

와전류에 의한 저주파 자기장 차폐 성능 평가

(Performance Evaluation of Low Frequency Magnetic Field Shielding by Eddy-Current)

최학윤*

(Hak-Yun Choi)

Abstract

In this paper, the shielding effectiveness of aluminum shielded room with using eddy-current is calculated and measured after fabricated. The size and thickness of shielded room are decided as $2.4 \times 2.4 \times 2.4[m^3]$ and 12[mm] after AC shielding characteristics by eddy-current of conductive materials is analyzed.

To verify the shielding effectiveness, a rectangular helmholtz coil is fabricated to generate magnetic field of 1.37[μT] and measured magnetic field inside shielding room for 0.01~10[Hz]. According to calculations and measurements, AC Shielding effectiveness by eddy-current in aluminum is very small for 0.01~2[Hz] and 5 times to 11 times for 5~10[Hz].

Key Words : Eddy-Current, Magnetic Shielding, Skin Depth, Helmholtz Coil, Magnetic Sensors

1. 서 론

저주파 근접장계는 지구자기장과 같은 자연현상으로부터 발생하는 잡음과 주변에 산재되어 있는 전력선, 산업현장에서 사용되는 변압기, 역률 개선을 목적으로 설치된 안정기 등에서 크기 발생한다. 이러한 자기장은 현장 모니터를 사용 불가능하게 만들기도 하고, 인체에도 유해한 수준인 1.5[mT] 이상이 될 때도 있다[1]. 또한 MRI가 설치되는 있는 병원 중 대다수의

중소형병원은 지하철, 자동차도로, 승강기 등 외부 자기잡음원으로부터 가까운 곳에 노출되어 있어 자기장 차폐는 필수적이다[2].

불요자기장을 감소시키는 방법은 자기차폐실(MSR : Magnetically Shielded Room), 잡음필터링, 잡음감소기술 등이 사용된다[3]. 여기서 자기차폐실은 가장 효과적인 방법이지만 고가이며, 제작의 난해성이 있어, 병원의 생체자기측정이나 전자현미경을 사용하는 연구실 등 특수 목적으로 사용되고 있다. 자기차폐실의 차폐능력은 차폐실을 구성하는 재료가 절대적인 영향을 미치고 있다고 알려지고 있다[4]. 즉 투자율이 큰 자성체와 도전율이 높은 도체를 사용하는데, 차폐하고자 하는 주파수 영역에 따라 자기차폐(magnetic shielding) 효과와 와전류 차폐

* 주저자 : 김포대학 IT학부 부교수
Tel : 031-999-4141, Fax : 031-999-4775
E-mail : hychoi@kimpo.ac.kr
접수일자 : 2010년 6월 21일
1차심사 : 2010년 6월 23일
심사완료 : 2010년 7월 29일

(eddy-current shielding) 효과를 적절히 결합하여 설계하며, 이 두 가지 재료를 결합시켜 제작한다고 알려져 있다[5-6]. 하지만 자성체와 도체에 의한 복합적 차폐효과는 알려져 있지만, 도체만의 교류차폐율은 잘 알려진바 없다.

따라서 본 논문에서는 도체의 자기장 차폐성을 알아보기 위해 와전류에 의한 차폐효과를 계산하여 $2.4 \times 2.4 \times 2.4[m^3]$ 의 크기와 12[mm]의 두께를 가지는 차폐실을 제작하였다. 차폐실의 성능 평가는 자기장 발생장치인 헬름홀츠 코일을 제작하여 차폐실 외부에서 1.37[μT]의 자기장을 발생시킨 후, 자기센서를 이용하여 차폐실 내부의 중심으로 유입되는 자기장의 크기를 측정하였다. 측정결과 와전류에 의한 차폐효과는 계산치와 측정치 모두 0.01~2[Hz]에서 거의 없었으며, 5[Hz]에서는 0.274~0.196[μT]로 측정되어 차폐효과는 5~7배, 10[Hz]에서는 0.137~0.122[μT]로 측정되어 10~11.2배였다. 또한 12[mm] 알루미늄의 표피깊이에 해당되는 48[Hz]에서는 69.5배, 전원주파수인 60[Hz]에서는 86.8배로 계산되어 10[Hz] 이상부터 알루미늄의 와전류에 의한 자기장 차폐효과는 급속한 증가를 보였다.

2. 와전류에 의한 교류 차폐율

도체로 구성된 차폐실 외부에 교류자기장이 가해지면 도체 내부에는 가해진 자기장을 상쇄시키기 위한 와전류가 흘러 차폐효과가 발생하는데 차폐의 정도는 도체의 두께와 표피깊이와 상대적인 크기에 따라 결정된다. 한 변의 길이가 L , 두께 t 인 도체로 구성된 직육면체 형태의 차폐실의 차폐효과는 표피깊이 δ 가 t 보다 큰 저주파 영역에서 다음과 같다[7].

$$S_{ed} = [1 + (2 \times 10^{-7} \pi^2 L t \sigma f)^2]^{1/2} (\delta > t) \quad (1)$$

여기서 $\delta = (1/\pi f \mu \sigma)^{1/2}$ 는 표피깊이, f 는 주파수, σ 는 도전율이다.

그림 1은 99.5[%] 순 알루미늄의 도전율을 $3.6 \times 10^7 [Sm^{-1}]$ 로 하고 0.01~60[Hz] 대역에서 차폐벽 두께 t 을 0~20[mm]까지 변화시키면서 계산하였다.

계산결과, 차폐효과는 주파수가 높아질수록, 두께가 커질수록 커짐을 알 수 있으며, 특히 5[mm] 부터는 각 주파수 대역에서 차폐효과가 1~51.1배(0~34.2[dB])로 선형성을 나타내고 있다.

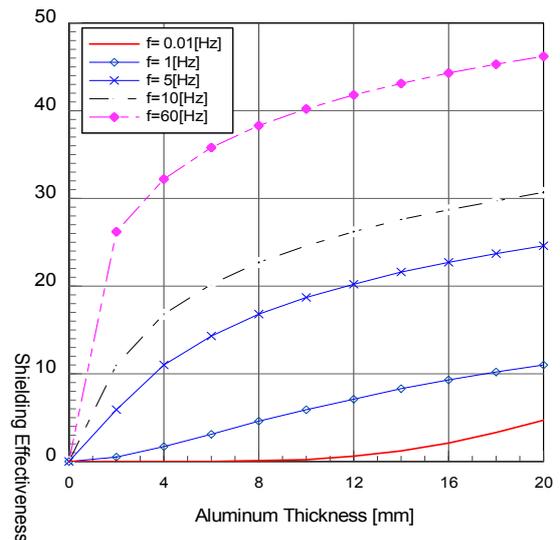


그림 1. 알루미늄 두께에 따른 차폐효과
Fig. 1. Shielding Effectiveness for aluminum thickness

차폐실 제작을 위해 차폐벽의 두께는 가능한 크게 하는 것이 차폐효과를 높일 수 있지만 10[Hz]의 경우 표피깊이가 δ 는 26.5[mm]가 된다. 하지만 26.5[mm]로 차폐실을 제작하는 경우 2000[kg]에 육박하여 t 을 무한정 크게 하여 제작하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 0.01[Hz]에서도 차폐효과가 나타나는 12[mm]로 결정하였다. 이를 이용하여 식 (1)을 정리하면, 다음과 같다.

$$S_{ed} = [1 + (0.853 L f)^2]^{1/2} \quad (2)$$

식 (2)을 이용하여 그림 2와 같이 차폐실 크기 L (2.0m, 2.4m, 2.8m)에 따른 차폐효과를 계산하였다. 계산결과 차폐실이 클수록 차폐효과는 커지며 각 크기의 차폐실에 대해 12배(21[dB]), 14배(22[dB]), 16배(24[dB])로 약 2배(1[dB])정도 차폐효과가 개선됨을 볼 수 있다.

와전류에 의한 저주파 자기장 차폐 성능 평가

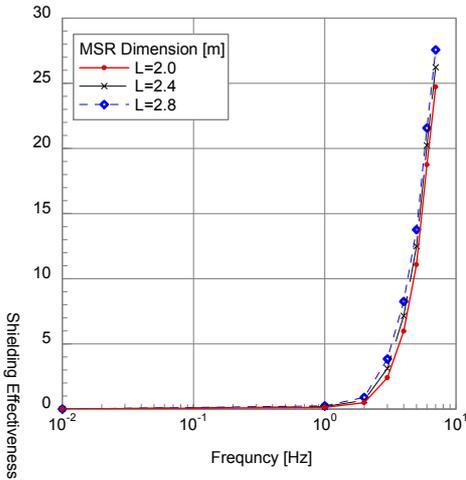


그림 2. 차폐실 크기에 따른 차폐효과
Fig. 2. Shielding Effectiveness for MSR dimension

3. 차폐실 제작

차폐실 두께 t 는 그림 1에서와 같이 0.01[Hz]에서 차폐효과가 나타나는 12[mm]로 결정하고 크기는 산업용 기기나, 사람이 활동할 수 있는 최소크기인 $2.4 \times 2.4 \times 2.4[m^3]$ 로 제작하였다. 차폐실은 진동을 흡수하기 위해 차폐실 바닥에 일정간격으로 25개의 방진패드를 균일하게 분포시켰으며 구조물의 자체의 지지를 위한 골격은 자기성질이 없고 가벼우며 도전 특성이 우수한 알루미늄 H-빔으로 제작하였다. H-빔의 두께는 10[mm]이며 폭과 높이는 각각 85[mm]와 180[mm]로 하였다. 차폐벽을 구성하는 알루미늄 판은 판 사이



그림 3. 알루미늄 차폐실 제작과정
Fig. 3. Aluminum MSR Manufacture Processing

에 도전 특성을 향상시키기 위해 알루미늄 표면에 전도성 그리스로 표면을 보호하였다. 그림 3은 알루미늄 차폐실의 제작과정을 나타낸다.

4. 차폐실의 차폐효과 측정

4.1 자기장 발생장치

제작된 차폐실의 와전류 차폐효과를 측정하기 위해서 사각형 헬름홀츠 코일(Helmholtz coil)을 제작하여 외부에서 자기장을 발생시키고, 자기센서로 차폐실 내부로 유입된 자기장의 크기를 측정하여 차폐효과를 측정하였다. 유입된 자기장 측정을 위한 자기센서는 Mag03을 사용하였으며, 특성은 DC에서 12[kHz]까지 3축으로 1[mT]까지 측정할 수 있고 10[mV/Gauss]의 감도를 가진다. 그림 4는 사각형 헬름홀츠 코일의 임의의 점 $P(x,y,z)$ 에서 발생하는 자기장의 크기 $B_z(z$ 방향 성분)는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다[8].

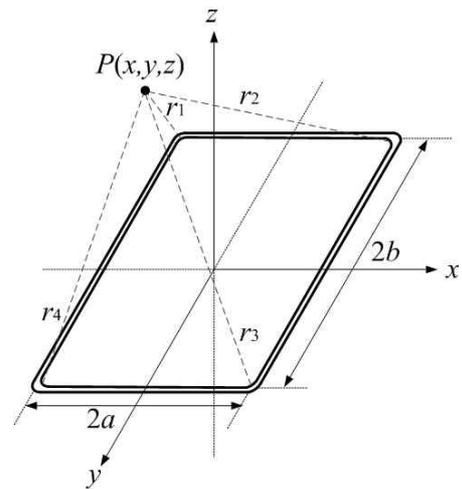


그림 4. 사각형 헬름홀츠 코일
Fig. 4. Geometry of Rectangular Helmholtz Coil.

$$B_z = \frac{\mu_0 IN}{4\pi} \sum_{\alpha=1}^4 \left[\frac{(-1)^\alpha d_\alpha}{r_\alpha [r_\alpha + (-1)^{\alpha+1} C_\alpha]} - \frac{C_\alpha}{r_\alpha (r_\alpha + d_\alpha)} \right] \quad (3)$$

여기서 N은 권선 수, I는 DC 전류[A], μ_0 는 진공 중 투자율 x,y,z 는 각 좌표이다. 또한

$$C_1 = -C_4 = a + x, \quad C_2 = -C_3 = a - x$$

$$d_1 = d_2 = b + y, \quad d_3 = d_4 = y - b$$

$$r_1 = [(a+x)^2 + (b+y)^2 + z^2]^{1/2}$$

$$r_2 = [(a-x)^2 + (b+y)^2 + z^2]^{1/2}$$

$$r_3 = [(a-x)^2 + (b-y)^2 + z^2]^{1/2}$$

$$r_4 = [(a+x)^2 + (b-y)^2 + z^2]^{1/2}$$

이다. 그림 4에서 코일의 한 변이 3 m(a=b=1.5m), 전류 1 A, 권선 수 10회 일 때, 점 $P_1(0,0,1.5)$ 에서 발생하는 자기장의 크기를 식 (3)을 이용하여 계산하면 1.37 μT 이므로 3 m 떨어진 두 코일의 중심에서 발생하는 자기장은 2.74 μT 이다.



그림 5. 제작된 헬름홀츠 코일
Fig. 5. Fabricated Helmholtz Coil

그림 5의 코일 프레임은 목재로 지지 틀을 만들어서 에나멜이 피복된 굵기 1[mm]의 구리선으로 같은 방향으로 10회씩 감았다. 발생 자기장의 측정은 자력계의 출력을 오실로스코프의 측정값 A/D카드를 거쳐 컴퓨터로 측정하였다.

자기센서의 출력은 자체의 오프셋전압, 지구자기장의 직류성분 및 1,000[Hz]이상의 주위 잡음 자장도 출력되므로, LPF에서 오프셋전압 및 순수한 직류성분은 500[μF]의 커패시터로 차단하고 또한 LPF로 1,000 [Hz]이상의 교류잡음을 제거하여 코일에서 발생하는 0.01~1,000[Hz]을 오실로스코프로 측정하였다. 측정 결과 1.37 μT 의 계산 값에 대해서 1.30~1.35 μT 로 측정되어 1~2[%]의 오차가 발생하였다. 오차의 원인

은 지지 틀인 목재 가공, 코일을 감을 때 발생하는 불균일성 등, 제작 시 문제로 인한 오차로 생각된다.

4.2 차폐효과 측정

알루미늄에 의한 와전류 차폐 성능을 평가하기 위해서 차폐실을 제작하고, 그림 6과 같이 차폐실 외부에 각각 x, y 축 방향으로 헬름홀츠 코일을 설치하여 1.37 μT 의 자기장을 발생시킨 후, 차폐실 내부 중심에서 0.01~10[Hz]의 대역의 상대적인 크기를 측정하였다. z 축은 차폐실을 들어 올리거나 회전을 시켜야 하는 문제로 인하여 x, y 축을 중심으로 하였다. 그림 6은 차폐효과를 계산치와 측정치를 비교한 것이다. 측정 결과 와전류에 의한 차폐효과는 계산치와 측정치 모두 0.01~2[Hz] 까지 차폐효과는 거의 없었으며, 5[Hz] 부터 차폐효과가 나타나고 있다. 10[Hz] 대역에서 x 축은 14.5배(23[dB])의 계산치에 대하여 0.12 μT 로 측정되어 11.2배(21.0[dB])로 나타났고, y 축은 0.14 μT 로 측정되어 10.0배(20.0[dB])로 나타났다. z 축은 x, y 축 측정치로 추정해보면 거의 유사한 결과를 나타내리라고 생각된다. 또한 12[mm] 알루미늄의 표피깊이에 해당되는 48[Hz]의 경우 69.5배(36.8[dB])이고, 전원주파수인 60[Hz]에서는 86.8배(38.8[dB]), 1,000[Hz]에서는 1,446배(63[dB])로 계산되어 10[Hz] 이상부터 와전류에 의한 차폐효과는 급속한 증가를 보인다.

측정결과와 계산값과의 오차는 알루미늄 재료의 순도 및 전기전도도가 계산에 사용된 값보다 나쁘거나, 판과 판 사이의 전기적 접촉이 충분하지 못하여 접촉저항이 발생함으로써 와전류가 도체를 통해 완전한 폐회로를 형성하지 않았기 때문으로 판단된다. x 방향과 y 방향간의 차이는 알루미늄 판의 배치에 의한 것으로 벽면의 알루미늄은 높이방향으로 세우고 천정과 바닥은 x 방향으로 길게 배치하였으므로 y 방향의 차폐전류가 x 방향의 차폐전류보다 더 쉽게 흐르기 때문으로 생각된다. 또한 차폐실의 출입구에 대한 차폐효과 보상을 고려하지 않았기 때문이다. 그러므로 세 방향에 대해 차폐율을 비슷하게 유지하기 위해서는 벽면의 알루미늄 판을 옆으로 길게 배치하여 접촉저항을 줄이고, 차폐실 도어부분에 의한 차폐효과 감소를 보상할 필요가 있다.

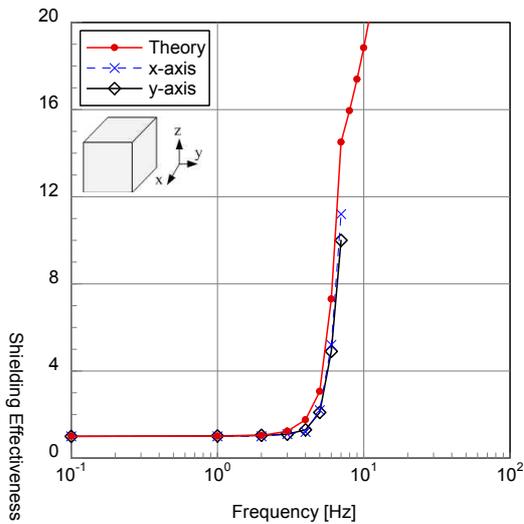


그림 6. 도체 자기차폐실의 x,y 방향 차폐효과 계산값과 측정값

Fig. 6. Calculation and Measurement value of 2-axis for Conductor MSR

5. 결 론

본 논문에서는 알루미늄 도체에 자기장이 가해질 때 발생하는 와전류로 인한 교류 차폐효과를 계산하고 측정하였다. 차폐실의 크기와 차폐벽의 두께는 계산을 통하여 2.4x2.4x2.4[m³]의 크기와 12[mm]로 결정하고 제작하였다.

제작된 차폐실의 차폐효과 측정은 사각형 헬름홀츠 코일을 제작하여 1.37[μT]의 자기장을 차폐실 외부에서 발생시킨 후, 내부로 유입되는 자기장을 측정하였다. 측정결과, 차폐효과는 계산치와 측정치 모두 0.01~2[Hz]까지 자기장 차폐효과가 거의 없었으며, 5~10[Hz]까지 7.3~14.5배의 계산치에 대해 4.9~11.2배의 차폐효과 측정치를 나타냈다. 여기서 차폐효과를 크게 하게 위해서는 알루미늄의 두께를 크게 하면 되지만 현실적으로 12[mm] 이상의 알루미늄을 사용하는 것은 불가능하다. 실제 상용화되고 있는 알루미늄의 두께인 3[mm]의 경우, 5~10[Hz]까지 2.7~5.2배로 차폐효과는 반으로 작아진다. 측정오차의 원인은 차폐실의 도어부분을 계산에서 고려치 않았고 H-빔 프레임 설치할 때 수직성 및 편평도 향상, 알루미늄 판간의 접촉저항 발생으로 인한 와전류 페루프를 형성

하지 못한 점에 기인한다고 판단된다. 향후 본 논문에서 제작한 차폐실에 자성체 재료를 2~3중으로 부착하여 설계할 경우 20배 이상의 차폐효과를 나타내어 병원의 MRI를 위한 자기차폐실이나, 최근 부각되고 있는 전자선 리소그래피 장치, 전자현미경등을 설치하려는 연구소의 자기차폐실로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문은 2010학년도 김포대학 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] 김재훈 외 3인, “평판 강자성체의 60[Hz] 자계 차폐 효율”, 전자공학회, 제 81권 2호, pp 309-312, 1995.12.
- [2] J.Clarke, A.I.Braginski, ‘The SQUID Handbook’ Wiley-VCH, vol.1, pp.277-280, 2004.
- [3] 이수열 외 3인, “연구자석 MRI를 위한 능동형 자기 잡음 차폐시스템 기술 개발”, 전자공학회, 제 40권 3호, pp.89-96, 2003.5.
- [4] 문석원의 2인, “60Hz ELF 자계에 대한 고 도전율 및 고 투자율 재료의 차폐효과 분석”, 전자학회논문지, 54C권, 4호, pp.166-171, 2005.4.
- [5] P. Heinonen, “Properties of a thick-walled conducting enclosure in low-frequency magnetic shielding”, Journey of Physics, Vol.13, No.5, pp.569-560, 1980.
- [6] 이용호외 6인, “생체자기계측을 위한 자기차폐실의 설치 및 특성”, 한국자기학회, 제6권 4호, pp.264-271, 1996.8.
- [7] Li Zhou, “An Economical Magnetocardiogram System Based on High-Tc SQUIDs”, Chin Phys Lett, Vol.23, No.8, pp.2319-2322, 2006.
- [8] 박포규외 5인, ‘브라운관의 자기장 영향 분석용 저자기장 제어 장치의 설계 및 제작’, 한국자기학회, 제 13권 6호, pp251-255, Dec, 2003.

◇ 저자소개 ◇



최학윤 (崔學潤)

1963년 4월 21일생. 1985년 숭실대학교 전자공학과 졸업. 1987년 숭실대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1999년 건국대학교 대학원 전자공학과 졸업(박사). 1996년~현재 김포대학 IT 학부 부교수.