

양쪽 끝이 열린 원통형 자기 실드캔의 3차원 자계 해석

신광호*

경성대학교 정보통신공학과, 부산시 남구 대연동 110-1, 608-736

(2011년 4월 4일 받음, 2011년 4월 19일 최종수정본 받음, 2011년 4월 20일 게재확정)

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여서 양쪽 끝이 열린 형상을 가진 원통형 3층 자기 실드를 설계하기 위한 해석을 수행하였다. 원통형 자성체의 투자율 범위 $2 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$ 에서 자기 차폐율을 검토하였고, 자성체의 길이 및 각 층간의 길이 차에 의한 자기 차폐율의 변화를 해석하였다. 투자율이 2×10^4 이상이고 각 층의 길이가 40 cm, 45 cm, 50 cm인 경우 -60 dB 이상의 자기 차폐율을 얻을 수 있었으며, 이때의 균일 자계 영역은 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 이상이였다.

주제어 : 자기 실드, 유한요소해석, 다층 원통

I. 서 론

자기 실드(magnetic shield)는 미약한 자기 현상을 측정하기 위해서 필요한 무자계 환경을 제공하기 위한 자기 실드룸(magnetic shield room)이나 자기 실드캔(magnetic shield can)을 제작하거나, 유도형 결합 노이즈(inductively coupled noise)로부터 다양한 계측 장치를 차폐함으로써 오동작을 방지하기 위해서 사용된다[1]. 최근 심장이나 뇌에서 발생하는 생체자계를 측정함으로써 의학적인 진단에 이용하려는 연구[2]나 초고감도 플럭스게이트센서(fluxgate sensor), 원자 자력계(atomic magnetometer) 등과 같이 매우 높은 자계 분해능을 가진 센서의 연구들이 활발해지면서 자기 실드의 사용이 더욱더 중요해 지고 있다[3, 4]. 직류나 저주파 자계를 차폐하기 위해서 사용되는 자기 실드는 높은 투자율을 가지는 판상의 자성체로 구성되며, 비교적 높은 주파수의 자계를 차폐하기 위해서는 높은 도전율을 가진 판상의 재료로 구성된다. 높은 주파수의 자계를 차폐하기 위해서 도전체를 이용하는 경우에는 와전류(eddy current) 효과가 이용되며, 직류나 저주파의 자계를 차폐하는 경우에는 실드를 구성하는 자성체의 자속집속(magnetic flux concentration)효과가 이용된다. 고감도 자계 센서의 성능을 검증하기 위해서는 직류에서부터 높은 차폐율을 나타내는 자기 실드가 필요하다.

본 연구에서는 자기 센서의 성능을 검증하기 위해서 필요한 원통형 자기 실드(magnetic shield)를 제작하기 위해서 유한요소해석을 수행하였다. 자기 센서의 성능을 검증하기 위해서는 센서소자와 신호처리를 위한 각종 회로를 자기 실드의 내부에 설치하여야 하고, 또, 이러한 센서 및 전자회로는 실드의 외부의 전원이나 계측기 및 인터페이스와 연결되어야 한

다. 따라서, 이러한 목적을 위해서는 원통의 양쪽 끝이 열린 형태의 자기 실드가 필요하다. 원통형 자기 실드의 설계에 대한 몇몇 연구결과들을 참고할 수 있으나[1-5], 양쪽이 열린 형태의 자기 실드에 대한 연구는 충분하지 않다. 특히, 자기 차폐율을 높이기 위해서는 실드캔을 다층화하는 것이 유용하지만 양쪽 끝이 열린 형태의 자기 실드에 있어서, 다층 자기 실드를 구성하는 자성체 원통의 각 층의 길이를 달리하였을 때의 설계 지침이 될 수 있는 정량적인 연구는 지금까지 수행된 예를 찾아 보기 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 3차원 유한요소해석을 이용하여 양쪽 끝이 열린 형태의 다층 자기 실드의 자기 차폐율에 미치는 자성체의 투자율 및 형상의 효과를 조사한 결과를 보고 한다.

II. 해석 방법

자기 실드의 자기 차폐율(magnetic shielding factor) S 는 외부에서 인가된 자계 H_e 와 자기 실드의 내부의 자계 H_i 의 비로 나타낼 수 있다. 즉, 자기 차폐율을 데시벨로 나타내면 $S[\text{dB}] = 20 \log_{10}(H_e/H_i)$ 로 표현된다. 본 연구에서는 두께 1 mm이며 상대투자율이 $2 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$ 사이의 값을 가지는 자성체판을 이용하여서 양쪽 끝이 열린 원통형 자기 실드를 제작하기 위한 해석을 수행하였다. 본 연구에서 개발하고자 하는 자기 실드는 전자회로가 포함된 자기 센서를 측정하기 위해서 사용될 것으로, 3층의 원통형 자성체를 사용하여 지구 자계에 대한 -60 dB 이상의 차폐율을 나타내는 것을 목표로 하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 해석한 자기 실드캔의 형상을 나타낸 것이다. 자성체의 두께는 1 mm로 고정하였고, 각층의 반경과 길이를 각각 d_1, d_2, d_3 그리고 l_1, l_2, l_3 로 나타내었다. 자기 실드는 일반적으로 원통의 직경이나 길이에 비해서 매우 얇

*Tel: (051) 663-5152, E-mail: khshin@ks.ac.kr

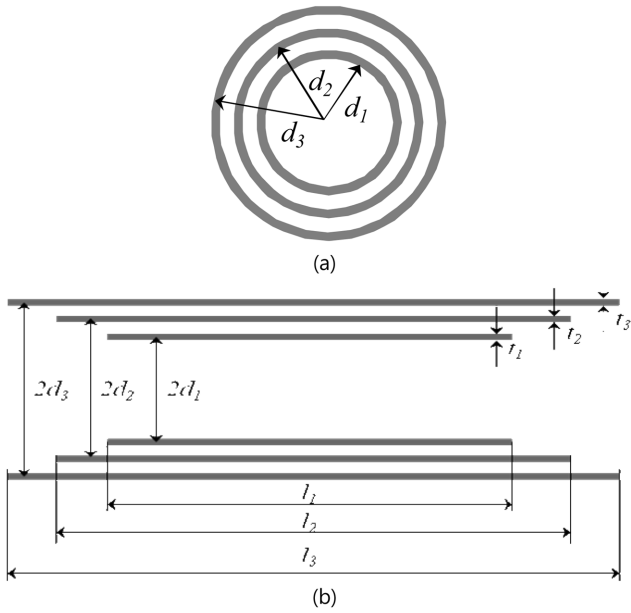


Fig. 1. Cross section view (a) and side view (b) of concentric cylinders.

은 두께의 자성체 판으로 제작된다. 이러한 형상은 일반적인 3차원 유한요소해석을 어렵게 한다. 그 이유는 체적 격자 (Mesh)의 크기가 자성체판의 두께에 비해하여서 작아지기 때문에 해석하고자 하는 공간 내의 격자수가 매우 많아지는 경향이 있으며, 해석을 위해서 많은 시간이 필요하거나 경우에 따라서는 해석이 불가능해진다. 본 연구에서는 2차원의 면요소를 3차원 구조에 적용시킴으로써 이러한 문제를 해결하였

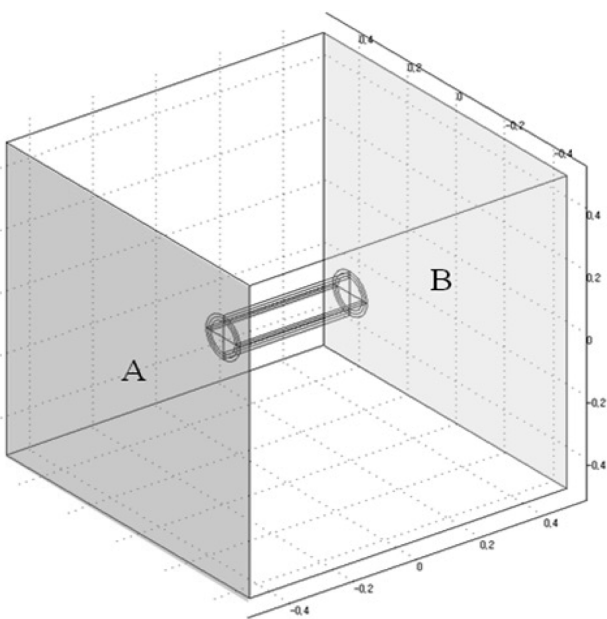


Fig. 2. Geometrical model for FEM analysis.

다. 이 경우, 해석을 위해서 2차원 면요소를 3차원 요소의 접선성분으로 고려함으로써 계산이 가능하다. 실제로 본 연구에서는 3차원 해석을 위해서는 상용 해석프로그램인 COMSOL [6]과 AC/DC모듈을 사용하였다.

Fig. 2는 해석을 위해서 제작한 기하학적 모델을 나타낸 것이다. Fig. 1에서 나타낸 자성체 원통은 3번이 각각 1m인 정육면체 내에 위치하고 있다. 해석을 위해서, 1 Oe(≈ 78.56 A/m)의 균일한 외부 자계가 자기 실드의 길이 방향으로 인가 되는 것으로 설정하였다. Fig. 2에서 정육면체의 A면에 스칼라 자위(scalar magnetic potential) V_m 이 인가되도록 하고 B에 영자위(zero magnetic potential)이 인가되도록 하여서, 자성체 원통의 길이 방향으로 균일한 자계가 인가될 수 있도록 설정하였다. 해석하고자 하는 공간 내에 전류가 존재하지 않는다고 가정할 때, 즉 $\nabla \times \vec{H} = 0$ 일 때, 자계는 스칼라 자위로부터 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\vec{H} = \nabla V_m \tag{1}$$

자속 밀도와 자계와의 관계와 자속밀도의 발산을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \tag{2}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{3}$$

위의 식(1)을 (2)에 대입하고, 또 식(2)를 식 (3)에 대입하면 다음과 같이 스칼라 자위에 대한 방정식을 얻을 수 있다.

$$-\nabla \cdot (\mu_0 \nabla V_m - \mu_0 \vec{M}) = 0 \tag{4}$$

또한, 외부 경계에서 자계는 접선성분만 있다고 가정하면 다음과 같은 경계 조건을 얻을 수 있다.

$$\hat{n} \cdot \vec{B} = \hat{n} \cdot (\mu_0 \nabla V_m - \mu_0 \vec{M}) = 0 \tag{5}$$

자기 실드를 구성하는 자성체 판은 앞에서 말한 바와 같이, 실제로 체적으로 설정하지 않고 두 체적 사이의 경계로 설정하였으며 두께를 1 mm, 상대 투자율을 $2 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$ 로 변화시키면서 해석을 수행하였다.

III. 해석 결과

3층의 원통형 자성체로 구성되는 자기 실드의 길이에 따르는 자기 차폐율의 변화율을 계산하기 위해서, 각 층의 길이를 동일하게 하고, 모든 자성체 층의 길이를 20~60 cm로 변화시키면서 해석을 수행하였다. 이 때, 자성체의 반경은 각각 $d_1 = 5$ cm, $d_2 = 6$ cm, $d_3 = 7$ cm로 설정하였다. 첫번째 자성체 원통의 반경을 5 cm로 설정한 이유는 본 연구에서 필요로 하

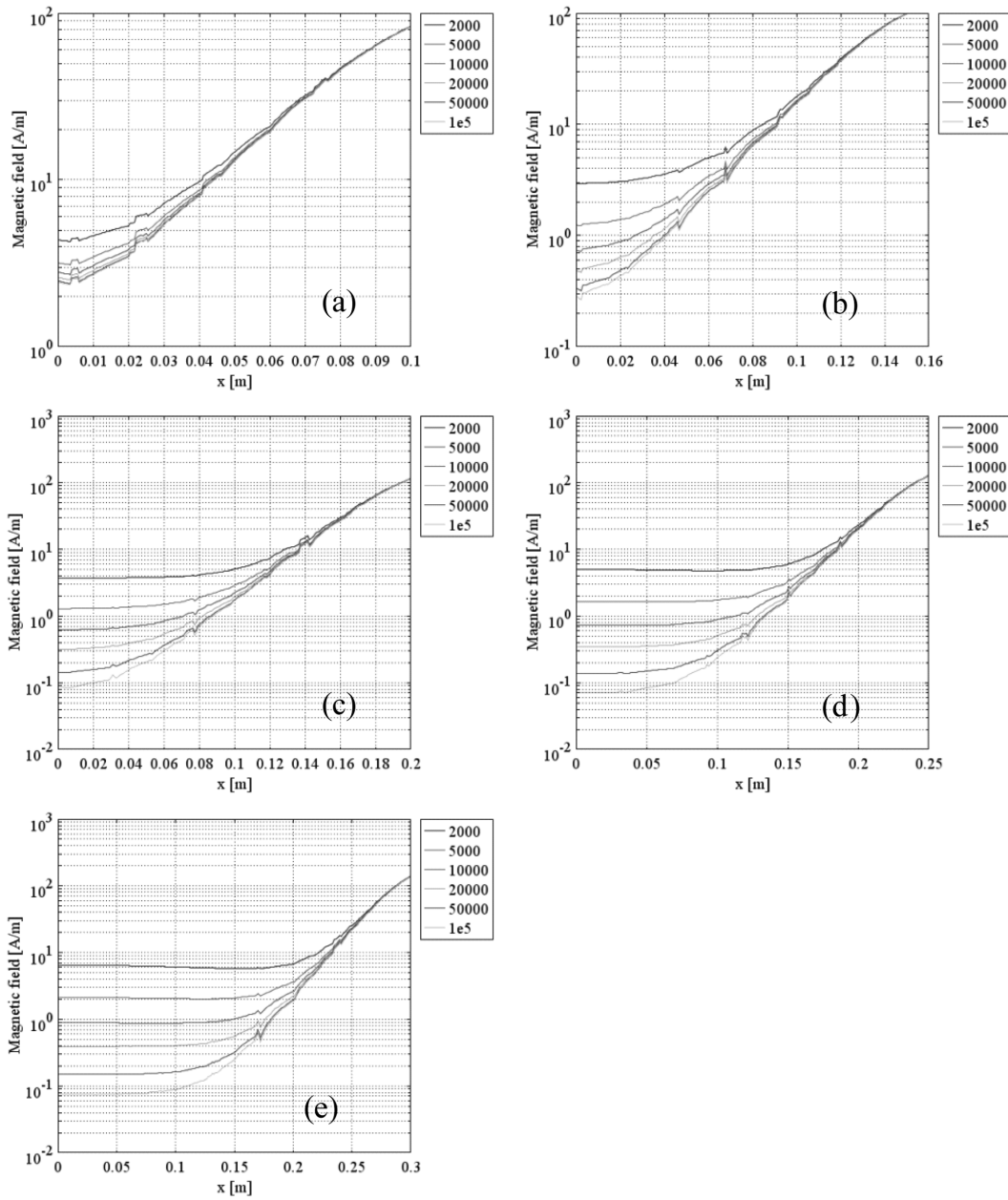


Fig. 3. Position dependence of magnetic field in shields; (a) 20 cm-long shield, (b) 30 cm-long shield, (c) 40 cm-long shield, (d) 50 cm-long shield and (e) 60 cm-long shield.

는 자기 센서의 성능 검증을 위한 필요충분 공간을 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ - ϕ 로 설정하였기 때문이다. Fig. 3은 해석 결과를 나타낸 것으로, 중심점으로부터의 자기 실드캔의 길이방향 위치에 따르는 자계의 세기를 나타낸 것이다. 자기 실드의 외부에서는 길이방향으로 78.56 A/m ($\approx 1\text{ Oe}$)의 자계를 인가한 상태에서 자기 실드의 내부에서 발생한 자계를 측정했기 때문에, 투자율의 변화에 따르는 곡선들을 함께 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 자성체 원통의 길이가 길어질수록 균일한 자계 영역이 증가한다. 또, 균일한 자계를 나타내는 영역은,

자성체의 길이가 동일할 때 투자율이 커질수록 감소한다. 이 결과로부터 분석해 보면, 투자율이 10배로 증가할수록 자기 실드 내부의 자계(중심 부근)는 대략 1/10으로 줄어들고, 균일한 자계를 나타내는 영역은 대략 1/2로 줄어드는 것을 알 수 있다.

일반적으로, 자기 실드를 제작하기 위해서 가장 많이 사용되는 뮤메탈을 고려하면 상대 투자율은 최대 1×10^5 에 달할 수 있지만, 판재의 가공 등을 고려하면 상대 투자율을 2×10^4 정도로 가정하는 것이 현실적이다[7]. 따라서, Fig. 3(c)의

Table I. Magnetic shielding factors in dB according to the length of magnetic shield.

Relative permeability	$l = 20$ cm	$l = 30$ cm	$l = 40$ cm	$l = 50$ cm	$l = 60$ cm
2000	-25.1226	-28.57	-26.5177	-23.9114	-21.6661
5000	-27.8295	-35.9901	-35.6431	-33.5622	-31.3977
10000	-28.9677	-40.5788	-42.0097	-40.6682	-38.9763
20000	-29.6077	-44.184	-47.8142	-47.1953	-46.0385
50000	-30.021	-47.4018	-54.7306	-55.1848	-54.4644
100000	-30.1644	-48.8218	-59.2473	-60.9877	-60.5081

결과로부터, 본 연구의 목표인 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ - ϕ 의 균일 자기 영역을 확보하기 위해서는 자기 실드의 길이가 40 cm 이상이 되는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 길이가 40 cm이고 상대 투자율이 2×10^4 일 때, 자기 실드의 중심부에서의 차폐율은 -47.8 dB였다. Table I은 상대투자율과 실드캔의 길이 변화에 따르는 자기 차폐율을 나타낸 것이다.

자기 실드를 다층으로 하는 이유는 외부 자계가 최외각 자성체에서부터 차례로 감쇄되어 가는 효과를 통해서, 자성체를 비교적 적게 사용하면서도 높은 자기 차폐율을 얻기 위한 것이다. 그러나, Fig. 3에서 계산한 것과 같은 자기 실드의 구조, 즉 다층을 이루는 자성체 원통들의 길이가 모두 동일한 경우에는 내부 자성체 원통의 끝부분이 외부 자계에 직접 노출되므로 높은 자기 차폐율을 얻을 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 다층을 이루는 자성체 원통의 각 층의 길이를 달리할 때의 자기 차폐율을 계산하였다. Table II는 3층의 자기 실드를 구성하는 각 자성체 원통의 길이를 다르게 하였을 때의 자기 차폐율을 계산한 결과를 나타낸 것이다. Table II에서 $\alpha = l_3 - l_1$ [cm]는 세번째와 첫번째 자성체의 길이의 차이를 나타낸 것이다. 두번째 자성체의 길이는 $l_2 = l_1 + \alpha/2$ 로 하였고, 모든 조건에서 l_1 은 40 cm로 고정하였다.

Table II에서 상대투자율이 증가함에 따라 자기 차폐율이 높아진다는 것을 알 수 있으며, 상대 투자율이 2×10^4 이상이고 α 가 10 이상일 때 본 연구에서 목표로 하고 있는 -60 dB 이상의 자기 차폐율을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 또, 투자율이 5×10^4 일 경우에는 α 가 5 이상일 때 -60 dB 이상

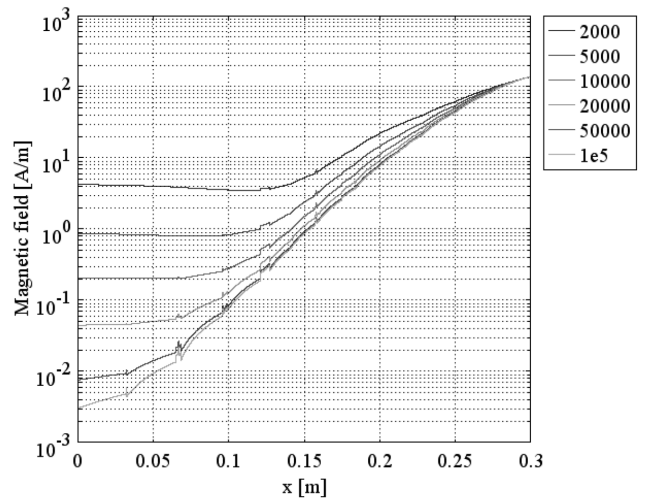


Fig. 4. Position dependence of magnetic field in shields.

의 자기 차폐율이 얻어진다. 이 결과로부터 만약 자성체의 상대 투자율이 1×10^4 이하일 경우에는 3층의 자성체를 이용하여서 -60 dB 이상의 자기 차폐율을 얻을 수 없으며, 이 경우에는 자성체의 층수를 늘려야 한다는 것을 예측할 수 있다. Fig. 4는 상대 투자율이 $2 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$ 인 자성체로 구성된 3층의 자기 실드에 있어서 α 가 10인 경우, 자기 실드 내의 위치에 따르는 자계를 나타낸 것이다. 이 때, 외부자계는 78.56 A/m가 인가되었다. Fig. 4에서 알 수 있듯이, 상대 투자율이 2×10^4 인 경우에 10 cm 이상의 균일 자기 영역이 얻어진다는 것을 알 수 있다. 균일 자기 영역은 투자율이 높아질수록 좁아지고, 자기 실드의 중심부분에서의 자기 차폐율은 대략적으로 투자율에 비례한다는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

양쪽 끝이 열린 형상의 원통형 다층 자기 실드를 설계하기 위해서, 3차원 유한요소법을 이용한 해석을 수행하였다. 그 결과, 자기 실드의 중심부분에서의 자기 차폐율은 투자율의 크기에 비례하였고, 균일 자기 영역은 투자율이 증가할수록 작아진다는 것을 알 수 있었다. 투자율이 2×10^4 인 경우, 안쪽으로부터 길이가 각각 40 cm, 45 cm, 50 cm인 3층의 원통

Table II. Magnetic shielding factors in dB according to difference of the length of magnetic layers.

Relative permeability	$\alpha = 0$	$\alpha = 5$	$\alpha = 10$	$\alpha = 15$	$\alpha = 20$	$\alpha = 25$	$\alpha = 30$	$\alpha = 35$	$\alpha = 40$
2000	-26.5177	-27.4283	-27.0545	-26.367	-25.3558	-24.7624	-23.926	-23.1228	-22.3985
5000	-35.6431	-39.0177	-40.1308	-40.0764	-39.1961	-38.5871	-37.604	-36.5993	-35.6828
10000	-42.0097	-47.408	-50.6141	-51.9096	-51.6944	-51.3075	-50.3447	-49.2527	-48.2281
20000	-47.8142	-54.5423	-59.9198	-63.4095	-64.9191	-65.2735	-64.6542	-63.6381	-62.5941
50000	-54.7306	-62.1124	-68.9982	-74.9462	-80.3462	-83.0166	-84.2179	-84.063	-83.3907
100000	-59.2493	-66.6636	-73.7497	-80.3405	-88.2466	-92.7409	-96.8041	-98.7461	-99.3263

형 자성체를 이용하는 경우, -60 dB 이상의 자기 차폐율을 얻을 수 있었으며, 이 때의 균일 자계 공간은 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}-\phi$ 이상이였다.

감사의 글

이 논문은 2006학년도 경성대학교 연구년 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

[1] A. J. Mager, IEEE Trans. Magn. **6**, 67 (1970).

- [2] 이용호, 권혁찬, 김진목, 임청무, 이상길, 박용기, 박중철, 한국자기학회지 **6**, 264 (1996).
[3] T. W. Kornack, S. J. Smullin, S.-K. Lee, and M. V. Romalis, Appl. Phys. Lett. **90**, 223501 (2007).
[4] S. K. Lee and M. V. Romalis, J. Appl. Phys. **103**, 084904 (2008).
[5] P. Sergeant, L. Dupre, and L. Vandernbossche, J. Appl. Phys. **97**, 10E511 (2005).
[6] <http://www.comsol.com>.
[7] <http://www.magnetic-shield.com>.

3-D Magnetic Field Simulation of Open-ended Cylinder Type Magnetic Shield

Kwang-Ho Shin*

Department of Information & Communication Engineering, Kyungsoong University, 110-1 Daeyeon-dong, Nam-gu, Pusan 608-736, Korea

(Received 4 April 2011, Received in final form 19 April 2011, Accepted 20 April 2011)

In this study, we have performed systematical FEM analysis for design of open-ended 3-layer magnetic shield. For the simulation to calculated shielding factors, the relative permeability was varied in the range of $2 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$, and the length of the magnetic cylinders and length difference between layers were changed. We found that the shielding factor of -60 dB were obtained with the relative permeability of over 20000 and the lengths of magnetic layers of 40 cm, 45 cm and 50 cm, and the uniform magnetic field could be obtained in the range of $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}-\phi$.

Keywords : magnetic shield, finite element analysis, multi-layered cylinder