

연자성 나노결정합금 분말의 열처리 온도에 의한 전자파 흡수 특성의 영향

홍순호^{a, b} · 손근용^a · 박원욱^{a*} · 문병기^b · 송용설^c

^a인제대학교 나노시스템공학과, ^b한국기계연구원 부설 재료연구소, ^c주아모센스

Effect of Annealing Temperature on the Electromagnetic Wave Absorbing Properties of Nanocrystalline Soft-magnetic Alloy Powder

S. H. Hong^{a, b}, K. Y. Sohn^a, W. W. Park^{a*}, B. G. Moon^b and Y. S. Song^c

^aDepartment of Nano-systems Engineering, Inje University, Gimhae, Korea (ROK)

^bLight Metals Research Group, Korea Institute of Materials Science,
531 Changwondaero, Changwon, Korea (ROK)

^cAMONSENSE, 185-1 Sucham-Ri, Tongjin-Myun, Gimpo, Korea (ROK)

(Received January 10, 2008; Accepted February 11, 2008)

Abstract The electromagnetic (EM) wave absorption properties with a variation of crystallization annealing temperature have been investigated in a sheet-type absorber using the $\text{Fe}_{73}\text{Si}_{16}\text{B}_7\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ alloy powder. With increasing the annealing temperature the complex permeability (μ_c), permittivity (ϵ_c) and power absorption changed. The EM wave absorber shows the maximum permeability and permittivity after the annealing at 610°C for 1 hour, and its calculated power absorption is above 80% of input power in the frequency range over 1.5 GHz.

Keywords : Electromagnetic wave absorption, Nanocrystalline, Annealing, Permeability, Permittivity

1. 서 론

현대과학의 눈부신 발전으로 인하여 전기·전자기기의 소형화 및 경량화, 고주파화, 디지털화, 집적화가 이루어졌으나 첨단화된 전자기기에서 방사되는 전자파가 전자기기 상호간 또는 인체에 악영향을 준다는 연구결과가 발표되면서 이를 해결하고자 하는 노력이 많은 연구자들에 의해 이루어지고 있다.

전자파 장해문제를 해결하기 위해서는 기기 내부에서 방사되거나 외부에서 들어오는 불필요한 전자파를 흡수하여 열로 변환하고 게다가 손쉽게 장착이 가능한 전자파 흡수체를 사용하는 것이 매우 효과적이다. 이러한 전자파 흡수체는 사용하고자 하는 주파수 대역에서 매질의 자기손실, 도전손실, 그리고 유전손실이 큰 재료를 이용하거나 이들을 혼합하여 최

대의 손실특성을 나타내는 재료를 사용한다. 특히 자기손실 재료는 다른 전자파 흡수체보다 고주파 대역에서 사용되며, 자벽공명 및 자연공명에 기인한 자성 손실을 이용하는 것으로 두께가 얇고 동작 주파수 범위가 넓은 장점이 있다¹⁻³⁾.

종래 개발된 우수한 연자성 합금으로는 비정질 및 나노 결정립 합금을 들 수 있다. 이중 나노 결정립 합금은 일반적으로 급속응고법을 사용하여 제조된 비정질 리본 합금에 대하여 적정 온도에서 결정화 열처리를 통하여 만들어진다. Yoshizawa 등에 의해 개발된 FeSiBNbCu 계 나노 결정립 합금의 경우, 10~15 nm 정도 크기의 미세한 $\alpha\text{-Fe}(\text{Si})$ 상의 결정립과 Nb 등이 농축된 비정질 입계상으로 구성되어 있다. 결정립 크기가 강자성 교환거리보다 작기 때문에 실효적 결정자기이방성이 극소화 되어 있고, 적정 온

*Corresponding Author : [Tel : +82-55-320-3872; E-mail : wwpark@inje.ac.kr]

도에서 열처리 함으로써 자기변형상수도 0에 근접한 값을 보이며, 미세 결정립 및 비정질 입계가 공존함으로써 높은 전기비저항을 나타내고, 또한 Fe계 비정질 합금에 비해 우수한 투자율을 가진다^{4,5)}.

본 연구에서는 철계 나노 결정립 합금을 적정 온도에서 열처리함으로써 합금의 투자율을 달리하여 고주파에서 사용되는 전자파 흡수체의 흡수특성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

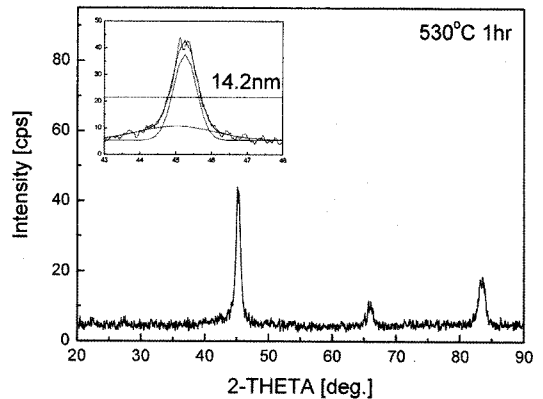
2. 실험방법

두께 약 20 μm의 Fe₇₃Si₁₆B₇Nb₃Cu₁(at%) 비정질 리본합금을 분쇄하여 530~610°C 소정의 온도와 Ar 가스분위기에서 1시간 동안 열처리하였다. 열처리된 분말은 체(sieve)를 이용하여 여러 입도별로 분급하였으며, 분급된 분말 중 64 μm(-200~+270 mesh) 크기를 가지는 분말만을 선별하여 폴리우레탄 계열의 결합제와 경화제를 혼합한 절연 매트릭스에 분산시켜 테잎캐스팅 방법으로 두께 0.5 mm의 sheet형 전자파 흡수체를 제작하였다.

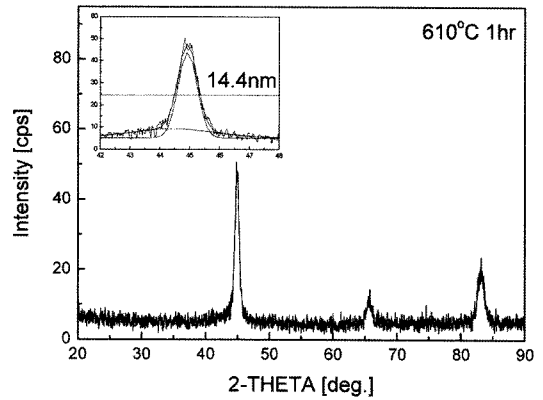
제조된 분말의 입도 변화를 분석하기 위하여 Cu-Kα 특성선을 사용한 X-선 회절분석기(Rigaku D/Max 2200)를 사용하였다. 흡수체 내부에 자성분말의 분산된 상태를 확인하기 위하여 흡수체의 단면을 SEM을 이용하여 관찰하였다. 제조된 흡수체의 투자율은 외경 7 mm, 내경 3 mm의 토로이드 형태로 준비하여 Agilent사의 E4991A impedance analyzer를 사용하여 측정하였으며, 유전율은 13×13 mm² 정사각형 형태로 시편을 준비하여 동일 장비에서 측정하였다. S-parameter는 크기 50×50 mm²의 시편을 준비하여 N5230A network analyzer에 본 연구실에서 자체 제작한 마이크로스트립 전송선로를 연결하여 two-port 방법으로 S₁₁ 및 S₂₁을 측정하였다. 또한 이들 S-parameter를 이용하여 전력흡수율(PA)을 계산하였다^{8,10)}.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 열처리된 분말의 XRD 측정 결과이다. 열처리를 통해 α-Fe(Si)의 결정화가 이루어졌으나, α-Fe(Si) 결정화 피크의 형상의 변화나 Fe-boride의 형성 흔적은 발견되지 않았다. 반면 열처리 온도가 증가함에 따라 Fe₃Si의 피크가 소량 검출되었다. 상



(a)



(b)

Fig. 1. XRD patterns of Fe₇₃Si₁₆B₇Nb₃Cu₁ powders annealed for 1 hour at different annealing temperatures : (a) 530°C and (b) 610°C.

기 XRD 패턴을 토대로 Scherrer 식을 이용하여 계산한 결과 결정립 크기는 14 nm 내외로 유지되고 있는 것으로 나타났다.

그림 2는 자성분말을 결합제 및 경화제와 혼합하여 테잎 캐스팅으로 시트 형상의 전자파 흡수체를 제조한 후 절연 매트릭스 내에 분산된 상태를 주사전자현미경으로 단면을 관찰한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 평균 입도 64 μm의 금속분말들이 결합제로 입자간 절연된 상태에서 흡수체 표면에 평행한 방향으로 배향되어 있음을 확인할 수 있다.

그림 3과 그림 4에는 열처리 온도에 따른 전자파 흡수체의 복소 투자율을 측정된 결과를 나타내었다. 그림 3의 투자율은 실수부와 허수부 모두 열처리 온도에 관계없이 주파수 증가에 따라 감소한다. 투자율의 실



(a)

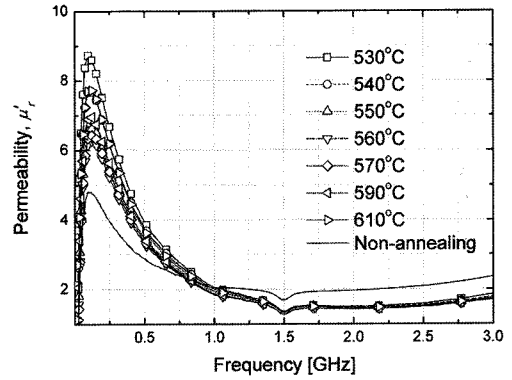


(b)

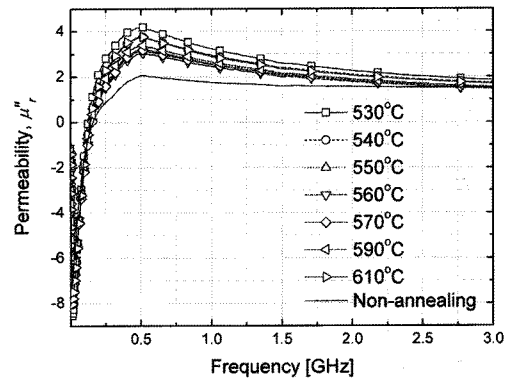
Fig. 2. Cross section images of the powder-compacted sheet : (a) $\times 100$ and (b) $\times 300$.

수부는 100 MHz 부근에서 최대 투자율(530°C, 8.7)을 보인 후 급속하게 감소하는데 반해, 투자율의 허수부는 500 MHz 부근에서 최대 투자율(530°C, 4.18)을 보인 후, 실수부에 비해 다소 완만하게 감소하는 특성을 나타내고 있다. 게다가, 열처리 온도가 증가함에 따라 투자율이 감소하다가, 570°C 이상의 고온에서는 다시 투자율이 증가한다. 이것은 미세한 α -Fe상의 상변화에 따른 실효적 결정자키방성과 함께 포화자기변형이 감소함에 기인하는 것으로 생각되며, 열처리로 인하여 적정 주파수 대역 이상에서는 투자율의 허수부분이 실수부분보다 크고 주파수가 높아짐에 따라서 다소 완만하게 감소하기 때문에 정합주파수가 넓어지는, 소위 광대역성을 가지게 할 것으로 기대된다^{5,6)}.

그림 5는 열처리 온도에 따른 유전율의 변화를 보이고 있다. 유전율의 실수부는 1.5 GHz 부근까지 일정하게 유지하지만, 그 이상의 주파수에서는 급격히



(a)



(b)

Fig. 3. Variation of permeability of the powder-compacted sheet with various annealing temperature as a function of frequency : (a) real and (b) imaginary parts.

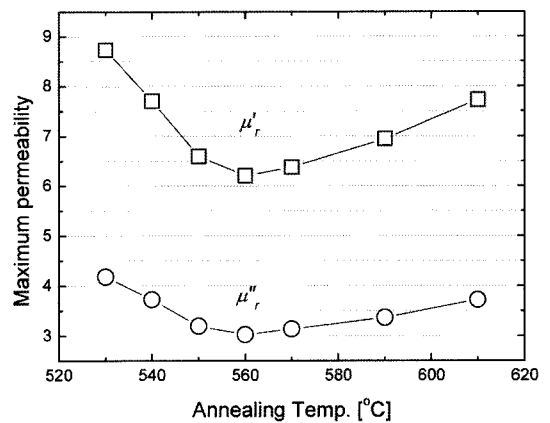


Fig. 4. Variation of maximum permeability of the powder-compacted sheet as a function of annealing temperature.

감소하는 것을 볼 수 있으며, 허수부는 500 MHz 이상의 주파수대역에서부터 유전손실이 급증함을 알

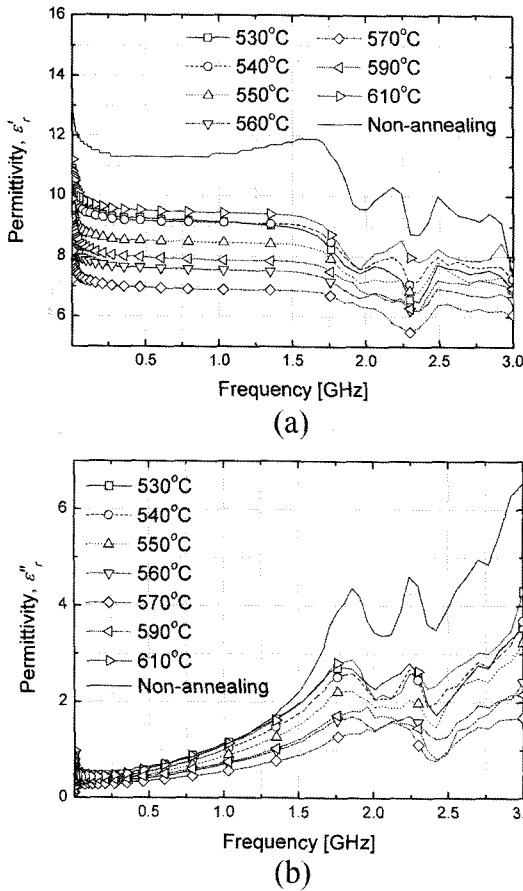


Fig. 5. Variation of permittivity of the powder-compacted sheet with various annealing temperature as a function of frequency : (a) real and (b) imaginary parts.

수 있다. 열처리 후 흡수체의 유전율은 열처리 전보다 다소 감소하였으며, 열처리 전의 흡수체의 유전율에는 미치지 못하지만, 530°C 부근 및 610°C에서 가장 우수한 유전율을 보이며, 이는 앞서 설명한 투자율의 경향과 유사함을 알 수 있다. 유전율이 20을 넘지 못하는 것으로 보아 유전손실은 이온분극(ionic polarization)에 의해 일어나는 것으로, 결정화 정도에 따라 이온분극의 정도가 달라진 것으로 판단된다⁷⁾.

그림 6은 N5230A network analyzer에 마이크로 스트립 선로를 연결한 후, 50x50 mm²의 시편을 장착하여 측정된 근역장에서의 S₁₁과 S₂₁이다. 대략 500 MHz 이하의 저주파대역에서는 흡수체의 표면에서 발생하는 S₁₁(반사)은 열처리 온도에 관계없이 거의 일정하지만, 500 MHz 이상의 고주파영역에서는 열처리 온도에 따라 반사량의 차이를 보이기 시작한

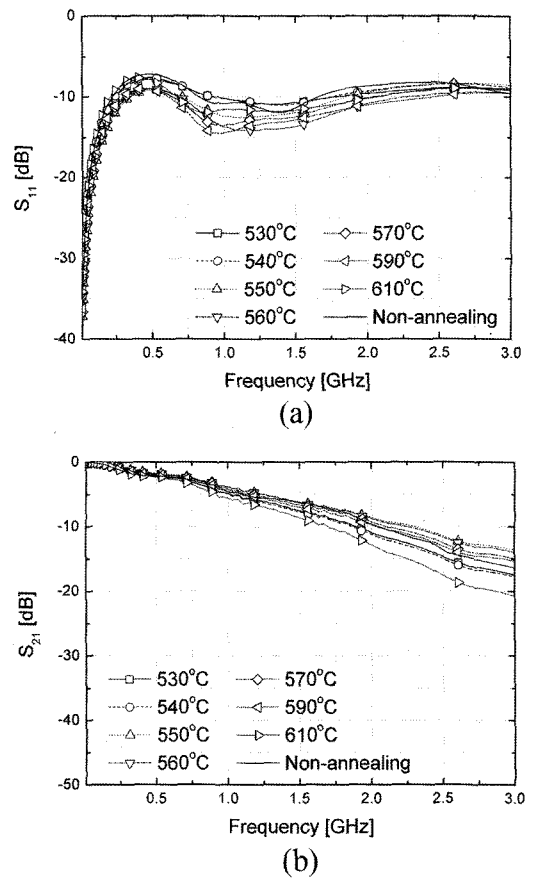


Fig. 6. Variation of s-parameters measured in a microstrip line covered with powder-compacted sheets with various annealing temperature as a function of frequency : (a) S₁₁ (b) S₂₁.

다. 흡수체 내부로 들어가는 S₂₁(투과) 역시 저주파 대역에서는 거의 일정하지만, 500 MHz 이상의 고주파수 대역에서 차이를 보이며, 투자율과 유전율이 높은 530°C와 610°C 열처리 시 다소 높은 수치를 보이고 있다. 전술한 바와 같이 열처리 온도에 따른 결정립의 크기 및 분율 변화로 인한 분말 내부의 자기 이방성의 변화에 의해 흡수체의 투자율에 변화를 가져오고, 열처리 온도의 증가에 따른 이온분극의 증가와 함께 Fe₃Si상의 형성으로 인하여 570°C 이상에서 유전율이 증가함으로써 결과적으로 자기손실 특성에 영향을 미친 것으로 판단된다^{8,9)}.

그림 7과 그림 8은 측정된 S₁₁과 S₂₁을 이용하여 아래 식에 의해 계산된 전력흡수율(PA)을 보여준다^{8,10)}.

$$PA = 1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2)$$

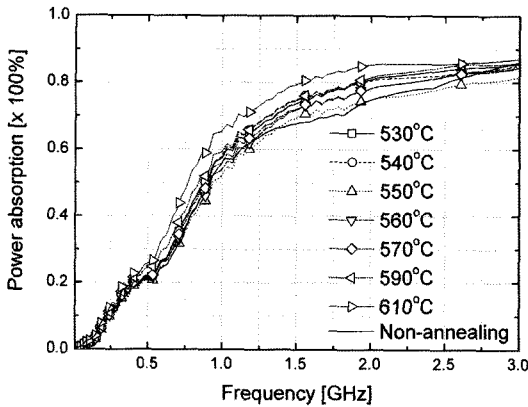


Fig. 7. Variation of power absorption calculated from S_{11} and S_{21} in the Fig. 6 of powder-compacted sheets with various annealing temperature as a function of frequency.

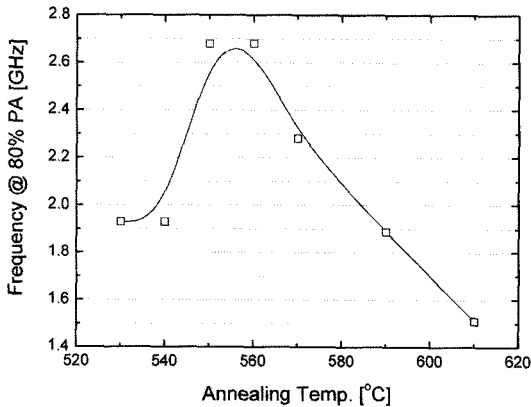


Fig. 8. Frequency for 80% power absorption measured from Figure 7.

열처리 온도가 증가함에 따라 500 MHz 이상의 대역에서부터 전력흡수율의 차이를 보이기 시작하며, 특히 610°C에서 열처리할 경우 다른 열처리 온도에 비해 보다 저주파 대역에서부터 우수한 흡수율을 보인다. 3 GHz 부근에서는 흡수율의 차이가 작아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 주파수 증가에 따라 급격하게 증가한 유전손실에 영향으로 판단된다. 전력흡수율을 토대로 하여 80%의 전력흡수율을 나타내는 주파수를 분석한 결과, 고온 열처리 시(610°C) 가장 낮은 저주파대역(1.51 GHz)에서 우수한 흡수특성을 보였다.

4. 결 론

$Fe_{73}Si_{16}B_7Nb_3Cu_1$ 합금 분말을 열처리하여 나노결

정립 구조로 결정화시킨 뒤 평균 64 μm 크기를 갖는 38 vol%의 분말과 폴리우레탄계열의 수지와 경화제를 혼합하여 전자파흡수체를 제조하는 연구과정에서, 열처리 온도에 따른 투자율과 유전율의 변화가 전자파 흡수 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

투자율은 530°C(8.73)에서 가장 높은 값을 보였으며, 최대유전율은 610°C(9.5)에서 얻을 수 있었다. 또한 주파수 증가에 따라 자기손실은 감소하고, 유전손실은 급격히 증가하였음을 확인하였다. 투자율은 열처리 온도에 따른 나노결정화된 정도와 미세한 α -Fe상으로의 상변화에 따른 실효적 결정자기이방성의 감소와 함께 포화자기변형의 극소화에 기인하는 것으로 생각되며, 유전율의 경우 열처리에 의한 이온분극과 결정상의 변화가 유전손실에 영향을 미친 것으로 판단된다. 근역장에서의 전력흡수율은 610°C 고온열처리에서 가장 우수하였으며, 1.51 GHz 주파수에서 80%의 전력흡수율을 보였다. 이는 고온열처리 시 이온분극에 의한 유전손실의 급격한 증가에 영향을 받은 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 BK21 사업과 고기능성 나노분말소재 핵심기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

참고문헌

1. S. S. Kim: J. Kor. Magn. Soc., **4** (1994) 285.
2. K. S. Lee, Y. C. Yoon, G. B. Choi, S. S. Kim and J. Y. Lee: J. KEES, **16** (2005) 228.
3. K. M. Lim, M. C. Kim, K. A. Lee and C. G. Park: J. Kor. Inst. Met. & Mater., **41** (2003) 180.
4. T. H. Noh, H. Y. Choi, and S. J. Ahn: J. Kor. Magn. Soc., **14** (2004) 7.
5. A. Hernando and T. Kulik: Phys. Rev. B, **49** (1994) 7064.
6. D. I. Kim: Engineering of Electromagnetic Wave Absorber, Daeyoung Publication Co. (2006) 40-50.
7. Y. J. Lee, Y. C. Yoon and S. S. Kim: Kor. J. Mat. Res., **12** (2002) 160.
8. S. T. Kim, B. K. Oh, S. S. Kim, H. S. Cho and J. H. Lee: J. Kor. Magn. Soc., **14** (2004) 174.
9. O. Hashimoto, Y. Takase and S. Haga: Trans. IEICE Japan., **J86-B** (2003) 113.
10. S. W. Kim, Y. W. Yoon, S. J. Lee, G. Y. Kim, Y. B. Kim, Y. Y. Chun and K. S. Lee: J. Magn. Magn. Mater., **316** (2007) 472.