

자성재료를 이용한 광대역 전자파 흡수체 설계 연구

김동영 · 윤석수 *

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 송천동 388, 760-749

(2012년 11월 24일 받음, 2012년 12월 11일 최종수정본 받음, 2012년 12월 12일 게재확정)

단층형 전자파 흡수체의 흡수 성능은 입사파의 반사 손실(return loss)이 최대가 되는 두께 정합 조건 및 주파수 정합 조건에서 최적화 된다. 본 연구에서는 재료의 복소 투자율과 복소 유전율에 의존하는 전송선 이론을 적용하여 광대역 흡수체의 정합 조건을 계산하였다. 그 결과 주파수에 따른 복소 투자율 감소 특성이 두께 정합 조건을 광대역으로 확대하는 효과를 지니기 때문에 광대역 전자파 흡수체에 자성 재료가 이용될 수 있다는 것을 알 수 있었다. 따라서 향후 확대될 EMC(Electromagnetic compatibility) 규격을 대비한 차세대 광대역 전자파 흡수체를 만들기 위하여 현재 사용되고 있는 NiZn 페라이트 소결체 보다 포화 자화량이 크고 유전율 값이 작은 자성 재료들을 사용하여야 한다는 것을 보였다.

주제어 : 전자파 흡수체, 정합조건, 투자율, 이완, 유전율

I. 서 론

현대 기술의 발달로 생활의 편리함을 주는 소형 휴대폰, 고성능 가전제품 및 첨단 의료기기의 사용이 날로 증가하고 있으며, 이들 전자기기들이 방출하는 전자파가 인접 전자기기들의 작동을 방해하여 기기들이 오작동을 일으키는 원인이 되고 있다. 이러한 전자기기들간의 전자파 장애를 방지하기 위하여 국제 규격인 전자파 적합성(Electromagnetic compatibility, EMC)을 강제 규정으로 법제화하여 규제하고 있으며, 전자기기들의 불요 전자파 방출을 규정하는 전자파 간섭(Electromagnetic interference, EMI) 및 불요 전자파에 의한 기기의 동작 특성을 규정하는 전자파 내성(Electromagnetic susceptibility, EMS)을 독립적으로 규제하고 있다. 따라서 모든 전자제품들은 EMC 규격을 만족하여야 하며, 일반적으로 EMC 분석 결과를 제품 설계에 반영한다. 제품의 설계 단계에서 EMC 규격을 만족하기 위하여 도입하는 방법중의 하나가 전자파의 출입을 차단하는 전자파 차폐(shielding) 기법이며, 이러한 기법은 최종 생산 제품의 불요전자파의 방출을 최소화하고 불요 전자파에 의한 기기의 내성을 최대화하기 위하여 사용되고 있다.

전자파를 차단하는 차폐 효과(shielding effectiveness)는 재료 표면에서의 전자파 반사, 재료 내부에서의 전자파 흡수 및 재료 내에서 일어나는 다중반사에 의한 손실 특성을 이용한다[1, 2]. 전자파 차폐 재료로 주로 이용되는 금속 재료는 비저항(resistivity)에 비례하는 전자파 임피던스가 공기의 전자

파 임피던스(337 ohm)보다 매우 작다. 따라서 금속 재료의 경우 공기/금속의 경계 면에서 전자파 임피던스의 차이에 의한 반사 효과가 전자파를 차단하는 역할을 한다. 그러나 이러한 반사파는 또다시 전자기기 내부의 다른 부품의 동작을 방해하는 장애 요인으로 대두 되면서 반사가 작고 흡수 성능이 우수한 전자파 차폐 재료를 요구하고 있다.

전자파 차폐재료에서 반사 보다는 흡수 성능을 이용한 재료를 전자파 흡수체라고 부른다. 초기에 개발된 전자파 흡수체는 전자제품의 EMI/EMS 규격을 측정하는 전자파 무반사실 및 비행기의 스텔스 기능에 사용되고 있으며, 최근에는 고속 및 고밀도 전자부품에서 발생하는 근역장의 자기장 차폐 등을 위하여 사용되고 있다[3-8].

전자파 무반사실에서 사용되는 전자파 흡수체는 상용 전자제품의 EMI/EMS 규격을 시험하기 위하여 30 MHz~1 GHz 대역에서 흡수 손실이 20 dB 이상이 되도록 설계한다. 일반적으로 전자파 무반사실은 금속으로 지은 전자파 차폐실 안쪽에 자성재료인 페라이트 타일로 만든 전자파 흡수체를 붙여 만든다. 특히 군용제품은 군용 규격(MIL-STD)을 시험하기 위하여 상용 제품의 시험 주파수 대역보다 넓은 30 MHz~18 GHz 대역에 대하여 흡수 손실이 20 dB 이상이 되도록 설계한다. 이 경우 30 MHz~1 GHz 대역의 저주파수 대역은 페라이트 타일 흡수체를 사용하여 흡수 손실을 만족시키고, 그 이상의 고주파수 대역은 피라미드형 흡수체를 활용하는 복합형 흡수체(hybrid absorber)를 사용한다[9]. 스텔스 비행기에 사용되는 흡수체는 군용 레이더에서 사용하는 X-band(8~12 GHz)의 전자파를 흡수하는 재료를 사용한다. 비행기에 사용되므로 전자파의 흡수 특성뿐만 아니라 경량화 및 고강도의

기계적인 특성이 만족되어야 한다. 이러한 전자파 흡수 특성 및 기계적인 특성을 고려하여 자성재료와 고강도 섬유재료를 혼합한 복합재료가 사용되고 있을 것으로 예상하고 있다.

전자기기의 소형화 및 소자의 고집적도에 따라 기기 내부의 도선 간격 및 소자 내부의 선폭이 좁아지고 있으며, 이들 도선들 사이에서 일어나는 전자기 간섭현상이 새로운 문제로 대두되고 있다. 도선들 사이의 이러한 간섭은 도선에 흐르는 전류 신호가 만든 자기장이 인접한 도선의 신호에 영향을 미치는 것으로 볼 수 있으며, 이러한 도선들 사이의 자기장의 영향을 최소화 하기 위한 방법으로 자성재료를 이용한 흡수체 박막이 휴대폰이나 컴퓨터 등의 정보통신기기 내부에서 사용되고 있다. 전자 부품의 고속 동작 및 통신기기의 사용 주파수 대역의 확대에 따라 EMC 규격의 주파수 대역을 확대하고자 하는 논의가 시작되고 있다. 현재까지는 상용 제품에 대한 EMC 규격이 30 MHz~1 GHz 대역을 규제 대상으로 하고 있으나, 이들 상용 제품에 대한 규제 주파수를 3 GHz까지 확대하려고 하는 움직임이 일고 있다. 따라서 향후 전개될 수 있는 상용 전자 제품에 대한 EMC 규격의 변화에 대응하기 위하여 새로운 광대역 전자파 흡수체 개발을 위한 연구가 요구된다.

본 연구에서는 전자파 흡수체의 기본원리를 바탕으로 투자율 스펙트럼이 자기 이완(magnetic relaxation) 특성을 보이는 자성재료의 전자파 흡수 성능을 분석하였으며, 이들 결과로부터 차세대 광대역 흡수체 개발에 필요한 자성재료의 초기투자율 및 이완 주파수 특성을 제시하였다.

II. 전자파 흡수 성능 분석

전자파 무반사실 또는 스텔스 비행기에서 사용하는 전자파

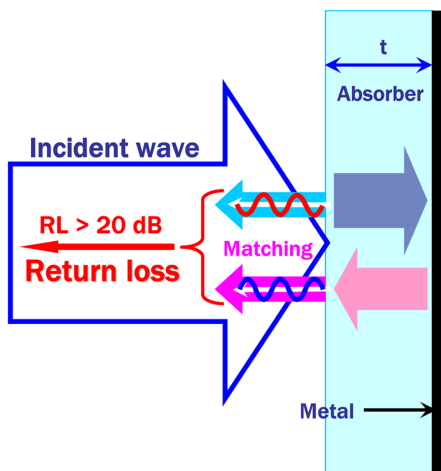


Fig. 1. (Color online) Schematic diagram of a metal-backed single layered electromagnetic wave absorber.

흡수체는 Fig. 1에서 보인 것과 같이 흡수 재료의 뒷면에 금속판을 갖는 단층형 구조를 갖는다. 이러한 금속판과 흡수 재료로 구성된 단층형 흡수체에 TEM(Transverse electromagnetic) mode의 전자파가 수직으로 입사(normal incidence)하는 경우에 대하여 전송선(transmission line) 이론을 적용하여 흡수체의 흡수 성능을 구한다. 본 연구에서도 단층형 흡수체의 흡수 성능에 대한 분석을 통하여 차세대 EMC 규격 변화에 대응할 수 있는 광대역 흡수체 개발에 부합되는 자성재료의 특성을 제시하고자 한다.

한 면이 금속판을 갖는 단층형 전자파 흡수체의 경우 전송선 이론으로부터 도출된 흡수체의 전자파 임피던스는 다음과 같다[3].

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \tanh\left(i \frac{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}}{\lambda} t\right) \quad (1)$$

여기서 i 는 허수($i = \sqrt{-1}$)이며, λ 는 입사 전자파의 파장, μ , ϵ 및 t 는 각각 재료의 상대 복소 투자율, 상대 복소 유전율 및 두께이다. 진공에서의 유전율(ϵ_0) 및 투자율(μ_0)을 고려하면 진공의 전자파 임피던스 $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 377 \Omega$ 이다. 이때 계산을 간단하게 하기 위하여 공기의 유전율 및 투자율을 1로 두고, 재료의 상대 복소 유전율과 상대 복소 투자율을 고려하여 흡수체의 흡수 성능을 구한다. 뒷면에 금속판을 갖는 단층형 흡수체는 흡수 재료를 투과한 전자파가 금속판에 의하여 차단되므로 흡수체를 투과하지 못한다. 따라서 식(1)을 사용하여 흡수체의 전자파 임피던스와 진공의 전자파 임피던스 차에 의한 반사 특성으로부터 흡수 성능을 구한다. 흡수체의 전자파 임피던스가 진공의 전자파 임피던스와 동일한 경우 임피던스 정합에 의하여 반사 특성이 최소가 되며, 이는 수직으로 입사하는 전자파가 흡수체에서 흡수되어 열로 소실되었음을 의미한다. 이러한 정합 조건을 만족하는 경우 흡수 성능이 최대가 된다. 따라서 흡수체의 흡수 성능은 입사 전자파의 전력 손실을 의미하며 그로 인하여 반사 전자파의 전력을 최소화하므로 반사 손실(RL, return loss)로 표현한다. 즉 흡수체의 흡수 성능은 반사손실로 특성화 하며, 다음과 같이 구한다[3].

$$RL(\text{dB}) = -20 \log \left| \frac{Z-1}{Z+1} \right| \quad (2)$$

반사 손실은 입사 전자파의 흡수 성능을 의미하며, 단위는 데시벨(dB)를 사용한다. 흡수체 설계의 기준 값인 $RL = 20 \text{ dB}$ 는 입사 전자파의 99% 전력이 흡수체에서 흡수되었음을 의미한다. 이렇듯 입사 전자파가 흡수 되는 원리는 Fig. 1에서 보인 것과 같이 입사된 전자파는 재료의 경계 면에서 일차적으로 반사하고, 나머지 전자파는 재료 안으로 투과 한다. 이

때 투과된 전자파는 재료 내에서 일부는 흡수되고, 다시 금속 면에서 반사된다. 반사된 전자파가 다시 재료에서 일부는 흡수되고 다시 재료 밖으로 나오게 된다. 재료 밖으로 나온 전자파가 재료의 경계 면에서 일차적으로 반사한 전자파와 서로 상쇄 간섭을 하기 위하여 위상차가 180°가 되어야 하며, 따라서 흡수체 재료의 두께는 재료 내에서 전자파 파장의 1/4이 되어야 한다. 따라서 일차 반사파와 재료 밖으로 나온 이차 반사파의 상쇄 간섭의 정도가 반사손실을 증가시키는 역할을 하게 된다. 이렇듯 일차 반사는 입사 전자파의 약 50% 이하를 반사시키는 조건을 만족해야 하며, 재료의 흡수 조건 및 재료의 두께 조건이 모두 최적화 되었을 때 우수한 흡수 성능을 보이게 된다. 이러한 최적화 조건이 광대역에 걸쳐서 만족할 때 광대역 전자파 흡수체가 된다. 따라서 광대역 전자파 흡수체는 이러한 조건을 만족하기 위하여 재료의 복소 유전율과 복소 투자율의 특성을 조절함으로써 가능하다.

전자파 흡수 재료는 일차 반사파의 반사율이 약 50% 이하여야 하므로 반사율이 매우 큰 금속 재료를 사용할 수 없다. 따라서 흡수 재료는 주로 절연체 재료를 사용하고 있다. 그러나 절연체 재료의 유전율은 마이크로파 대역에서 거의 일정한 값을 가지고 있으므로 재료 내에서의 전자파 파장이 1/4가 되는 조건이 제한적이므로 광대역의 흡수 특성을 구현하기 어렵다. 따라서 절연체이면서 자성특성을 갖는 페라이트 재료가 전자파 무반사실의 흡수 재료로 사용되고 있다. 이러한 페라이트 재료는 마이크로파 대역에서 투자율 변화가 크므로 재료 내에서의 전자파 파장이 1/4가 되는 조건의 범위를 넓힐 수 있기 때문에 광대역 흡수 재료로 이용이 가능하다. 이러한 자성 페라이트의 복소 투자율은 주파수(f)에 따라서 다음과 같이 이완 특성을 보인다[10, 11].

$$\mu = 1 + \frac{K}{1 + if/f_r} \quad (3)$$

여기서 $K+1$ 은 주파수가 0일 때의 초기 투자율 값이고, f_r 은 허수부 투자율이 최대가 되는 이완 주파수이다. 현재 전자파 무반사실에서 흡수 재료로 사용되고 있는 NiZn 페라이트 소결체의 경우 유전율 $\epsilon' = 12.5$ 이고, 초기투자율 값과 이완 주파수는 각각 $K+1 = 1072$ 과 $f_r = 6.3$ MHz이다. 한편 MnZn 페라이트 소결체의 경우 유전율 $\epsilon' = 14.0$ 이고, 초기투자율 값과 이완 주파수는 각각 $K+1 = 2500$ 과 $f_r = 2.5$ MHz이다[10, 11].

유전율과 투자율에 대한 주파수 특성이 알려진 NiZn 페라이트 소결체에 대하여 식(3)을 이용하여 구한 복소 투자율의 실수부와 허수부 투자율의 주파수 의존성을 Fig. 2(a)에서 보인다. 이러한 복소 투자율 스펙트럼과 유전율 상수 값을 식(1)과 식(2)에 적용하여 재료의 두께와 주파수에 따른 반사손

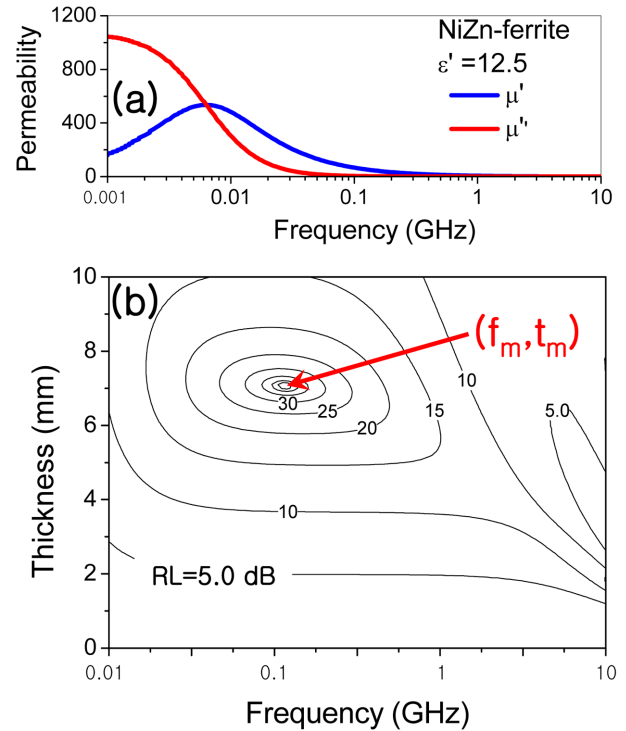


Fig. 2. (Color online) (a) Real (μ') and imaginary (μ'') permeability spectra of the NiZn ferrite material. (b) Contour map of the return loss with sample thickness and frequency in NiZn ferrite material. The matching frequency (f_m) and matching thickness (t_m) are indicated at the maximum return loss.

실을 계산하였으며, 그 결과는 Fig. 2(b)에서 보인다.

Fig. 2(b)에서 NiZn 페라이트 흡수체의 반사손실은 재료의 두께 및 주파수에 따라 등고선 형태를 보인다. 이러한 등고선에서 반사손실이 최대가 되는 주파수와 두께를 각각 정합 주파수(matching frequency, f_m)와 정합 두께(matching thickness, t_m)라고 한다. NiZn 페라이트 소결체의 경우 정합 두께는 약 7.1 mm이며, 정합 주파수는 117 MHz임을 계산 결과로부터 알 수 있다. 이러한 정합 조건은 흡수 재료의 복소 유전율과 복소 투자율의 주파수 특성에 의존한다. 따라서 흡수체를 설계하는 과정에서는 흡수 재료의 복소 유전율과 투자율로부터 정합두께를 먼저 도출한 후, 정합 두께를 갖는 흡수체의 주파수에 따른 반사손실을 계산한다.

Fig. 3은 두께 정합 조건을 만족하는 7.1 mm의 NiZn 페라이트 흡수체에 대한 주파수에 따른 반사손실 특성을 보인다. 흡수체 설계에서 요구하는 20 dB의 반사 손실을 적용하여 흡수 대역폭을 환산하면, NiZn 페라이트 흡수체의 경우 29.6~469 MHz의 흡수 대역폭을 갖는 흡수체임을 알 수 있다. 이러한 흡수 대역폭은 전자파 무반사실에서 요구하는 30 MHz~1 GHz의 EMC 측정 규격 조건을 만족하지 못한다. 따라서 NiZn 페라이트 흡수체 보다 흡수 대역폭이 넓은 전자파 흡수

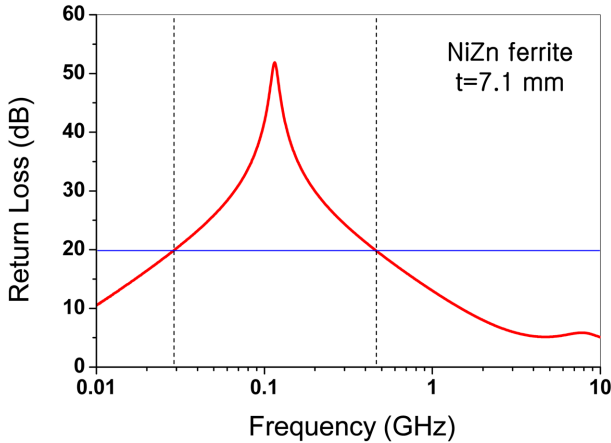


Fig. 3. (Color online) Return loss with frequency for NiZn ferrite material with $t = 7.1$ mm.

체의 개발이 필요하다. 페라이트 자성재료는 재료의 성분에 따라서 K 와 f_r 이 서로 다르며, 이들 자성재료의 투자율 특성을 나타내는 K 와 f_r 은 재료에 첨가되는 성분을 조절하여 그 특성을 향상시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 광대역 흡수체에 적합한 페라이트 자성 재료의 K 와 f_r 의 특성을 분석하였다.

III. 광대역 전자파 흡수체 설계

본 연구에서는 전자파 무반사실에서 요구하는 30 MHz~1 GHz의 EMC 측정 주파수대역에서 20 dB 이상의 반사손실을 갖는 흡수체에 사용되는 흡수 재료가 가져야 하는 유전율 및 복소 투자율 특성을 분석하였다. 이때 절연체 특성을 갖는 페라이트 재료의 전자기 물성인 유전율은 실수부만 있고, 복소 투자율은 식(3)의 이완 특성을 갖는 자성 재료를 도입하였다. 이러한 이완 특성을 보이는 자성재료의 복소 투자율은 초기투자율 K 와 이완 주파수 f_0 로 두 가지 변수로 표현된다. 자성 재료에서 이들 두 변수의 곱인 Kf_r 은 다음과 같이 Snoek의 한계 법칙을 따른다[12].

$$Kf_r = 3\gamma M_s \quad (4)$$

여기서 γ 는 자기스핀의 자이로 계수(gyromagnetic factor)이며, M_s 는 포화 자화량이다. 자성 재료에 대하여 두 가지 변수로 표현되는 복소 투자율 특성은 하나의 변수인 Kf_r 로 특성화 하는 것이 가능하다. 따라서, 본 연구에서는 광대역 흡수체의 흡수 성능 분석에 Kf_r 을 새롭게 도입하였다.

Fig. 4는 흡수체의 두께를 바꾸면서 30 MHz~1 GHz 대역에 대하여 반사손실이 20 dB 이상의 조건을 만족하는 유전율과 Kf_r 값들의 영역을 계산한 결과를 보인다. 흡수체의 두께가 2 mm인 경우 Kf_r 의 값은 21~26 GHz 범위에 있어야 하

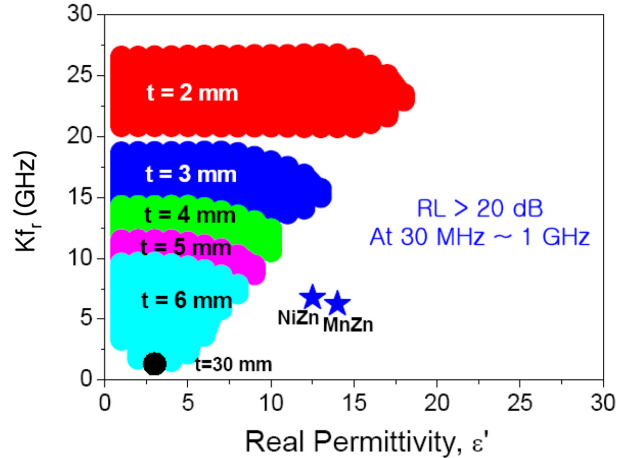


Fig. 4. (Color online) Material parameters of Kf_r and ϵ' satisfying the 20 dB return loss in the frequency range of 30 MHz~1 GHz. The material parameters of NiZn ferrite and MnZn ferrite are indicated for the comparison.

고 이때 유전율은 18 이하가 되어야 한다. 반대로 두께가 30 mm인 경우 Kf_r 의 값은 2 GHz로 작지만 유전율은 3의 값을 가져야 함을 알 수 있다. 즉 흡수체의 두께가 증가하면 Kf_r 의 값은 작아도 되지만 유전율 또한 작아야 한다. 현재 흡수체로 사용되고 있는 NiZn 페라이트나 MnZn 페라이트의 경우 유전율 값이 30 MHz~1 GHz 대역에 대하여 반사손실이 20 dB 이상의 조건을 만족하지 못한다. 예를 들어 7.1 mm의 NiZn 페라이트의 경우 유전율이 7 이하로 작아진다면 30 MHz~1 GHz 대역에서 20 dB의 반사 손실을 갖는 흡수체가 될 수 있으며, 유전율이 같을 경우 Kf_r 이 커져야 함을 알 수 있다. 이들 결과로부터 광대역 흡수체 재료는 유전율 값이 작고 Kf_r 값이 커져야 두께가 얇은 광대역 흡수체가 가능함을 보인다. 식(4)의 Snoek의 한계 법칙에 의하면 자성 재료의 Kf_r 값을 증가시키기 위해서는 자성재료의 포화 자화량이 커져야 한다. 결국, 자성 재료의 포화 자화량이 크고, 유전율이 작아야 두께가 얇은 광대역 흡수체가 가능함을 알 수 있다. 이러듯 광대역 흡수체가 유전율이 작은 재료에서 가능한 이유는 광대역 흡수 특성이 자성재료의 주파수에 따라 변화되는 복소 투자율의 특성과 관련되고 있음을 알 수 있다. 주파수에 따른 투자율의 감소는 재료 내부에서의 주파수에 따른 유효 파장을 감소시켜 정합 주파수 조건을 광대역으로 확대시키고 있음을 알 수 있다. 따라서 30 MHz~1 GHz 대역에 대하여 반사손실이 20 dB 이상의 조건을 만족하는 광대역 전자파 흡수체는 유전율이 작고 포화 자화량이 큰 자성재료가 최적의 재료임을 알 수 있다. Fig. 4의 결과로부터 실수부 유전율 값이 3이고 $Kf_r = 15.5$ GHz인 자성재료 사용을 가정하여 두께가 3 mm인 광대역 흡수체를 설계 하기 위하여 주파수에 따른 반사 손실을 계산한 결과를 Fig. 5에서 보인다.

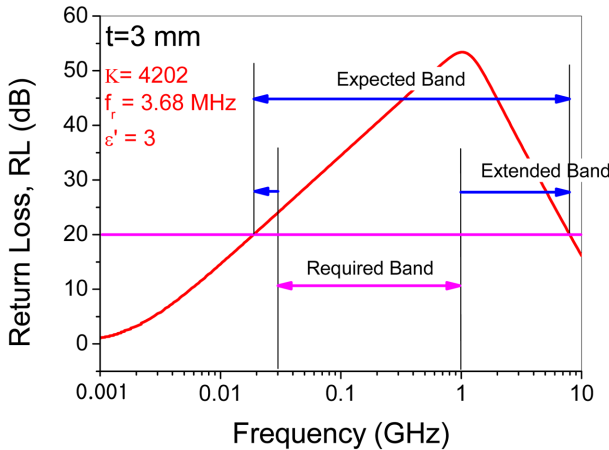


Fig. 5. (Color online) Return loss with frequency for magnetic material with $t = 3$ mm, $K = 4202$, $f_r = 3.68$ MHz and $\epsilon' = 3$.

Fig. 5에서 반사손실이 20 dB 이상인 주파수 대역은 18.9 MHz~7.95 GHz까지 확대되었음을 보인다. 이러한 결과는 현재 상용제품의 EMC 규격인 30 MHz~1 GHz 대역에 대한 측정 주파수 대역을 만족하고 있으며, 향후 측정 주파수 폭이 3 GHz까지 넓어지더라도 새로운 규격에 대응할 수 있는 흡수체임을 보인다. 결론적으로 이러한 특성을 갖는 전자파 흡수체를 구현하기 위해서는 기존의 NiZn 페라이트 소결체 또는 MnZn 페라이트 소결체 보다 포화자화량이 크고 유전율을 값이 적은 새로운 자성 재료의 개발이 필요하다.

IV. 결 론

단층형 전자파 흡수체 재료의 복소 유전율과 복소 투자율의 주파수 특성을 이용하여 재료의 두께와 주파수에 따른 흡수 성능을 계산한 반사 손실은 등고선 형태를 보이며, 이러한 등고선에서 반사 손실이 최대가 되는 조건을 만족하는 정합 두께 및 정합 주파수를 흡수체 설계에 이용한다. 따라서 흡수 특성이 최대가 되는 정합 조건은 흡수 재료의 복소 유전율과 복소 투자율의 주파수 특성에 의존하며, 흡수체를 설계하는 초기 과정에서는 흡수 재료의 복소 투자율과 복소 투자율로부터 정합두께를 먼저 구한 후, 정합 두께를 갖는 흡수체의 주파수에 따른 반사손실 특성을 계산할 수 있었다.

NiZn 페라이트 소결체의 경우 정합 두께에서 흡수체 설계에서 요구하는 20 dB의 반사 손실을 만족하는 흡수 대역폭은 29.6~469 MHz의 주파수 영역임을 보였다. 이러한 흡수 대역폭은 EMC 측정 규격에서 요구하는 30 MHz~1 GHz의 주파수 조건을 만족하지 못한다. 따라서 기존의 페라이트 재료를

대신하는 광대역의 전자파 흡수체의 개발이 필요하다는 결과를 보였다.

재료의 실수부 유전율인 ϵ' 과 자기완화 변수인 Kf 과의 관계로 정합두께 조건을 분석한 결과 상용 전자제품의 EMC 규격인 30 MHz~1 GHz의 광대역에서 반사손실이 20 dB 이상의 전자파 흡수체는 포화 자화량이 크고 유전율 값이 작은 자성 재료를 사용하여야 가능하다는 것을 알 수 있었다. 이러한 특성을 갖는 전자파 흡수체를 구현하기 위해서는 기존의 NiZn 페라이트 소결체 또는 MnZn 페라이트 소결체 보다 포화자화량이 크고 유전율 값이 적은 새로운 자성 재료의 개발이 필요하다라는 결론을 얻을 수 있었다. 이러한 재료는 절연체 재료와 자성 재료의 혼합 또는 금속 재료를 혼합한 새로운 복합 재료의 개발을 통해 실현될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012-0002218).

참고문헌

- [1] R. B. Schulz, V. C. Plantz, and D. R. Brush, IEEE Trans. Electromagn. Compat. **30**, 187 (1988).
- [2] P. F. Wilson, M. T. Ma, and J. W. Adams, IEEE Trans. Electromagn. Compat. **30**, 239 (1988).
- [3] F. Qin and C. Brosseau, J. Appl. Phys. **111**, 061301 (2012).
- [4] Y. Natio and K. Suetake, IEEE Trans. Microw. Theory Tech. **19**, 65, (1971).
- [5] H. M. Musal, Jr. and H. T. Hahn, IEEE Trans. Magn. **25**, 3851, (1989).
- [6] H. M. Musal, Jr. and D. C. Smith, IEEE Trans. Magn. **26**, 1462, (1990).
- [7] T. Kagotani, D. Fujiwara, S. Sugimoto, K. Inomata, and M. Homma, J. Magn. Mater. **272**, e1813 (2004).
- [8] Z. Haijun, L. Zhichao, M. Chengliang, Y. Xi, Z. Liangying, and W. Mingzhong, Mater. Sci. Eng. B **96**, 289 (2002).
- [9] B. K. Chung and H. T. Chuah, Progress In Electromagnetics Research, Symp. (PIERS) **43**, 273, (2003).
- [10] Y. Naito, H. Anzai, and T. Mizumoto, in Proc. 1993 IEEE Int. Symp. EMC, Dallas, TX, 254 (1993).
- [11] Y. Naito and T. Mizumoto, in Proc. 1994 IEEE Int. Symp. EMC, Chicago, IL, 402 (1994).
- [12] G. F. Dionne, IEEE Trans. Magn. **39**, 3121 (2003).

Design of Wideband Electromagnetic Wave Absorber Using Magnetic Materials

Dong Young Kim and Seok Soo Yoon*

Department of Physics, Andong National University, Andong 760-749, Korea

(Received 24 November 2012, Received in final form 11 December 2012, Accepted 12 December 2012)

The absorption performance of a metal-backed single layered electromagnetic wave absorber is optimized at matching conditions of thickness and frequency indicating the maximum returns loss of incidence electromagnetic wave in the contour map. These matching conditions are obtained by applying the electromagnetic impedance to the transmission line theory, which depend on the complex permeability and complex permittivity of absorber material. The magnetic materials with high permeability can enhance the matching thickness condition to the wide frequency range based on the decrease of permeability with frequency and it can be used as a wideband electromagnetic wave absorber material. Therefore, the magnetic materials with higher saturation magnetization and lower permittivity than NiZn ferrite can be applied to the wideband electromagnetic wave absorber in order to satisfy the newly enforcing the electromagnetic compatibility regulation in the future.

Keywords : electromagnetic wave absorber, matching condition, permeability, relaxation, permittivity