

MnZn계 페라이트-고무 복합체의 마이크로파대역에서의 전기적 특성 및 전자파 흡수 특성

(Electrical and Electromagnetic wave Absorbing Properties of MnZn Ferrite-Rubber Composites in Microwave Frequencies)

김 호 철*, 이 병 택*, 정 언 춘**, 엄 진 섭***

(H.C. Kim, B.T. Lee, Y.C. Chung*, J.S. Um**)

요 약

MnZn계 페라이트-실리콘 고무 복합체를 MnZn 페라이트의 체적비를 0.1에서 0.4까지 변화시키면서 제작하여 주파수 대역 1 GHz-10 GHz 범위에서 전기적 특성 및 전자파 흡수 특성을 조사하였다. MnZn 페라이트의 체적비가 증가할 수록 유전율과 투자율의 증가를 보였다. 반사 손실 흡수체의 두께가 1/4파장에 해당하는 주파수 대역에서 극대치가 나타났으며, 극대치는 MnZn 페라이트의 체적비가 증가할 수록 저주파수로 이동하는 현상을 나타내었다. 또한, 흡수체의 두께가 증가함에 따라서 반사 손실 극대치는 저주파수 대역으로 이동하였다. 페라이트-고무 복합체의 경우에 전자파 흡수체의 사용주파수 대역에 따라서 요구되는 전자파 흡수 효과를 얻기 위해서는 페라이트 체적비를 조절해야 함을 보여 주었다.

ABSTRACT

Electrical and electromagnetic wave absorbing properties of MnZn ferrite-rubber composites have been examined for varying the volume fraction of ferrite powder from 0.1 to 0.4 in the frequency range between 1-10 GHz. As the volume fraction of MnZn ferrite increased, the complex permittivity and permeability of composite increased. The peak of reflection loss at the frequency corresponding to 1/4 wavelength shifts to lower frequency, and shifts to lower frequency as the thickness of absorber increased. We show that for the ferrite-rubber composites the volume fraction of ferrite should be controlled to obtain the absorbing properties required in given frequency range.

* 한국과학기술원 물리학과

** 한국표준과학연구원

*** 한국타이어 기술연구소

I. 서 론

물질의 전자기적 성질은 복소 유전율과 복소 투자율로 결정짓게 되며, 흡수체로 사용하는 물질의 흡수 특성을 결정짓는 반사 손실은 복소 유전율과 복소 투자율의 함수이다. 마이크로파 대역에서의 전자파 흡수체로는 이 주파수 대역에서 적절한 전자기 특성을 갖는 페라이트가 주로 사용되고 있으나[1,2,3], 페라이트와 같은 단일 물질을 사용할 경우에 전자기 상수와 기계적 성질이 고정되므로 사용 주파수 대역이 제한되고 사용 용도에 따른 형태의 변화가 용이하지 않으므로 불편한 점이 많이 발생하게된다. 그러나, 복합체를 사용할 경우에는 매질과 첨가 재료의 종류와 양에 따라서 전자기 상수의 변화와 기계적 성질의 변화가 가능하므로 이러한 난점을 극복할 수 있다.

본 연구는 MnZn계 페라이트 분말을 실리콘 고무에 분산시켜 복합체를 제작하여 1 GHz-10 GHz의 주파수 대역에서 페라이트 분말의 체적비에 따른 복소유전율과 복소 투자율의 변화 및 전자흡수특성을 조사하여, 페라이트 체적비를 변화시킴으로써 전자파 흡수체의 사용 주파수 대역을 조절할 수 있음을 보여 주었다.

II. 공진형 전자파흡수체^[3,4]

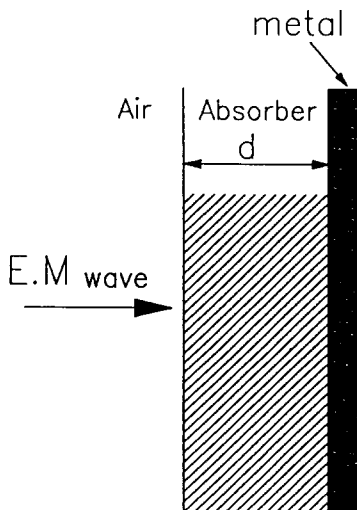


그림 1. 공진형 전자파 흡수체
Fig 1. Quarter wavelength resonant absorber

전자파 흡수체의 전형적인 구조는 그림 1과 같다. 흡수체에 입사된 전자파는 흡수체에 의해서 전자파가 진행됨에 따라서 흡수가 이루어지고, 금속에 의해서 차폐되어 후방으로는 전자파가 진행하지 못하게 된다. 입사된 전자파는 흡수체의 표면과 금속에서의 반사, 그리고, 흡수체와 금속사이에서의 다중 반사에 의해서 흡수체 전면으로 반사가 일어난다. 흡수체 전면으로의 반사는 유전율이 투자율보다 큰 물질에서 1/4 파장의 두께를 갖는 경우에서 가장 큰 반사 손실을 갖는 공진형태를 갖게되어 공진형 전자파흡수체(quarter wave resonant absorber)라 한다.

그림 1)과 같은 경우의 반사 계수는 다음과 같다 [1].

$$R = \frac{Z_m \tanh \gamma d - 1}{Z_m \tanh \gamma d + 1} \quad (1)$$

여기에서, γ 는 흡수체내에서의 전자상수이고, Z_m 은 공기중의 임피던스로 흡수체의 임피던스를 규격화한 양이다. 전자 상수와 규격화된 임피던스는 다음과 같이 표현되는 흡수체의 복소 유전율과 복소 투자율의 함수이다.

$$\gamma = j2\pi f \sqrt{\mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r} \quad (2)$$

$$Z_m = \frac{Z_s}{Z_0} = \left(\frac{\mu_r}{\epsilon_r} \right)^{1/2} \quad (3)$$

여기에서, ϵ_0 과 μ_0 은 각각 공기 중에서 유전율과 투자율이고, $\epsilon_r (= \epsilon_r' - i\epsilon_r'')$ 과 $\mu_r (= \mu_r' - i\mu_r'')$ 은 각각 흡수체의 복소 유전율과 복소 투자율이다. 일반적으로, 전자파 흡수체의 성능 평가도 사용되는 반사 손실은 다음과 같이 표현된다.

$$R.L. (dB) = -20 \log_{10} |R| \quad (4)$$

흡수체에서 파장은 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{c_0}{f(\sqrt{\epsilon_r \mu_r})'} = \frac{\lambda_0}{(\sqrt{\epsilon_r \mu_r})'} \quad (5)$$

$$(\sqrt{\epsilon_r \mu_r})' = \text{real part of } \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \\ = \sqrt{\frac{\epsilon_r' \mu_r'}{2}} [1 - \tan \delta_\epsilon \tan \delta_\mu] \quad (6)$$

$$\tan \delta_\epsilon = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}, \quad \tan \delta_\mu = \frac{\mu_r''}{\mu_r'} \quad (7)$$

여기에서, c_0 는 공기 중에서의 전자파의 속도 상수, λ_0 는 공기중에서의 전자파의 파장이다.

III. 시편 준비 및 실험

복합체의 제작은 매질을 HR550-50U 실리콘 고무를 사용하였고, 전자파 손실을 주는 첨가 재료로 삼화 전자에서 제작한 MnZn계 페라이트 분말을 사용하였다. 실리콘 고무와 페라이트의 비중은 각각 1.17과 4.80이다. 실리콘 고무에 대한 페라이트 분말의 체적비는 0.1에서 0.4까지 0.1 간격으로 변화하며 제작하였고, 시편은 MnZn 페라이트 체적비에 따라서 각각 MZ10, MZ20, MZ30, MZ40이라고 명명하였다. 페라이트 분말은 고무에 crosslinking agent, dicumylperoxide를 1phr(per hundred : 고무 100g에 대한 질량비)를 첨가한후 균질하게 분포하도록 두개의 로울러로 혼합하였다. 혼합물은 동축선 측정에 알맞게 내경과 외경이 각각 3mm, 7mm 두께 5mm인 molder에 넣어 온도 160℃, 고압의 환경에서 10분동안 curing 한후 200℃에서 4시간 동안 휘발성 물질을 제거하여 제작하였다. 복소유전율과 복소투자율은 APC-7 coaxial air-line(HP85051-60007)과 회로망 분석기(Network Analyzer : HP8501A)를 사용하여 1 GHz에서 10 GHz의 주파수 대역에서 측정하였다. 동축선 측정 장치에서 복소 유전율과 복소 투자율은 다음 식과 같이 구해진다.

$$\epsilon_r = \frac{\gamma}{\gamma_0} \left(\frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma} \right) \quad (8)$$

$$\mu_r = \frac{\gamma}{\gamma_0} \left(\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right) \quad (9)$$

γ 는 시편에서의 전파상수, γ_0 는 공기중에서의 전파상수, Γ 는 공기중에서 시편으로의 입사될 때의 경계면에서의 반사계수이다. γ 와 Γ 는 회로망 분석기에서 측정되는 S파라미터로 다음과 같이 주어진다.

$$\Gamma = \frac{-(S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1) \pm \sqrt{(S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1)^2 - 4S_{11}^2}}{2S_{11}^2} \quad (10)$$

$$\gamma d = -\log$$

$$\left(\frac{-(S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1) \pm \sqrt{(S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1)^2 - 4S_{21}^2}}{2S_{11}^2} \right) \quad (11)$$

여기서, d 는 시편의 두께이다.

IV. 결과 및 토론

그림 2의 (a)와 (b)는 실리콘 고무의 주파수에 따른 유전율과 투자율의 변화를 보여주고있는데, 측정 주파수 대역에서는 복소유전율의 실수부는 3정도의 일정한 값으로 분산(dispersion)현상이 나타나지는 않는다. 복소유전율의 허수부는 0에 가까운 값으로 실리콘 고무는 유전 손실이 거의 없음을 보여주고있다. 복소투자율의 실수부도 1 정도의 값으로 유전율의 경우와 마찬가지로 측정 주파수 대역에서 분산(dispersion)현상이 나타나지 않으며, 이 결과는 실리콘 고무가 비자성 물질이므로 예상할 수 있는 결과이며, 복소투자율의 허수부도 거의 0에 가까운 값으로 자성 손실이 없음을 알 수 있다.

그림 3의 (a)과 (b)는 MZ10, 20, 30, 40 각 시편의 경우에 주파수에 대한 유전율의 변화를 보이고 있다. 복소유전율의 실수부 경우에 6 GHz 이하의 주파수 대역에서 MnZn 페라이트 체적비의 증가에 따라서 증가하는 경향을 보이고, 주파수가 증가함에 따라 증가하는 양은 줄어든다. MnZn 페라이트 체적비가 0.1의 경우에 7 GHz이상에서 복소유전율의 실수부는 감소를 보이며 체적의 증가에 따라서 감소가 일어나는 주파수는 저주파수 대역으로 이동한다. 복소유전

표 1. 각 시편의 체적비와 중량비

Table 1. Volume fraction and weight percent for MnZn ferrite-rubber composites

시편	MnZn 페라이트 체적비	MnZn 페라이트 (g)	실리콘 고무 (g)	비중 (측정치/이론치)
Rubber	0	0	100	1.15/1.17
MZ10	0.1	45.6	100	1.40/1.53
MZ20	0.2	102.6	100	1.72/1.90
MZ30	0.3	175.8	100	2.10/2.26
MZ40	0.4	273.5	100	2.55/2.62

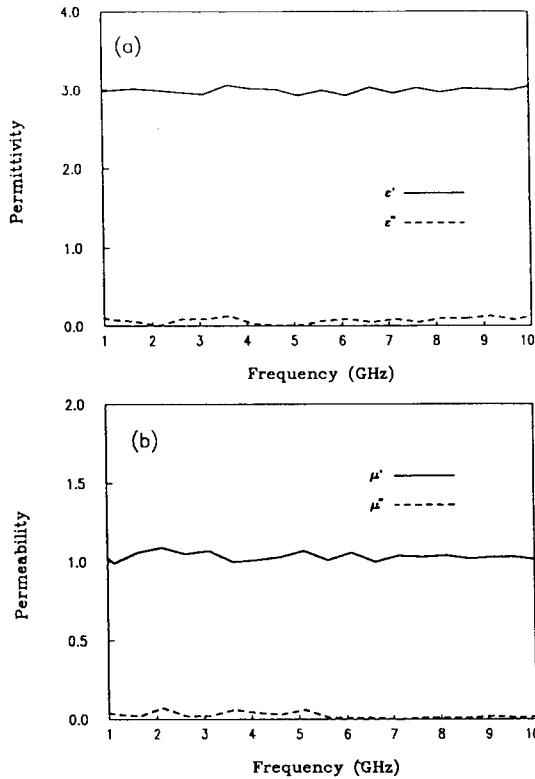


그림 2. (a) 실리콘 고무의 주파수에 대한 유전율의 변화
 (b) 실리콘 고무의 주파수에 대한 투자율의 변화
 Fig 2. (a) Permittivity vs. frequency for silicone rubber
 (b) Permeability vs. frequency for silicone rubber

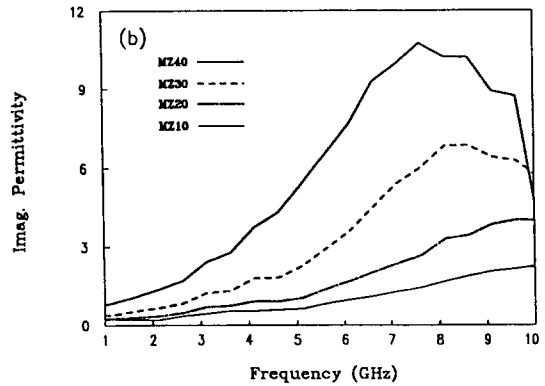
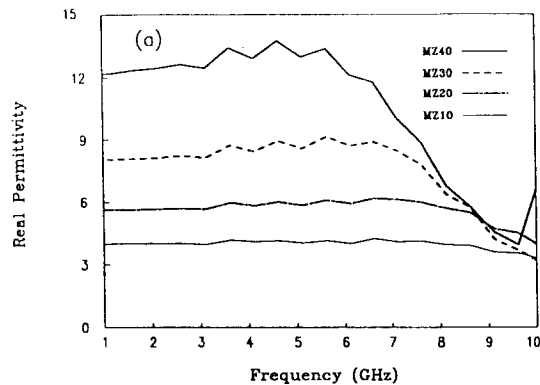


그림 3. (a) MnZn 페라이트-고무 복합체의 주파수에 대한 유전율 실수부의 변화
 (b) MnZn 페라이트-고무 복합체의 주파수에 대한 유전율 허수부의 변화
 Fig 3. (a) Real permittivity vs. frequency for MnZn ferrite-rubber composites
 (b) Imaginary permittivity vs. frequency for MnZn ferrite-rubber composites

율의 허수부는 실수부가 감소하는 대역에서 극대치를 갖으며, MnZn 페라이트 체적비의 증가에 따라서 극대치와 위치는 저주파수 대역으로 이동한다. 위의 결과는 유전체 매질에 전도성 첨가물을 분산시킨 복합체의 이완 현상(relaxation phenomena)과 일치한다[5,6]. MnZn은 실리콘 고무보다 전도성이 크므로 MnZn 분말의 체적비의 증가에 따라서 쌍극자의 양의 증가로 유전율의 실수부와 허수부가 증가하고, 이완시간(relaxation time)이 증가함에 따라서 이완 현상이 저주파수 대역으로 이동한다.

그림 4의 (a)와 (b)는 MZ10, 20, 30, 40 각 시편의 경우에 주파수에 대한 투자율의 변화를 보여주고 있다. 복소투자율의 실수부는 5 GHz이하의 주파수 대역에서 MnZn 페라이트 체적비의 증가에 따라서 경향을 보이고 주파수의 증가에 따라서 증가하는 양은 줄어든다. 6 GHz이상에서는 MnZn 페라이트 체적비에 따른 경향성은 보이지 않고 있다. 복소투자율의 허수부도 MnZn 페라이트 체적비에 따라서 6 GHz이하에서는 증가를 하고, 복소투자율의 실수부와 같이 주파수의 증가에 따라서 증가의 폭은 줄어들고 7 GHz 근방에서 극소값을 갖는 특이점이 나타나는데, 이것은 MnZn 페라이트의 고유 특성으로 판단되며, 7 GHz 이상의 주파수 대역에서는 MnZn 페라이트 체

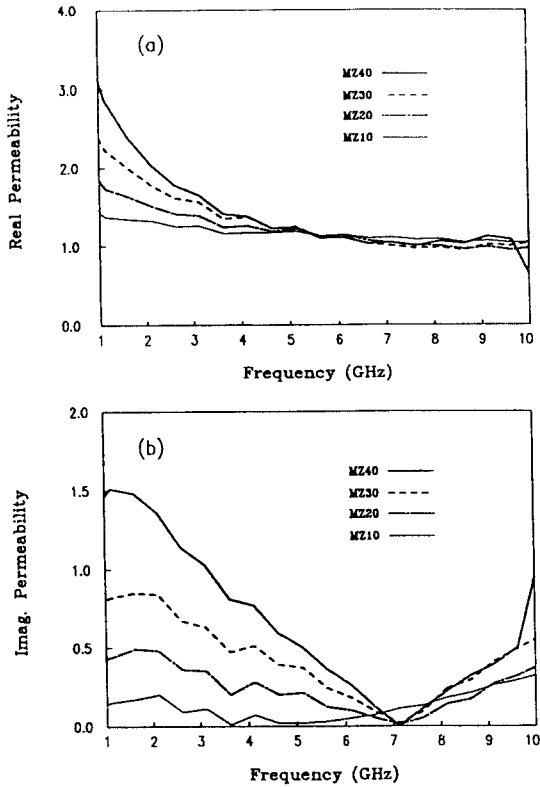


그림 4. (a) MnZn 페라이트-고무 복합체의 주파수에 대한 투자율 실수부의 변화
 (b) MnZn 페라이트-고무 복합체의 주파수에 대한 투자율 허수부의 변화
 Fig 4. (a) Real permeability vs. Frequency for MnZn ferrite-rubber composites
 (b) Imaginary permeability vs. frequency for MnZn ferrite-rubber composites

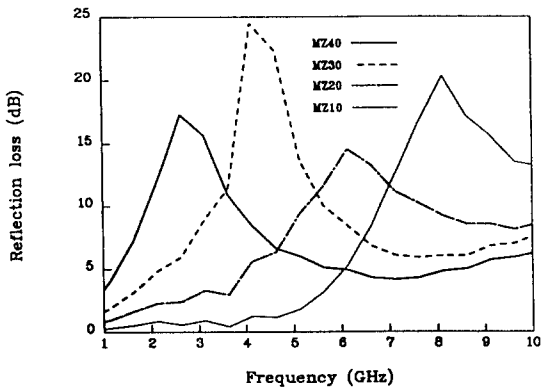


그림 5. MnZn 페라이트-고무 복합체의 주파수에 대한 반사 손실의 변화
 Fig 5. Reflection loss vs. frequency for MnZn ferrite-rubber composites

적비에 따른 경향성은 보이지 않는다.
 그림 5는 식(1)에 각 시편의 복소유전율과 복소투자율을 대입하여 얻은 각 시편에 대한 MnZn 페라이트-고무 복합체의 반사 손실을 보여주고 있다. 반사 손실은 특정 주파수 대역에서 극대치를 갖는 전형적인 공진형 전자 흡수체의 현상을 보여주고 있다.
 표2은 각 시편의 반사 손실의 극대치의 위치와 극대값, 10 dB 이상을 나타내는 주파수폭을 나타내고 있다. 반사 손실의 극대치의 위치는 MnZn 페라이트 체적비의 증가에 따라서 낮은 주파수 대역으로 이동을 하는것이 나타나며, 이 결과는 실리콘 고무에 NiZn계 페라이트를 첨가시킨 결과와도 일치한다[7]. 그러나, 극대치의 크기는 MnZn 페라이트 체적비에 따른 경향성은 보이지 않는다. 반사 손실 극대값이 20 dB 이상은 MZ30의 경우에 4.13 GHz에서 가장 큰 24.4 dB를 보여주고 있으며, MZ10의 경우에 8.13 GHz에서 20.3 dB의 값을 보여주고있다. 10 dB 이상의 반사 손실을 갖는 주파수 대역폭은 MZ10의 경우가 가장 넓은 3 GHz정도 이며, 다른 시편은 약 2 GHz의 주파수 대역폭을 갖는다.

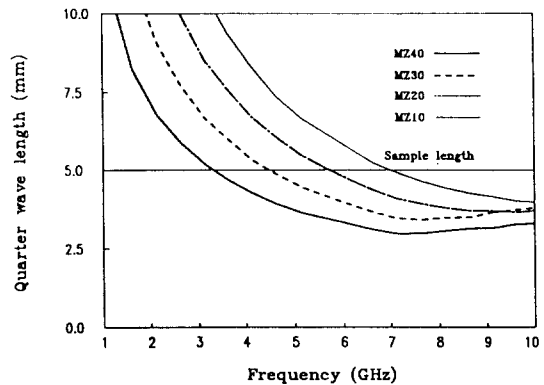


그림 6. MnZn 페라이트-고무 복합체의 주파수에 대한 1/4 파장의 변화
 Fig 6. Quarter wavelength vs. frequency for MnZn ferrite-rubber composites

표 2. 각 시편에서의 반사 손실의 극대치의 위치 및 극대값과 반사손실 10 dB 이상의 주파수 대역폭

Table 2. Peak frequency, peak amplitude and frequency band beyond 10dB of reflection loss for MnZn Ferrite-rubber composites

시편	극대치 주파수(GHz)	극대값(dB)	주파수 대역폭(GHz)
MZ10	8.13	20.3	3
MZ20	6.13	14.6	2
MZ30	4.13	24.4	2
MZ40	2.63	17.2	1.8

그림 6은 식 (5)에 각 시편의 복소유전율과 복소투자율을 대입하여 구한 주파수에 따른 각 시편의 1/4 파장의 변화를 보여주고 있다. 그림 5와 그림 6을 비교하여 보면 MZ20과 MZ30의 경우에 시편의 1/4 파장에서 가장 큰 반사 손실을 갖고, MZ10과 MZ40의 경우는 약간의 위치 변화는 있지만, 1/4파장 부근에서 가장 큰 반사 손실을 보이고 있다.

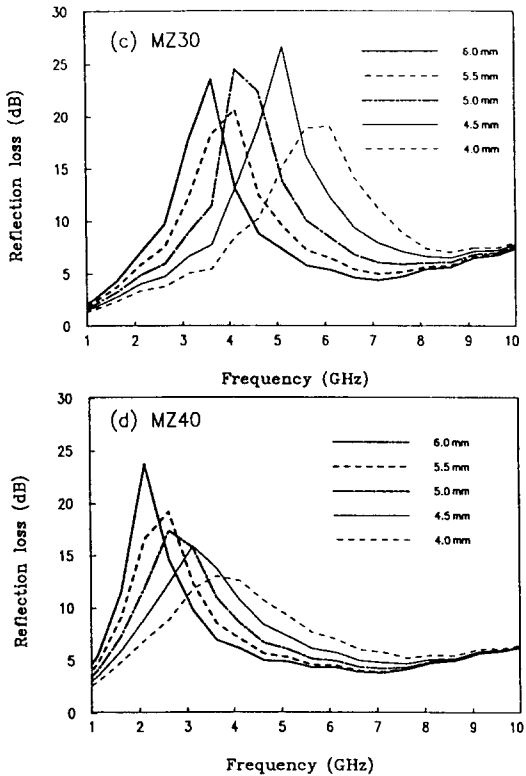
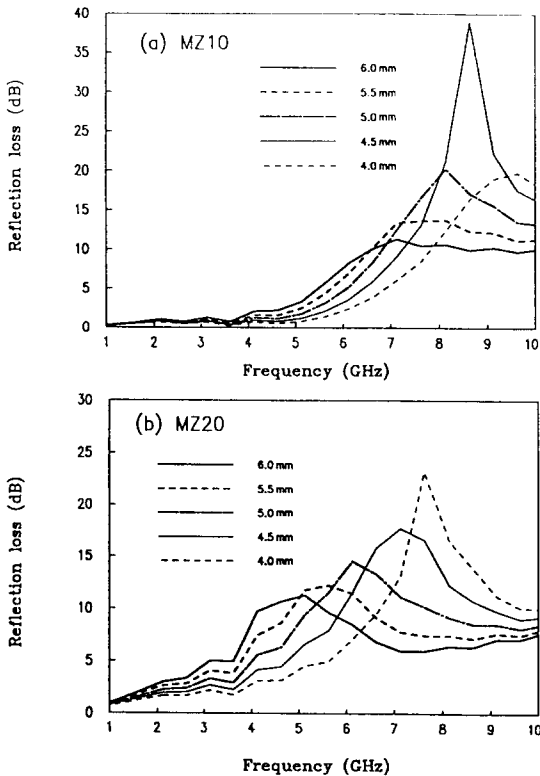


그림 7. 흡수체 두께를 변화시킬 때 주파수에 대한 반사 손실의 변화

(a) MZ10 (b) MZ20 (c) MZ30 (d) MZ40
Fig 7. Reflection loss vs. frequency with different absorber thickness (a) MZ10 (b) MZ20 (c) MZ30 (d) MZ40

그림 7은 각 시편에서 두께를 변화하였을 때 주파수에 따른 반사 손실의 변화를 보여주고 있다. 각 시편은 두께가 증가함에 따라서 반사 손실의 극대치가 저주파수 대역으로 이동하는 것이 나타나고 있는데, 이것은 그림 6에서와 같이 시편의 1/4 파장이 저주파수에서 두꺼워지는 현상과 일치하며, 다른 rubber ferrite 전파 흡수체의 결과와도 일치한다[8]. 반사 손실의 극대치의 크기는 두께에 따른 경향성은 보이지 않는다. 20 dB 이상의 반사 손실은 MZ10의 경우에 두께 4.5mm에서 8-9 GHz의 범위, MZ20의 경우에 두께 4.0mm에서 8 GHz 부근, MZ40의 경우에 두께 6.0mm에서 2 GHz 부근에서 나타나고 있다. MZ30의 4.5mm에서 6.0mm까지의 두께에서 20 dB 이상의 반사 손실을 보이며, 두께의 증가에 따라서

극대치의 위치는 저주파수 대역으로 이동한다.

V. 결 론

MnZn계 페라이트를 실리콘 고무에 분사시켜 MnZn 페라이트의 체적비를 0.1에서 0.4까지 변화시키면서 복합체를 제작하여 주파수 대역 1 GHz-10 GHz 범위에서 전기적 특성 및 전파 흡수 특성을 조사하였다. MnZn 페라이트의 체적비가 증가 할수록 유전율과 투자율의 증가를 보였다. 흡수체의 두께가 1/4 파장에 해당하는 주파수 대역에서 반사 손실의 극대치가 나타났으며, 극대치는 MnZn 페라이트의 체적비가 증가 할수록 저주파수로 이동하는 현상을 나타내었다. 흡수체의 두께가 증가함에 따라서 반사 손실의 극대치는 저주파수 대역으로 이동하였는데, 이것은 시편의 1/4 파장이 저주파수에서 두꺼워지는 현상과 일치한다. 20dB 이상의 반사 손실은 MZ30의 경우에 4.13 GHz에서 가장 큰 24.4dB를 얻을 수 있었으며, MZ10의 경우에 8.13 GHz에서 20.3 dB의 값을 얻을 수 있었다. 이 결과로부터, 페라이트 체적비를 변화시킴으로써 전파 흡수체의 사용 주파수 대역을 조절할 수 있음을 보여 주었다.

참 고 문 헌

1. K.Akita, Proceedings of International Conference, Sep.-Oct.1980, Japan
2. K.Y.Kim, W.S.Kim, Y.D.Ju, H.J.Jung, J. Mater.Sci. 27, 4741, 1992
3. M.B.Amin, J.R.James, The Radio and electronic engineer. Vol.51, 209, 1981
4. E.F.Knott, IEEE Trans on Antennas and Propagation. AP-27, No.5.678, 1979
5. S.K.See, Ph.D.These, KAIST, Seoul, Korea, 1990
6. Y.Song, T.W.Noh, S.I.Lee, and J.R.Gaines, Phys.Rev.B, 33, 904, 1986
7. S.S.Kim, S.B.Jo, K.I.Kueon, K.K.Choi, J.M. Kim, and K.S.Chune, IEEE Trans.Mag.Vol.27, 6, 5462, 1991
8. 김동일, 안영섭, 정세모, 한국전자과학기술학회지, Vol.4, No.1, 10, 1993

본 연구가 수행되도록 지원해주신 체신부와 한국통신 관계자 여러분, 한국 전자과학기술학회의 회원 여러분, 측정에 도움을 주신 KIST의 김경룡박사, 삼화 전자의 조성일 연구원, 한국 타이어의 이범진부장님께 감사를 표합니다.
