Academy, Nowon-Gu, Seoul, 01805, Korea³

Post-Doc researcher, University of Utah, Salt Lake City, Utah, 84112, USA⁴

Professor, Korea Military Academy, Nowon-Gu, Seoul, 01805, Korea⁵

Abstract

The purpose of this research is to analyze the gamma ray shielding effect of heavy concrete containing magnetic aggregate and to confirm the applicability to the military protective facilities. In general, a military concrete structure protects combatants from bullets, and also it provides some radiation shielding. In this research, experiments were conducted using a Cs-137 source to check the gamma ray shielding effect. In addition, the Monte Carlo N-Particle(MCNP) modeling was applied to evaluate the gamma ray shielding effect of a military structure. As a result, as the concrete thickness increased, the shielding performance improved according to the linear attenuation law. With that, as the ratio of magnetic aggregate was increased, gamma ray shielding performance was also improved. Therefore, this research verified that the application of magnetic aggregate concrete to military facilities for radiation shielding purposes would be useful.

Keywords : radiation shielding, magnetic aggregate concrete, MCNP

1. 서 론

1.1 연구의 목적

일반적으로 핵무기에 의한 효과는 폭발파, 열복사선, 방사선, EMP(Electromagnetic Pulse) 등으로 분류한다. 이와 같은 핵무기 효과 중 방사선은 장기간 지속적으로 인명피해 및 활동에 제한을 가한다. 특히 낙진에서 발생하는 방사선은 대기의 영향을 받아 넓은 지역에 확산되어 광범위한 피해를 유발한다[1].

한편, 핵 및 방사능전 상황에서도 각개 전투원은 부득이하게 전투임무 수행을 함에 있어 개인 치장물자 및 유개호 외에는 야지에서 방사능 차폐를 기대할 수 있는 효과적인 수단이 제한적이다. 이 중 콘크리트로 된 유개호는 소화기, 포탄 등에 의한 피격으로부터 내부의 전투원 및 장비를 보호할 뿐만 아니라 방사선으로부터 일정부분 차폐성능을 제공한다[2].

이러한 콘크리트의 방사선 차폐성능 향상을 위해서는 일반적으로 중량 골재를 사용하는 경우가 많다. 중량 골재는 지역적 특성이 강하여 콘크리트의 골재로 사용할 경우에는 요구되는 재료의 성질에 대한 별도의 검증이 필요하다. 한편, 우리나라에서 사용가능한 중량 골재는 자철석이 유일하며, 원전 구조물에 일부사용이 가능한 것으로 밝혀졌다. 한편 콘크리트는 사용 용도에 따른 콘크리트의 강도, 두께 등에 차이가 있고, 이러한 차이가 방사능 차폐 효과에도 영향을 미칠 수 있어 자철석 콘크

Received : October 30, 2019

Revision received : February 6, 2020

Accepted : March 24, 2020

* Corresponding author : Park, Young-Jun

[Tel: 82-2-2197-2955, E-mail: parky@mnd.go.kr]

©2020 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

리트의 군사적 활용 가능성에 대한 기대와 우려가 줄곧 제기되어 왔다[3].

이에 본 연구에서는 자철석이 포함된 중량 콘크리트의 감마선 차폐효과를 분석하여 일선 전투부대에서 활용하는 유개호에 대한 적용 가능성을 확인하였다. 이를 위해 12개의 콘크리트 시험체를 제작하여 자철석 함유량별 방사선 차폐 성능에 관한 실험을 수행하였다. 또한 실험을 통해 얻어낸 방사능 차폐 성능에 관한 물성치를 바탕으로 M&S(Modeling and Simulation)를 통해 방사능 차폐효과에 관한 유개호 구축에서의 자철석 콘크리트 활용가능성을 규명하였다.

1.2 연구 범위 및 방법

콘크리트는 원자력 발전소 및 방사능 폐기물 저장소 등에서 방사능 차폐재로 많이 사용된다. 특히 콘크리트는 투과율이 높은 감마선과 중성자를 차폐하는데 많이 사용된다. 그런데 핵 및 방사능전 상황에서는 낙진에 의한 감마선에 의한 피해가 지배적이므로 본 연구는 감마선에 대한 차폐 성능 확인으로 연구범위를 제한하였다. 이를 위해 감마선을 방출하는 Cs-137 선원을 이용하여 차폐 실험을 실시하였다. 이에 추가하여 MCNP(Monte Carlo N-Particle) 프로그램[4]을 사용하여 일선 전투원의 방호시설인 유개호에 자철석 콘크리트를 적용하였을 경우에 대한 감마선 차폐 성능을 평가하였다.

2. 감마선 차폐 실험 및 결과

2.1 감마선 차폐 이론 및 적용

콘크리트의 감마선 차폐는 기본적으로 선형감쇠 법칙 (Linear attenuation law)을 따른다.[5] 단일 에너지 감마선이 차폐되는 정도를 계산하기 위한 선형감쇠 법칙은 Eq. (1)과 같다.

Eq. (1)의 수학적 의미는 다음과 같다. 임의의 차폐재에 I_0 의 강도를 가진 방사선이 입사한다고 가정할 때, 이 차폐재를 투과한 후의 감마선의 강도는 I 라는 의미이다. 이때 x 는 차폐재의 두께이며, μ 는 선형감쇠계수로 감마선이 물질내의 단위 길이 당 반응할 확률을 나타낸다.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

I : 차폐재를 투과한 후의 감마선 강도(counts)

I_0 : 초기 방사선 강도 (counts)

μ : 선형감쇠계수 (cm^{-1})

x : 차폐재의 두께 (cm)

그런데 차폐재의 선형감쇠 상수 μ 는 동일한 물질일지라도 물질의 밀도에 따라 다른 값을 가진다[6]. 예를 들어 물이 액체 상태로 있는 경우와 수증기 형태인 기체로 존재하는 경우에 각 상태마다 밀도가 다르기 때문에 감마선의 차폐되는 정도에 영향을 준다. 따라서 밀도가 상태에 따라 달라지는 물질이나 혼합물일 경우에는 선형감쇠 상수보다 Eq. (2)와 같이 밀도 값이 포함된 질량감쇠 상수를 적용해야한다[7].

$$I = I_0 e^{-(\mu/\rho)x\rho} \quad [\text{질량감쇠 상수} = \frac{\mu}{\rho}] \quad (2)$$

이번 실험에서도 혼합물인 콘크리트의 차폐 효과를 분석하기 때문에 질량감쇠 상수를 사용하여 계산하였다. 더불어 혼합물의 질량감쇠 상수를 얻기 위해서는 Eq. (3)에서 보여주는 바와 같이 각 물질의 질량감쇠 상수 값에 질량비(Table 1)를 곱한 후 총합하여 계산한다.

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (3)$$

w_i = 혼합물 내 임의의 물질 i 의 질량비

Table 1. Molecular aonstruction of magnetic aggregate concrete

No.	Component	Unit	Result
1	F	mass(%)	0.2957
2	Na2O	mass(%)	0.0000
3	MgO	mass(%)	15.1644
4	AL ₂ O ₃	mass(%)	3.0018
5	SiO ₂	mass(%)	32.3375
6	P ₂ O ₅	mass(%)	0.0598
7	SO ₃	mass(%)	0.2773
8	Cl	mass(%)	0.0913
9	K ₂ O	mass(%)	1.1214
10	CaO	mass(%)	8.7690
11	TiO ₂	mass(%)	0.0973
12	MnO	mass(%)	0.8482
13	Fe ₂ O ₃	mass(%)	37.5015
14	ZnO	mass(%)	0.0554
15	GeO ₂	mass(%)	0.0106
16	Br	mass(%)	0.0094
17	SrO	mass(%)	0.0136
18	MoO ₃	mass(%)	0.0057
19	PdO	mass(%)	0.0442
20	Sb ₂ O ₃	mass(%)	0.0545
21	I	mass(%)	0.0759
22	Cs ₂ O	mass(%)	0.0796
23	PtO ₂	mass(%)	0.0221
24	PbO	mass(%)	0.0249
25	U ₃ O ₈	mass(%)	0.0207

Table 2. Mix design of magnetic aggregate concrete

NO.	mix design				materials per unit volume of concrete (kg/m ³)										Aggregate	Slump (mm)	Air (%)
	Curing temperature (°C)	F _{cr} (MPa)	W/B (%)	S/a (%)	W	B	OPC	S1	S2	G	S (magnetic)	G (magnetic)	AD.				
1			31.0	46.0	167.0	539	539	445	305	897				0.8	normal 100%	230.0	3.6
2	20	50	31.0	46.0	167.0	539	539	334	228	673	278	326	1.1	normal 75% + magnetic 25%	230.0	3.4	
3			31.0	46.0	167.0	539	539	222	152	449	555	652	1.4	normal 50% + magnetic 50%	235.0	3.9	
4			31.0	46.0	167.0	539	539					1110	1303	2.2	magnetic 100%	230.0	3.8

F_{cr} : Required average compressive strength of concrete used as the basis for selection of concrete proportion
 W/B : Water Binder Ratio
 S/a : Sand to aggregate ratio

W : Water
 B : Binder
 S : Fine aggregate
 G : Coarse aggregate

2.2 시험체 제작 및 물성치

감마선 차폐 성능 실험에 사용된 콘크리트 시험체는 20°C의 온도에서 수증양생하여 50MPa의 강도를 갖도록 설계하여, 재령 28일에 49.2MPa 수준의 강도로 제작되었다. 시험체는 일반 콘크리트가 아닌 특수 콘크리트로서 골재 내 자철석의 비율을 변경하면서 배합하였다. 총 4 경우의 비율 조정을 통해 자철석이 골재 내 차지하는 함유율은 0%, 25%, 50%, 100%이다.

실험에 사용된 자철석의 배합은 한국 표준기준인 F 2573 (KS F 2573)을 준용하였으며, 본딩의 경우 일반 포틀랜드 시멘트를 사용하여 KS L 5201을 준용하였다. Table 2 는 제작된 시험체의 골재 함량에 따른 배합표를 보여준다. 자철석은 강원도 정선에서 채광되었으며, 시험체는 공장생산을 통해 제작하였다.

또한 Table 2는 콘크리트 배합에 사용된 골재 중 자철석의 특성을 XRF(X-Ray Fluorescence)를 활용하여 얻어낸 결과로 자철석 내 Fe₂O₃의 함량이 약 37%임을 확인하였다. 실험을 위한 콘크리트 샘플은 가로 30cm, 세로 30cm이고 두께는 5cm, 10cm, 20cm의 세 가지 크기로 제작되었다. 따라서 각기 다른 콘크리트 두께와 자철석 함유량을 가진 총 12개의 콘크리트 시험체에 대하여 감마선 차폐실험을 진행하였다.

2.3 실험 방법

감마선원은 1μCi 강도의 Cs-137가 사용되었다. Cs-137이 방출하는 감마선의 에너지는 661.7 keV로 핵무기 효과에 의한 낙진의 감마선 에너지와 유사하다. 그리고 감마스펙트럼 측정에는 이동식 HPGe(High Purity Germanium) 검출기를 사용하였다. HPGe 검출기는 반도체검출기로 NaI(Sodium

Iodine)와 같은 섬광검출기보다 높은 효율과 우수한 분해능을 가지고 있어 정확한 분석을 하기 위해 적합하다[8]. 다중채널 분석기의 (Multi Channel Analyzer, MCA) 채널수는 8,192 개로 최대 3MeV의 에너지를 측정할 수 있도록 설정하였다.

실험간 선원에서 검출기까지 떨어진 거리는 35cm로 유지하였고, 선원과 검출기 사이에 12개의 콘크리트 시험체들을 번갈아가며 놓은 상태에서 감마선 스펙트럼을 5분간 측정하였다.

2.4 실험 결과

Figure 1의 콘크리트 시험체에 대한 감마선 에너지 스펙트럼에서는 콘크리트의 두께가 증가될수록 선형감쇠법칙에 따라 감소함을 확인할 수 있었다.

Table 3. Counts on 661.7 keV energy peak

ratio of magnetic aggregate	5cm	10cm	20cm
0%	5,389	2,565	390
25%	4,944	2,075	276
50%	5,082	2,565	262
100%	4,421	1,409	136

* Counts on 661.7 keV energy peak without shielding material : 16,573 counts

Table 3은 콘크리트 내 자철광 함량에 따른 661.7 keV 에너지의 측정치(Counts) 값을 보여준다.

Cs-137 선원과 HPGe 검출기 사이의 이격 거리 및 콘크리트 차폐재 배치 등을 고려한 실험조건에 맞는 선형감쇠법칙은 Eq. (4)와 같다.

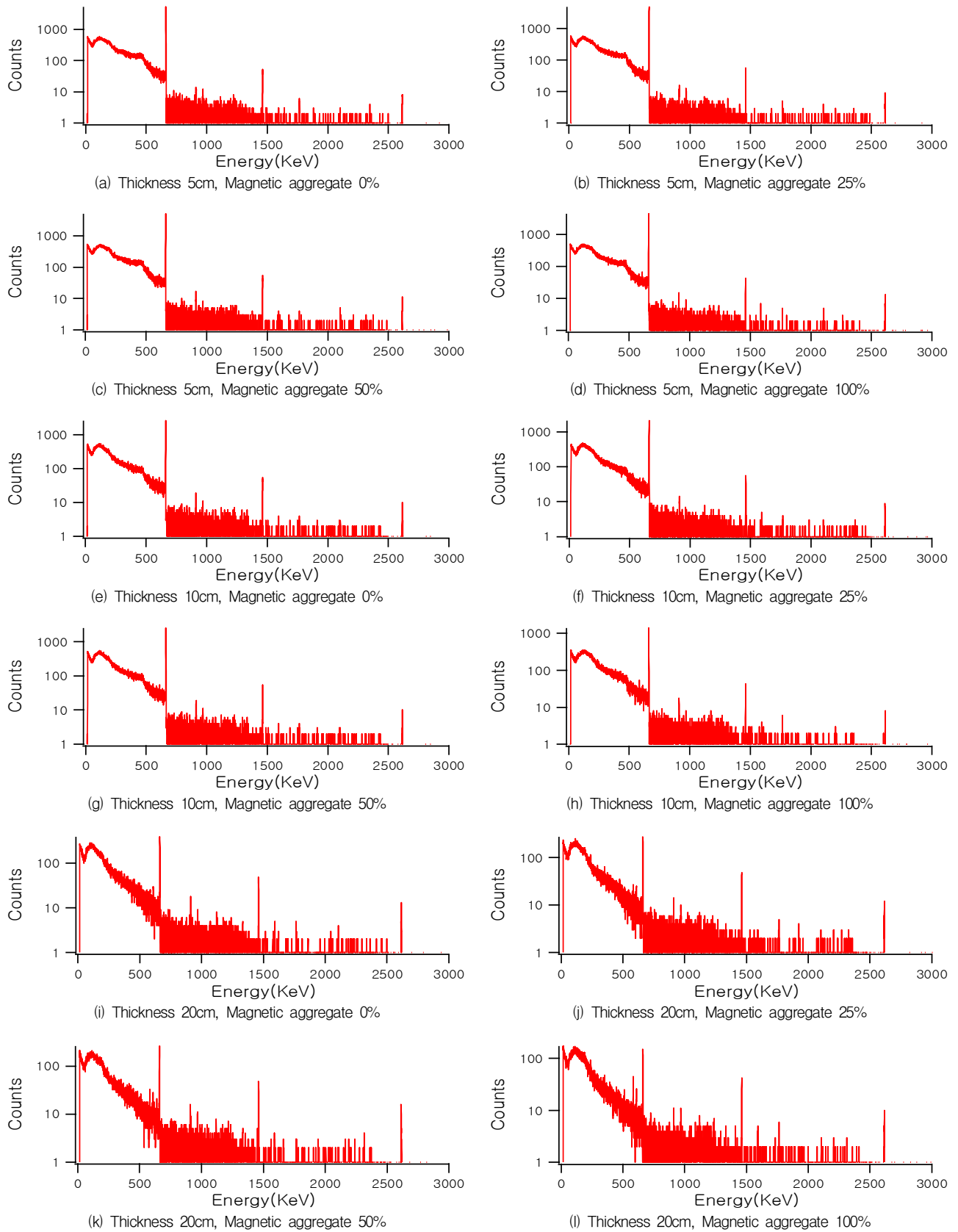


Figure 1. Cs-137 spectra for magnetic aggregate concrete shielding samples

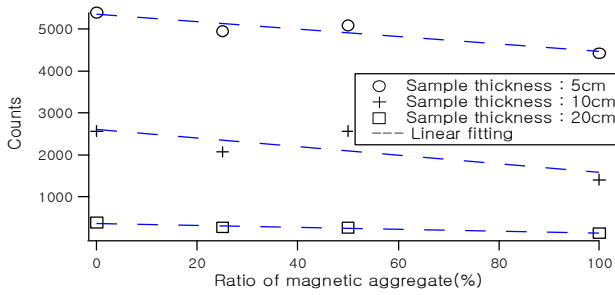


Figure 2. Trend of counts on 661.7 keV energy peak by changing the ratio of magnetic aggregate

$$I = I_0 e^{-(\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2)} \quad (4)$$

x_1 = 콘크리트의 두께,
 μ_1 = 콘크리트의 선형감쇠 상수,
 x_2 = 선원과 측정기 간 빈공간의 거리,
 μ_2 = 공기의 선형감쇠 상수

실험에서 얻은 결과 값을 이용하여 콘크리트의 선형감쇠계수를 계산하기 위한 Eq. (5)를 Eq. (4)로부터 유도할 수 있다.

$$\mu_1 = \left[\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) - \mu_2 x_2 \right] / x_1 \quad (5)$$

앞서 살펴본 콘크리트의 두께에 따른 차폐효과 영향과 더불어 자철석 함량이 증가할수록 Figure 2와 같이 차폐효과가 좋아지는 경향성을 확인할 수 있었다.

3. 수치해석

3.1 해석 방법

몬테카를로 확률기법이 적용된 MCNP 프로그램은 알파선, 베타선, 감마선, 중성자 등과 같은 방사선의 반응을 모사할 수 있다[4]. 따라서 이 프로그램은 원자로의 임계수치, 방사선 차폐 효과, 인체 피폭선량 측정 등을 계산할 때 사용될 수 있다. 본 연구에서는 MCNP6 프로그램 사용하여 자철석이 포함된 콘크리트 혼합물의 차폐 효과를 확인하고 선형 감쇠 계수를 계산하였다.

수치해석에서는 실험과 동일한 12개의 조건을 모사하였다. 방사능 선원은 원통형의 Cs-137 선원으로 정의되었다. 감마선은 선원에서부터 방출되어 콘크리트와 반응하며 차폐된다. 검출기는 실험조건과 동일한 HPGe 검출기로 정의되었고 F8 tally[4]를 사용하여 감마스펙트럼을 기록하도록 하였다. 여러 콘크리트 샘플들의 감마선 차폐 분석을 위해 각 시뮬레이션

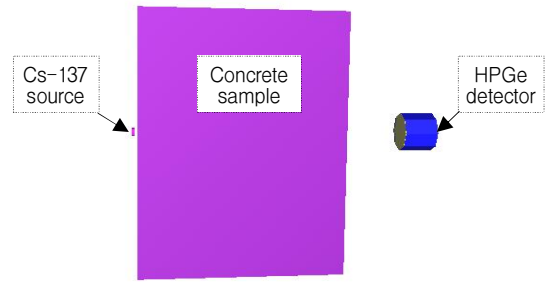


Figure 3. MCNP modeling of concrete sample

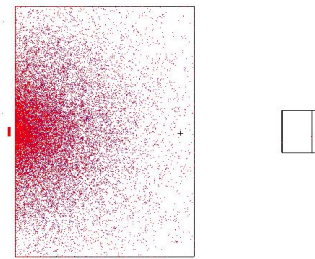


Figure 4. Collision modeling of gamma rays and concrete sample

당 10억 개의 경우를 실행시켰다. 이와 같이 많은 경우를 시뮬레이션 하여 오차를 1%이하로 낮출 수 있었다.

Figure 3은 MCNP input의 기하학적 3D구조를 보여주고 있으며, Figure 4는 선원으로부터 나오는 감마선의 콘크리트 샘플과의 충돌 반응을 시각화 한 것이다.

3.2 수치해석 결과

실험 및 수치해석 결과와 더불어 Xcom 데이터로부터 일반 콘크리트의 선형감쇠계수도 비교할 수 있다[9]. 미국 NIST (National Institute of Standards and Technology)는 Xcom이라는 인터넷 공개정보 데이터를 통해 광자 에너지 1keV부터 100GeV의 대상물질과의 반응확률을 제공한다 [10]. 특히 광자의 산란, 광전흡수, 전자쌍생성 등의 확률 값을 단일물질뿐만 아니라 혼합물질에 대해서도 제공하고 있다. Table 4에서는 Xcom에서 제공하는 데이터 중에서 일반 콘크리트의 661.7keV 광자에 대한 선형감쇠계수와 실험 및 MCNP 수치해석 결과로부터 수리적으로 계산된 자철석 함량에 따른 선형감쇠계수를 보여준다.

Table 4에서 보는 바와 같이 실험 및 MCNP 수치해석으로부터의 자철석 함량이 0%인 콘크리트의 선형감쇠계수는 일반 콘크리트의 Xcom 데이터와 유사한 값을 보였다. 또한 실험 및 MCNP 수치해석 결과에서 자철석 함량이 증가할수록 일반

적으로 선형감쇠계수가 증가함을 확인할 수 있었다. 다만 실험결과에서 자철석 함량이 25%에서 50%로 높아질 때 선형감쇠계수가 감소하는 결과를 보였다. 이는 동일한 조건의 여러 시험체를 제작하여 실험을 실시하지 못한 것에 따른 오류로 판단된다.

Table 4. Linear attenuation coefficient for each sample (cm⁻¹)

ratio of magnetic aggregate	Xcom	Test result	MCNP
0%	0.21514	0.21055±0.0132	0.22084±0.00726
25%	-	0.22913±0.0112	0.23575±0.00263
50%	-	0.21763±0.0165	0.24737±0.00313
100%	-	0.25703±0.0049	0.27429±0.00362

3.3 오차분석

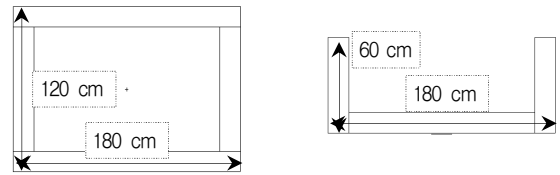
실험으로부터 얻은 측정값(Counts)에 대한 오차는 일반적으로 푸아송 분포를 따른다[2]. 따라서 오차 σ_I 는 측정치 I 의 제곱근이다. MCNP 모델링은 σ_I 에 대한 값을 M&S 결과에서 측정값과 함께 제공한다. 이에 오차의 전파 분석(Error Propagation)[11]을 적용한 선형감쇠계수(μ_1)의 오차 값(σ_{μ_1})은 다음 Eq. (6)으로 계산할 수 있으며 그 결과는 Table 4에 함께 나와 있다.

$$\sigma_{\mu_1} = \sqrt{\left(\frac{\partial \mu_1}{\partial I}\right)^2 \sigma_I^2 + \left(\frac{\partial \mu_1}{\partial I_0}\right)^2 \sigma_{I_0}^2} \quad (6)$$

4. 자철석 중량 콘크리트의 유개호 적용성

자철석이 함유된 콘크리트 샘플에 대한 실험 및 모델링에서의 감마선 차폐 성능은 일반 콘크리트의 감마선 차폐 성능보다 좋은 것으로 확인이 되었다. 따라서 자철석이 함유된 콘크리트를 군 구조물에 적용할 경우 피탄 성능에서도 우수한 성능을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 핵 및 방사능전에서 낙진으로부터의 감마선 차폐 성능도 향상될 것으로 판단된다.

따라서 전투원을 보호하기 위한 Figure 5에서 나와 있는 바와 같이 군 규격[12]에 맞는 개인호를 모델링하여 자철석 함량별 감마선 차폐효과를 확인하였다. 접적시설 방호성능 평가 연구 두께 20cm의 유개호에 대해서 Figure 6과 같이 모델링 하였다.



(1) Front view (2) Top view

Figure 5. Personal protective structure

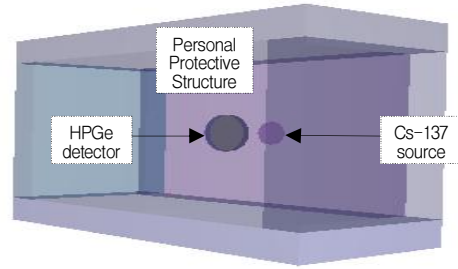


Figure 6. MCNP modeling of personal protective structure

Table 5는 모델링을 통해 계산된 유개호의 자철석 함량별 선형감쇠계수 결과를 보여준다. 결과에서 보여준 바와 같이 자철석 함량비가 높을수록 선형감쇠계수가 증가하였고, 그만큼 감마선 차폐효과가 좋아졌음을 확인할 수 있었다.

Table 5. Linear attenuation coefficient for personal protective structure (cm⁻¹)

ratio of magnetic aggregate	MCNP
0%	0.234148±0.00
25%	0.248105±0.00
50%	0.26155±0.00
100%	0.290678±0.00

5. 결 론

본 연구에서는 자철석이 포함된 콘크리트의 감마선 차폐 성능을 확인하였다. 이를 위해 자철석 함량과 콘크리트 표적의 두께에 따라 12개의 샘플을 제작하여 실험을 진행하였다. 또한 수치해석을 실시하여 실험치와 해석치를 비교하였다. 이번 연구를 통해 밝혀진 결과는 다음과 같다.

첫째, 콘크리트 두께가 증가에 따른 감마선 차폐성능이 선형감쇠법칙과 일치하였다. 또한 콘크리트 골재에 자철석 함유량

이 증가할수록 일반 골재를 사용한 콘크리트보다 감마선 차폐 성능도 향상됨을 확인할 수 있었다.

둘째, 균 구조물 중 하나인 전투원의 유개호에 대한 컴퓨터 수치해석 결과 자철석이 포함된 콘크리트를 사용하였을 경우 감마선 차폐효과가 증가함을 확인할 수 있었다. 따라서 유개호 외에는 특별한 방사능 차폐수단이 없는 일선부대에서는 전투원 보호를 위하여 본 연구에서의 결과 활용성이 클 것으로 사료된다.

다만, 양생과정에서 골재의 자체 중량에 따른 하부로의 쏠림 현상에 대한 제어, 함량이 25%에서 50%로 높아질 때 선형감쇠 계수가 감소하는 실험결과에 대한 규명에 대한 보완 및 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

요 약

핵 및 방사능전 상황에서 방사선에 의한 인명피해를 줄이기 위한 방안으로서 유개호에 자철석이 포함된 중량 콘크리트의 적용 가능성을 확인해보았다. 이에 본 연구에서는 자철광 콘크리트의 방사선 차폐효과를 분석하기 위하여 감마선원을 사용하여 차폐실험을 진행하였고 실험조건과 동일한 몬테카를로 모델링도 하였다. 그 결과 자철광의 함량이 증가할수록 감마선에 대한 차폐효과가 향상됨을 확인할 수 있었다. 향후 자철광 콘크리트가 군사적 목적의 시설물에 적용될 경우 방사선 차폐 측면에서 효과를 얻을 수 있을 것이라 기대한다.

키워드 : 방사선 차폐, 자철석 중량 콘크리트, 몬테카를로 모델링

Funding

This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2019S1A5A2A03046683).

ORCID

Sangkyu Lee, <https://orcid.org/0000-0002-5919-2364>

Hochan Lee, <https://orcid.org/0000-0001-7228-0062>

Gunwoo Lee, <https://orcid.org/0000-0003-0309-1916>

Dahee Han, <https://orcid.org/0000-0003-4637-2961>

Young-Jun Park, <http://orcid.org/0000-0003-4006-8192>

References

1. Glasstone S, Dolan PJ. The effects of nuclear weapons. 3rd ed. Washington, D.C.(USA): US Department of Defense; 1977. p. 28-30.
2. Dong Yang Engineering & Construction. Study for Improving the Protection ability of Concrete Structure. Seoul (Korea): Korea Military Academy; 2005. p. 44-6. Korean.
3. Kim SB, Kang YC, Lee JC, Baek SH, Park YJ. An assessment for anti-piercing designs of rc slabs against small caliber bullets. Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology. 2007 Jun 29;10(2):69-75.
4. Pelowitz D, Goorley T, James M, Booth TE, Brown F, Bull J, Cox LJ, Durkee J, Elson J, Fensin ML, Forster RA, Hendricks J, Hughes HG, Johns R, Kiedrowski B, Martz R, Mashnik SG, Mckinney G, Prael R, Sweezy J, Waters L, Wilcox T, Zukaitis T. MCNP6 User's manual. NM(USA): Los Alamos National Laboratory; 2013. 27 p.
5. Knoll GF. Radiation Detection and Measurement. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons; 2010. p. 51-2.
6. Ragheb M. Gamma rays interaction with matter [dissertation]. [Urbana-Champaign (USA)]: University of Illinois at Urbana-Champaign; 2011. p. 27.
7. Kaplan MF. Concrete radiation shielding. New York: John Wiley and Sons; 1989. p. 137-42.
8. Tsoufanidis N, Landsberger S. Measurement and detection of radiation. Third Edition. New York(USA): Taylor & Francis; 2010. 236 p.
9. Medhat M, Shirmardi S, Singh V. Comparison of Geant 4, MCNP simulation codes of studying attenuation of gamma rays through biological materials with XCOM and experimental data. Journal of Applied & Computational Mathematics. 2014 Aug;3(6): 1000179. <https://doi.org/10.4172/2168-9679.1000179>
10. National Institute of Standards and Technology; [Internet]. MD (USA): XCOM: Photon cross section database(version 1.1.2)[updated 2019 Nov. 26, cited 2019 Dec. 23]:[about data]. Available from: <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>
11. Pentia M, Iorgovan G, Mihul A. Multiple scattering error propagation in particle track reconstruction [dissertation]. [New York (USA)]: Cornell University; 1995. p. 2-6.
12. Republic of Korea - Army Headquarter. Stronghold and Protective Facility. Gyeryong (Korea): Republic of Korea - Army Headquarter; 1998. p. 84-92. Korean.