

FeSiCr 박편/폴리머 복합 시트의 전자파 흡수 특성에 미치는 합금 어닐링 효과

김주범 · 노태환*

안동대학교 신소재공학부, 경북 안동시 송천동 388, 안동 760-749

(2013년 5월 9일 받음, 2013년 6월 5일 최종수정본 받음, 2013년 6월 7일 게재확정)

두께 1 μm 정도의 연자성 Fe-Si-Cr 합금 박편을 편상화 가공을 실시한 그대로 및 500과 700 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1시간 어닐링한 후 이를 폴리머 중에 분산시켜 준마이크로파 대역의 전자파 노이즈 억제용 복합 시트를 제조하여, 자성 합금의 열처리와 전자파 전송 손실(전력 손실)에 미치는 영향을 조사하였다. 합금 분말을 어닐링하지 않은 것이 어닐링한 분말을 사용한 경우보다 수 GHz의 주파수 대역에서 전력 손실의 크기가 증가하였다. 이 때 복소 투자율의 허수항 크기도 어닐링을 하지 않았을 때 더 큰 값을 나타내었는바 편상화 가공 상태의 자성 분말을 사용한 복합 시트가 우수한 전자파 노이즈 흡수 특성을 가지며, 이에 높은 복소 투자율의 허수항 크기가 기여하고 있는 것으로 판단되었다. 반면 편상화 시킨 합금 박편을 어닐링 한 경우에는 와전류 효과의 증대에 따라 복소 투자율이 낮아지고 따라서 전력 손실도 저하되는 것으로 생각되었다.

주제어 : FeSiCr 박편/폴리머 복합 시트, 전자파 흡수 특성, 어닐링

I. 서 론

컴퓨터, 휴대전화 등 각종 전자 및 정보통신 기기의 디지털화, 고주파화 및 경박단소화, 부품의 고집적화가 빠르게 진행되면서 최근 GHz 대역의 전자파 간섭 및 장애 문제가 대단히 심각해지고 있다. 근래 이에 대한 대응책의 하나로써 포화 자화 값이 큰 각종 연자성 합금 박편을 폴리머 중에 분산시켜 만든 얇은 복합 시트를 노이즈 방시원 근방에 설치하여, 입사되는 전자파 노이즈 에너지를 이의 자기 손실로서 흡수하는 기술 방안이 광범위하게 연구 개발되고 있다[1-6].

과거 많이 사용되던 전자파 흡수용 복합체로는 Ni-Zn 페라이트 분말을 고무와 혼합하여 만든 시트 등이 잘 알려져 있으나, 연자성 페라이트의 경우 포화 자속밀도가 작아서 상대적으로 낮은 주파수 대역에 Snoek의 한계가 위치하므로 이들을 GHz 대역의 고주파 노이즈 대책 부품으로 사용하기에는 성능이 불충분한 것으로 보고된 바 있다[2, 5].

일반적으로 어떤 자성체에 교류 자기장 $H = H_0 \cos \omega t$ (ω : 각주파수, t : 시간)이 인가될 때, 발생하는 에너지 손실(P)은

$$P = \frac{1}{2} \omega \mu'' H_0^2 \quad (1)$$

으로 주어진다[7]. 여기서 μ'' 은 이 자성체의 복소 투자율의 허수부이다. 따라서 GHz 대역에서 전자파 흡수용 복합 시트

가 우수한 노이즈 억제효과를 얻기 위해서는 이에 사용되는 자성 분말의 복소 투자율이 GHz 영역에서 높아야 한다.

또 복합 시트용 금속 연자성 분말은 표피 깊이 정도로 얇게 박편으로 가공하여 형상 이방성을 증대시키고 와전류 손실을 낮추는 것이 GHz 대역까지 큰 투자율을 나타낼 수 있게 한다.

현재 전자파 노이즈 흡수용 복합 시트의 연자성 합금 분말로는, 이상과 같은 원리에 따라 상대적으로 포화 자화와 전기 저항이 크면서 박편으로의 소성 가공이 가능한 FeCrSiAl계 내식강[1], FeSi 규소강[2], 스테인레스 자성강[3], FeCuNbSiB 나노결정 합금[4], FeSiAl계 센더스트[5, 6] 등이 사용되고 있거나 그 특성이 평가된 바 있다.

본 연구에서는 이들 합금 이외에 새로운 복합 시트용 연자성 합금 분말로서, 근래 Si 농도를 약 6.5%까지 높일 때 포화 자기변형이 거의 0이 되면서 결정 자기이방성이 감소하고 전기 저항이 증가하여 매우 우수한 교류 특성을 나타내는 것으로 알려져 있는 FeSi계 고규소강 합금의 사용을 검토하여 보았다. 즉 6.5%Si-Fe의 고규소강 합금 분말을 얇은 박편으로 편상화하고 이를 폴리머와 혼합하여 복합 시트를 제조한 다음 전자파 흡수특성을 조사 분석하였다.

그런데 전자파 노이즈 흡수 시트의 성능은 이러한 자성 분말의 성분 이외에 자성 분말의 열처리, 형상, 입도 및 미세조직, 폴리머와의 혼합비, 시트 두께 등 대단히 많은 인자에 의존할 것으로 예상된다. 본 논문에서는 이들 중 자성 박편의 어닐링의 영향을 밝히고자, 동일 편상화 공정을 거친 합금 분말을 열처리 상태에 따라 3 그룹으로 분류한 후 이들 각각을

가지고 시트를 제조한 후 그 특성을 평가하였다.

II. 실험방법

수분무법으로 만든 92.6%Fe-6.5%Si-0.9%Cr(wt%) 합금 분말(휴먼일렉스사 제조)에 대하여 어트리션 밀(KMS-1B)을 이용하여 편상화 가공을 실시하였다.

상기 어트리션 밀은 임펠러(impeller)로 원통 용기 내에 장입된 밀링 볼을 강제적으로 교반하는 장치로서, 금속 분말은 이들 볼 사이에서 충돌 각도에 따라 연속적으로 압축, 전단, 마찰, 냉간 압접과 파괴를 일으키면서 변형되는데, 양호한 박편형 합금 분말의 제조를 위해서는 적절한 밀링 볼의 크기, 임펠러의 회전속도, 볼 대 분말 시료의 장입 비율 등이 예비 실험에 의해 미리 파악되어 있어야 한다.

본 실험에서 사용된 밀링 볼은 스테인레스강 제품이었고 밀링 용기의 용량은 1,000 cc였으며, 모든 밀링은 에탄올을 용매로 한 습식법으로 이루어졌다. 그리고 밀링 볼의 직경은 12.6 mm, 임펠러의 회전 속도는 150 rpm, 볼과 분말 시료의 장입비는 30 : 1이었으며, 최대 21시간까지 밀링하였다.

밀링에 의해 편상화된 합금박편은 체진동기를 사용하여 26~45 μm 크기로 분급하고 이들을 각각 500, 700 °C에서 1 시간 동안 진공 분위기에서 어닐링한 다음, 폴리우레탄 수지와 40 : 60의 중량비로 혼합한 뒤 닥터 블레이드법을 이용한 테이프 캐스팅으로 두께 0.7 mm의 복합 시트를 제조하였다.

수분무법으로 만들어진 원료 분말과 편상화 가공에 의해 얻어진 박편형 분말의 외형 및 복합 시트의 단면은 주사 전자현미경(SEM, Jeol-JSM 6300)으로 관찰되었으며, X-선 회절법(Cu K α 특성선 이용)으로 구조 분석을 실시하였고 진동 시료형 자력계(VSM)로 정적 자화 특성을 조사하였다.

또 복합 시트의 전자과 흡수 특성은 네트워크 분석기(HP-8722D)를 이용한 S 파라미터(반사 파라미터 S₁₁, 투과 파라미터 S₂₁), 복소 투자율 등의 측정을 통해 평가되었다. 이 때 전자파의 전송 특성 S₁₁ 및 S₂₁의 값은 선로 길이가 79.536 mm이고 폭이 2.243 mm이며 특성 임피던스가 50 Ω인 마이크로 스트립 라인 상에 가로 세로가 각각 5 cm인 사각형의 시트 시료를 배치하여 측정하고, 복소 투자율은 시료 형상을 내경 3 mm/외경 7 mm의 링 모양으로 가공하여 측정하였다[8].

III. 실험결과 및 고찰

Fig. 1의 (a)와 (b)는 각각 수분무법으로 제조된 원료 합금 분말 및 이를 21시간 동안 밀링한 후 편상화시킨 26~45 μm 크기의 박편(flakes) 모습을 보여주고 있다.

이 그림 (a)와 같이 수분무법에 의해 용탕 급냉된 분말은

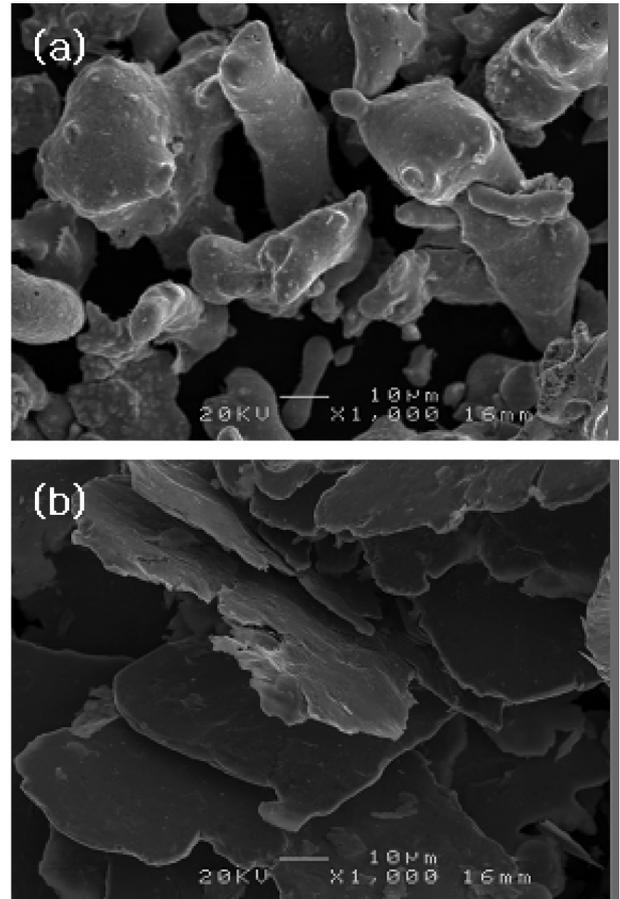


Fig. 1. The SEM images of (a) as-atomized FeSiCr alloy powders, and (b) flakes milled for 21 h (1000×).

그 모양이 매우 불규칙하고 크기도 10 μm 이하의 작은 분말로부터 100 μm 이상에 이르는 큰 것까지 대단히 넓은 분포를 하고 있는데, 이들 분말을 밀링하면 (b)와 같이 두께가 1 μm 전후로 되어 보이는 아주 얇은 박편으로 편상화 가공이 일어나면서 입자 직경도 상당히 증가하였다.

이러한 형상을 지닌 합금 박편의 자화곡선을 VSM으로 구해 보면, 보자력이 9.6 Oe(약 770 A/m), 포화자화는 136.7 emu/g(약 1.28 T)의 값을 나타내어 강한 소성 가공에 의해 큰 형상 이방성이 부여된 분말 시료로서는 비교적 작은 보자력을 가지고 있었으며, 포화 자화는 일반 규소강의 3.0%Si-Fe 합금보다는 훨씬 작으나 기존의 대표적 고연자성 소재인 센더스트나 페라이트보다 상당히 큰 값을 가지고 있었다.

Fig. 2에는 편상화 후 열처리에 의해 변화되는 합금의 X-선 회절 곡선을 보여주고 있다. 편상화 가공(as-milled) 상태에서는 상대적으로 회절 강도가 낮으면서 피크의 폭이 커 상당히 심한 소성 변형을 받은 미세조직의 특징을 나타내어 어닐링 온도의 상승에 따라 회절 피크의 폭이 감소하면서 강도는 크게 증가하여 미세조직상의 회복 및 결정립 크기의 증가

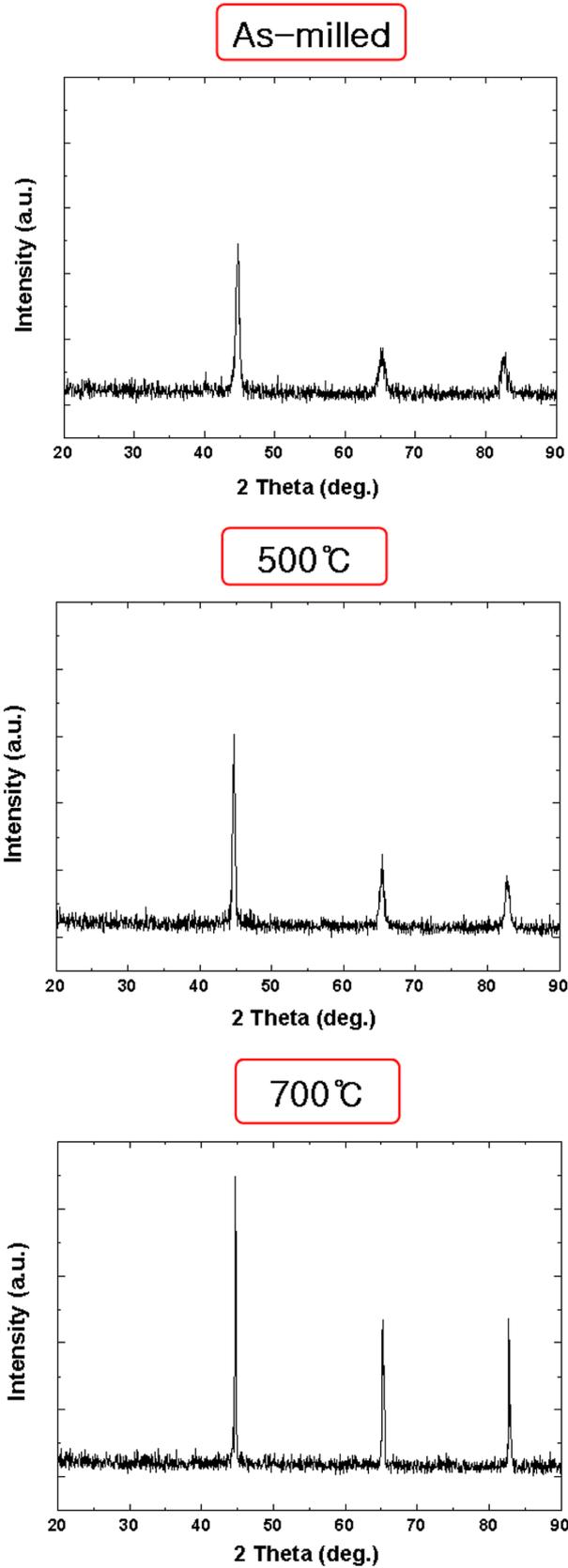


Fig. 2. (Color online) The X-ray diffraction patterns of FeSiCr alloy flakes in as-milled state and annealed at 500 and 700 °C for 1 h, respectively.

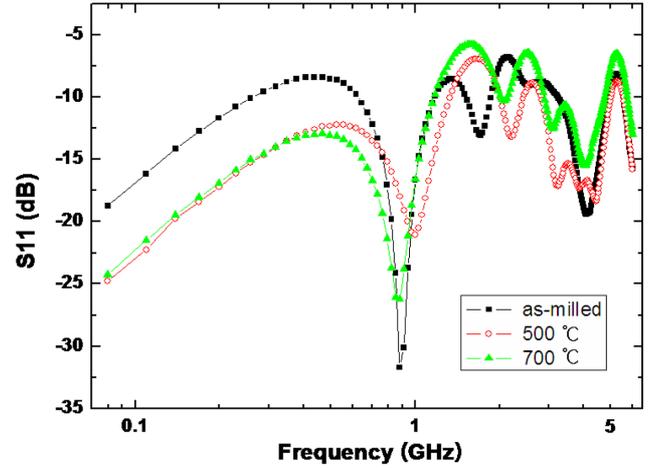


Fig. 3. (Color online) The frequency dependence of reflection parameter S_{11} for the composite sheets including FeSiCr alloy flakes in as-milled state and annealed at 500 and 700 °C for 1 h, respectively.

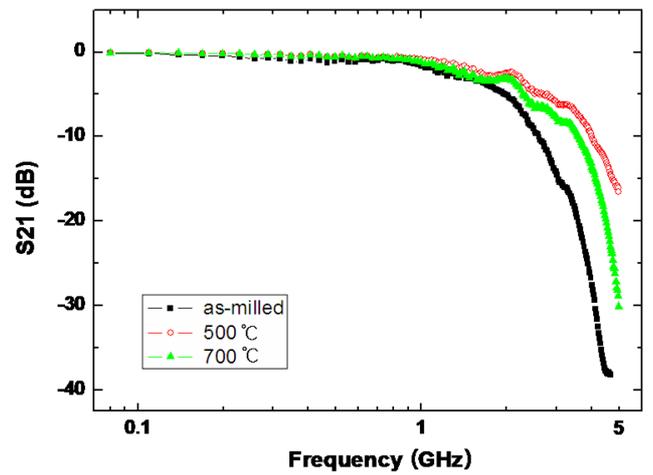


Fig. 4. (Color online) The frequency dependence of transmission parameter S_{21} for the composite sheets including FeSiCr alloy flakes in as-milled state and annealed at 500 and 700 °C for 1 h, respectively.

와 같은 현상이 일어났음을 추정케 하는 변화가 관찰되고 있다. 이 때 결정구조는 모두 체심 입방구조의 α -Fe 단상을 나타내어 열처리에 따른 변화가 없는 것으로 분석되었다.

이상과 같은 형상과 미세구조의 박편을 이용하여 복합 시트를 만든 후, 네트워크 분석기를 사용하여 전자파의 반사 및 투과 특성에 대하여 측정된 결과를 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타내었다.

복합 시트의 전자파 반사계수를 Γ , 투과계수를 T 라고 할 때, 이들과 반사 파라미터 S_{11} 및 투과 파라미터 S_{21} 은

$$S_{11} = 20 \log|\Gamma| \quad (2)$$

$$S_{21} = 20 \log|T| \quad (3)$$

의 관계로 주어진다[9].

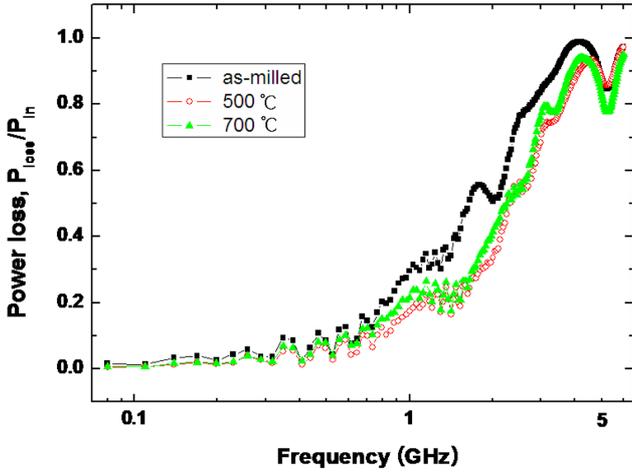


Fig. 5. (Color online) The frequency dependence of power loss(P_{loss}/P_{in}) for the composite sheets including FeSiCr alloy flakes in as-milled state and annealed at 500 and 700 °C for 1 h, respectively.

Fig. 3에서 주파수에 따라 다양한 반사손실을 나타내는데 전반적으로 -10~-30 dB의 상당히 낮은 범위에 걸쳐 분포하고 있으나, 어닐링 온도에서 따라 일관성 있는 변화는 보여주고 있지 않다. 다만 1 GHz 이하의 경우, 열처리한 분말의 경우 좀 더 낮은 반사손실 값을 보이고 있다.

한편 Fig. 4에 나타내고 있는 투과 파라미터 S_{21} 은 S_{11} 의 변화 거동과 달리, 일관된 변화를 보여주고 있다. 1 GHz까지는 어닐링 온도에 따라 별 차이를 보여주지 못하나 그 이상의 주파수에서는 어닐링을 하지 않았을 때 S_{21} 의 크기가 현저하게 낮아지고 있음을 볼 수 있다.

이상과 같은 Fig. 3 및 Fig. 4의 S 파라미터 특성으로부터 전자파 전송 손실(전력 손실) P_{loss}/P_{in} 를 다음 식으로 구하였으며[9], 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

$$\frac{P_{loss}}{P_{in}} = 1 - (|\Gamma|^2 + |T|^2) \quad (4)$$

이 그림에서 보는 바와 같이 전송 손실은 전반적으로 주파수의 증가와 함께 증대되어 4.5 GHz 근방이 되면 거의 0.9의 값에 근접하였다. 또 전반적으로 어닐링을 하지 않은 분말을 사용한 경우 전체적으로 더 높은 전력 손실을 나타내고 있다. 이에 따라 as-milled 상태의 자성 입자를 사용한 복합 시트의 전자파 흡수 특성 및 노이즈 억제 효과가 더 우수함을 알 수 있었다.

이와 같은 전송 손실의 주파수 및 어닐링 의존성과 대비시키기 위해, $\mu = \mu' - j\mu''$ (j : 복소수)로 주어지는 복소 투자율의 주파수와 어닐링에 따른 변화를 조사하여 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 이 때 Fig. 6은 복소 투자율의 실수부를 그리고 Fig. 7은 허수부를 표시하고 있는데, 이들 그림에서 as-milled

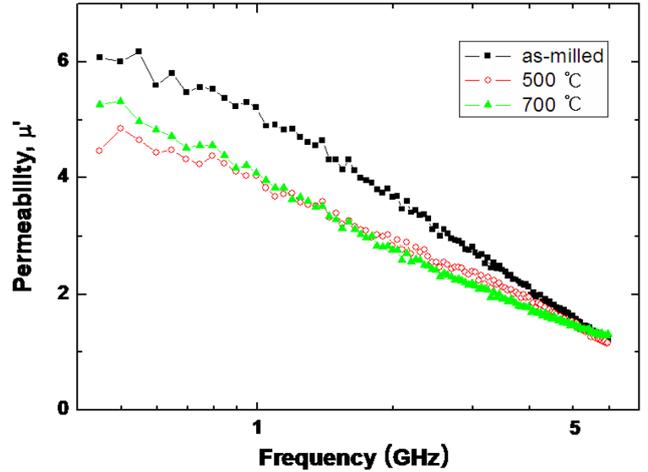


Fig. 6. (Color online) The frequency dependence of real part of complex permeability (μ') for the composite sheets including FeSiCr alloy flakes in as-milled state and annealed at 500 and 700 °C for 1 h, respectively.

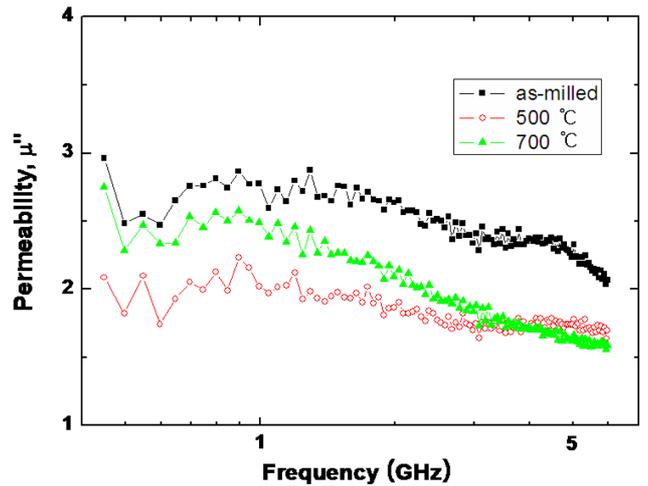


Fig. 7. (Color online) The frequency dependence of imaginary part of complex permeability (μ'') for the composite sheets including FeSiCr alloy flakes in as-milled state and annealed at 500 and 700 °C for 1 h, respectively.

상태의 자성 박편을 사용한 시트가 전 측정 주파수 범위에서 복소 투자율이 더 크울 알 수 있다. 이에 따라 as-milled 상태의 자성 박편 분말이 더 큰 전송 손실을 보였던 Fig. 5의 결과는, 서론에서 설명한 바에 의해, 이들의 높은 복소 투자율 특히 허수부가 더 큰 것에 기인하는 것으로 판단되었다.

원리적으로 교류 자화에서는 자심의 두께가 두꺼울수록 그리고 전기 저항이 작을수록 더 큰 와전류 손실 효과가 나타난다. Fig. 6 및 Fig. 7에서와 같이 as-milled 상태에 비해 어닐링한 박편을 시트 재료로 사용한 경우 더 낮은 복소 투자율을 나타내는 것은, 이들 합금을 어닐링 할 경우 미세조직의 회복 및 재결정 등이 발생하여 이들의 전기 비저항이

낮아지면서 고주파에서 이러한 와전류 효과가 매우 크게 작용하였기 때문으로 여겨진다.

일반적으로 연자성 재료를 소성 가공한 후 어닐링을 하면 응력 완화 및 결정 결함의 감소에 의해 자벽 이동이 용이해지고 따라서 투자율이 증가한다. 그러나 이 현상은 대체로 수십 MHz 이하의 낮은 주파수 범위에서 일어나며[10], 자벽 공명이 일어나는 주파수보다 높은 수 GHz 대역에서는 자벽 이동의 투자율 기여 효과의 소멸과 함께 전기 비저항의 감소에 따른 와전류 효과의 증대가 현저해져 오히려 투자율이 감소한 것으로 생각된다.

그리고 자화의 증가를 방해하는 방향으로 일어나는 와전류 효과가 증대되어 복소 투자율의 크기가 감소하는 경우, 통상 실수부와 허수부가 같이 작아진다.

IV. 결 론

수분무법으로 얻어진 연자성 Fe-Si-Cr 합금 분말을 어트리션 밀로써 두께가 1 μm 정도 되도록 편상화 가공한 다음, 가공 상태 그대로 및 500과 700 °C에서 어닐링 하고 이를 폴리머 중에 분산시켜 준마이크로파 대역의 전자파 노이즈 억제용 복합 시트를 제조하여, 자성 합금의 어닐링이 전자파 전송 손실(전력 손실)에 미치는 영향을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

합금 박편을 어닐링하지 않은 것이 열처리한 분말을 사용한 경우보다 수 GHz의 주파수 대역에서 전력 손실의 크기가 증가하였다. 이 때 복소 투자율의 허수항 크기도 어닐링을 하지 않았을 때 더 큰 값을 나타내었는바, 이로부터 as-milled 상태의 자성 박편을 사용한 복합 시트가 우수한 전자파 노이즈 흡수 특성을 가지며, 이에는 그의 높은 복소 투자율의 허

수항 크기가 주로 기여하고 있는 것으로 판단되었다.

반면 편상화 시킨 합금 박편을 어닐링 한 경우에는 와전류 효과의 증대에 따라 복소 투자율이 낮아지고 따라서 전력 손실도 저하되는 것으로 추정되었다.

감사의 글

이 논문은 2010학년도 안동대학교 국제학술교류보조금에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] Y. Aikawa and K. Yanagimoto, Sanyo Technical Report **9**, 59 (2002).
- [2] Y. Hashimoto and H. Kurihara, Engineering Materials **46**, 36 (1998).
- [3] A. Saito, M. Ogawa, K. Tutui, H. Endo, and S. Yahagi, Materia Japan **38**, 46 (1999).
- [4] Y. Bizen, J. Sunakawa, S. Arakawa, and S. Takaoka, Hitachi Metals Technical Report **16**, 39 (2000).
- [5] S. Yoshida, J. Magn. Soc. Jpn. **22**, 1353 (1998).
- [6] S. Yoshida, M. Sato, and Y. Shimada, J. Magn. Soc. Jpn. **22**, 1377 (1998).
- [7] K. Ohta, Fundamentals of Magnetic Engineering II, Kyoritsu, Tokyo (1973) p. 305.
- [8] D. I. Kim, Electromagnetic Wave Absorber, Daeyoungsa, Seoul (2006) p. 175.
- [9] S. Yoshida, H. Ono, S. Ando, S. Ohnuma, M. Yamaguchi, and Y. Shimada, Materia Japan **42**, 193 (2003).
- [10] T. H. Noh, Magnetic Materials, Dooyangsa, Seoul (2006) p. 334.

Effects of Annealing on Electromagnetic Wave Absorption Characteristics in FeSiCr Flakes/Polymer Composite Sheets

Ju-Beom Kim and Tae-Hwan Noh*

School of Materials Science & Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea

(Received 9 May 2013, Received in final form 5 June 2013, Accepted 7 June 2013)

The soft magnetic Fe-Si-Cr flakes with the thickness of about 1 μm were annealed at 500 and 700 $^{\circ}\text{C}$ for 1 h, and the composite sheets for electromagnetic wave noise absorber available for quasi-microwave band were fabricated by using these annealed flakes and polymer. Further the power loss characteristics of the composite sheets was investigated to clarify the annealing effect on electromagnetic wave absorption properties. The power loss decreased in the frequency range of several GHz when the annealed flakes were used as compared to the sheet using the as-milled FeSiCr alloy flakes. Moreover the sheets using annealed flakes exhibited lower value of real and imaginary part of complex permeability. These inferior electromagnetic wave absorption properties of the composite sheets using annealed alloy flakes were considered to be obtained by the enhanced eddy current effect upon annealing-induced recovery of microstructure and resulted low complex permeability.

Keywords : FeSiCr flakes/polymer composite sheets, electromagnetic wave absorption characteristics, annealing