Journal of the KIMST, Vol. 21, No. 4, pp. 456-463, 2018
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2018.21.4.456

Research Paper 소재 · 나노 · 공정 부문

소구경 개인화기 격발신호 발생장치의 자기차폐효과 분석

이기수*,1) · 안준모1) · 채제욱2)

1) 국방과학연구소 제4기술연구본부
2) 국방과학연구소 제5기술연구본부

Magnetic-Shielding Effectiveness Analysis of the Trigger Assembly of Small Arms

Kisu Lee*,1) · Joon Mo Ahn1) · Je-Wook Chae2)

1) *The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*
2) *The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 8 February 2018 / Revised 29 May 2018 / Accepted 6 July 2018)

ABSTRACT

With the development of weapon systems by mounting various sensors, it makes important to analyze the precise functioning of sensor to external environment. In the case of small arms with magnetic sensor, the malfunction of small arms might be caused by strong external magnetic fields. In this study, the effects of magnetic sensor on external magnetic fields were analyzed, and optimal magnetic shield and shield structure were designed through M&S. In addition, the magnetic-shielding effectiveness of magnetic sensor in small arms was verified with commercial shielding materials. As a result, it was demonstrated that the Fe-Cu-Si-Nd-B with the structure of multi-layer metallic shields was shown the magnetic-shielding effectiveness of 83 % for an external permanent magnet and 19 % for an alternating magnetic field of 180 dBpT at 60 Hz, respectively.

Key Words : Small Arms(소구경 개인화기), Magnetic Sensor(자기센서), Magnetic-Shielding Effectiveness(자기차폐효과), Multilayer Metallic Shields(다중 차폐)

1. 서 론

현대전은 과거 병사의 육체적 능력으로 적을 섬멸하는 개념에서 첨단화된 무기체계로 적을 무력화하는 양상으로 변화하고 있다. 무기체계의 첨단화에 따라 무기체계의 기능 향상 및 다양한 임무 부여가 가능하도록 광학식 혹은 기계식 센서가 무기체계에 탑재되고 있다. 그러나 실제 전장(Battle-field)과 같은 극한환경에서 광학식 센서는 외부충격에 의한 광학 빔의 정렬오류의 문제점이 있으며, 기계식 센서는 먼지 등에 의한 미작동의 문제점으로 적용 및 운용 측면에서 한

* Corresponding author, E-mail: kslee0909@gmail.com
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology

계가 있다.

전장과 같은 외부환경에 강인하며 특정 자기장에 의해서만 반응하는 자기센서(Magnetic sensor)의 적용이 검토되고 있으나, 자기센서 역시 특정 자기장 외에 외부 자기장에 의해 오작동 될 수 있는 단점이 있다.

소구경 개인화기에 적용되는 자기센서는 특정 자기장에 반응하여 사격통제장치에 격발신호를 인가하게 되는데 이는 세계 최초로 적용된 방식이다[1]. 그러나 최근 비격발 상태의 소구경 개인화기에 외부 영구자석(직류 자기장) 및 60 Hz의 외부교류자기장이 인가되었을 때 비정상 격발신호 발생 오작동 가능성이 제기됨에 따라 소구경 개인화기의 자기 영향 최소화를 위한 대책이 요구되고 있다. 따라서 본 연구는 외부 직류 및 교류자기장(180 dBpT @60 Hz)에 대하여 각각 60 %, 10 % 이상의 외부 자기장 영향 저감 요구에 따라, 소구경 개인화기 격발신호 발생장치에 자기차폐재를 이용한 자기차폐효과를 M&S 하였으며, M&S를 통해 도출된 결과를 적용하여 자기차폐성능을 시험/분석하였다.

2. 해석기본이론

소구경 개인화기의 자기 영향 최소화 M&S는 Maxwell 이론과 시변 자기장에서의 유도전류 해석 기법을 이용하여 해석하였다. 직류 자기장(정 자기장)의 기본방정식은 다음과 같다[2,3].

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \text{ (자속보존의 법칙)} \tag{1}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J_0} \text{ (암페어의 주회법칙)} \tag{2}$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{3}$$

시변자기장에 의해 유도되는 전류의 계산을 위한 기본방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \text{ (전류 연속방정식)} \tag{4}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \text{ (옴의 법칙)} \tag{5}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \vec{B} \tag{6}$$

식 (4)~(6)에서 $\vec{E}$, $\vec{B}$, ω, σ, $\vec{J}$는 유도전계강도, 자속밀도, 각주파수, 도전율, 유도 전류밀도이고 시간미분은 $j\omega$로 치환하였다. Fig. 1은 외부 인가 자기장에 대해 수직한 타원단면에 유도되는 전류밀도의 벡터도로써 수치는 최대치로 표현된 것으로 유도 전류는 외부 인가 자기장을 상쇄하는 방향으로 발생함을 알 수 있다. 따라서 유도전류에 의해 발생되는 자기장(2차 자기장) 효과는 고려하지 않았다.

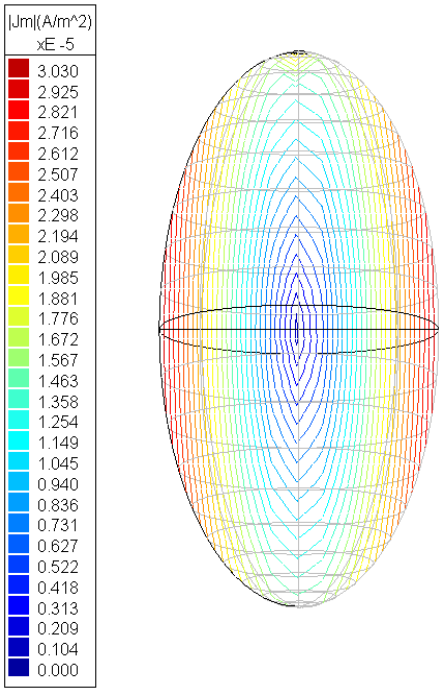

Fig. 1. Induced current density distribution of elliptic cross-section perpendicular to an external magnetic field

상기의 Maxwell 이론과 시변 자기장에서의 유도전류 해석 이론을 기반으로 Fig. 2와 같은 해석모델을 이용하였다. 자기센서의 표면자속밀도(MFD : Magnetic Flux Density)는 자기센서에 작용되는 자기장의 크기로 정의되며, 외부 자기장 환경에 따른 자기센서 표면자속밀도 변화는 Fig. 2(c)에서 보는 바와 같이 ①의 위치에서 ②→③→④로 변하는 길이방향에 따라 해석하였다. 이와 같이 자기센서의 표면자속밀도 해석을 통하여 자기차폐재에 의한 자기센서의 외부 자기장 영향을 고찰하였다.

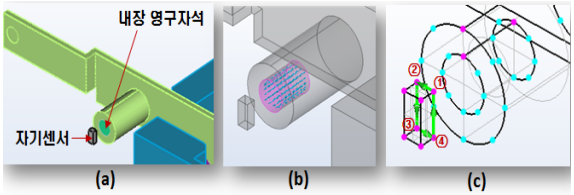

Fig. 2. Analytical model of magnetic flux density : (a), (b) structure of magnetic sensor and embedded magnet and (c) analytical method of magnetic flux density for magnetic sensor

3. 자기차폐효과 M&S

소구경 개인화기의 자기영향 최소화를 위하여 자기차폐재 적용 방안을 고려할 수 있다[4,5]. 선행연구에서 판상 형태의 자기차폐 구조를 이용하여 격발신호 인가를 위한 '격발' 상태에 대한 제한적인 조건에 대하여 자기차폐 효과를 분석하였다[5]. 자기차폐재 크기(자기센서 면적의 8배 이상)가 커질수록 차폐재 두께와 투자율에 관계없이 34 % 이상의 안정적인 자기차폐효과를 확인하였다.

그러나 소구경 개인화기의 자기영향 최소화를 위해서는 자기센서가 구동되지 않는 상태(즉 '비격발' 상태)에서 외부 자기장에 의한 자기센서의 자기차폐효과를 해석할 필요가 있다. 또한 크기가 무한히 큰 자기차폐재를 적용할 수 없으므로 Fig. 3과 같이 소구경 개인화기에 적용될 수 있는 실형상 자기차폐영역에 대한 자기차폐성능을 해석하였다.

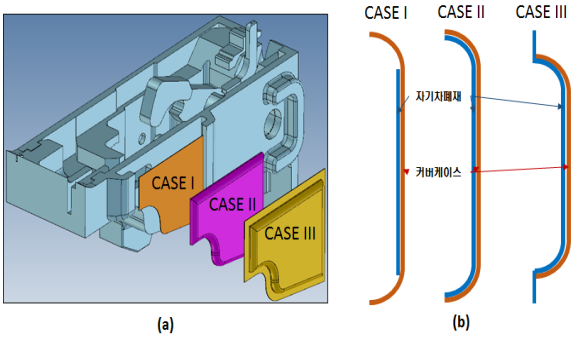

Fig. 3. Schematic diagram of small arms applied magnetic shield materials with (a) real shape and (b) cross-sectional shape

Fig. 3의 해석 모델은 소구경 개인화기의 실제 크기를 모사하였으며, Fig. 3(a)의 소구경 개인화기 몸체와 Fig. 3(b)의 커버 케이스는 알루미늄 합금 소재를 적용하였다. Fig. 3(a)의 소구경 개인화기 내부의 firearm link, trigger와 hammer 등과 같은 구성품은 기계합금강 소재를 적용하여 해석하였다. 뿐만 아니라 자기차폐재의 형상 최적화를 위하여 자기차폐재 가장자리 형상 변화에 따른 자기차폐효과를 분석하였다. CASE I은 평판형 자기차폐재를 가정하였으며, CASE II는 커버 케이스와 동일한 곡면을 가지는 경우와 CASE III는 CASE II 형상에 3 mm의 플랜지 폭의 형상을 가지는 자기차폐재로써 각각의 자기차폐재 가장자리 형상변화에 따른 자기차폐효과를 해석하였다.

자기차폐성능은 자기차폐재가 적용되었을 때와 적용되지 않았을 때의 자기센서의 표면자속밀도 변화차이로 해석하였으며, 자기차폐효과(SE : Shield Effect)는 식 (7)와 같이 정의된다.

$$Shield\ Effect(SE) = \left(1 - \frac{B_{shield}}{B_{w/o\,shield}}\right) \times 100 \qquad (7)$$

3.1 외부 직류 자기장 환경에서의 자기차폐효과

자기센서가 비격발 상태에서 외부 직류 자기장은 실린더 형상(Φ 3 × H 3(mm))의 NdFeB 영구자석(잔류자화 : 6,850 gauss)을 자기센서 표면에서 6.5 mm 이격된 위치에서 인가하였다. 이때 투자율은 10,000이며 두께가 0.2 mm인 자기차폐재를 가정하였으며, 자기차폐재 적용 여부에 따른 격발신호 발생장치의 자기장 분포는 Fig. 4와 같다.

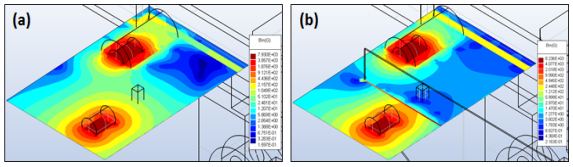

Fig. 4. Magnetic field distribution of trigger assembly (a) without and (b) with magnetic shield when an external permanet magnet was applied

Fig. 5는 외부 직류 자기장 환경에서 자기차폐재가 적용되지 않았을 때와 다양한 형상의 자기차폐재(Fig. 3(b))가 적용되었을 때의 자기센서의 표면자속밀도를 나타낸다.

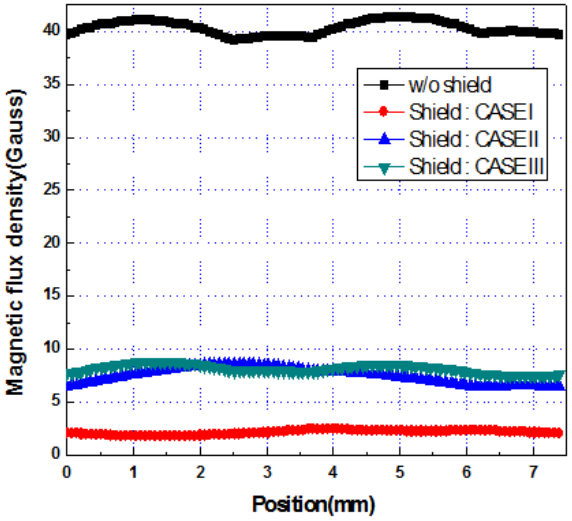

Fig. 5. Surface magnetic flux density of magnetic sensor according to application of magnetic shielding by an external permanent magnet

Fig. 5로부터 도출된 표면자속밀도를 식 (7)의 자기차폐효과로 해석한 결과는 Table 1과 같다.

Table 1. Magnetic shielding effect dependent on shapes of magnetic shield in DC magnetic field

자기센서 상태	‘비격발’ 상태		
자기차폐재 형태	CASE I	CASE II	CASE III
최대 자기차폐효과 [%]	95.58	83.67	81.18
평균 자기차폐효과 [%]	94.68	81.24	79.94

외부 영구자석(직류 자기장) 환경에서 투자율 10,000의 자기차폐재를 적용하였을 경우, 형상에 관계없이 외부 직류 자기장에 대하여 60 % 이상의 외부 자기장 저감 효과를 보인다. CASE II와 CASE III의 경우는 CASE I보다 낮은 자기차폐효과를 나타나는데, 이는 CASE II와 III의 가장자리가 CASE I보다 자기센서에 근접되어 있어 자화된 자기차폐재 가장자리에서 발생하는 누설 자기장의 cross-talk 효과로 낮은 자기차폐효과를 나타내는 것으로 추정된다[7-9].

3.2 외부 교류 자기장 환경에서의 자기차폐효과

외부 교류 자기장은 루프 안테나(Loop antenna)를 이용한 자기장 인가 방법을 고려하였으며, Fig. 6과 같이 자기센서 표면에서 50 mm 떨어진 위치에서 180 dBpT (= 10 gauss)(@60 Hz)의 교류 자기장이 인가되는 환경을 모사하였다.

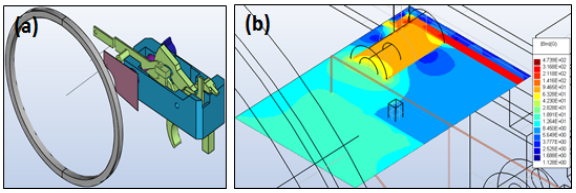

Fig. 6. Schematic diagram of (a) loop antenna and (b) magnetic field distribution of trigger assembly in an alternating magnetic field

외부 교류 자기장 환경에서의 자기차폐재 적용 유무에 따른 자기센서 표면자속밀도는 Fig. 7과 같다.

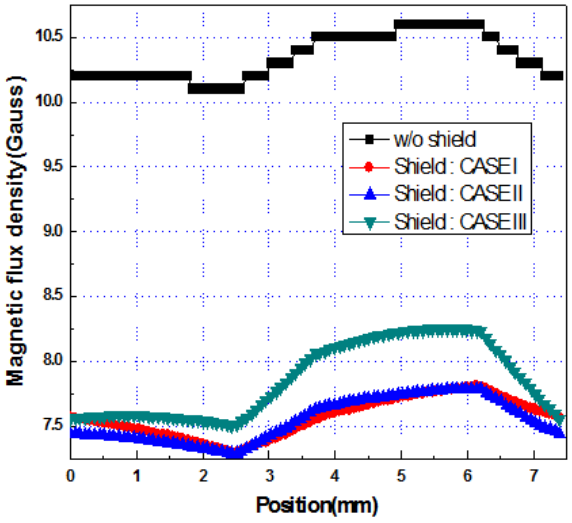

Fig. 7. Fluctuation of surface magnetic flux density by position of magnetic sensor in the alternating magnetic field of 180 dBpT at 60 Hz

Table 2는 외부 교류 자기장 환경(180 dBpT @60 Hz)에서의 자기차폐효과를 해석한 것으로 형상에 관계없이 10 % 이상의 외부 자기장 저감 효과를 가진다. CASE III보다는 CASE I 혹은 CASE II가 최적의 자기

차폐 구조임을 알 수 있는데 이 결과는 교류 자기장 환경에서는 CASE III 구조에 잔존하는 remanent magnetic domain에 의한 cross-talk 효과가 더 크게 작용하는 것으로 해석된다.

Table 2. Magnetic shielding effect dependent on scheme of magnetic shield materials in an alternating magnetic field of 180 dBpT at 60 Hz

자기센서 상태	‘비격발’ 상태		
자기차폐재 형태	CASE I	CASE II	CASE III
최대 자기차폐효과 [%]	28.23	28.13	25.88
평균 자기차폐효과 [%]	26.87	27.05	24.04

3.3 외부 자기장 환경에서의 자기차폐재 최적화

자기차폐재의 형상과 관계없이 자기차폐재의 두께와 투자율이 각각 0.2 mm와 10,000을 가지는 자기차폐재 적용 시 외부 자기장에 대하여 우수한 자기차폐효과를 보임을 알 수 있다. 그러나 일반적으로 알려진 자기차폐재(규소강판 혹은 permalloy)를 적용하기 위해서는 자기차폐재의 투자율에 따른 자기차폐효과 해석이 필요하다. 여기에서 투자율은 자성재료가 차폐재로 적용될 때 차폐특성을 구분하는 용어로써 자성재료가 외부 자기장에 대하여 자화되는 정도를 나타내는 물질 상수를 의미하며 식 (8)과 같이 정의된다[2].

$$\mu = \frac{B}{H} \tag{8}$$

외부 교류자기장 환경에서는 CASE I과 CASE II의 자기차폐재 형태가 유사한 자기차폐효과를 보이나 외부에서 직/교류 자기장이 복합적으로 작용될 경우 CASE I 형상의 자기차폐재가 우수한 자기차폐효과를 나타낼 수 있다. 따라서 자기센서가 비격발 상태의 조건에서 두께 0.2 mm를 가지는 CASE I형상의 자기차폐재에 대하여 투자율에 따른 자기차폐효과를 해석하였다. Fig. 8은 외부 자기장에 따라 투자율 변화에 따른 평균자기차폐효과를 나타내는 것으로 투자율 2,000 이상에서 외부 직/교류 자기장에 대하여 효과적인 자기차폐효과를 보임을 알 수 있다. 따라서 소구경 개인화기의 외부 자기장 영향을 최소화를 위한 자기차폐재는 투자율은 최소 2,000 이상이어야 하며 CASE I과 같은 평판 구조를 가져야 한다.

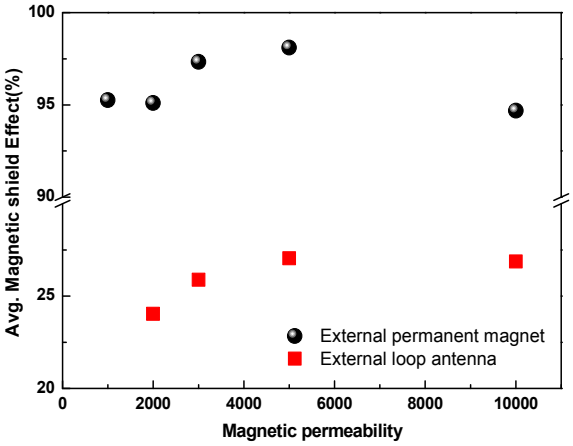

Fig. 8. Calculated average shield effect in the influence of permeability of magnetic shield material with the shape of CASE I(magnetic sensor : ‘inactive’ state)

4. 자기차폐 성능시험

자기차폐 성능시험은 격발신호 인식을 위한 자기센서가 포함된 통합전장조립체(Fig. 9)를 이용하여 수행하였다.

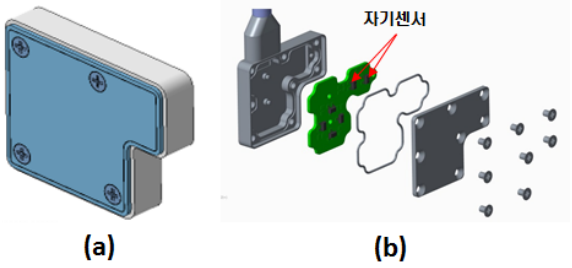

Fig. 9. (a) Apparatus and (b) internal structure of trigger assembly

외부 자기장 환경에 대한 자기차폐 성능시험은 M&S 해석과 동일한 방법으로, 통합전장조립체에 자기차폐

재 적용 유무에 따른 자기장 변화를 측정함으로써 자기차폐재 성능을 분석하였다(Fig. 10). 자기차폐재는 통합전장조립체 안쪽 면에 위치할 때(Type I(Fig. 10(b)) 와 표면에 위치할 때(Type II(Fig. 10(c))의 두 가지 조건에 대하여 고려하였다.

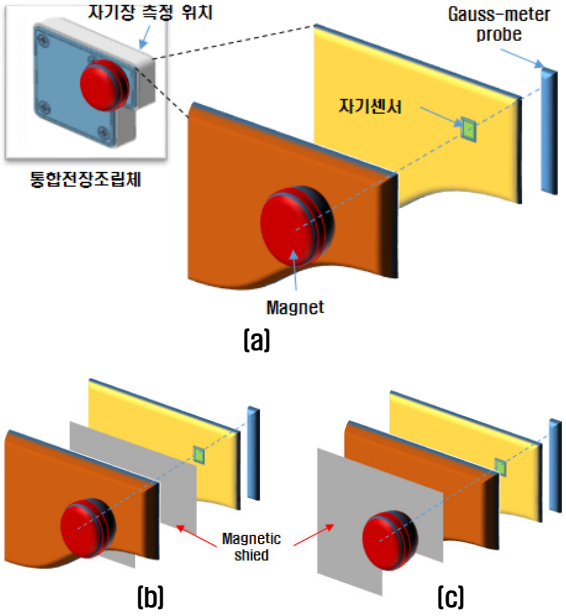

Fig. 10. Apparatus for magnetic shielding performance test without magnetic shield material(a) and with magnetic shield material(b, c)

외부 직류 자기장은 표면 자기장이 1,000 gauss를 가지는 영구자석을 사용하였으며, 외부 교류 자기장은 60 Hz의 교류 자기장을 발생할 수 있는 솔레노이드 코일을 적용하였다. 자기차폐재 적용 유무에 따른 자기장 변화는 Lakeshore Cryotronics사의 가우스미터(Model 410)를 이용하여 측정하였다.

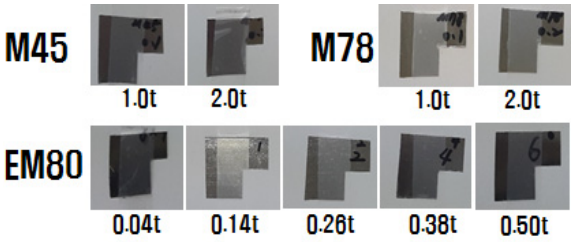

Fig. 11. Shapes of magnetic shield materials

자기차폐 성능시험에 적용된 자기차폐재는 Fig. 8의 해석과 같이 투자율 2,000 이상의 상용 자기차폐재를 적용하였다. 성능시험에 적용된 자기차폐재의 특성과 적용 형상은 각각 Fig. 11과 Table 3과 같다.

Table 3. Property of magnetic shield material

기호	Material	초기 투자율	최대 투자율	보자력 (A/m)	제조사
M45	permalloy (Ni-45wt%)	2,500	17,000	0.28	Nilaco (일본)
M78	permalloy (Ni-78wt%)	25,000	60,000	0.30	
EM80 (0.14t)	Fe-Cu-Si -Nd-B		100,000	0.53	EMIsorb (한국)

외부 직류 자기장이 인가된 환경에서 자기차폐재가 적용되지 않았을 경우, 62.7 gauss의 외부 직류 자기장이 자기센서에 작용되었다. 자기차폐재 적용 위치(Type I 혹은 Type II)에 따른 자기장 변화를 측정하였으며 측정된 자기장 크기를 이용하여 식 (7)와 같이 자기차폐효과를 분석하였다. 자기차폐재의 종류와 두께에 따른 자기차폐효과는 Fig. 13과 같다. 두께 2 mm의 M45와 M78 자기차폐재가 Type I(Fig. 10(b))과 같이 통합전장조립체 안쪽에 위치할 때 우수한 자기차폐효과를 보인다.

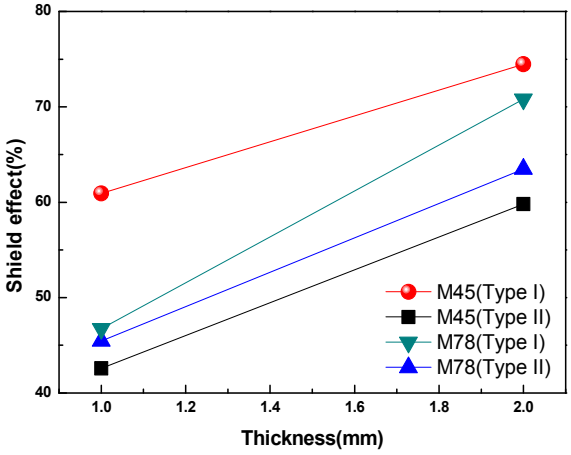

Fig. 12. Shield effect of M45 and M78 with various thickness by the external permanent magnet

Table 4의 EM80(A)과 EM80(B) 자기차폐재는 접착 형태로 두께 변화에 따른 자기차폐성능을 시험 분석하였다. Fig. 14에서와 같이 EM80(A) 자기차폐재를 다층으로 적층했을 때 자기차폐효과가 증가하는 경향을 보이며 특정 두께 이상에서는 자기차폐효과는 포화된다.

Table 4. Property of EM80

기호	Material	두께 (mm)주1)	최대 투자율
EM80(A)	Fe-Cu-Si-Nd-B	0.14	100,000
EM80(B)	Fe-Cu-Si-Nd-B	0.04	120,000

주1) 접착부 보호필름 0.02 mm를 포함한 두께

자기차폐재 위치는 Fig. 13과 동일하게 통합전장조립체 안쪽에 위치할 때 M45와 M78의 자기차폐재보다 얇은 두께에서 우수한 자기차폐효과를 보였다.

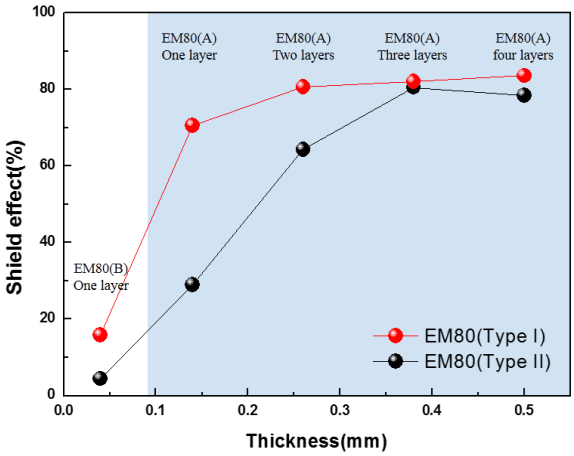

Fig. 13. Shield effect of EM80(A) with various thickness by the external permanent magnet

단일층의 M45와 M78보다 EM80 다층 구조의 자기차폐재가 보다 얇은 두께에서 우수한 자기차폐효과를 보이는데 이는 투자율 차이보다는 다층 구조에 의한 자기차폐 효과로 분석된다. 이러한 다층 구조의 다중차폐 효과는 Fig. 14와 같이 입사되는 자기장과 가장 가까운 층은 저투자율 고포화 물질을 이용하여 두 번째 층을 포화시키지 않는 수준까지 자기장의 크기를 줄이게 된다. 두 번째 층이 대부분의 자기장을 차폐함으로써 차폐되는 원리이다[10,11].

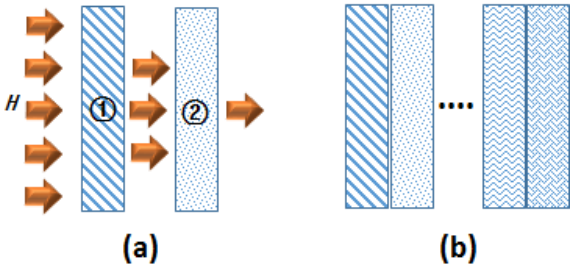

Fig. 14. (a) Principle and (b) structure of multi layer metallic shields

따라서 EM80(A)의 다층 구조에 따른 자기차폐효과가 다중차폐 효과임을 검증하기 위하여 투자율이 다른 EM80(A)와 EM80(B) 자기차폐재를 혼합 적층했을 때의 자기차폐효과를 시험하였다.

Table 5. Shield effect of multi-layer with the different structure at the position of Type II

적층구조	두께(mm)	자기차폐효과(%)
[EM80(B)/EM80(A)]×1	0.18	72.88
[EM80(A)/EM80(A)]×1	0.26	64.27
[EM80(B)/EM80(A)]×2	0.36	80.54
[EM80(A)/EM80(A)]×2	0.52	78.46

Table 5와 같이 동종의 EM80(A) 이층 구조 보다 투자율 다른 두 종류의 EM80(A)와 EM80(B) 자기차폐재를 적층한 구조에서 큰 자기차폐효과를 보임을 알 수 있다. 따라서 동종의 EM80(A) 다층 구조는 Fig. 14(a)의 원리에 의해 얇은 두께에서도 83 % 수준의 우수한 자기차폐효과를 보이는 것으로 판단된다.

EM80(A) 다층 구조를 가지는 자기차폐재에 대하여 외부 교류 자기장 환경에서의 자기차폐성능시험 결과는 Fig 15와 같다. 외부 교류 자기장(10 gauss @ 60 Hz) 인가 시 자기차폐재가 적용되지 않을 경우 10.2 gauss의 외부 교류자기장이 자기센서에 작용되었으며, 자기차폐재를 적용하였을 때 19 %의 자기차폐효과를 보였다.

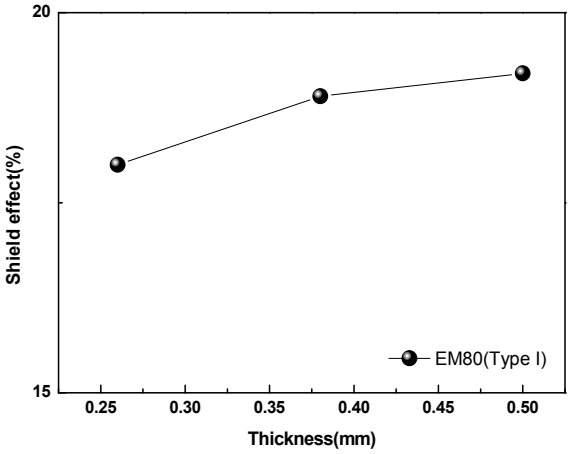

Fig. 15. Shield effect of EM80(A) with various thickness by the alternating magnetic field of 180 dBpT at 60 Hz

5. 결 론

소구경 개인화기 격발신호 발생장치의 자기센서에 미치는 외부 직/교류 자기장의 영향을 감소시키기 위하여 자기차폐효과 M&S 및 자기차폐 성능을 시험/분석하였다. M&S를 통하여 투자율 10,000의 자기차폐재를 적용하였을 때 외부 직류 자기장 및 교류 자기장(180 dBpT @60 Hz)에 대해 각각 94 %, 26 % 이상의 외부 자기장 영향이 감소함을 해석하였다. 결과적으로 투자율 2,000 이상의 평판 형상을 가지는 최적의 자기차폐재를 해석 및 설계하였으며, 상용 자기차폐재를 이용한 자기차폐 성능시험에서 외부 직류 자기장 및 교류 자기장(180 dBpT @60 Hz)에 대하여 각각 83 %, 19 % 수준의 외부 자기장 영향을 최소화 할 수 있음을 확인하였다. 뿐만 아니라 성능시험을 통해 투자율이 다른 이종 자기차폐재를 다중차폐 구조로 적용할 경우, 보다 자기차폐효과를 증대시킬 수 있음을 확인하였다.

따라서 개인화기 격발신호 발생장치의 외부 자기장 영향 최소화를 위하여 자기차폐재를 적용함으로써, 외부 직류 자기장 및 교류 자기장(180 dBpT @60 Hz)에 대하여 각각 60 %, 10 % 이상의 효과적인 외부 자기 영향 최소화 조건을 M&S 및 성능시험을 통해 도출하였다.

References

[1] J. Chae, et. al., “Trigger Mechanism Using Duble Magnet of the Firearms Link and Method of Operating the Same,” Korean Patent, No. 10-2017-0156055, 2017.

[2] B. D. Cullity and C. D. Graham, “Introduction to Magnetic Materials,” A John Wiley & Sons, Inc. USA, pp. 4-20, 2009.

[3] Roger. F. Harrington, “Introduction to Electro-Magnetic Engineering,” Courier Dover Publications, USA, pp. 49-56, 2003.

[4] H. Choi, “Design of MSR for Magnetic Field Shielding of Low Frequency,” Journal of the Korean Institute of Illumination and Electrical Installation Engineers, Vol. 24, pp. 154-159, 2010.

[5] A. Yelon, et. al., “Calculation of Giant Magneto Impedence and Ferromagneic Resonance are Rigorously Equivalent,” Applied Physics Letters, Vol. 69, pp. 3084-3085, 1996.

[6] K. Lee, J. M. Ahn and J. Chae, “A Study on M&S for Magnetic Shielding Performance of Small Arms,” KIMST Annual Conference Proceedings, Materials·Nano·Process, pp. 624-625, 2017.

[7] David Johns and Patrick Deroy, “Simulating Crosstalk and EMI in Cables,” Microwave Journal, Vol. 56, pp. S1-S8, 2013.

[8] Selcuk Kose, et. al., “Shielding Methodologies in the Presence of Power/Ground Noise,” IEEE Transactions VLSI Systems, Vol. 19, No. 8, pp. 1458-1468, 2011.

[9] Douglas Brooks, “Crosstalk, EMI, and Differential Z,” CMP Media, Inc., Article, 2001.

[10] S. M. Yang, et. al., “Electromganetic Shielding Effectiveness of Multilayer Metallic Thin Film on Plastic Substrate,” J. Applied Polymer Science, Vol. 110, pp. 1403-1410, 2008.

[11] J. Joo, et. al., “High Frequency Electromagnetic Interference Shielding Response of Mixture Nad Multilayer Films based on Conducting Polymers,” J. Applied Physics, Vol. 88, No. 1, pp. 513-518, 2000.