

규소강판을 이용한 실드케이스의 차폐효과

(A Study on Shield Effect of Shield Case using SiFe Sheet)

신동규* · 김영학**

(Dong-Gyu Shin · Young-Hak Kim)

Abstract

The shield effect of 4 layered shield case was investigated in this paper. The material of the case was non-oriented SiFe sheet with a thickness of 0.5mm. The size of the case was 100mm wide, 100mm high and 300mm long. Relative permeability of SiFe sheet was needed to calculate shield effect. It was obtained from the measurement by a ferrite yoke and from the calculation by eddy current FEM analysis. Three configurations were used to connect both ends of SiFe sheet. First one is a connection by double-welded butt. Second one is to put the sheet the same material above the confronted both ends of the sheet to avoid a leakage magnetic flux. The last one is ideally without any connection. The shield effect of the second one agreed well with the last one and showed the shield effect of -40dB.

Key Words : Shield Case, Shielding Effect, SiFe Sheet, Ferrite-Yoke, Permeability

1. 서 론

MRI장비와 SEM과 같은 의료기기뿐만 아니라 산업 계측기기, 그리고 여기에 사용되는 자기소자의 고감도 및 고정밀화가 진행됨에 따라 미약한 자기잡음에 대

해서도 관측결과가 민감하게 변하여 자기실드룸 혹은 자기실드케이스가 크게 요구되고 있다. 고성능 자기 실드케이스의 제작에는 10,000-30,000의 투자율을 가지는 Ni을 주성분으로 하는 퍼멀로이 계열의 자성체가 선호되고 있다[1-3]. 런던 금속 거래소에서 제시한 2013년 10월의 Ni 가격은 13,635\$/kg으로 Fe에 비해 가격이 매우 높다. Ni 보다 가격이 훨씬 낮은 무방향성 규소강판을 링의 형태로 적층하여 투자율을 높이기 위해 자기인가방식을 수직자계방식(hand shaking)한 자기실드케이스가 0.8A/m 이하의 목표자계를 나타내었다[4]. 이 실드케이스는 퍼멀로이로 제작된 실드케이스와 거의 동등한 자기차폐율을 가지지만 자계인가방식[5] 때문에 복잡한 권선구조를 가지게 된다. 권선구조를 가지지 않는 고성능의 실드케이스는 자성

* 주저자 : 부경대학교 전기공학과
** 교신저자 : 부경대학교 전기공학과 교수
* Main author : Dept. of Electrical Eng. Pukyong National University Korea
** Corresponding author : Professor, Dept. of Electrical Eng. Pukyong National University Korea
Tel : 051-629-6316, Fax : 051-629-6305
E-mail : kimyh@pknu.ac.kr
접수일자 : 2013년 11월 1일
1차심사 : 2013년 11월 5일
심사완료 : 2013년 12월 4일

체를 다층으로 하는 구조를 가지며 층수가 증가함에 따라 자계 차폐율이 증가하게 된다[6]. 그러나 다층 구조의 실드케이스는 투자율감소를 막기 위해 각 층의 자성체 끝을 접합시켜야 하는 문제점을 가진다. 본 논문에서는 목표 자계가 0.8A/m 이하가 되는 무방향성 규소강판의 실드케이스에 대해 검토하였다. 본 논문의 제안내용과 독창성은 자성체의 접합방식을 달리하였을 때 무방향성 규소강판의 투자율을 구하는 것과 이를 바탕으로 실드케이스의 차폐율을 구하는 것이다.

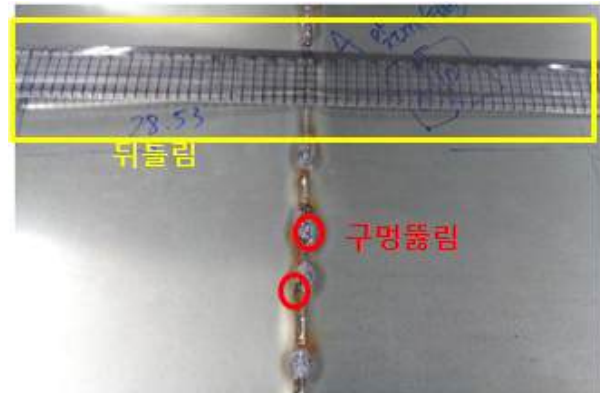


그림 2. 규소강판 용접 시에 발생한 뒤틀림과 구멍뚫림
Fig. 2. Holes and distortion generated by welding

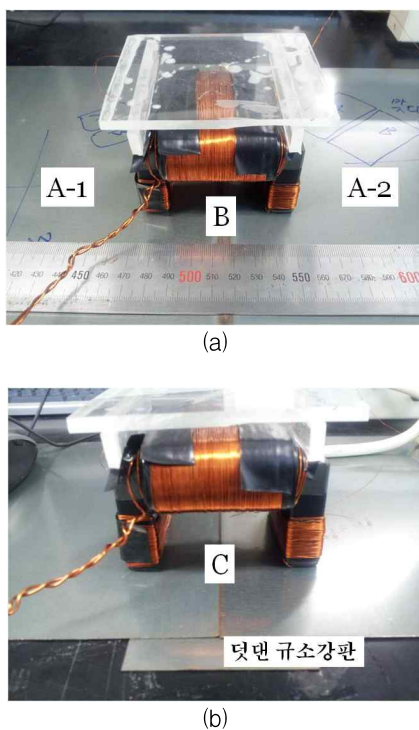


그림 1. 페라이트 요크와 규소강판
Fig. 1. Ferrite-Yoke and SiFe sheet

2. 투자율 측정 및 해석

실드케이스의 차폐율을 계산하기 위해서는 사용되는 재료의 비투자율을 결정하는 것이 중요하다. 여기서 이용된 무방향성 규소강판은 35PN계열(POSCO 전기강판) 무방향성 규소강판[7]을 사용하였다. 이 규소강판의 비투자율을 구하기 위해 다음과 같이 하였다. 먼저 페라이트 요크[8]와 LCR미터로 규소강판의

인덕턴스와 저항을 측정한다. 이 측정치를 동일한 형상을 가지는 FEM 모델로부터 해석한 계산치와 비교하였다. 이 때 FEM 해석 설정값인 비투자율은 계산된 인덕턴스와 저항이 측정치와 가까워질 때까지 변화시켰다. 그림 1은 규소강판의 인덕턴스와 저항을 페라이트 요크를 이용하여 측정하는 경우를 나타낸 것이다. 그림 1 (a)에서 A-1과 A-2는 용접된 규소강판의 좌, 우측을 측정하는 경우를 나타낸 것이고 B는 용접부분을 측정하는 것을 나타낸 것이다. C의 경우는 그림 1 (b)와 같이 두 장의 규소강판을 맞대기 한 후, 폭이 작은 또 한 장의 규소강판을 아래에 놓은 경우이다. 한 장의 규소강판의 크기는 250mm×250mm이며 두께는 0.5mm의 무방향성 규소강판이다. 그리고 맞대기 아래에 놓은 규소강판의 크기는 길이와 두께가 각각 250mm와 0.5mm이고 폭을 60mm로 하였다. 그림 1 (a)에서 규소강판의 접합은 TIG 용접으로 용접을 하였고 용접 중에 규소강판의 뒤틀림 혹은 구멍 뚫림을 최대한 방지하기 위해 용접 전류를 정밀하게 조절하였다. 그림 2는 두 장의 규소강판을 접합할 때, 용접에 의해 발생한 구멍뚫림과 뒤틀림을 나타낸 것이다. 용접 전류가 크게 되면 위 그림과 같이 구멍 뚫림과 뒤틀림이 생겨 10~13A 로 낮추어 용접하였다. 용접기는 EP-300A INVERTER TIG 용접기를 사용하였으며 용가재로 무방향성 규소강판을 약 2mm폭으로 잘라서 사용하였다. 규소강판의 인덕턴스와 저항측정은

LCR(NF ZM2353) 미터를 이용하였다. 페라이트 요크는 “C”자형 페라이트에 150회 권선을 감은 것이다.

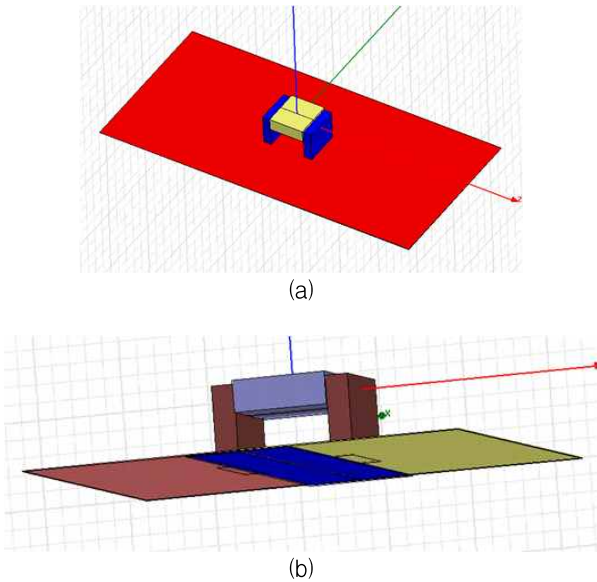


그림 3. 페라이트 요크와 규소강판의 FEM모델
Fig. 3. FEM model of ferrite-yoke and SiFe sheet

인덕턴스와 저항은 와전류 유한요소법 해석(Eddy Current FEM Analysis)을 이용하여 구할 수 있다. 그림 2는 FEM 해석모델을 나타낸 것으로 그림 3 (a)는 A의 경우에서와 같이 1장의 규소강판을 계산하기 위한 모델이며 그림 3 (b)는 두 규소강판을 맞대기 한 후, 아래에 폭 60mm의 규소강판을 댄 것으로 B의 경우이다. 그림 1 (b)에서와 같이 두 장의 규소강판이 서로 맞대고 있어도 실제 공극이 존재하기 때문에 해석 시에는 서로 맞대기한 규소강판 사이에 각각 20 μ m의 gap을 두었다. FEM 해석으로부터 인덕턴스와 저항은 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$W_e = \int \vec{B} \cdot d\vec{H} = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1)$$

$$L = 2W_e, \quad I = 1[A] \quad (2)$$

$$P = \frac{\vec{J} \cdot \vec{J}}{2\sigma} = RI^2 \quad (3)$$

$$R = P, \quad I = 1[A] \quad (4)$$

$$P = P_{SiFe} + P_{coil} + P_{ferric} \quad (5)$$

여기서 시변자기에너지 W_e 는 자속밀도와 자계인 \vec{B} 와 \vec{H} 의 체적적분으로 유한요소해석으로부터 구해지며 인덕턴스와 관계는 (1)식으로 된다. 이 때 인가전류가 1A일 때 시변자기에너지의 두 배가 식 (2)와 같이 인덕턴스 L이 된다. 저항 R은 식 (3)의 손실전력으로 구할 수 있다. \vec{J} 와 \vec{J} 자속의 시간적인 변화에 의해 발생하는 와전류밀도와 공액 와전류밀도이며 유한요소 해석으로부터 구해지고 저항과의 관계는 (3)식으로 구한다. 이 때 I=1A일 때 전력 P가 저항 R이 된다. 식 (5)와 같이 손실전력 P는 규소강판과 코일, 페라이트에서 발생하는 손실전력의 합이지만 페라이트의 교류손실이 거의 0에 가깝기 때문에 여기서 제외되었다. FEM해석에서 코일의 턴 수가 많아질수록 계산 시간이 길어진다. 따라서 본 논문에서는 감은 코일의 형상을 고려하여 1턴의 사각코일로 한 다음 코일의 단면적과 턴수와의 관계를 식 (6)~식(11)로 하여 인덕턴스와 저항을 구하였다. 유한요소법 해석에서 코일 단면적과 턴수의 관계를 고려하여 입력값인 전류를 IA 대신에 NI A · turn로 입력하였다. 이 때 해석할 때 이것은 권선수 150턴의 코일에서 계산되는 인덕턴스 L이라고 하고 해석모델의 1턴의 권선수의 저항을 L'이라고 할 때 식 (6)의 관계식이 성립된다.

$$L = N^2 L' \quad (6)$$

$$L' = \frac{\mu S}{l} \quad (7)$$

$$W_e = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} L' N^2 I^2 \quad (8)$$

이 때 l과 S은 해석모델의 자로길기와 단면적이다. 식 (8)에서 에너지 W_e 는 NI를 입력하여 해석한 것이나 I를 입력하여 구한 것이나 동일하므로 W_e 의 두배가 결국 인덕턴스가 된다. 코일에서 발생하는 R도 동일하게 고려될 수 있다.

$$R_{coil} = \rho \frac{N_c}{S_f N} = N^2 R' \quad (9)$$

$$R' = \frac{l_c}{\rho S_c} \tag{10}$$

$$P = R_{coil} I^2 = R' N^2 I^2 \tag{11}$$

여기서 l_c 과 S_c 은 권선코일의 길이와 단면적이다. 이 때 저항 R은 식 (11)과 같이 P로부터 구해진다.

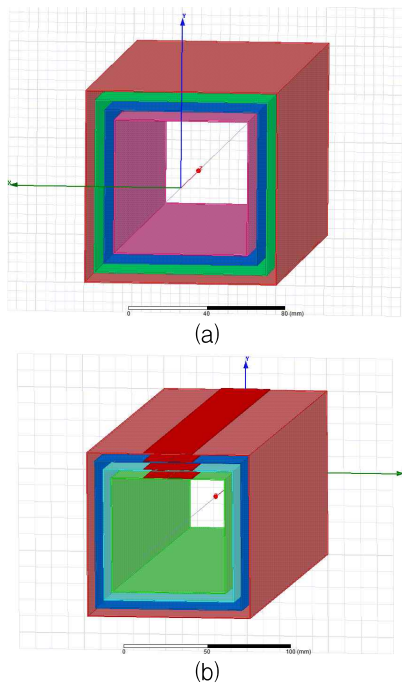


그림 4. 실드케이스의 FEM모델
Fig. 4. FEM model of shield case

그림 4은 A 경우에 대한 사각 실드케이스의 해석모델을 나타낸 것이다. 실드케이스의 크기는 가로와 세로가 각각 100mm이며 길이가 300mm, 두께가 0.5mm

로 4층 구조로 되어 있다. 각 층 사이의 간격은 10mm로 하였다. 그림 4 (a)는 사각 단면에 gap이 없는 상태를 나타내고 있다. 이 해석모델은 규소강판과 용접된 규소강판에 의한 차폐율 계산과 1층에서부터 4층까지 층수가 변할 때 차폐율을 구할 때 이용되었다. 용접접합인 B의 경우에 대한 실드케이스의 해석에서는 단지 B의 경우에 대한 투자율을 그림 4 (a)의 모델에 입력하여 구하였다. 그림 4 (b)는 C의 경우에 대한 실드케이스의 계산모델을 나타낸 것이다. 사각단면에 갭이 존재하며 그 위에 자로연결을 위한 규소강판이 놓인 것을 볼 수 있다.

표 1. 측정된 인덕턴스와 저항
Table 1. Measured inductance and resistance

case		L(mH)	R(W)
A	A-1	22.7	1.86
	A-2	23.9	1.9
B		19.8	1.51
C		28.2	3.82

3. 실드 케이스의 자기장 감쇄 계산

표 1은 그림 1에서 보인 바와 같이 A와 B, C의 경우에 대한 인덕턴스 L과 저항 R의 측정치를 나타낸 것이다. 이 표에서 A의 A-1과 A-2의 측정치 차이는 무방향성 규소강판의 방향에 따른 자기적인 특성차이로 생각된다. B의 경우에 대한 인덕턴스 L과 저항 R은 A보다 감소하였다. 이것은 용접에 의한 열응력의 도입에 의해 자기적인 특성이 열화한 것으로 생각된다. C의 경우는 A의 경우보다 인덕턴스와 저항이 증가하였

표 2. FEM 모델로 계산된 값
Table 2. Calculated values of FEM model

case	mr	We(J)	L(mH)	R_total	R_Coil	R_SiFe_#1	R_SiFe_#2	R_SiFe_#3	
A	A-1	1430	0.0113	22.7	2.19	0.267	1.92	-	-
	A-2	1500	0.0117	23.5	2.33	0.267	2.07	-	-
B	1190	0.00995	19.9	1.71	0.267	1.44	-	-	
C	1430	0.0143	28.7	6.34	0.267	2.96	2.96	0.128	

다. 이것은 갭 아래에 반쳐진 무방향성 규소강판이 가지는 단면적의 증가에 의한 것이다. 이로서 C 경우의 측정치로부터 페라이트 요크에서 발생한 자속이 갭과 갭 사이, 갭 아래의 규소강판을 따라서 동시에 흐르고 있음을 알 수 있다. 표 2는 비투자율 μ_r 을 입력하여 계산한 값들을 나타낸 것이다. 이 비투자율은 계산된 인덕턴스가 측정치에 가장 가깝게 되도록 선정된 것이다. 따라서 인덕턴스의 계산치와 측정치는 매우 잘 일치하고 있다. 저항의 계산치에서 전체 저항 R_{total} 은 코일 저항 R_{coil} 그리고 R_{SiFe} 규소강판의 저항 (#1:1장의 규소강판, 맞대기 왼쪽 규소강판, #2:맞대기 오른쪽 규소강판, #3: 갭 아래의 규소강판)의 합이 된다. 저항의 계산치는 측정치보다 A, B의 경우에서 약 0.3Ω 크며 C의 경우는 2.5Ω 정도 크게 계산되었다. 이 계산에서는 규소강판을 투자율을 가지는 단순 금속체로 가정하고 있으나 실제 규소강판은 자구구조를 가지고 있어 와전류손실은 단순 금속체보다 작게 발생하게 된다. 특히 C의 경우에서 나타난 저항의 차이는 FEM 계산에서 밑에 바쳐진 규소강판이 갭 없이 붙어 있어 두께 증가에 의한 와전류의 증가 때문이다. 그림 5는 A 경우에 대해 실드 케이스의 층수를 변화시켰을 때, 케이스 내, 외부의 자계를 나타낸 것이다. 자계의 x방향의 크기는 그림과 같이 실드케이스 외부에서는 설정값 $24A/m$ 를 가지지만 케이스 내부로 갈수록 점점 작아지며 층수에 따라 자계의 크기가 감소함을 알 수 있다. 그림 6은 그림 5의 실험결과로부터 실드케이스의 중앙에서 자계를 층수에 대해 나타낸 것이다. 층수의 증가에 따라 자계의 감소가 뚜렷해지며 차폐율은 실드케이스를 1 층으로만 해도 약 17%까지 감소하고 2층 이상이 되면 수 %까지 감소하게 된다. 실드케이스를 4층으로 하였을 때 차폐율은 거의 100배 감소하는 $-40dB$ 이하가 되었다. 그림 7은 A, B, C 경우에 대하여 차폐율을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 용접에 의한 접속의 경우가 차폐율이 가장 낮으며 A와 B의 경우가 거의 같음을 알 수 있다. 따라서 규소강판으로 만들어지는 실드케이스의 경우 4층의 구조를 가지고 반자계를 줄이기 위해 두 자성체를 서로 맞대고 갭을 덮는 구조만으로도 $-40dB$ 의 차폐율을 얻을 수 있다.

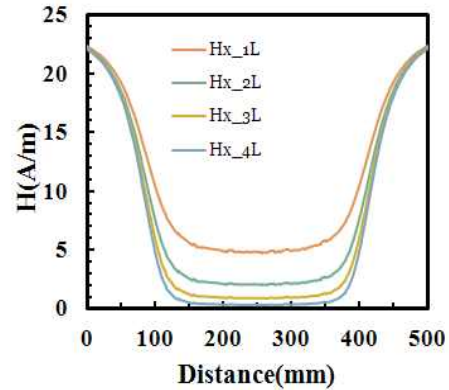


그림 5. 실드캔 내, 외부의 자기장
Fig. 5. Magnetic field around shield case

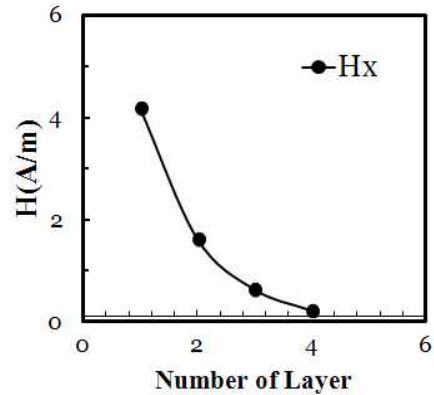


그림 6. 층수에 따른 실드케이스 내부의 자기장
Fig. 6. Magnetic field reduction depending on the number of shield layer

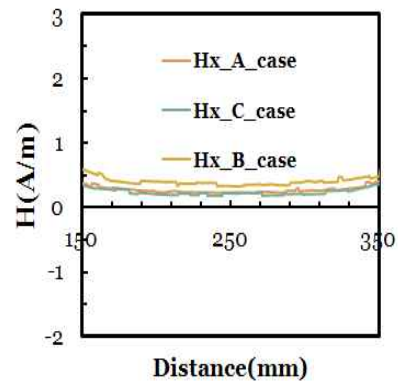


그림 7. 실드케이스의 차폐효과
Fig. 7. Shielding effect of shield case

4. 결 론

0.5mm 두께의 무방향성 규소강판을 이용한 실드케이스의 차폐율에 대해 검토하였다. 이 검토에서 차폐율을 결정하는 비투자율을 페라이트 요크와 와전류유한요소법해석을 이용하여 구하였다. 실드케이스의 크기는 가로, 세로, 길이가 각각 100mm, 100mm, 300mm이며 4층 구조로 하였다. 실드케이스의 차폐율은 FEM 정자장 해석을 하여 구하였으며 용접으로 접합한 구조와 길이방향으로 갭을 가지고 갭 위에 놓은 또 다른 규소강판을 놓은 구조, 그리고 비교를 위해 사각단면을 가지는 이상적인 실드케이스를 이용하여 서로 비교하였다. 해석결과 갭을 가지고 위에 규소강판이 있는 실드케이스가 사각단면을 가지는 이상적인 실드케이스와 거의 같은 차폐율을 가졌고 4층의 구조를 가지는 실드케이스는 목표자계가 약 0.2A/m로 약 100배, -40dB 이하의 차폐율이 계산되었다. 본 논문의 결과를 바탕으로 실드케이스 뿐만 아니라 자성체 패널의 접합으로 제작되는 실드룸과 같은 비교적 큰 자기실드 구조체의 차폐율을 실험에 앞서 이론적으로 구할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음.

References

[1] D. Cohen, "Large-volume conventional magnetic shields," Rev. Phys.Appl., Vol. 5, pp. 53-58, 1970.

[2] V. O. Kelha et al., "Design, construction, and performance of a large-volume magnetic shield," IEEE Trans. Magn., Vol. 18, no. 1, pp.260-269, Jan. 1982.
 [3] J. Bork et al., "The 8-layered magnetically shielded room of the PTB:Design and construction," in Proc. Biomag2000, 12th Int. Conf. Biomagnetism,Espoo, Finland, pp. 970-973.
 [4] K. Tashiro and I. Sasada, "A Low-Cost Magnetic Shield Consisting of Nonoriented Silicon Steel", IEEE Trans. Magn., Vol. 41, 2005.
 [5] Vaino O. Kelpha, R. Peltonen and Borje Rantala, "The effect of shaking on magnetgc shields", IEEE Trans. Magn., Vol. 16, 1980.
 [6] K. S. Shin, "3-D Magnetic Feild Simulation of Open-ended Cylinder Type Magnetic Shield", Journal of the Korean Magnetic Society, Vol. 21, No. 3, , pp 99-103, 2011.
 [7] http://www.posco.co.kr/homepage/docs/kor3/dn/product/info/k_electrical_pdf_2011.pdf, 2013.
 [8] Y. H. Kim, "B-H Loop Measurement of a High Tensile Steel Plate", Journal of the Korean Magnetic Society, Vol. 20, No. 3, , pp 94-99, 2010.

◇ 저자소개 ◇



신동규(申東叫)

1983년 4월 5일생. 2011년 평생교육진흥원 기계학과 졸업. 2011년~현재 대한상공회의소 부산인력개발원 자동화제어시스템학과 교수.



김영학(金榮學)

1960년 1월 20일생. 1994년 일본동북대학 전자공학과 졸업(박사). 1995년~현재 부경대학교 전기공학과 교수.