

FeCuNbSiB 합금 박편/폴리머 복합 시트의 전자파 흡수 특성에 미치는 자성분말 어닐링 온도의 영향

노태환* · 이태규

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

(2007년 10월 2일 받음, 2007년 10월 24일 최종수정본 받음)

비정질 FeCuNbSiB 리본 합금의 파쇄분말을 1~3 μm의 두께로 편상화한 다음, 375~525 °C의 온도범위에서 1 h 동안 열처리한 후 폴리머 중에 분산시켜 준마이크로파 대역의 전자파 노이즈 억제용 복합 시트를 제조하였다. 이 때 어닐링 온도가 복합 시트의 전자파 전송손실(전력손실)에 미치는 영향을 조사한 결과, 425~475 °C에서 열처리하여 부분 나노결정 구조를 얻었을 때 가장 높은 전력손실 값을 나타내었으며, α-Fe상으로 결정화 정도를 더 높여 보다 우수한 연자성을 얻게 되는 525 °C에서의 열처리에 의해서는 오히려 전력손실 특성이 저하되었다. 이와 같은 전자파 흡수 특성의 어닐링 온도 의존성은 각각 425~475 °C에서 나타나는 높은 복소 투자율의 허수항(μ'') 및 525 °C에서의 큰 투과 파라미터(S_{21})에 그 주된 원인이 있는 것으로 판단되었다. 한편 열처리하지 않은 비정질 상태에서는 μ'' 값이 작아 매우 낮은 전력손실을 나타내었다.

주제어 : 전자파 흡수 특성, FeCuNbSiB 합금 박편, 복합 시트, 어닐링 온도, 전력손실

I. 서 론

개인용 컴퓨터, 무선 통신기기 등 각종 전자기기의 고속 정보처리 및 소형경량화 추세에 따라 동작주파수의 고주파화, 회로부품의 고집적화와 고밀도화가 급속히 이루어지면서, 발생하는 전자파 노이즈의 주파수가 GHz 영역으로 높아지고 있고 이에 의한 내부 반사와 회로 기관간의 상호 간섭 등의 심각성도 크게 증대되고 있다[1].

이러한 전자기적 장애 문제에 대한 대책의 하나로써, 최근 각종 금속 연자성 분말 박편을 폴리머 중에 분산시켜 만든 얇은 복합 시트를 노이즈 방사원 근방에 설치하여 입사된 전자파 노이즈 에너지를 이의 자기 손실로서 흡수하는 기술이 광범위하게 연구 개발되고 있다[2-9].

일반적으로 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 주어지는데[10], 여기서 μ'' 은 이 자성체의 복소 투자율의 허수항이다. 따라서 GHz 대역에서 전자파 흡수용 복합 시트가 우수한 노이즈 억제효과를 얻기 위해서는 이의 복소 투자율이 GHz 영역에서 높아야 한다.

한편 교류 자기장의 주파수가 MHz대 이상으로 높아지면 일반적으로 자벽공명에나 자연공명에 의해 투자율이 낮아지

며, 특히 자연공명에 의해 주어지는 Snock의 한계를 넘어서면 투자율이 급격하게 떨어지면서 자성으로서의 기능이 소멸된다.

자기공명에 의해 투자율이 저하되는 주파수 즉 공명주파수를 f_r 이라고 할 때, 이는 상대 투자율 μ , 자기회전비(gyromagnetic ratio) γ , 그리고 포화자화 M_s 및 진공 투자율 μ_0 와 다음과 같은 관계에 있다[11].

$$2\pi f_r \mu = \frac{2\gamma M_s}{3\mu_0} \quad (2)$$

이 식으로부터 포화자화 M_s 가 크면 공명주파수가 높아지고 이에 따라 높은 주파수 대역에서 큰 투자율을 얻는데 유리함을 알 수 있다.

또 금속 연자성 분말에서 GHz 대역까지 상당한 투자율을 얻기 위해서는 재료의 M_s 이외에 그 형상도 중요하여, 이들을 포피깊이 정도로 얇게 만드는 편상화 즉 아스펙트 비(aspect ratio)가 큰 박편형으로 분말을 가공하면 형상이방성에 기인하는 이방성 자장이 증대되면서 공명주파수가 높아지고 와전류 손실이 저감되어 더 높은 주파수 대역까지 투자율을 유지할 수 있게 된다.

현재 이상과 같은 원리에 따라 전자파 노이즈 흡수용 복합 시트에 사용되는 연자성 합금 박편으로는, FeCrSiAl계 내식강[2], FeSi 규소강[3], 스테인레스 자성강[4], FeCuNbSiB 나노결정 합금[5], FeSiAl계 센터스트[6-9] 등이 알려져 있다.

그런데 이들 금속재료 중 특히 FeCuNbSiB 나노결정 합금은 가장 연자성이 좋고 상대적으로 포화자화가 크며 전기저

*Tel: (054) 820-5903, E-mail: thnoh@andong.ac.kr

항이 커 고주파 특성이 우수하고 비정질 상태에서 박편으로의 편상화 가공이 가능하여 우수한 전자파 노이즈 흡수용 복합 시트의 자성 분말로 기대된다.

통상 나노결정 연자성 합금은 비정질 상태의 급속응고 리본 합금을 열처리하여 나노결정화 시켜 얻는 바 이 때 어닐링 온도에 따라 그 결정구조 및 자기적 특성이 크게 변화하므로, 본 연구에서는 비정질 리본 합금의 파쇄와 편상화를 통해 얻은 박편을 다양한 온도에서 열처리한 후 복합 시트를 제조하고 이의 전자파 흡수 특성을 조사하여 적정 열처리 조건을 규명하고자 하였다.

II. 실험 방법

본 실험에서는 먼저 폭 30 mm, 두께 18 μm 의 비정질 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{15.5}\text{B}_7(\text{at}\%)$ 리본 합금을 회전속도 8,000~11,000 rpm의 로터 밀(Fritch-pulverisette-14) 내에서 1차 파쇄하여 편상화용 원료 분말을 제조하였다. 여기서 로터 밀은 날카로운 날(rib)이 달려 있는 회전 로터와 그 바깥 둘레에 위치한 시브 링(sieve ring)으로 구성되어 있는데, 본 연구에서는 0.5, 0.2, 0.12, 0.08 mm의 구멍 크기를 가진 시브 링을 차례로 교체하여 사용하면서 편상화용 분말을 제조하였으며, 체진동기를 사용하여 26~45 μm 의 크기로 분급하여 입도를 제어하였다.

로터 밀로써 1차 파쇄된 분말에 대하여 어트리션 밀(KMS-1B)을 이용하여 편상화 가공을 실시하였다. 본 실험에서 사용된 밀링 볼은 스테인레스강 제품이었고 밀링 용기의 용량은 1,000 cc였으며, 모든 밀링은 에타놀을 용매로 한 습식법으로 이루어졌다. 그리고 밀링 볼의 직경은 12.6 mm, 임펠러의 회전속도는 100 rpm, 볼과 분말시료의 장입비는 20 : 1이었으며, 밀링 시간은 21 h으로 하였다.

밀링에 의해 편상화된 합금박편은 각각 375~525 $^{\circ}\text{C}$ 의 범위에 있는 소정의 온도에서 1 h 동안 진공 분위기에서 열처리한 다음, 폴리우레탄 수지와 65 : 35의 중량비로 혼합한 뒤 닥터 블레이드법을 이용한 테이프 캐스팅으로 두께 0.7 mm와 1.0 mm의 복합 시트를 제조하였다.

자성 합금 분말의 형상은 주사전자현미경(SEM, Jeol-JSM 6300)을 사용하여 관찰하였고, 각 온도에서 열처리된 분말의 구조 분석을 위해서 X-선 회절법($\text{CuK}\alpha$ 특성선 이용)이 이용되었다.

또 복합 시트의 전자파 흡수 특성은 네트워 분석기(HP-8722D)를 사용하여 반사/투과법 즉 S 파라미터(scattering parameter) 측정법으로 반사 파라미터 S_{11} 과 투과 파라미터 S_{21} 을 구하여 평가하였다. 여기서 전자파의 전송 특성 S_{11} 및 S_{21} 의 값은 선로 길이가 79.53 mm이고 폭이 2.24 mm이며 특

성 임피던스가 50 Ω 인 마이크로 스트립 라인 상에 가로 세로가 각각 5 cm이고 두께가 0.7 mm인 사각형의 시트 시료를 배치하여 측정하였다.

재료상수인 복소 투자율($\mu' - j\mu''$)과 복소 유전율($\epsilon' - j\epsilon''$)은, 1 mm 두께의 복합 시트를 커팅 드릴로 절삭하여 만든 내경 3 mm/외경 7 mm의 토로이드형 시료에 대해 위의 벡터 네트워 분석기(HP-8722D)를 이용하여 S_{11} , S_{21} , S_{22} 값을 측정한다음, 이들로부터 계산되었다. 이 때 측정 주파수 범위는 0.2~6 GHz로 하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

Fig. 1의 (a)와 (b)는 각각 비정질 리본을 로터 밀로 파쇄한 분말 및 이를 어트리션 밀로써 21 h 밀링하여 편상화시킨 박편(flakes)의 모습을 보여주고 있다. 여기서 박편의 두께는 대략 1~3 μm 정도의 범위에 있음을 알 수 있다.

편상화 가공처리를 실시한 박편 시료에 대해 각각 375, 425, 475 및 525 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1 h 동안 진공 열처리를 실시했을

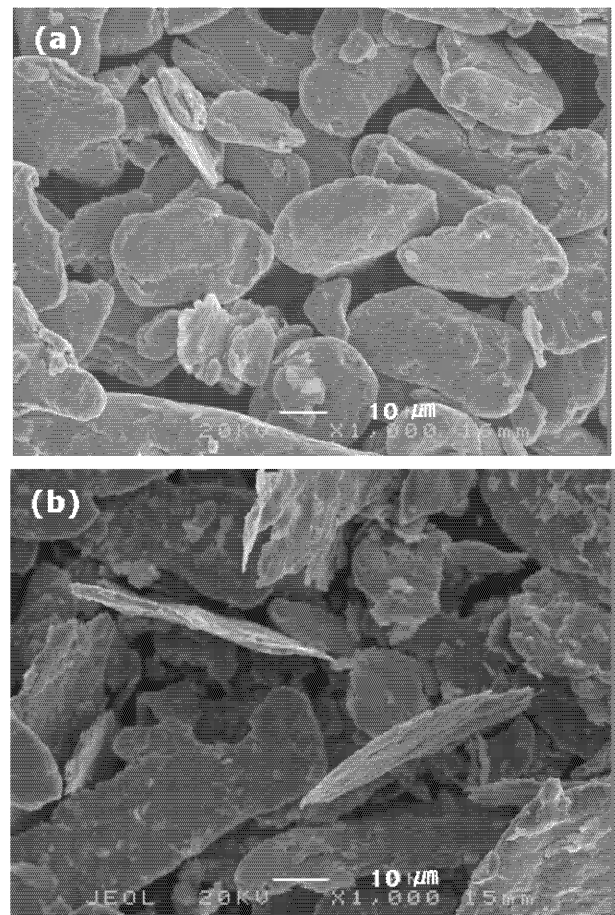


Fig. 1. The SEM images of (a) FeCuNbSiB alloy powders pulverized by rotor mill, and (b) flakes milled for 21 h (1000 \times).

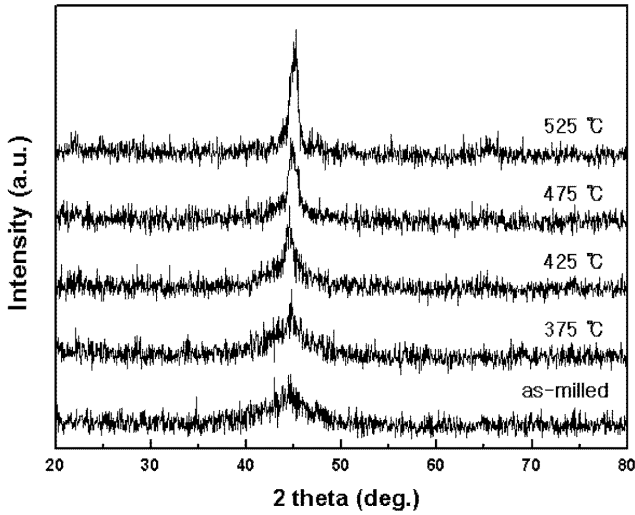


Fig. 2. The X-ray diffraction patterns of FeCuNbSiB alloy flakes in as-milled state and annealed at 325, 375, 425, 475, and 525 °C for 1 h, respectively.

때의 미세구조의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 열처리하지 않은 밀링상태에서는 완만한 산 모양의 전형적인 비정질 구조의 X-선 회절 패턴을 보여주고 있으나, 375 °C가 되면 α-Fe 결정상의 초기 생성을 시사하는 45° 근방의 극히 약한 회절 피크가 관찰되었다.

그런데 어닐링 온도를 425 °C로 하면 이 회절 피크의 강도가 더욱 증가하면서 비정질상으로부터 나노결정화가 한층 더 진행되고 있음을 보여주며, 475 °C에 이르면 비정질상의 완만한 회절 패턴이 많이 소멸되면서 α-Fe상으로 구성된 나노결정 구조로의 상변태가 상당히 이루어졌음을 나타내고 있다.

어닐링 온도가 525 °C이면 비정질상의 전형적 회절패턴이 거의 사라지고, α-Fe 결정상의 (110) 피크 강도가 최고도에 도달하면서 전체적으로 체심입방구조의 α-Fe상으로 결정화되었음을 알 수 있다.

Fe_{73.5}Cu₁Nb₃Si_{22.5-x}B_x(x = 6~9)(at%) 비정질 합금의 자기적 특성에 미치는 어닐링 온도의 영향에 대한 종래의 보고에 의하면[12-15], 520~570 °C 정도의 범위에서 1 h 열처리하면 비정질상이 대부분 10~15 nm 정도의 결정립 크기를 가지는 Fe(Si)상으로 변태되면서 0 또는 그 근방의 포화자기변형 값이 얻어져 정적 자화조건 및 kHz의 주파수 대역에서 가장 높은 투자율 및 가장 낮은 보자력이 얻어지며, 그 이상의 어닐링 온도에서는 포화자기변형이 음의 값을 갖거나 철-보론 화합물이 석출하면서 연자성이 열화된다고 하였다.

이상과 같은 형상 및 미세구조를 가지는 비정질 및 나노결정구조 박편 분말을 이용하여 복합 시트를 만든 다음 주파수에 따른 전자파의 전송특성의 변화를 측정하여 Fig. 3과 Fig. 4에 보여주고 있는데, 이 중 Fig. 3은 반사 특성 S₁₁을 그리

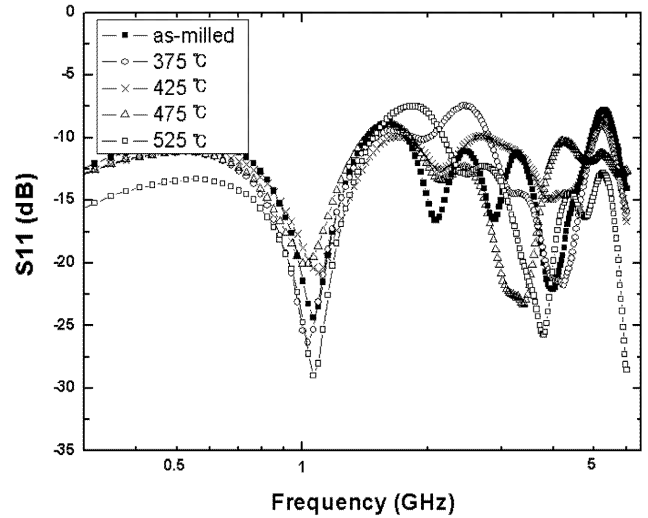


Fig. 3. The frequency dependence of reflection parameter S₁₁ for the composite sheets including FeCuNbSiB alloy flakes in as-milled state and annealed at 375, 425, 475, and 525 °C for 1 h, respectively.

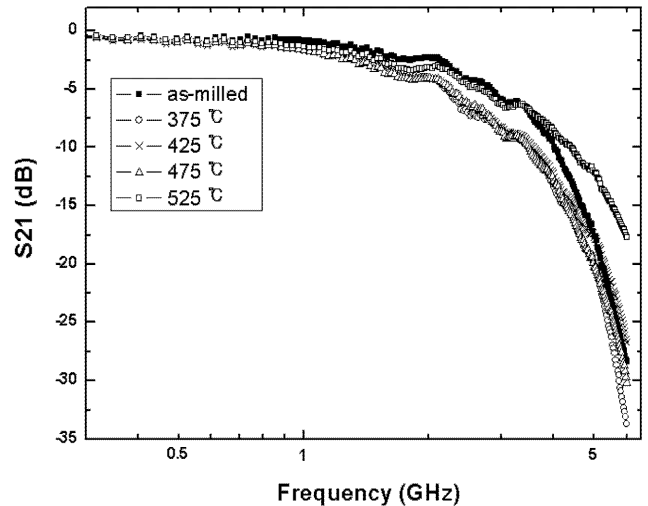


Fig. 4. The frequency dependence of transmission parameter S₂₁ for the composite sheets including FeCuNbSiB alloy flakes in as-milled state and annealed at 375, 425, 475, and 525 °C for 1 h, respectively.

고 Fig. 4는 투과 특성 S₂₁을 각각 나타내고 있다.

복합 시트의 전자파 반사계수를 R, 투과계수를 T라고 할 때, 이들과 반사 파라미터 S₁₁ 및 투과 파라미터 S₂₁은

$$S_{11} = 20 \log |R| \quad (3)$$

$$S_{21} = 20 \log |T| \quad (4)$$

의 관계로 주어진다[16].

Fig. 3에서 S₁₁의 크기는 대부분 -25~-10 dB의 상당히 낮은 범위에 걸쳐 분포하고 있으나, 어닐링 온도에 따라 일관성 있는 변화를 보여주고 있지는 않다. 다만 1 GHz 이하의

경우, 밀링상태(비정질 상태) 및 475 °C 이하에서의 값들은 서로 큰 차이가 없으면서 상대적으로 높고 525 °C가 되면 상당히 낮아지고 있음을 볼 수 있다.

반면 Fig. 4의 S_{21} 값은 주파수에 따라 비교적 일관된 변화를 보여, 0.5 GHz 이상 3~4 GHz까지 밀링상태에서 가장 높은 투과 파라미터 값을 가지나, 어닐링 온도가 높아지면서 점차 감소하여 425~475 °C에 이르면 5 GHz에서 -20 dB까지 낮아진다. 그러나 어닐링 온도가 525 °C가 되면 S_{21} 값이 다시 크게 증가하였다.

그리고 이 S_{21} 의 크기는 주파수가 1 GHz 정도가 되기까지 열처리 조건에 상관없이 모든 시료가 거의 0 가까이 머무는 대단히 큰 값을 나타내며, 특히 밀링상태의 경우를 제외하고 어닐링 온도에 따른 변화는 거의 관찰되지 않는 특징을 보이고 있다.

이상과 같은 Fig. 3 및 Fig. 4의 S 파라미터 특성으로부터 다음 식을 이용하여 전자파 전송손실(전력손실) P_{loss}/P_{in} 를 구하였으며[16], 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

$$\frac{P_{loss}}{P_{in}} = 1 - (|T|^2 + |R|^2) \quad (5)$$

이 그림에서 전력손실은 전반적으로 주파수의 증가와 함께 증대되어 4 GHz가 되면 0.9 전후에 도달하였다. 그런데 어닐링 온도에 따라 전송손실의 값에는 상당한 차이가 존재하여, 밀링한 상태에서 가장 낮은 전력손실을 나타내고 어닐링 온도가 높아지면 증가하여 425~475 °C에서 가장 큰 값을 나타낸 뒤 525 °C가 되면 다시 낮아지는 거동을 보이고 있다. 가령 2 GHz의 경우, 밀링상태에서는 0.39 정도이나 325 °C에서의 열처리에 의해 0.50으로 증가하고 425와 475 °C에서는

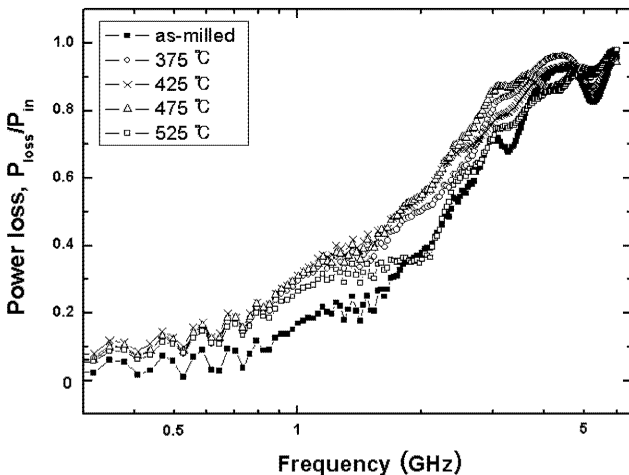


Fig. 5. The frequency dependence of power loss (P_{loss}/P_{in}) for the composite sheets including FeCuNbSiB alloy flakes in as-milled state and annealed at 375, 425, 475, and 525 °C for 1 h, respectively.

0.55가 되며 525 °C에서는 0.38로 다시 저하되었다.

여기서 425~475 °C에서의 이러한 높은 전력손실 특성은, 식 (3)-(5)를 참조하면, Fig. 4에 제시되어 있는 바와 같이 주로 이들의 낮은 S_{21} 값에 기인하는 것으로 생각되며, 반면 525 °C에서의 전력손실의 감소는 S_{21} 값의 증가에 크게 의존하는 것으로 믿어진다.

이상의 결과로부터 Fe_{73.5}Cu₁Nb₃Si_{15.5}B₇(at%) 합금 박편으로 만들어진 복합 시트의 준마이크로과 대역에서의 전자파 흡수 특성(노이즈 억제 특성)은 425~475 °C의 열처리에 의해 얻어지는 나노결정화가 충분히 진행되지 않은 상태에서 가장 우수하고, 보다 더 α-Fe 상으로 결정화 정도를 높인 525 °C에서의 열처리에 의해서는 오히려 열화된다는 사실을 알 수 있었다.

이와 같은 전력손실의 어닐링 온도 의존성과 비교하기 위해, $\mu = \mu' - j\mu''$ (j : 복소수)로 주어지는 복소 투자율의 어닐링 온도에 따른 변화를 조사하여 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었는데, 이 때 Fig. 6은 복소 투자율의 실수항을 그리고 Fig. 7은 허수항을 표시하고 있다.

Fig. 6에서 복소 투자율의 실수항은 0.3 GHz의 주파수에서 4~7의 크기를 나타내나 전반적으로 주파수의 증가에 따라 감소하게 되는데, 열처리하지 않은 비정질 상태에서 제일 투자율이 작으나 주파수에 따른 감소속도는 가장 느린 반면, 열처리에 의해 투자율이 높아진 경우에는 빠른 속도로 감소하게 됨을 볼 수 있다. 525 °C에서 열처리한 경우 다른 어닐링 온도에서의 시료와 비교하여 kHz 대역에서 가장 높은 투자율이 얻어지는 것으로 알려져 있으나[13-15], MHz 이상의 주파수에서 빠른 속도로 감소하여 Fig. 6에서와 같이 GHz

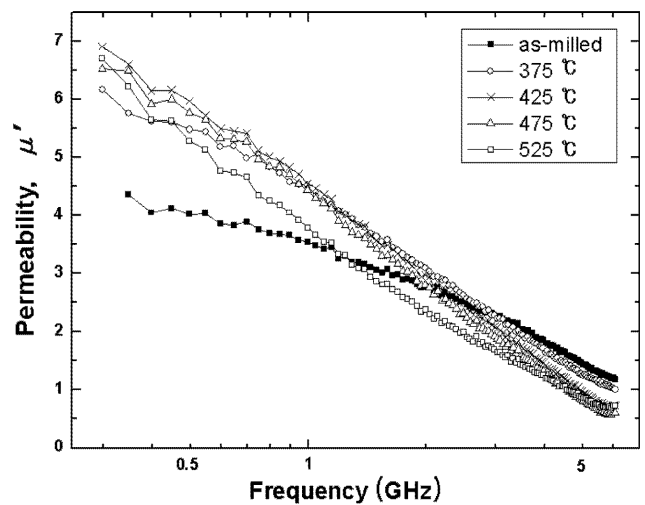


Fig. 6. The frequency dependence of real part of complex permeability (μ') for the composite sheets including FeCuNbSiB alloy flakes in as-milled state and annealed at 375, 425, 475, and 525 °C for 1 h, respectively.

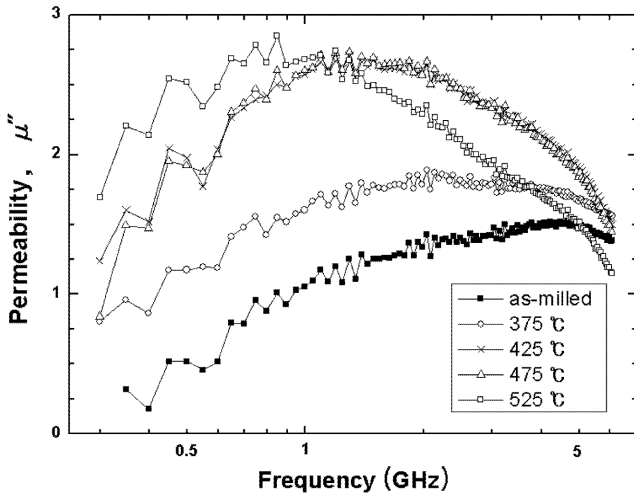


Fig. 7. The frequency dependence of imaginary part of complex permeability (μ'') for the composite sheets including FeCuNbSiB alloy flakes in as-milled state and annealed at 375, 425, 475, and 525 °C for 1 h, respectively.

대역에서는 더 낮은 투자율을 보이고 있다.

한편 Fig. 7의 허수항은 공통적으로 주파수가 높아짐에 따라 증가하여 어느 지점에서 극대값을 나타낸 후 다시 감소하는 거동을 보인다. 이 때 밀링상태에서는 넓은 주파수 범위에서의 가장 낮은 실수항의 크기 및 주파수 상승에 따른 이의 느린 감소속도를 반영하여, 허수항의 크기가 가장 작고 이의 증가가 일어나는 주파수 대역도 가장 높다.

그런데 어닐링 온도가 높아지면서 나노결정화가 진행되면, 실수항 및 이의 주파수에 따른 감소속도가 증가함에 따라 허수항의 크기도 점차 증가하고 허수항의 극대치가 얻어지는 주파수도 점차 낮아진다. 그 결과 425~475 °C의 경우 1~2 GHz에서 허수항의 극대값을 가지며 그 크기가 2.6 정도 되고, 525 °C에서는 0.8~0.9 GHz에서 2.7 정도의 값을 가지는 것으로 관찰되었다.

이상과 같은 어닐링 온도 의존성을 보이는 Fig. 5 및 Fig. 6~7의 전력손실과 복소 투자율의 주파수에 따른 변화 거동을 비교해 보면, 425~475 °C에서 열처리한 시료가 나타내는 1~5 GHz 대역에서의 높은 전자파 전송손실은 식 (1)에서 제시된 바에 따라 그의 큰 복소 투자율의 허수항 μ'' 에 기인하는 것으로 판단된다. 물론 밀링 상태에서 얻어지는 가장 작은 전력손실 또한 그의 낮은 μ'' 값에 그 원인이 있는 것으로 생각된다.

그런데 1 GHz 이하에서는 525 °C에서 열처리한 시료의 복소 투자율의 허수항이 가장 커 전력손실 또한 가장 높을 것으로 예상되나, 이 주파수 범위에서는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 열처리 온도에 상관없이 S_{21} 의 값이 대단히 크고 온도에 따른 차이가 별로 없어 전력손실의 크기 또한 대단히 작

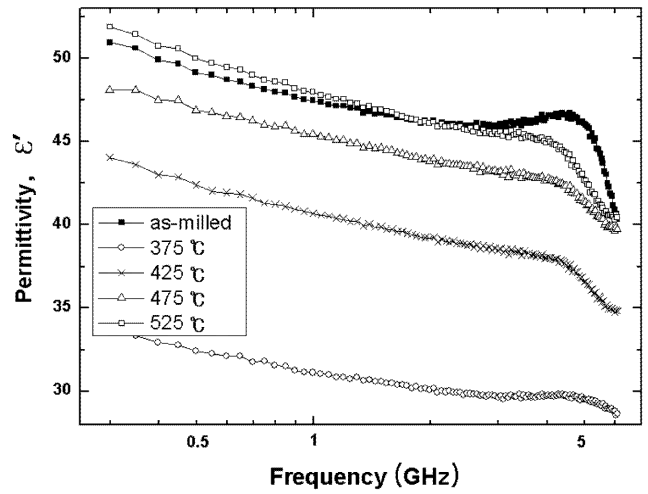


Fig. 8. The frequency dependence of real part of complex permittivity (ϵ') for the composite sheets including FeCuNbSiB alloy flakes in as-milled state and annealed at 375, 425, 475, and 525 °C for 1 h, respectively.

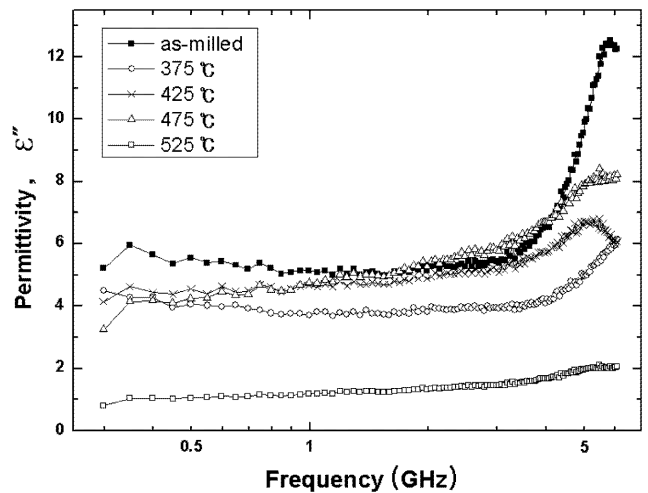


Fig. 9. The frequency dependence of imaginary part of complex permittivity (ϵ'') for the composite sheets including FeCuNbSiB alloy flakes in as-milled state and annealed at 375, 425, 475, and 525 °C for 1 h, respectively.

고 어닐링 온도에 따른 변화도 잘 나타나지 않은 것으로 믿어진다.

전자파 흡수체의 성능에는 투자율뿐 아니라 유전율도 큰 영향을 미친다. 일반적으로 유전율이 크면 전자파의 반사가 커지고, 복소 유전율의 허수항이 크면 입사된 전자파의 감쇄 즉 전송손실이 증가한다.

Fig. 8과 Fig. 9에는 각각 밀링상태의 비정질 박편과 375, 425, 475 및 525 °C에서 열처리한 박편을 사용한 복합 시트의 주파수에 따른 복소 유전율의 변화를 보여주고 있는데, 전자는 실수항을 그리고 후자는 허수항을 나타내고 있다.

Fig. 8에 나타난 실수항의 경우 대략 30~50의 범위에 있으면서 주파수에 따라 점차 감소하는 경향을 보이고 있는데, 열처리하지 않은 밀링상태에서의 큰 유전율이 375 °C의 열처리에 의해 크게 낮아지나 어닐링 온도가 올라가면서 점차 다시 증가하는 거동을 보여주고 있다. 한편 Fig. 9에서의 허수항의 크기는 어닐링 온도에 따라 일관성 있는 변화를 나타내지는 않지만 대략 밀링상태에서 가장 크고 열처리에 의해 낮아지면서 525 °C에서 가장 작아졌다.

이상과 같은 유전율의 변화 경향과 Fig. 5의 전력손실의 어닐링 온도 의존성을 비교해 보면 그 경향이 거의 일치하지 않아, 본 연구에서 제작된 복합 시트의 전자파 흡수 특성은 투자율 변화에 거의 의존한다는 사실이 확인된다. 그러나 525 °C에서 열처리한 시료가 375 °C에서의 시료보다 3~4 GHz 이하의 주파수 범위에서 더 큰 μ'' 값을 보임에도 불구하고 전송손실(전력손실)의 값이 역전되는 등의 현상이 관찰되는 것으로 보아, 유전율을 포함한 다른 영향 인자에 대해 더 체계적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

IV. 결 론

Fe_{73.5}Cu₁Nb₃Si_{15.5}B₇(at%) 비정질 리본 합금을 파쇄하여 얻은 분말을 어트리션 밀로써 두께가 1~3 μm 정도 되도록 편상화한 다음, 이를 375~525 °C의 여러 온도에서 1h 동안 열처리 한 후 폴리머 중에 분산시켜 준마이크로파 대역의 전자파 노이즈 억제용 복합 시트를 제조하였다. 이 때 어닐링 온도가 복합 시트의 전자파 전송손실(전력손실)에 미치는 영향을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

425~475 °C에서 열처리하여 α -Fe 상의 부분적 나노결정립 구조를 얻었을 때 가장 높은 전력손실 값을 나타내었으며, 더 결정화 정도를 높여 kHz의 주파수 대역에서 보다 우수한 전자성을 얻게 되는 525 °C에서의 열처리에 의해서는 오히려 전력손실 특성이 저하되었다.

이와 같은 전자파 흡수 특성의 어닐링 온도 의존성은 각각 425~475 °C에서 나타나는 높은 복소 투자율의 허수항(μ'') 및 525 °C에서의 큰 투과 파라미터(S_{21})에 주로 기인하는 것으로 판단되었다. 한편 열처리하지 않은 비정질 밀링상태에서는 매

우 낮은 전력손실 값을 나타내었는데 이는 그 때의 μ'' 값이 가장 작기 때문인 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-10482-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] S. Sugimoto, J. Mag. Soc. Jpn., **27**, 862 (2003).
- [2] Y. Aikawa and K. Yanagimoto, Sanyo Technical Report, **9**, 59 (2002).
- [3] Y. Hashimoto and H. Kurihara, Engineering Materials, **46**(10), 36 (1998).
- [4] A. Saito, M. Ogawa, K. Tutui, H. Endo, and S. Yahagi, Materia Japan, **38**, 46 (1999).
- [5] Y. Bizen, J. Sunakawa, S. Arakawa, and S. Takaoka, Hitachi Metals Technical Report, **16**, 39 (2000).
- [6] S. Yoshida, J. Mag. Soc. Jpn., **22**, 1353 (1998).
- [7] S. Yoshida, M. Sato, and Y. Shimada, J. Mag. Soc. Jpn., **22**, 1377 (1998).
- [8] M. Sato, S. Yoshida, E. Sugawara, and Y. Shimada, J. Mag. Soc. Jpn., **20**, 421 (1996).
- [9] S. Yoshida, S. Mitsuharu, E. Sunagawa, and Y. Shimada, J. Appl. Phys., **85**, 4636 (1999).
- [10] K. Ohta, Fundamentals of Magnetic Engineering II, Kyoritsu, Tokyo (1973) p. 305.
- [11] S. Chikazumi, Physics of Ferromagnetism, 2nd ed., Oxford University Press, Oxford (1997) p. 561.
- [12] T. H. Noh, M. B. Lee, H. J. Kim, and I. K. Kang, J. Appl. Phys., **67**, 5568 (1990).
- [13] T. H. Noh, W. K. Pi, H. J. Kim, and I. K. Kang, J. Appl. Phys., **69**, 5921 (1991).
- [14] Y. Yoshizawa and K. Yamauchi, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. (Vol. 232), Materials Research Society, Pittsburgh (1991) p. 183.
- [15] G. Herzer, Scripta Met. Mater., **33**, 1741 (1995).
- [16] S. Yoshida, H. Ono, S. Ando, S. Ohnuma, M. Yamaguchi, and Y. Shimada, Materia Japan, **42**, 193 (2003).

Effects of Annealing Temperature on Electromagnetic Wave Absorption Characteristics in FeCuNbSiB Alloy Flakes/Polymer Composite Sheets

Tae-Hwan Noh* and Tae-Gyu Lee

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

(Received 2 October 2007, in final form 24 October 2007)

The effects of annealing temperature on electromagnetic wave absorption characteristics in Fe_{73.5}Cu₁Nb₃Si_{15.5}B₇ (at%) alloy flakes/polymer composite sheets available for quasi-microwave band have been investigated. The composite sheet including the magnetic flakes annealed at 425~475 °C for 1 h exhibited highest power loss in the GHz frequency range as compared with the sheets composed of the alloy flakes annealed at higher temperature than 475 °C or in as-milled state. Moreover the imaginary part of complex permeability had largest value in the GHz frequency range for the sheets including the flakes annealed at 425~475 °C. The large value of power loss of the sheets including the magnetic flakes annealed at 425~475 °C was attributed to the high imaginary part of the complex permeability. However, because of its large transmission parameter S_{21} , the composite sheet having the magnetic flakes annealed at 525 °C showed low power loss.

Keywords : electromagnetic wave absorption, FeCuNbSiB alloy flakes, composite sheets, annealing temperature, power loss