

## Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 자성분말/에폭시 복합재 필름의 고주파 특성

홍성민 · 김철기\*

충남대학교 재료공학과, 대전시 유성구 공동 220, 305-764

(2008년 9월 2일 받음, 2008년 9월 19일 최종수정본 받음, 2008년 9월 22일 게재확정)

Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 분말/에폭시 복합재 필름은 열경화과정을 이용하여 준비되었다. 자성분말/에폭시 복합재의 구조와 전자기적 특성 및 전자파 흡수특성을 분석하기 위하여 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM), 시료진동형 자력계(vibrating sample magnetometer, VSM), 네트워크 어날라이저(network analyzer) 등을 이용하였다. 분석결과, 포화자속밀도는 복합재 내의 Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 분말이 차지하는 양에 의존하며, 이는 초기투자율에 영향을 미친다. 결과적으로 1 GHz 이상의 주파수에서는 와전류 손실(eddy current loss)이 주요한 인자이며, 자성분말/에폭시 복합재의 공명주파수(resonance frequency)는 복합재 내의 Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 분말의 양이 증가함에 따라 감소한다. 반사손실(reflection loss)은 자성분말/에폭시 복합재의 투자율(permeability)과 유전율(permittivity)로부터 계산에 의해 구해진다. 50 wt% Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 분말의 양과 5 mm 두께를 가진 자성분말/에폭시 복합재는 3.66 GHz와 4.16 GHz 사이에서 -20 dB 이하의 값을 보인다. 따라서 Fe-Si/에폭시 박형 복합재는 마이크로파 흡수체로서 좋은 후보물질이 될 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : Fe-Si/에폭시 복합재, 마이크로파 흡수

### I. 서 론

전자기기의 사용이 날로 증가함에 따라, 전자기파의 유해성에 대한 많은 연구가 보고되었으며, 특히 의학적, 과학적인 연구가 진행되어왔다[1, 2]. 전자기파를 흡수하는 재료로 잘 알려진 두 종류의 재료는 자성재료와 유전재료이다. 자성재료 중에서는 특히 페라이트(ferrite)가 유전재료와 비슷한 흡수특성을 보이면서도, 보다 얇은 필름형태를 구현할 수 있다는 점에서 주목을 받아왔다[3]. 그러나 스피넬(spinel)구조를 가진 페라이트는 수백 MHz 대역 이상에서 자성손실 감소에 의해 기능이 저하되는 단점이 있다. 따라서 원하지 않는 전자기적 신호의 흡수를 위하여 새로운 재료를 찾는 것이 중요하다[4]. 페라이트와 비교하여 금속 자성재료는 높은 포화자속밀도와 고주파에서 복합투자율을 갖고 있다[5].

본 연구에서는 Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 분말/에폭시 복합재를 열경화과정을 거쳐 제조하였고, 고주파에서 전자기파 흡수특성을 조사하였다.

### II. 실험

자성분말/에폭시 복합재를 제조하기 위하여 에폭시는 전기 절연 특성이 우수한 diglycidyl ether of bisphenol A type 을 사용하였다.

분말과의 혼합을 원활하게 하기 위해서는 에폭시의 점성을 감소시켜야 하는데, 이를 위해 에탄올과 에폭시는 1 : 1을 부피비율로 혼합하였다. Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 분말은 평균 입자크기 10 μm의 구(spherical)형 분말을 attrition mill을 이용하여 600 rpm으로 60시간 밀링하여 편상(flaky shape)의 입자를 갖는 분말로 제조하였다. 편상의 입자를 갖는 Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 분말은 에폭시-에탄올 혼합체에 혼합하였다. 복합재 내의 Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 분말의 양은 20 wt%, 30 wt%, 40 wt%, 그리고 50 wt%로 조절하였다. 자성분말/에폭시 복합재는 150 × 150 mm steel mold를 이용하여 60 °C의 건조기에서 경화하였다. 복합재의 미세구조는 SEM을 이용하여 조사하였고, 자성특성은 VSM(Lakeshore 7407)을 이용하여, 고주파 특성은 network analyzer(Agilent 4901A)를 이용하여 각각 조사하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 미세구조 및 자기적 특성

Fig. 1은 milling 공정을 거친 Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 분말의 미세구조를 보여준다. Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 입자는 약 10 μm의 크기와 300 nm의 두께를 갖는 편상을 보인다. 복합재의 자기거동에 따른 이력 곡선은 Fig. 2에 나타내었으며, 각각의 값을 Table I에 비교하여 나타내었다. Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 분말의 양이 증가함에 따라 포화자속밀도는 증가하였으나 보자력 및 잔류자속밀도는 일정하였다. 이로써 모든 혼합비율에서 Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 입자들은 잘 분리되어 있으며 에폭시 기지(matrix)에 개별적으로 기능화 되어

\*Tel: (042) 821-6632, E-mail: cgkim@cnu.ac.kr

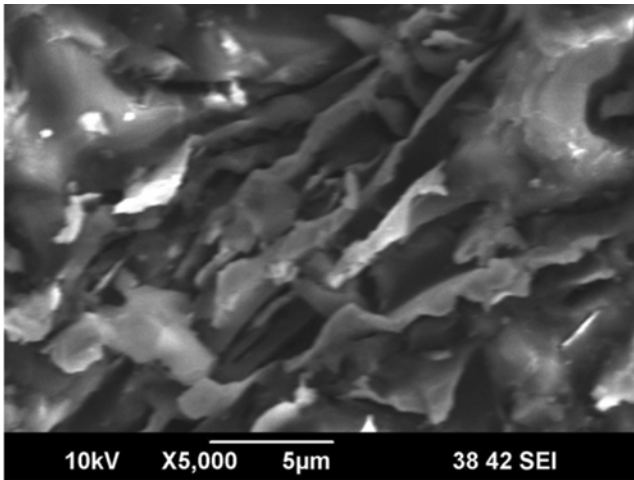


Fig. 1. SEM image of a composite with Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 50 wt.%.

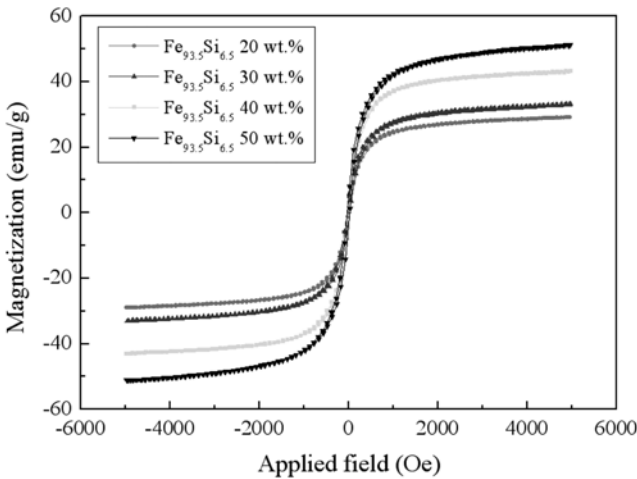


Fig. 2. The hysteresis loops of composites as a function of the fraction of Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> powder.

Table I. A summary of magnetic properties for Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub>/epoxy composites as a function of the fraction of Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> powder contained within them.

wt % of powder	$M_s$ (emu/g)	$M_r$ (emu/g)	$M_r/M_s$ (%)	$H_c$ (Oe)
20	29.07	2.65	9.12	26.52
30	33.08	2.91	8.80	25.37
40	43.10	3.90	9.05	24.72
50	51.17	4.34	8.48	26.35

있음을 알 수 있다.

### 2. 고주파 특성

복소투자율( $\mu = \mu' - j\mu''$ )과 유전율( $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ ) 값은 network analyzer로 측정된 S-parameter( $S_{11}$ ,  $S_{21}$ )를 Nicolson-Ross 모델에 의해 계산하여 구하였다[6]. 0.05 GHz부터 10 GHz가

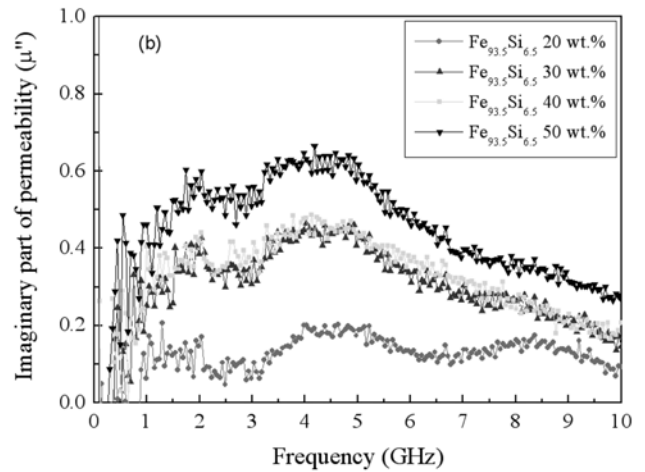
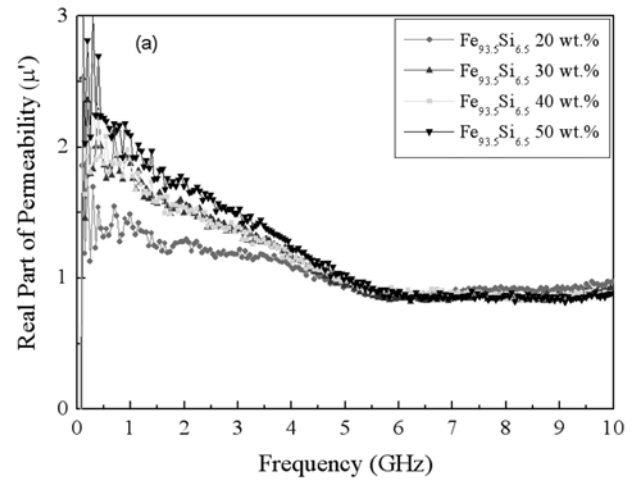


Fig. 3. Permeability spectra of composites as a function of Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> powder fraction. (a) the real part of permeability,  $\mu'$ , and (b) the imaginary part of permeability,  $\mu''$ .

지 측정된 두께가 5 mm인 자성분말/에폭시 복합체의 복소투자율의 값을 Fig. 3에 나타내었다. 초기투자율(initial permeability)의 실수부(real part)는 FeSi 분말의 양이 증가할수록 증가한다. 비투자율(relative permeability)은  $\mu = 1 + M/H$ 로 표현하는데, 여기서  $M$ 은 자화값이고  $H$ 는 외부자장이다. 50 wt% Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub>/에폭시 복합체에서 가장 큰 초기투자율 값을 가진다. 투자율의 실수부는 주파수가 증가함에 따라 감소하는데 6 GHz에서 1의 값에 도달한다. 공명주파수는 Fig. 3(b)에 나타난 투자율의 허수부(imaginary part)의 최대값으로부터 계산으로 얻을 수 있다. 공명주파수는 복합체 내의 Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 분말의 분율이 증가할 때 감소한다. 자화 메커니즘을 고려할 때, 반자장효과 및 자구벽 운동은 두 가지 모두 복합체의 공명주파수에 영향을 미친다. 그러나 와전류역시 금속 자성재료에 영향을 미치므로 이를 고려해야 한다. 표피깊이(skin depth)보다 작은 직경  $D$ 를 갖는 자성입자의

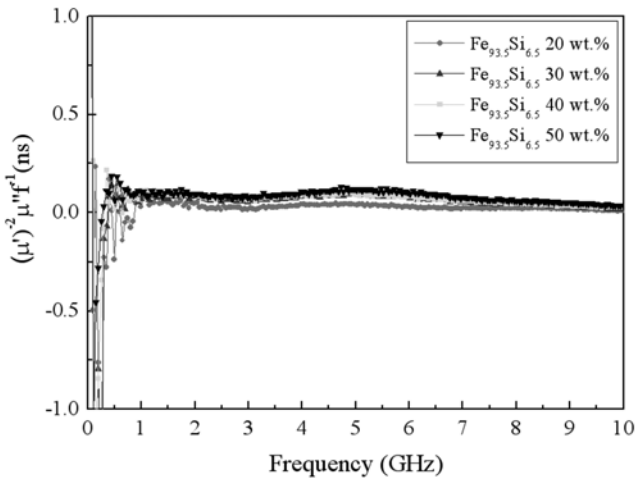


Fig. 4. Values of  $(\mu')^{-2} \mu'' f^{-1}$  as a function of Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> powder fraction.

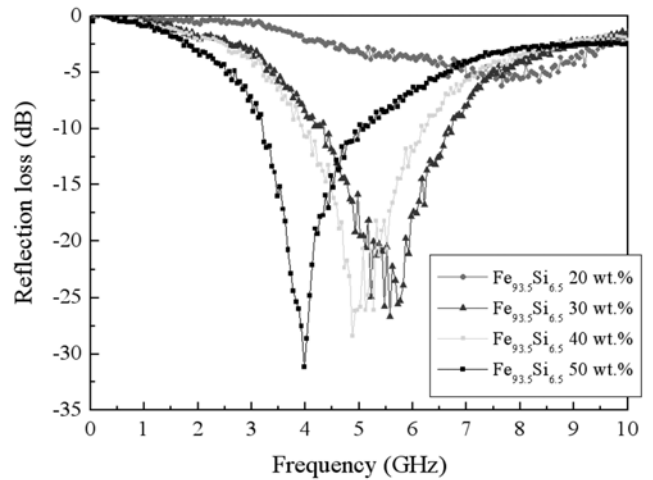


Fig. 6. Reflection loss as a function of Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> powder fraction ( $t = 5$  mm).

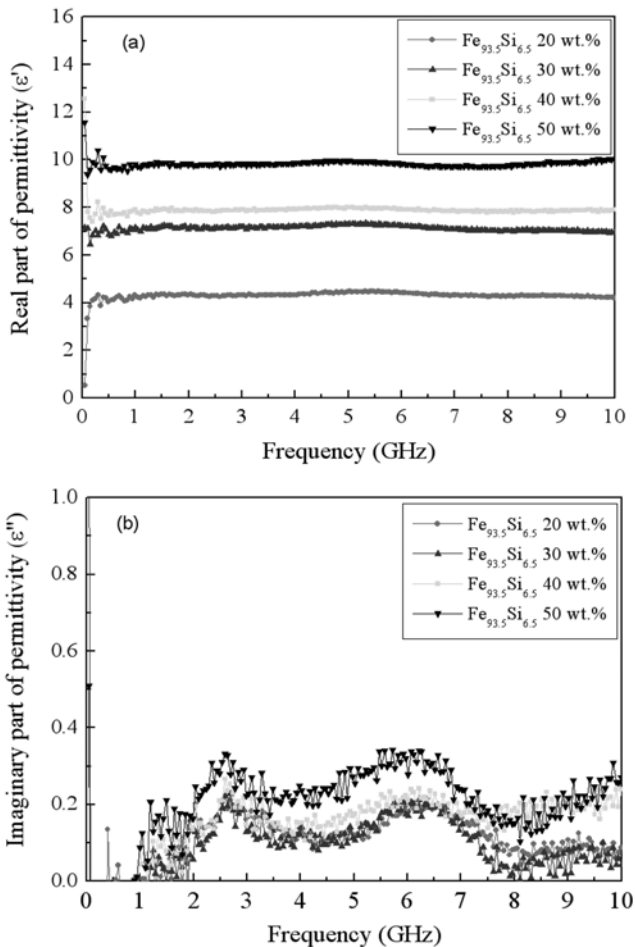


Fig. 5. Permittivity spectra of composites as a function of Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> powder fraction. (a) is the real part of the permittivity,  $\epsilon'_r$ , and (b) is the imaginary part,  $\epsilon''_r$ .

와전류 손실(eddy current loss)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\mu''}{\mu'} = \frac{\mu' f D^2}{\rho} \quad (1)$$

여기서  $f$ 는 적용 주파수이며  $\rho$ 는 입자의 전기저항이다[7]. Fig. 4에서  $f^{-1}(\mu')^{-2} \mu''$ 의 값은 1 GHz에서 10 GHz로 주파수가 증가하면서 개략적으로 일정함을 보여준다. 따라서 와전류 손실은 1 GHz 이상에서 주요한 자기손실임을 알 수 있다.

Fig. 5는 복합재의 복소유전율의 스펙트럼을 보여준다. 유전율의 실수부는 첨가된 Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 분말의 양에 의존하며, 측정주파수 범위에서 거의 일정하다.

### 3. 흡수특성

시료두께를 달리한 자성분말/에폭시 복합재의 전자기파 흡수특성은 다음과 같은 계산식에 의해 계산되어진다.

$$\text{R.L. (dB)} = 20 \log_{10} \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (2)$$

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[ j \left( \frac{2\pi f d}{c} \right) \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right] \quad (3)$$

여기서  $Z_{in}$ 은 흡수체의 입력 임피던스이며,  $Z_0$ 는 공기의 임피던스,  $d$ 는 두께,  $f$ 는 마이크로파의 주파수 그리고,  $c$  빛의 속도이다[8]. 흡수체의 두께가 5 mm일 때, Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 분말의 양을 달리한 흡수체의 주파수에 대한 반사손실의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. -20 dB 이하로 표시된 반사손실 값들은 99% 이상 전자기파를 흡수했다고 표현할 수 있으며, 이 값은 전자기파 흡수재로 응용이 가능한 목표수준 값이다[9]. Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 분말의 양이 증가함에 따라 반사손실은 이 목적수준 값에 도달하는데, 최대 반사손실 지점은 7.66 GHz에서 3.98 GHz로 낮아진다. 최대 반사손실 지점은 복합재 내의

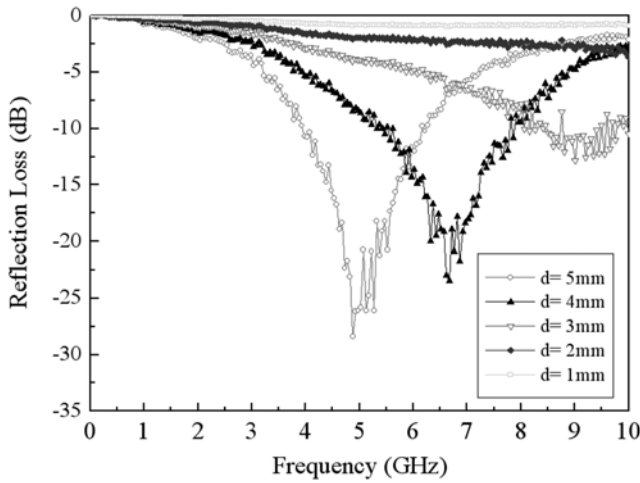


Fig. 7. Reflection loss of composites with a Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 40 wt.% fractions a function of thickness.

Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 분말의 양이 50 wt% 일 때, 3.98 GHz에서 약 -31.15 dB 였고, -20 dB 반사손실에 상응하는 대역은 약 0.5 GHz 였다.

Fig. 7은 Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 40 wt% 복합재의 흡수능의 두께의존성을 보여준다. 흡수체의 두께가 증가할수록 더 큰 반사손실을 보여주지만, 최대 반사손실 지점은 낮은 주파수대역으로 이동한다.

#### IV. 결 론

Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub>/epoxy 복합재 필름은 열경화과정을 이용하여 제조하였다. Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 입자는 attrition milling을 통해 편상으로 제어하였다. 포화자속밀도는 Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 분말의 양에 의존하며, 이는 복합재의 초기투자율에 영향을 미친다. 복소투자율의 실수부와 복소유전율은 복합재 내의 Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 분말의 양이 증가함에 따라 증가한다. 최종적으로 반사손실은 흡수체의 두께

와 Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> 분말의 양에 대한 함수로 나타내었다. 5 mm의 두께를 가진 50 wt% Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub>/epoxy 복합재는 3.66 GHz부터 4.16 GHz까지의 영역에서 -20 dB 보다 낮은 반사손실 값을 나타내었다. 따라서, Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub>/epoxy 박형 복합재는 마이크로 흡수재로 응용이 가능할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 기초연구사업의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] J. R. Jauchem, *Int. J. Hyg. Environ. Health*, **211**, 1 (2008).
- [2] L. Hardell and C. Sage, *Biomedicine & Pharmacotherapy*, **62**, 104 (2008).
- [3] Y. Kotsuka and H. Yamazaki, *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, **42**, 116 (2000).
- [4] S. Sugimoto, S. Kondo, K. Okayama, H. Nakamura, D. Book, T. Kagotani, and M. Homma, *IEEE Trans. on Magnetics*, **35**, 3154 (1999).
- [5] X. Tang, Q. Tian, B. Zhao, and K. Hu, *Materials Science and Engineering A*, **135**, 445 (2007).
- [6] A. M. Nicolson and G. F. Ross, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, **IM-19**, **4**, 377 (1970).
- [7] M. Wu, Y. D. Zhang, S. Hui, T. D. Xiao, S. Ge, W. A. Hines, J. I. Budnick, and G. W. Taylor, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 4404 (2002).
- [8] E. Michielssen, J. Sajer, S. Ranjithan, and R. Mittra, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, **41**, 1024 (1993).
- [9] S. Motojima, Y. Noda, S. Hoshiya, and Y. Hishikawa, *J. Appl. Phys.*, **94**, 2325 (2003).

## High Frequency Properties of Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> Magnetic Powder/Epoxy Composite Film

Seongmin Hong and Cheol-Gi Kim\*

*Dept. of Material Science and Engineering, Chungnam National University, 220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea*

(Received 2 September 2008, Received in final form 19 September 2008, Accepted 22 September 2008)

Composites of Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> powder and epoxy were prepared using a thermal curing process. Scanning electron microscope (SEM), vibrating sample magnetometer (VSM) and network analyzer were used to analyze the structure, electromagnetic properties and microwave absorption of the composites. Results show that the saturation magnetization depends on the fraction of the Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> powder in the composite, which affects initial permeability. It is believed that the eddy current loss is a dominant factor over 1 GHz and that the resonance frequency of the composite decreases with increasing fractions of Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> powder. Finally, reflection loss was calculated from the permeability and permittivity of these composites. Composite with 50 wt.% Fe<sub>93.5</sub>Si<sub>6.5</sub> powder fractions and 5 mm thickness showed reflection loss below -20 dB from 3.66 GHz to 4.16 GHz. Therefore, it is believed that thin Fe-Si/epoxy composites may be a good candidate for microwave absorption application.

**Keywords :** Fe-Si/epoxy composites, microwave absorption