

비정질 연자성재료를 이용한 복층 차폐체의 저주파 자기장 차폐효과

김성규 · 허 진 · 박포규 · 정연춘 · 김윤배

한국표준과학연구원 자기연구실
대전광역시 유성구 도룡동 1번지, 305-340

김택기

충남대학교 공과대학 금속공학과
대전광역시 유성구 궁동 220, 305-764

(1998년 7월 22일 받음, 1998년 11월 10일 최종수정본 받음)

상용화된 5 종류의 비정질 리본으로 제작한 실린더형 차폐체의 자기차폐효과를 미국재료시험협회(ASTM)에 준하여 연구하였다. 2705M과 2605CO를 이용한 복층 차폐체의 차폐인자는 2705M을 안쪽층으로 한 경우가 2605CO를 안쪽층으로 한 경우보다 상대적으로 2배 이상의 차폐효과를 얻을 수 있었다. 이는 바깥층이 2705M인 경우, 낮은 자기장세기에서 포화되는 2705M이 높은 세기의 자기장을 효과적으로 차폐하지 못하고, 1차적으로 차폐된 자기장 세기에서 2605CO는 투자율이 낮기 때문이다. 반면 바깥층이 2605CO인 경우, 높은 자기장 세기에서 포화되는 2605CO가 높은 세기의 자기장을 효과적으로 차폐하고 1차적으로 차폐된 자기장 세기에서 2705M의 투자율은 높기 때문이다.

I. 서 론

자기차폐는 SQUID를 이용하여 인체자장 등 미세자기 측정을 위한 shield room 제작[1] 및 산업 계측기기 오동작 및 정보화기기의 손실 방지에 응용된다. 고주파 영역의 자기장은 Cu 또는 Al과 같은 전도성이 좋은 물질의 맴돌이전류(Eddy current) 효과를 이용하여 효과적으로 차폐하는 반면[2], 저주파 영역의 자기차폐는 자기투자율(magnetic permeability)이 높은 퍼멀로이 또는 비정질 금속 등의 연자성 재료를 이용한다[3]. 특히, 두께가 수십 μm 로 얇고 다양한 폭으로 제조되는 비정질 리본은 사용하기 편리하며 스테인레스(stainless steel)에 필적하는 내식성을 갖고있어 실용성이 우수한 특징도 갖고 있다. 효과적인 단층 차폐를 위해서는 차폐공간의 크기 및 형상과 자기장의 주파수 및 세기에 따라, 차폐재료의 가격, 투자율, 두께등이 고려되어야 한다. 한편 같은 크기의 공간을 차폐하는 경우, 단층 차폐체 보다는 복층 차폐체가 더 큰 차폐효과를 얻을 수 있는데, 이것은 값이 비싼 연자성 재료의 비용절감의 한 방법이기도 하다[1]. 복층 차폐체의 설계에서는 단층 차폐에서 고려한 사항들외에 각 차폐층들 사이의 간격이 매우 중요하다[2]. 또한, 각 차폐층들의 종류 및 배열 순서도 효과적인 다층 차폐체를 구현하는데 매우 중요

하다고 사료되는 바, 본 논문에서는 복층 차폐체의 안쪽층 및 바깥층 차폐재료를 선별하여 효과적인 복층 차폐방법에 대해 보고한다.

II. 이론적 배경 및 실험방법

자기차폐효과는 차폐인자(shielding factor)로 나타낼 수 있는데, 차폐인자 S 는 인가된 외부자장 H_0 에 대한 차폐후의 내부자장 H_i 의 비이며 다음 식으로 표현된다.

$$S = \frac{H_0}{H_i}$$

차폐효과는 재료의 투자율 μ 와 교류자장의 침투깊이(penetration depth)에 의해 달라지는데 침투깊이 δ 는 식(1)과 같이 차폐재의 비저항에 비례하고, 투자율 및 교류 자기장의 주파수에 반비례한다.

$$\delta = \left(\frac{10^7 \rho}{4\pi^2 \mu f} \right)^{1/2} \quad (1)$$

여기서, 비저항 ρ 를 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 로, 주파수 f 를 Hz로 표시할 경우 δ 는 mm로 된다.

차폐체의 지름이 D 이고 차폐재의 두께를 d , 투자율

Table I. The physical properties of commercial amorphous materials used in this study

Materials	saturation induction (Tesla)	maximum D.C permeability	electrical resistivity ($\mu\Omega\text{cm}$)	width (mm)	thickness (μm)
2605SC	1.61	40,000	135	50.8	17.8
2826MB	0.88	50,000	138	50.8	30.5
2605CO	1.80	120,000	123	50.8	22.9
2714A	0.57	80,000	142	25.4	15.2
2705M	0.77	290,000	136	50.8	20.3

을 μ 라 할 때, $d \ll D$ 및 $\mu \gg 1$ 의 조건이 만족되면 충분히 긴 실린더형 차폐체의 교류자기차폐율 S_{cr} 는 식(2)로 표현된다[2].

$$S_{cr} = \left[\{(\alpha/4)^2 + (1/2\alpha)^2\} (\cosh\beta - \cos\beta) + \alpha(\sinh\beta - \sin\beta) + (1/2\alpha)(\sinh\beta + \sin\beta) + (1/2)(\cosh\beta + \cos\beta) \right]^{1/2} \quad (2)$$

여기서, $\alpha = D/\mu\delta$, $\beta = 2(d/\delta)^2$ 이다.

차폐체를 제작하기 위해 비자성 물질의 아크릴로 만든 실린더형 튜브와 상용화된 비정질 리본을 사용하였는데, 제조사에서 제공한 리본 특성은 Table I과 같다. 실험에 사용한 차폐체는 ASTM (American Society for Testing and Materials) 규격을 만족하도록 실린더 지름과 길이를 각각 헬름홀츠코일 지름의 1/3 이하인 260 및 500 mm로 하였다. 차폐체는 비정질리본을 15° 경사로 밀착시켜 감아 제작하였는데, 가장자리는 약 3 mm씩 겹치게 하여 누설자속을 방지하였고 실린더의 양단은 차폐하지 않았다. Fig. 1은 헬름홀츠코일을 이용한 저주파 자기장 발생장치로, ASTM의 제안 규격

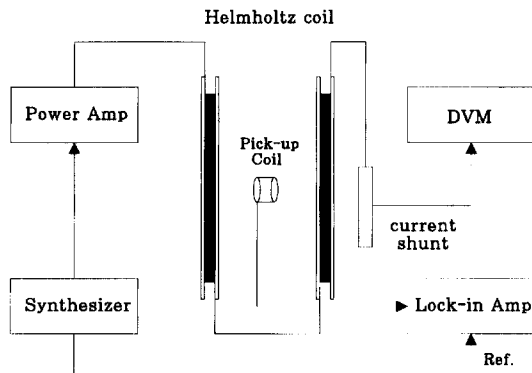


Fig. 1. A schematic diagram for the system generating low-frequency magnetic field.

[4]에 따라 제작된 것이다. 저주파 자기장 발생장치의 구성은 지름 1200 mm인 목재 보빈에 동선을 40회 감은 헬름홀츠코일과 synthesizer (HP3325), power amplifier (Techron, Model TEC 7572), lock-in amplifier (EG&G)로 이루어져 직류 및 교류 자기장을 인가할 수 있다. 헬름홀츠코일의 중앙에 실린더형 차폐체를 넣고 차폐체 횡방향으로 자기장을 인가하여 차폐체 중앙에서 교정된 픽업코일 (pick-up coil) 또는 교정된 홀가우스미터 (hall gaussmeter)를 이용해 차폐된 자기장을 측정하였다.

III. 실험결과 및 고찰

본 연구에서 사용된 5가지 비정질 재료의 α 및 β 값을 Table I의 최대투자율, 비저항, 두께 등을 고려하여 계산한 다음 이를 이용하여 계산한 S_{cr} 의 결과를 Table II에 나타내었다. 그리고 α 와 β 에 따른 이론값 S_{cr} 의 변화를 Fig. 2에 도식하였다.

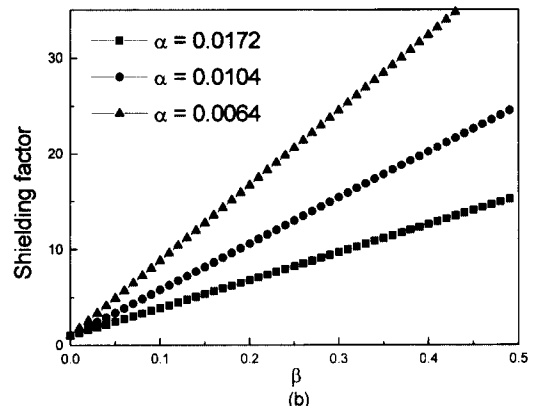
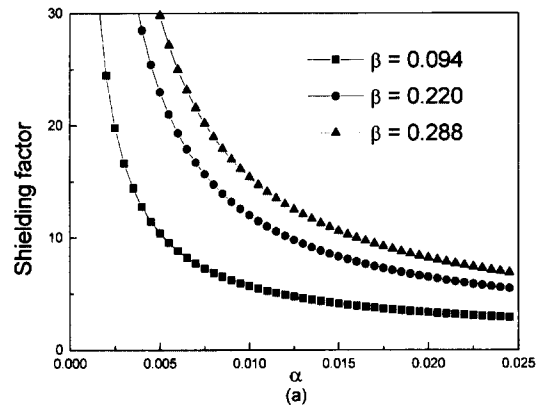


Fig. 2. Theoretical values of S_{cr} as a function of (a) α for typical values of β and (b) β for typical values of α .

Table II. The value of δ , α , β , S_{ct} calculated by formula (2) with values in Table I

Materials	δ (mm)	α	β	S_{ct}
2605SC	0.378	1.72×10^{-2}	0.094	3.74
2826MB	0.342	1.52×10^{-2}	0.178	6.86
2605CO	0.208	1.04×10^{-2}	0.220	11.57
2714A	0.274	1.19×10^{-2}	0.111	5.86
2705M	0.141	6.37×10^{-3}	0.288	23.64

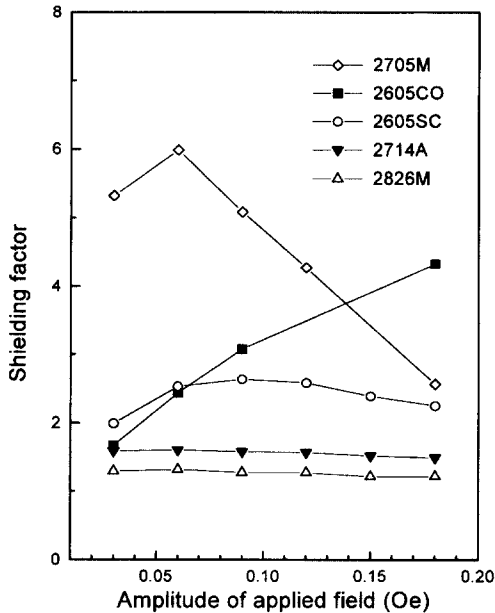


Fig. 3. The shielding factors of 5-amorphous ribbons measured at 60 Hz.

Fig. 3은 5 종류의 비정질 리본으로 제작한 단층 차폐체의 차폐인자를 주파수 60 Hz에서 측정된 결과이다. 2705M의 차폐인자는 $S=6$ 으로 가장 높았으나, 0.06 Oe이상에서는 saturation effect로 인하여 점차 감소하였다. 반면, 2605CO의 차폐인자는 0.2 Oe까지 단조증가하였다. 2826MB, 2714A 및 2705M을 이용한 단층 차폐체들의 차폐인자들은 제조사가 제공한 최대 투자율에 따른 계산값의 1/8~1/2에 해당하였다.

Fig. 4는 극저주파 대역에 속하는 20~100 Hz일 때 0.5 Oe세기에서 측정된 Fe-based 비정질리본인 2605CO와 2605SC의 단층 차폐효과를 나타낸 것이다. 2605SC의 경우 측정된 결과는 $S=3\sim4$ 로 실험 주파수 범위에서 주파수 의존성을 거의 보이지 않고 계산 결과와 잘 일치하였다. 그러나, 2605CO의 경우 인가자장 주파수가 20에서 100 Hz로 증가함에 따라 차폐인자는

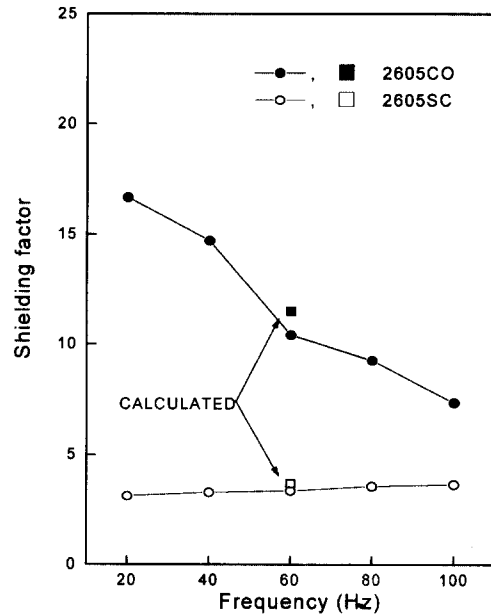


Fig. 4. The frequency dependencies of shielding factors measured in a field intensity of 0.5 Oe.

17에서 7.5로 감소하였다. 본 연구에서 사용한 시료들이 대해 침투깊이 δ 를 20Hz와 100Hz에서 주파수의 함수로 계산하고 이론식 (2)에 적용하여 차폐인자 S 를 계산하면 그 차이가 매우 작아 δ 의 변화는 차폐효과에 큰 영향은 미치지 못함을 알 수 있었다. 따라서, 주파수가 증가함에 따라 차폐인자가 감소하는 원인은 투자율 감소에 기인한다. 결국, 차폐효과는 차폐재료에 따라 상대적으로 매우 낮은 주파수에서도 급격히 변화할 수 있으므로 저주파 자기장에서의 사용되는 차폐재료의 선택시 주파수 특성도 고려해야 된다.

한편, 다른 종류의 차폐재료를 활용한 복층 차폐체에서 차폐재료들의 배열 순서 및 간격에 따른 차폐효과를 연구하고자, 단층 차폐체 실험에서 차폐효과가 가장 좋은 두 재료를 이용하여 복층 차폐체의 차폐효과를 연구하였다. Fig. 5는 60 Hz에서 2705M과 2605CO를 층과 층사이 공간은 두지 않고 복층으로 하여 실험한 결과이다. S_i, S_o 를 각각 안쪽 및 바깥쪽 차폐체의 단층 차폐인자라고 하면 이들을 복층으로 할 경우의 복층 차폐인자는 다음 식(3)으로 표현된다[2].

$$S = S_i S_o (1 - D_i^2 / D_o^2) + S_i + S_o + 1 \quad (3)$$

여기서, D_i 및 D_o 는 각각 안쪽과 바깥쪽 차폐층의 직경

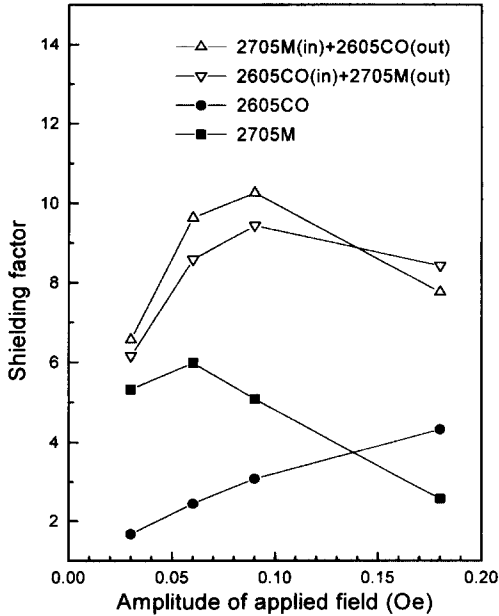


Fig. 5. The shielding factors of 2705M shell, 2605CO shell and double shell shields measured at 60 Hz.

이다. 0.2 Oe 이하의 실험자기장 세기에서 측정된 2705M 및 2605CO 복층 차폐체의 차폐인자는 식(3)으로부터 계산한 이론값과 일치하였다. 차폐층간의 간격이 없는 경우에 복층 차폐인자는 각 단층의 배열순서에 둔감하였으나, 자기장 세기가 0.14 Oe 이하에서 2605CO를 바깥층으로 한 경우가 2605CO를 안쪽층으로 한 경우보다 차폐인자가 다소 높게 나왔다. 이것은 바깥층을 2605CO로 한 경우, 높은 자기장에서도 포화되지 않는 바깥층 2605CO가 외부 자기장을 효과적으로 차폐하고, 안쪽층 2705M 역시 1차적으로 차폐된 낮은 세기의 자기장을 효과적으로 차폐하기 때문이다. 바깥층을 2705M으로 한 경우 낮은 자기장세기에서 2705M이 쉽게 포화되어 미분 투자율(differential permeability)이 작아지고 안쪽층 2605CO의 투자율도 높지 않기 때문이다. 따라서, 차폐재료의 배열 순서가 매우 중요함을 알 수 있었다.

배열 순서의 중요성을 더 자세히 알아보기 위해, 복층 차폐체의 층과 층 사이에 공간을 두고 배열 순서를 다르게 하여 차폐인자를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 6에 도식하였다. 2705M 및 2605CO로 제작된 복층 차폐체는 바깥층 및 안쪽층의 지름이 각각 90, 70 mm이며 두 층의 간격은 10 mm이었다. 차폐후 자장은 홀가우스미터로 측정하였다. 이 경우 식(3)에 의해 계산한

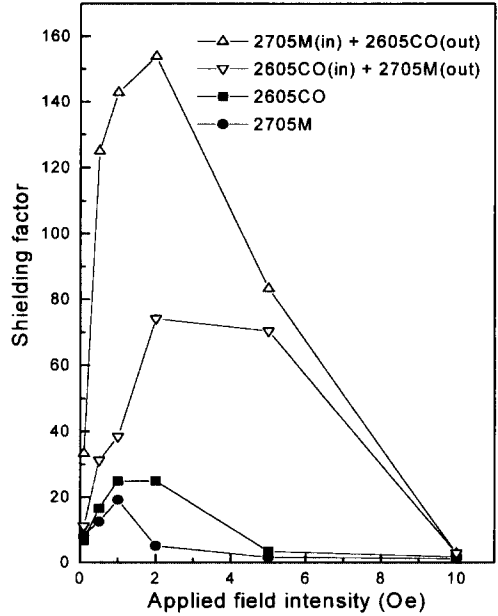


Fig. 6. The shielding factors of 2705M shell, 2605CO shell and two shell of 2705M and 2605CO in D.C. field.

차폐인자는 $S = 80$ 이고, 안쪽층이 2705M인 복층 차폐체 A와 안쪽층이 2605CO인 복층 차폐체 B의 차폐효과를 측정된 결과, 2 Oe에서 복층 차폐체 A는 $S = 154$ 로 복층 차폐체 B의 $S = 74$ 보다 약 2배의 차폐효과가 나타났다. 복층 차폐체 A의 측정값과 이론값이 일치하지 않는 것은 이론식의 가정은 차폐재료의 투자율이 자기장세기에 대해 상수이지만, 실제 차폐재료의 미분 투자율은 자기장의 세기에 따라 변하기 때문이다. 따라서, 복층 차폐체 A의 안쪽층(2705M)이 차폐하는 자장은 2 Oe가 아닌 바깥 차폐층에 의해 1차적으로 감쇠된 자기장이 되는데, 1차적으로 감쇠된 자기장세기에서 복층 차폐체 A의 안쪽층(2705M)은 투자율이 매우 높기 때문에 복층 차폐체 A는 높은 차폐인자를 보인다. 이는 다른 종류의 차폐재료를 이용하여 복층 차폐체를 설계할 때에는 반드시 배치 순서와 배치 간격을 고려해야 함을 의미한다.

IV. 결 론

저주파 자기장에서의 실린더형 복층 차폐체의 차폐효과를 연구하였다. 2705M과 2605CO를 이용한 복층 차폐체의 경우, 2605CO를 바깥층으로 한 경우가 2705M을 바깥층으로 한 경우보다 상대적으로 2배 이

상의 차폐효과를 얻을 수 있었다. 이것은 바깥층(2605CO)에 의해 1차적으로 감쇠된 자기장 자기장 세기에서 안쪽층(2705M)이 매우 높은 투자율을 나타내기 때문이다. 따라서, 복층 차폐 설계시 바깥층 재료가 외부 자기장을 효과적으로 차폐하여 안쪽층 재료에 작용하는 자기장의 세기가 안쪽층 재료의 최대 투자율을 보이는 자기장 세기에 해당하도록 차폐층간의 간격, 차폐 재료 및 순서를 선택하여야 한다.

참 고 문 헌

- [1] V. O. Kelha, J. M. Pukki, R. S. Peltonen, A. J. Penttinen, R. J. Ilmoniemi, and J.J. Heino, IEEE Trans. Magn. 18, 260(1970).
- [2] A. J. Mager, IEEE Trans. Magn. 6, 67(1970).
- [3] I. Sasada, T. Yamauchi and Y. Yatomi, IEEE Trans. Magn. 32 (5), 4923(1996).
- [4] Standard test method for magnetic shield efficiency in attenuating alternating magnetic fields, ASTM, A698/A698M-92.

Magnetic Shielding Effect of Amorphous Strips in Low Frequency Field

S. G. Kim, J. Hur, P. G. Park, Y. C. Chung, Y. B. Kim

Korea Research Institute of Standards and Science, P.O. BOX 3, Taejon 305-606, Korea

T. K. Kim

Chungnam National University

Dept. of Metallurgical Engineering, Chungnam National Univ., Taejon 305-704, Korea

(Received 22 July 1998, in final form 10 November 1998)

Magnetic shielding effect of cylindrical shields made of commercial amorphous ribbons has been studied. The shell-arrangement-order of double shell shield has been found to show a striking difference in shielding factor. In low applied field region, a 2605CO-2705M-shield (outer shell: 2605CO, inner shell: 2705M) yields two times higher shielding factor than a 2705M-2605CO-shield (outer shell: 2705M, inner shell: 2605CO). The reasons are as follows: In case of 2605CO-2705M-shield, the outer shell is not easily saturated and effectively shields the applied field. In addition, the inner shell shows high shielding factor in the field shielded by the outer shell. In case of 2705M-2605CO-shield, the outer shell is saturated at very low field as well as the inner shell shows low shielding factor in the field shielded by the outer shell.