

Ni_{2-x}Zn_xY-고무 복합체의 복소투자율과 전파흡수특성

신재영 · 오재희

인하대학교 무기재료공학과

인천시 남구 용현동 253

권형주

삼화전자공업주식회사 연구소

경기도 화성군 동탄면 장지리 211-1

(1995년 1월 16일 받음, 1995년 2월 20일 최종수정본 받음)

Ni_{2-x}Zn_xY-고무 복합체의 ferrite 조성과 입자 크기 변화에 따른 복소투자율과 전파흡수 특성을 조사하였다. Ferrite 입자가 1 μm 이하인 경우에는 ferrite-고무 복합체가 단자구 거동을 하여 자연공명 현상만이 관찰되었다. Ni_{2-x}Zn_xY-고무 복합체의 제 1정합주파수는 Zn 함량이 증가함에 따라서 저주파 대역으로 이동하였으며, 자연공명 주파수와 비례함을 알 수 있었다. 반면에 제 2정합주파수는 자연공명 주파수에 비례하지 않음을 확인하였다. 또한 복합 ferrite 전파흡수체의 전파흡수 현상은 자벽공명보다는 자연공명에 크게 영향을 받음을 확인하였다.

I. 서 론

자성손실을 이용한 ferrite 전파흡수체는 대역폭이 넓고 정합두께가 얇아 EMI /EMC 대책용으로 널리 사용된다. Ferrite 전파흡수체는 구성 형태에 따라 ferrite 소결형과 ferrite 분말에 고무나 유기물을 혼합하여 제조한 복합형으로 나눌 수 있으며 [1] 이중 복합형은 정합두께가 얇고 가공성이 우수하여 GHz 이상의 micro 파 영역에서 많이 응용되고 있다. Ferrite 전파흡수체의 특성은 정합주파수, 정합두께 그리고 대역폭 등으로 평가되며 이중 정합주파수 (f_m)와 정합두께 (d_m)는 임피던스 정합조건을 만족하는 주파수와 두께를 각각 의미한다. 정합주파수와 정합두께는 상호 의존적인 관계이며 일반적으로 ferrite 전파흡수체는 2개의 정합주파수와 정합두께가 존재한다 [2]. 전파흡수 특성은 재료정수 (복소투자율, 복소유전율)와 밀접한 상관관계를 갖고 있으나 복합 ferrite 전파흡수체의 복소유전율은 GHz 대역에서 거의 일정한 값을 가지므로 [2, 3] ferrite 전파흡수체의 특성은 복소투자율에 크게 영향을 받는다. 따라서 복합 ferrite 전파흡수체의 복소투자율과 전파흡수 특성과의 상관관계를 고찰하는 것이 전파흡수체의 응용 면에서 매우 중요하다.

본 연구에서는 GHz 대역에서 전파흡수능이 우수하고 정합두께가 얇아 많은 응용이 기대되는 복합 Ni_{2-x}Zn_xY (Ba₂Ni_{2-x}Zn_xFe₁₂O₂₂) 전파흡수체의 조성과 ferrite 합성 온도 변화에 따른 전파흡수 특성을 검토하였다. 그리고 ferrite 전파흡수체의 정합주파수 변화를 ferrite 의 고

유 특성인 공명주파수 측면에서 고찰하고자 하였다.

II. 실험방법

본 연구에 사용된 Ni_{2-x}Zn_xY (Ba₂Ni_{2-x}Zn_xFe₁₂O₂₂) 분말은 고상법을 이용하여 제조하였으며 제조 조건은 다음과 같다.

시약급인 BaCO₃, NiO, ZnO, α-Fe₂O₃를 평량한 후 나일론 볼을 이용하여 10시간 습식 혼합하였다. 혼합한 출발 물질을 건조시키고 이를 muffle furnace에서 1300 °C와 1150 °C에서 3시간 공기 중에서 합성한 후 자동 마노유발에서 2시간 분쇄하여 Ni_{2-x}Zn_xY 분말을 제조하였다. 제조한 Ni_{2-x}Zn_xY 분말의 결정상과 입자 크기는 X선 회절 분석과 주사 전자 현미경을 이용하여 확인하였다.

합성된 ferrite 분말을 silicone 고무와 무게비 (ferrite의 무게 /rubber의 무게)를 4로 혼합하여 내경 3 mm, 외경 7 mm의 toroidal mold에 넣고 상온에서 숙성시킨 후 탈형하여 ferrite-고무 복합체를 제조하였다. Ferrite-고무 복합체의 재료정수 (복소투자율, 복소유전율)를 구하기 위하여 HP8720B network analyzer를 이용하여 200 MHz ~ 14 GHz 범위에서의 산란계수인 S-parameter를 측정하였고 측정된 S-parameter에 의하여 재료정수를 계산하였다 [4]. 그리고 재료정수에 의하여 시편의 반사감쇠량 (dB)을 계산하였다.

Ni_{1.5}Zn_{0.5}Y (Ba₂Ni_{1.5}Zn_{0.5}Fe₁₂O₂₂) 소결체의 주파수

변화에 따른 복소투자율을 구하기 위하여 혼합 분말을 성형한 후 ferrite 분말 합성과 동일한 조건인 1300 °C, 3시간 공기 중에서 소결하여 내경 3 mm, 외경 7 mm인 toroid형 소결체를 제조하였다. 제조한 소결체의 복소투자율을 위에서 언급한 방법으로 측정하여 Ni_{1.5}Zn_{0.5}Y-고무 복합체의 특성과 비교하였다.

III. 결과 및 고찰

Fig. 1에 1300 °C에서 합성한 분말로 제조한 Ni_{2-x}Zn_xY-고무 복합체의 주파수 변화에 따른 복소투자율을 나타내었다.

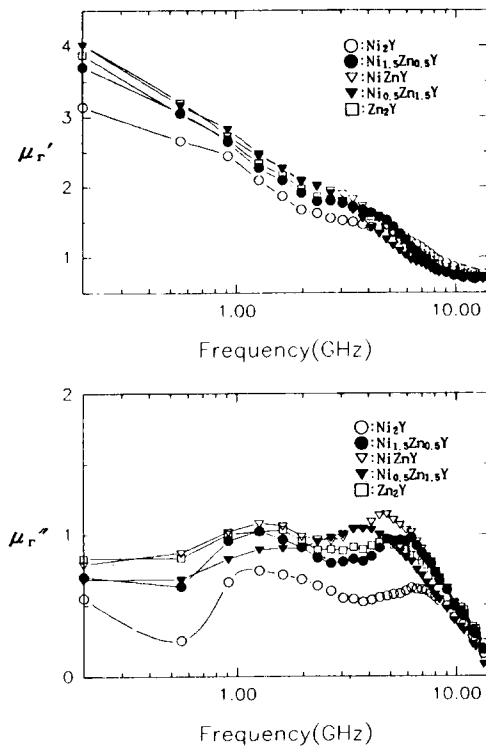


Fig. 1. Frequency dependence of the complex permeability of Ni_{2-x}Zn_xY-rubber composites (Synthesizing temp. = 1300 °C).

일반적으로 ferrite는 공명현상이 발생하면 μ_r' 은 급격히 감소하고 μ_r'' 은 특정 주파수에서 최대값을 갖고 그 이후의 주파수에서는 감소한다[5]. Fig. 1에서 관찰할 수 있듯이 주파수가 증가함에 따라서 Ni_{2-x}Zn_xY-고무 복합체의 μ_r' 은 감소하며, μ_r'' 이 고유 주파수에서 최대값을 갖

고 그 이후의 주파수에서는 감소하는 공명현상을 1 GHz 영역과 5~7 GHz 영역에서 각각 관찰할 수 있다. 이는 본 연구의 측정 주파수 범위에서 Ni_{2-x}Zn_xY-고무 복합체가 2개의 공명현상이 발생하기 때문이라 판단된다. Ni_{2-x}Zn_xY-고무 복합체 시편의 공명현상을 명확하게 관찰하고자 1300 °C에서 소결한 ferrite 소결체를 제조하여 복소투자율의 변화를 고찰하였다. Fig. 2에 대표적으로 Ni_{1.5}Zn_{0.5}Y 소결체와 Ni_{1.5}Zn_{0.5}Y-고무 복합체 시편의 주파수 변화에 따른 복소투자율을 비교하여 나타내었다.

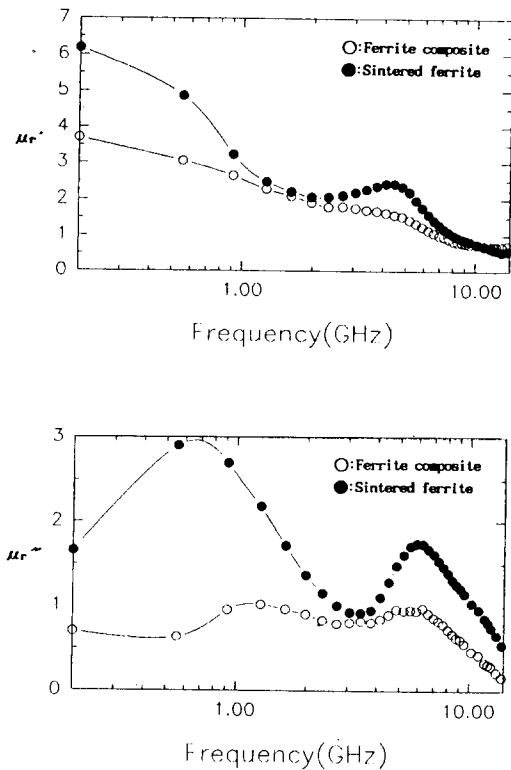


Fig. 2. Frequency dependence of the complex permeability of sintered Ni_{1.5}Zn_{0.5}Y and Ni_{1.5}Zn_{0.5}Y-rubber composite.

Ferrite-고무 복합체의 복소투자율이 ferrite 소결체보다 작음을 알 수 있는데 이는 복합체의 복소투자율이 비자성체인 고무와의 혼합에 기인하여 감소하였다고 생각된다.

일반적으로 고주파 영역에서 ferrite의 자화기구는 자벽이동과 spin의 회전자화가 있다. 다결정체 ferrite의 경우 이와 같은 두가지의 자화 기구에 의해 자벽이동에

의한 자벽공명과 spin 회전에 의한 자연공명이 관찰되어 지며 자연공명은 자벽공명보다 높은 주파수 영역에서 발생한다고 알려져 있다[6]. 따라서 Fig. 1과 Fig. 2에서 나타낸 ferrite 소결체 및 ferrite-고무 복합체에서 관찰되는 2개의 공명(f_r)은 각각 자벽공명(f_{r1}), 자연공명(f_{r2}) 현상이라 판단된다. Fig. 1에 나타낸 Ni_{2-x}Zn_xY-고무 복합체의 공명현상을 고찰하면 Zn 함량에 따른 자벽공명 주파수(f_{r1})의 큰 변화는 관찰되지 않으나 자연공명 주파수(f_{r2})는 Ni₂Y인 경우 6.4 GHz, NiZnY인 경우 4.8 GHz, 그리고 Zn₂Y인 경우 3.0 GHz로 Zn 함량이 증가함에 따라 저주파 대역으로 이동함을 알 수 있다. Ni_{2-x}Zn_xY-고무 복합체의 투자율 허수항은 Zn 함량이 증가함에 따라서 점차 증가하는 경향을 보이고 있으며 실수항은 큰 변화없이 일정한 값을 나타내었는데 이러한 현상은 Zn 함량에 비례하여 자연공명 주파수가 감소하기 때문이다. 한편 Ni_{2-x}Zn_xY-고무 복합체의 복소유전율은 실수항인 경우 7~8, 그리고 허수항은 0.1~1의 값을 갖음을 확인하였다.

일반적으로 spin 회전에 의한 자연공명과 이방성 자장과는 다음과 같은 관계가 있다[5].

$$2\pi \cdot f_{res} = \gamma \sqrt{H_{\phi}^A \cdot H_{\theta}^A} \quad (1)$$

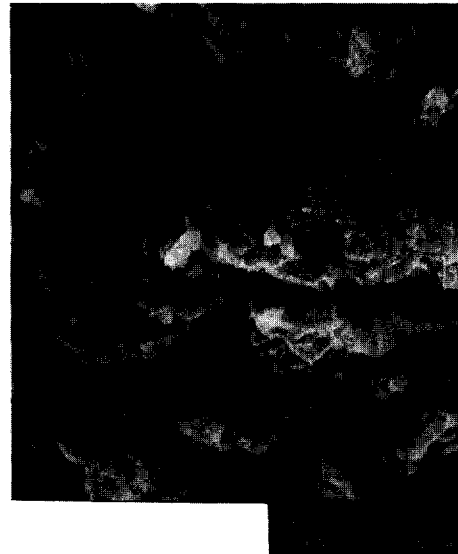
여기서 f_{res} 는 spin 회전에 의한 공명주파수, γ 는 gyro-factor, H_{ϕ}^A 는 축방향 이방성 자장, H_{θ}^A 는 면방향 이방성 자장이다. 식(1)에서 알 수 있듯이 자연공명 주파수는 축방향과 면방향 이방성 자장에 크게 의존함을 알 수 있다. Y형 ferrite는 c면이 자화 용이면이므로 면내에서는 결정자기 이방성이 매우 작고, c축 방향으로서는 자화가 힘들기 때문에 큰 자기 이방성 값을 가져 Y형 ferrite의 결정자기 이방성의 대부분은 축방향의 자기 이방성에 기인한다[8]. Smit와 Wijn 등[9]은 상온에서 Ni₂Y의 축방향 이방성 자장을 14,000 Oe, Zn₂Y는 9,000 Oe로 보고하였다. 즉 Zn₂Y가 Ni₂Y보다 이방성 자장이 작음을 알 수 있는데 이러한 경향은 ferrite 분말-고무 복합체에도 적용될 것이라 생각된다. 따라서 Fig. 1에 나타낸 ferrite-고무 복합체에 사용된 ferrite 조성에서 Zn 함량이 증가함에 따라 자연공명 주파수가 감소하는 원인은 축방향 이방성 자장이 감소하기 때문이라 판단된다.

Ni_{2-x}Zn_xY-고무 복합체의 복소투자율에 미치는 입자 크기의 영향을 고찰하고자 Ni_{2-x}Zn_xY 분말의 합성 온도를 변화시켰다. 합성은 1300 °C와 1150 °C에서 행하였고 합성 후 X선 회절 분석을 행하여 Y형 단일상임을 확인하였다. 대표적으로 합성 온도 변화에 따른 Ni_{1.5}Zn_{0.5}Y 분

말의 주사 전자 현미경 사진을 Fig. 3에 나타내었다.



(a) 1150°C



(b) 1300°C

Fig. 3. SEM photographs of Ni_{1.5}Zn_{0.5}Y powders with different synthesizing temperatures.

주사 전자 현미경 관찰로부터 1300 °C에서 합성한 분말의 입자 크기는 약 4~5 μm이며 1150 °C에서 합성한 분말의 입자는 1 μm 이하임을 알 수 있었다. 이와 같이 상이한 입자 크기를 갖는 Ni_{1.5}Zn_{0.5}Y 분말과 고무를 혼합하여 제조한 복합체의 복소투자율을 Fig. 4에 나타내었다.

뒷면에 금속판을 붙인 1층형 전파흡수체의 정합조건식 [1, 2]은 다음과 같다.

$$Z = 1 = \frac{\sqrt{\mu_r / \epsilon_r} \tanh [j(2\pi / C) \sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r} f \cdot d]}{\dots} \quad (2)$$

여기서 Z 는 규격화 입력 임피던스, μ_r 는 복소투자율($\mu_r' - j\mu_r''$), ϵ_r 은 복소유전율($\epsilon_r' - j\epsilon_r''$), C 는 공기 중의 광속, f 는 주파수 그리고 d 는 흡수체의 두께이다. 식 (2)의 풀이는 유전 손실을 고려한 복소유전율항과 $f \cdot d$ 항을 일정한 값으로 고정시킨 후 Z 가 1일 때의 복소투자율을 계산한다. 일련의 유전율 항과 $f \cdot d$ 항에 대하여 Z 가 1을 만족할 때의 복소투자율 값을 계산하여 그림으로 나타낸 것이 정합조건 map이다. 이와 같은 정합조건 map을 이용하면 1층형 전파흡수체의 정합조건 일치 여부와 정합이 일어날 때의 정합주파수 및 정합두께를 정량적으로 예측이 가능하여 ferrite 전파흡수체의 설계 방안으로 활용이 가능하다 [10, 11].

1300 °C에서 합성한 분말로 제조한 $Ni_{2-x}Zn_xY$ -고무 복합체 시편의 복소투자율을 정합조건 map에 적용시킨 결과를 Fig. 5에 나타내었다. $Ni_{2-x}Zn_xY$ -고무 복합체의 유전 손실항($\tan\delta_e$)은 Ni_2Y 인 경우 0.02, $NiZnY$ 인 경우 0.05, 그리고 Zn_2Y 인 경우에는 0.1 정도이어서 해당하는 유전율 손실항을 고려한 정합조건 map을 작성하고 이를 이용하였다.

Ferrite 전파흡수체의 정합현상은 정합조건 map 상에서 유전율 실수항을 나타낸 선과 복소투자율의 궤적이 교차하는 점에서 발생하게되며 교차하는 점에서의 $f \cdot d$ 항으로 부터 정합두께와 정합주파수를 예측할 수 있다.

정합조건 map 상에서의 복소투자율 궤적을 살펴보면, ferrite의 조성이 Ni_2Y 일 때 유전율 실수항(ϵ_r')이 7인 선과 복소투자율 궤적이 교차하는 점이 1개 그리고 그 이외의 조성에서는 2개가 존재함을 알 수 있어 정합현상은 1개 또는 2개가 발생하게 된다. 복소투자율의 거동을 보면 Zn 함량이 증가함에 따라서 투자율 허수항의 변화가 크고 투자율 실수항은 변화가 작아 정합조건 map 상에서 y축(μ_r'') 방향으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 따라서 $Ni_{2-x}Zn_xY$ -고무 복합체의 제 1정합현상이 발생하는 $f \cdot d$ 항이 Zn 함량이 증가함에 따라서 28 GHz mm에서 18 GHz mm으로 점차 감소하기 때문에 제 1정합주파수가 감소하며, 제 2정합현상이 발생하는 $f \cdot d$ 항이 32 ~ 33 GHz mm로 일정한 값을 갖기때문에 제 2정합주파수는 큰 변화가 없으리라 예상된다.

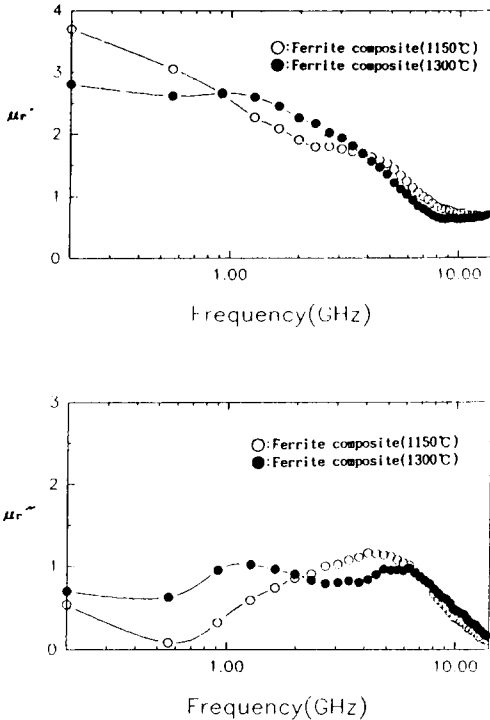
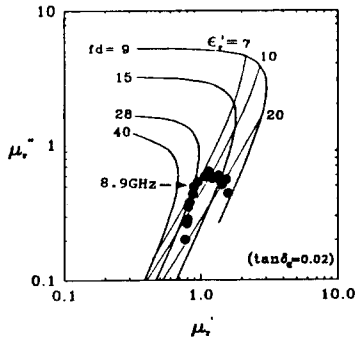


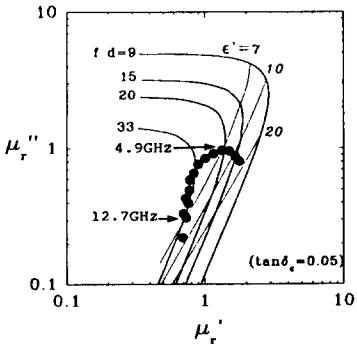
Fig. 4. Frequency dependence of the complex permeability of $Ni_{1.5}Zn_{0.5}Y$ -rubber composites with different synthesizing temperatures.

1300 °C에서 합성한 분말로 제조된 복합체는 자벽공명과 자연공명이 관찰되나 1150 °C에서 합성한 분말로 제조된 복합체 시편은 자연공명만이 관찰됨을 확인하였다. Rado [7]는 ferrite 소결체와 0.5 μm 정도의 입자 크기를 갖는 ferrite 분말과 wax를 혼합하여 제조한 복합체의 복소투자율을 비교한 결과 ferrite 소결체에서는 자벽공명과 자연공명이 발생하고 ferrite-wax 복합체에서는 저주파에서 발생하는 자벽공명 현상이 소멸되고 자연공명만이 관찰된다고 보고하였다. 따라서 Fig. 4와 같은 결과는 1150 °C에서 합성한 $Ni_{1.5}Zn_{0.5}Y$ 분말의 입자 크기가 작아서 자벽공명 현상이 소멸되었기 때문이라 판단된다.

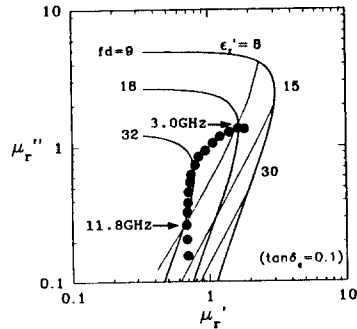
Ferrite 분말의 열처리 온도와 조성을 달리한 $Ni_{1-x}Zn_xY$ -고무 복합체의 전파흡수 특성을 고찰하기 위하여 impedance 정합조건 map (impedance matching solution map)을 작성하고 복소투자율을 적용시켜 그 결과를 고찰하였다.



(a) Ni₂Y-rubber composite



(b) NiZnY-rubber composite



(c) Zn₂Y-rubber composite

Fig. 5. The complex permeability locus of Ni_{2-x}Zn_xY-rubber composite on the impedance matching solution map.

1층형 전파흡수체의 반사감쇠량(dB)은 다음의 식(3)에 의하여 계산이 가능하다[12].

$$\text{Reflection loss(dB)} = 20 \log \left| \frac{Z-1}{Z+1} \right| \quad (3)$$

식(3)에서 Z는 식(2)로 정의되는 규격화 입력 임피던스이다. 주파수 변화에 따른 ferrite-고무 복합체의 규격화 입력 임피던스를 식(2)에 의하여 구하고 식(3)에 의하여 주파수 변화에 따른 반사감쇠량(dB)을 계산하였다. 그리고 정합주파수(f_m)는 30 dB 이상의 반사감쇠량을 보이는 주파수로 선정하였다. 위와 같이 계산한 Ni_{2-x}Zn_xY-고무 복합체의 전파흡수 특성 결과와 공명주파수를 Table I과 Table II에 나타내었다. Table I과 Table II는 ferrite의 합성 온도를 각각 1150 °C와 1300 °C로 한 경우이며, f_{r1} 와 f_{r2} 는 각각 자벽공명 주파수와 자연공명 주파수를, f_{m1} 과 f_{m2} 는 각각 제 1정합주파수와 제 2정합주파수를, 그리고 d_{m1} 과 d_{m2} 는 각각 제 1정합두께와 제 2정합두께를 의미한다.

Table I. The resonance frequency and the microwave absorbing characteristics of Ni_{2-x}Zn_xY-rubber composites (Synthesizing temperature of ferrite = 1150 °C)

Composition	Resonance Freq. (GHz)		Matching Freq. (GHz)		Matching Thickness. (mm)	
	f_{r1}	f_{r2}	f_{m1}	f_{m2}	d_{m1}	d_{m2}
Ni ₂ Y	...	5.0	5.9	8.8	4.0	3.3
Ni _{0.5} Zn _{1.5} Y	...	4.1	4.7	11.1	4.1	3.0
NiZnY	...	4.1	4.5	12.1	4.1	2.8
Ni _{0.5} Zn _{1.5} Y	...	3.9	4.3	12.2	4.3	2.8
Zn ₂ Y	...	3.0	3.6	10.9	4.9	3.1

Table II. The resonance frequency and the microwave absorbing characteristics of Ni_{2-x}Zn_xY-rubber composites (Synthesizing temperature of ferrite = 1300 °C)

Composition	Resonance Freq. (GHz)		Matching Freq. (GHz)		Matching Thickness. (mm)	
	f_{r1}	f_{r2}	f_{m1}	f_{m2}	d_{m1}	d_{m2}
Ni ₂ Y	1.2	6.4	8.9	...	3.1	...
Ni _{0.5} Zn _{1.5} Y	1.2	5.0	5.6	12.2	3.7	2.6
NiZnY	1.2	4.8	4.9	12.7	4.0	2.6
Ni _{0.5} Zn _{1.5} Y	1.2	4.8	4.9	13.5	4.2	2.4
Zn ₂ Y	1.2	3.0	3.0	11.8	5.9	2.7

Table I과 Table II를 고찰하면 Zn 함량이 증가함

에 따라서 제 1정합주파수가 점차감소하고 있으며 제 2정합주파수는 Zn 함량에 관계없이 거의 일정한 값을 갖음을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 1과 Fig. 5의 결과와 같이 $Ni_{2-x}Zn_xY$ -고무 복합체의 제 1정합주파수가 존재하는 3~9 GHz 범위에서 Zn 함량에 비례하여 투자율 허수항이 증가하기 때문에 정합조건 map 상에서 정합현상이 낮은 $f \cdot d$ 항에서 발생하며, 9 GHz 이상에서는 투자율 실수항과 허수항 모두 큰 변화없이 일정한 값을 갖기때문에 제 2정합주파수가 일정한 값을 갖는다고 판단된다.

복합 $Ni_{2-x}Zn_xY$ 전파흡수체의 공명현상과 정합현상과의 관계를 보면 자연공명 주파수 (f_{r2})와 제 1정합주파수 (f_{m1})가 비례적으로 감소함을 알 수 있으며, Table I의 결과로부터 자벽공명 (f_{r1})이 관찰되지 않는 복합 ferrite 시편에서 f_{m1} 과 f_{m2} , 2개의 정합현상을 관찰할 수 있다. 즉 ferrite 전파흡수체의 정합현상은 자연공명 현상 이후에 존재함을 확인할 수 있었다. 이러한 경향이 Y형 fer-

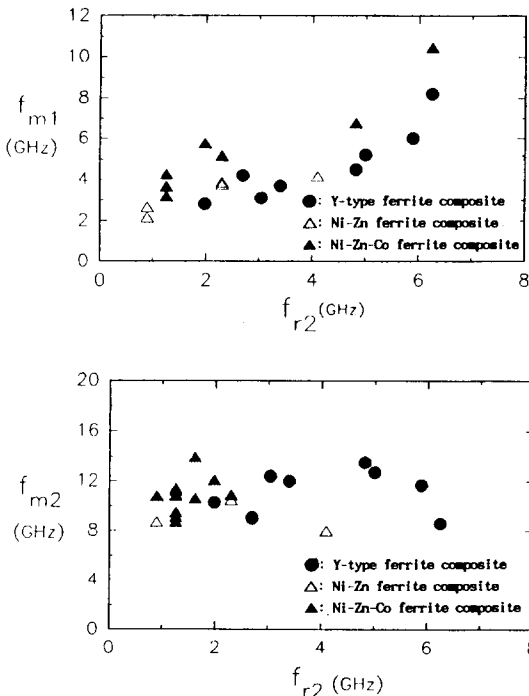


Fig. 6. The relationship between the spin rotational resonance frequency (f_{r2}) and the 1st and 2nd matching frequencies (f_{m1} and f_{m2}) of ferrite-rubber composites microwave absorber.

rite 이외의 다른 ferrite 조성에서도 적용되는지 조사하

기 위하여 복합 Ni-Zn ferrite, 복합 Ni-Zn-Co ferrite 전파흡수체의 f_{r2} 와 f_{m1} , f_{m2} 의 상관관계를 Fig. 6에 나타내었다. 이때 사용한 ferrite 분말은 1300 °C에서 합성하였고 복합체의 제조 조건은 $Ni_{2-x}Zn_xY$ -고무 복합체의 제조 조건과 동일하게 하였다.

Fig. 6을 고찰하면 복합 ferrite 전파흡수체의 제 1정합주파수 (f_{m1})와 자연공명 주파수 (f_{r2})는 비례관계에 있음을 확인할 수 있다. 반면에 제 2정합 주파수 (f_{m2})는 자연공명 현상 이후에 발생하지만 자연공명 주파수에 비례하지 않음을 알 수 있다.

Naito 등[2]에 의한 ferrite-고무 복합체의 전파흡수 특성과 자기적 특성과의 관계를 연구한 결과에 의하면 복합체의 제 1정합주파수는 ferrite의 초기투자율과 반비례의 관계에 있으며 제 2정합주파수는 비례 관계에 있음을 보고하였다. Ferrite의 공명주파수는 초기 투자율과 반비례의 관계에 있기 때문에 Fig. 6과 같이 공명주파수와 제 1정합주파수가 비례하는 결과를 얻었다고 판단된다. 그러나 제 2정합주파수는 자연공명 현상 이후에 존재하지만 비례하지 않음을 확인하였다.

Table I 과 Table II 그리고 Fig. 6의 결과로부터 복합 ferrite 전파흡수체의 전파흡수 현상은 자벽공명이 아닌 자연공명 현상 이후에 존재하며, 제 1정합주파수 (f_{m1})는 자연공명 주파수와 비례함을 확인하였다.

IV. 결 론

$Ni_{2-x}Zn_xY$ -고무 복합체에 사용된 ferrite 분말의 조성 변화와 입자 크기 변화에 따른 복소투자율이 전파흡수 특성에 미치는 영향을 검토하고 ferrite 전파흡수체의 정합 주파수 변화를 공명주파수 측면에서 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. $Ni_{2-x}Zn_xY$ -고무 복합체에 사용된 ferrite 분말이 1 μm 이하인 경우에는 자벽공명현상이 소멸되고 자연 공명 현상만이 관찰되었다.
2. $Ni_{2-x}Zn_xY$ -고무 복합체는 Zn 함량이 증가함에 따라 자연공명 주파수와 제 1정합주파수는 저주파 대역으로 이동하였다.
3. 복합 ferrite 전파흡수체의 제 1정합주파수는 자연공명 주파수에 비례하며 제 2정합주파수는 자연공명 현상 이후에 존재하지만 비례하지 않음을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] 内藤喜之, "電波吸收體," オ-ム社 (1987) pp. 77-116.

- [2] Y. Naito and K. Suetake, IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., **19**(1), 65-72 (1971).
- [3] 신재영, 오재희, 한국자기학회지, **1**(2), 49-54 (1991).
- [4] W. B. Weir, Proc. IEEE, **62**(1), 33-36 (1974).
- [5] J. Smit and H. P. J. Wijn, "Ferrites," Philips's Tech. Lib. (1959) pp. 68-300.
- [6] G. T. Rado, R. W. Wright, and W. H. Emerson, Phys. Rev., **80**(2), 273-280 (1950).
- [7] G. T. Rado, Rev. Mod. Phys., **25**(1), 81-89 (1953).
- [8] G. T. Jonker, H. P. J. Wijn, and P. B. Braun, Philips Tech. Rev., **18**(6), 145-180 (1956).
- [9] J. Smit and H. P. J. Wijn, "Ferrites," Philips's Tech. Lib. (1959) pp. 205-211.
- [10] H. M. Musal, Jr. and H. T. Hahn, IEEE Trans. Mag., **25**(5), 3851-3853 (1989).
- [11] S. S. Kim, S. B. Jo, K. I. Gueon, K. K. Choi, J. M. Kim, and K. S. Churn, IEEE Trans. Mag., **27**(6), 5462-5464 (1991).
- [12] 乾哲司, "電波吸收體", エレクトロニクセラミクス, 冬號, 18-24 (1985).

The Complex Permeability and Microwave Absorbing Characteristics of $Ni_{2-x}Zn_xY$ -Rubber Composites

J. Y. Shin and J. H. OH

*Department of Ceramic Engineering, Inha University,
253 Yonghyun-Dong, Nam-Gu, Incheon*

H. J. Kwon

*R&D Laboratory, Samwha Electronics Company, Ltd.,
211-1 Jangji-Ri, Dongtan-Myun, Hwasung-Gun, Kyungki-Do*

(Received 16 January 1995, in final form 20 February 1995)

The microwave absorbing characteristics and complex permeability of $Ni_{2-x}Zn_xY$ -rubber composites with variation of composition and particle size were investigated. With a ferrite particle with a diameter of about $1 \mu m$, only spin rotational resonance was observed. This behavior probably due to the particle being sufficiently small to approach single domain characteristics so that only spin rotations can occur. The first matching frequency, found in $Ni_{2-x}Zn_xY$ -rubber composites, which was higher than that of spin rotational resonance, increased with spin rotational resonance frequency. It is also found that the second matching frequency is independent of spin rotational resonance frequency. Based on these findings, it could be concluded that the microwave absorbing characteristics were caused by only one type of resonance, the spin rotational resonance.