

NiCuZn 페라이트의 전자파 흡수특성

박찬규 · 김기태 · 장상목 · 이상록[†]

동아대학교 공과대학 화학공학과
(2009년 5월 11일 접수, 2009년 7월 1일 채택)

Electromagnetic Wave Absorption Properties of NiCuZn Ferrite

Chan-Kyu Park, Ki-Tae Kim, Sang-Mok Chang, and Sang-Rok Lee[†]

Department of Chemical Engineering, Dong-A University, Pusan 604-714, Korea
(Received May 11, 2009; accepted July 1, 2009)

전자파 흡수용 재료로서 NiCuZn 페라이트의 제조조건 중 구성성분비, 소결온도, 평균입자 크기에 대하여 자기적 특성을 검토하였다. 전자파 흡수용 재료로서의 NiCuZn 페라이트가 가장 넓은 주파수 대역에 적용될 수 있는 화학적 조성비는 Fe₂O₃ 49.0 mol%, NiO 9.0 mol%, CuO 8.0 mol%, ZnO 34.0 mol%이다. 이 화학조성에서 배합한 원료를 900 °C에서 하소하여 제조한 페라이트를 성형하여 1080 °C에서 소결시킨 페라이트 상태를 관찰한 결과 결정립 5~10 μm로서 최적의 상태를 보였다. 평균입자크기가 1.12 μm의 경우 가장 우수한 손실탄젠트 및 전자파 흡수특성을 나타내었다.

NiCuZn Ferrites, known as preventing EMI/EMC, were prepared and their properties were investigated based on the chemical composition ratio, sintering temperature, and mean particle size. The NiCuZn ferrite made of Fe₂O₃ 49.0 mol%, NiO 9.0 mol%, CuO 8.0 mol%, ZnO 34.0 mol% could be applied at the largest range of electromagnetic wave. The optimal calcination and sintering temperature were 900 °C and 1080 °C, respectively. The electromagnetic wave loss capacity of its mean particle size 1.12 μm was superior to others examined.

Keywords: NiCuZn ferrite, EMI/EMC, sintering temperature, calcination, electromagnetic wave

1. 서 론

현대사회는 급격한 정보통신기술의 발달을 이룩하였다. 다양한 전자통신기술이 발달하면서 현대인은 매우 편리한 생활을 누리고 있지만 과거에 예상하지 못하였던 새로운 문제점들에 직면하고 있다. 전자기기 사용이 증가함에 따라 전자기기에서 발생하는 전자파로 인하여 각종 전자파의 폐해가 발생하고 있다[1,2]. 인체가 전자파에 장시간 노출되면 인체에 악영향을 주어 체온 변화와 생체리듬이 깨어져 질병으로 발전될 가능성이 클 뿐 아니라, 기기상호간에 전자파 간섭에 의한 오동작 등의 사고 위험성도 대두되고 있다. 이와 같이 심화되고 있는 전자파장해(EMI ; Electromagnetic Interference) 및 전자파양립성(EMC ; Electromagnetic Compatibility)에 대한 대책이 사회적으로 큰 관심을 끌고 있으며, 전자파장해 및 전자파양립성에 대한 방지대책으로서 전자파흡수(Electro-magnetic Absorption) 또는 전자파차폐(Electromagnetic Shielding)에 대한 기술 개발과 함께 관련법규에 대한 개정도 뒤따르고 있다[3,4].

유해전자파의 차폐를 위해서는 우선 전자파흡수 재료의 개발이 가장 시급하다. 전자파흡수 재료는 전자파를 흡수하여 전파에너지를 열에너지로 변환하는 재료를 이용하여 불필요한 전자파를 흡수하여 반

사파가 생기지 않도록 하는 재료이다. 전자파흡수 재료는 크게 나누어 도전손실형 재료, 유전손실형 재료, 그리고 자성손실형 재료로 나눌 수 있다[5,6]. 이 가운데 자성손실형 전자파흡수 재료는 일반적으로 산화물 자성재료인 페라이트가 널리 사용되고 있다[7-9].

페라이트는 실온에서 자발자화(spontaneous magnetization)를 나타내는 강자성체적 특성 및 비교적 큰 전기저항에 사용하는 고주파용 자성재료로서 산업상의 중요성을 지니고 있다. 페라이트는 일반적으로 스피넬 구조를 갖는 이온화합물로서 산화철을 주성분으로 하여 다양한 금속화합물과의 결합으로 형성된다. M·Fe₂O₄의 조성식으로 나타내며, 대표적인 금속화합물(M)로는 Mn, Zn, Mg, Cu, Ni, Co 등 2가 금속이온이 단독 또는 복합 형태로 사용된다.

이와 같은 스피넬 구조의 페라이트를 전자파 흡수소재로서 사용하기 위하여 전자파 흡수특성을 제어하는 방법으로 우선 2가 금속이온의 종류와 사용량의 조절을 들 수 있다. 그리고 2차 금속을 복합형으로 사용하는 경우, 화학적 조성을 조절함으로써 전자파 흡수특성을 제어하는 것이 가능하다[10].

NiZn계 페라이트는 비교적 높은 투자율 및 전기비저항을 가지며 대기 중에서 소결할 수 있는 장점을 가진 전자파흡수 재료이다. 또한 NiCuZn계 페라이트는 소결조제로서 Cu가 첨가되어 NiZn계 페라이트에 비해 낮은 온도에서 소결이 가능하며 고주파대역에서 우수한 자기적 특성을 갖는다[11]. 이러한 관점에서 NiCuZn계 페라이트에 대한 연구가 활발하게 진행되어왔다[12-14].

[†] 교신저자 (e-mail: srlee@dau.ac.kr)

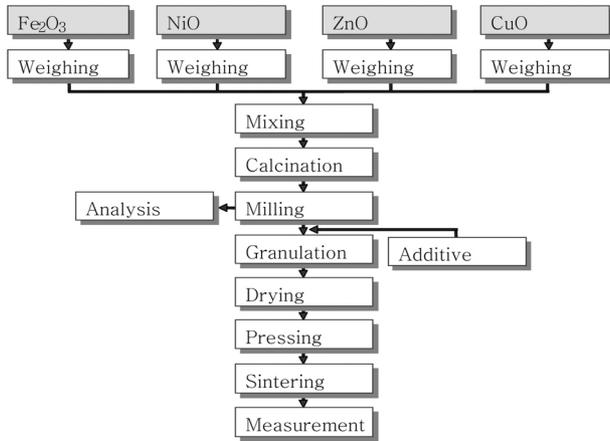


Figure 1. Procedure of preparation for the NiCuZn ferrite.

페라이트의 자기적 특성을 나타내는 인자로서 초기투자율이 있다. 초기투자율은 자기이방성 상수, 자왜상수, 내부응력 및 미세조직 등의 인자에 의하여 제어되며 이들 인자는 페라이트의 조성에 의하여 크게 영향을 받는다. 특히 Ni의 함량은 자왜상수에 영향을 주어 초기투자율을 변화시킨다. 그러므로 화학적 조성을 변화시킴으로써 초기투자율을 조절하고 전자과 흡수특성을 제어할 수 있다[15].

자성재료의 전자과 손실은 재료에 작용하는 자장 및 주파수에 의하여 결정되며 페라이트 내부의 공극 및 결정립의 형태에 따라 자기적 특성이 결정될 수 있다. 소결체 결정 내의 공극은 소결밀도를 저하시키고 입계 간의 자벽이동이나 자화회전을 방해하는 반자계 효과(demagnetic effect)를 유발하여 투자율 저하의 원인이 된다. 입자가 규칙적으로 성장하여 공극의 발생을 최소화함으로써 향상된 투자율을 얻을 수 있다. 즉 소결체의 미세구조를 규칙적으로 만들기 위하여 페라이트 분말의 입자상태를 제어할 필요가 있다. 따라서 소결조건을 제어하여 소결체의 소결상태를 개선함으로써 전자과 흡수능의 향상이 가능하다.

본 연구에서는 대표적인 전자과흡수 재료로서 비교적 높은 투자율 및 전기비저항을 가지고, 1000 °C 부근의 비교적 낮은 온도의 대기 분위기 하에서 소결이 가능한 NiCuZn계 페라이트를 사용하여 페라이트의 전자적 특성을 제어하여 자기적 손실이 큰 재료를 개발함을 목적으로 페라이트의 조성 변화, 입자크기 변화, 그리고 소결 온도 변화에 따른 페라이트의 미세조직 및 전자적 특성 변화를 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1. NiCuZn 페라이트 제조

NiCuZn 페라이트의 제조과정 및 실험과정을 Figure 1에 나타내었다. 페라이트를 구성하는 분말상의 원료 Fe₂O₃, NiO, CuO, ZnO의 화학적 조성비는 자성체 핸드북을 참고하여 Table 1과 같이 배합하여 진동밀을 사용하여 30 min 동안 고속 혼합하였다. 혼합된 시료를 900 °C에서 90 min 동안 하소하고 자연 냉각하였다. 하소분말과 직경 8 mm의 쇠볼을 1:5의 무게비로 혼합하고 진동밀로서 20 min 간 고속 건식 분쇄하여 평균입자크기 1.1~1.2 μm의 페라이트를 생성하였다.

하소 분말을 고속 건식 분쇄하여 제조된 페라이트 분말에 5 wt%의 PVA 수용액을 첨가제로 첨가하여 과립화한 다음 건조하였다. 건조한 분말은 프레싱하여 시편을 제작한 후 소결하여 분석하였다.

본 실험에서는 분말상의 원료 Fe₂O₃, NiO, CuO, ZnO 가운데 Ni 함

Table 1. Condition of Preparation for the NiCuZn Ferrite

Sample No.	Composition [mol%]				Calcination temperature [°C]	Milling time [min.]	Mean particle size [μm]
	Fe ₂ O ₃	NiO	CuO	ZnO			
1	49.0	8.0	9.0	34.0	900	20	1.13
2	49.0	8.5	8.5	34.0			1.17
3	49.0	9.0	8.0	34.0			1.16
4	49.0	9.5	7.5	34.0			1.17
5	49.0	10.0	7.0	34.0			1.15

량은 자왜상수에 영향을 주어 초기투자율을 변화시키므로 전자과 흡수 특성을 제어할 수 있고[15], 소결조건으로서 Cu가 첨가된 NiCuZn계 페라이트의 경우 NiZn계 페라이트에 비하여 낮은 온도에서 소결 가능하며, 고주파 대역에서 우수한 자기 특성을 가지므로[11] NiO와 CuO 조성 영향을 중점적으로 살펴보았다. 그리고 고속 건식 분쇄시간의 영향을 살펴보기 위하여, Fe₂O₃ 49.0 mol%, NiO 9.0 mol%, CuO 8.0 mol%, ZnO 34.0 mol%의 하소분말을 2 min, 10 min, 30 min, 90 min 간 분쇄하여 평균입자크기와 밀도를 측정하여 비교하였다. 입자 크기 측정은 입도분포 측정 장치 LS-230 (Beckman Coulter, U.S.A)를 사용하여 측정하였다.

2.2. NiCuZn 페라이트의 전자적 특성 측정

제조한 페라이트 분말을 5 wt%의 PVA 수용액을 첨가하여 과립화한 후, 제작한 금형을 사용하여 1.5 tons/cm²의 성형압에 의해 톨로이드형 시편을 제작하였다. 성형한 시편을 1060, 1080, 1100, 1120 °C의 온도를 변화시켜 소결하였다. 주어진 최종온도에서 150 min 간 유지하는 소결온도 스케줄에 따라 소결하였다. 완성된 톨로이드형 시편의 규격은 외경 7.0 mm, 내경 3.0 mm, 높이 5.0 mm이다. X-선 회절분석(Rigaku D/MAX2000)하여 스피넬 구조를 관찰함으로써 제조한 분말의 페라이트화를 확인하였다. 주사전자현미경(JEOL JSM-5410)으로 성형체의 미세구조를 분석하여 소결상태를 확인하였다. 네트워크 분석기(Hewlett Packard 8753D)로 제작한 톨로이드형 시편의 재료정수를 측정하여 페라이트의 전자적 특성을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 결정구조

제조한 분말을 900 °C의 온도에서 하소하기 전과 하소한 후를 X-선 회절분석하여 결정구조를 확인하였다. 이 결과 명확한 스피넬 구조를 확인함으로써 페라이트화가 진행되었음을 확인하였다. 이와 같은 결과를 Figure 2에 나타내었다. 일반적으로 NiCuZn 페라이트는 500~750 °C에서 ZnO, NiO, CuO + Fe₂O₃의 고상반응이 시작되어 스피넬 구조를 가지는 (Zn, Ni, Cu)Fe₂O₄의 결정상이 형성되기 시작한다. Figure 2(a)의 하소 전 원료혼합물의 결정구조가 900 °C에서 하소한 후에는 Figure 2(b)와 같이 스피넬 단일 구조로 변화됨을 보여 (Zn, Ni, Cu)Fe₂O₄의 형태로 고용화 된 것을 확인하였다. 또한 900 °C에서 하소한 분말은 스피넬 결정상이 잘 형성되어 있을 뿐만 아니라 성형 밀도가 높으며 성형작업성이 양호한 0.9~1.2 μm의 평균입자크기로 비교적 쉽게 조절이 가능하였다.

3.2. NiCuZn 페라이트의 미세구조

Fe₂O₃ 49.0 mol%, NiO 9.0 mol%, CuO 8.0 mol%, ZnO 34.0 mol%

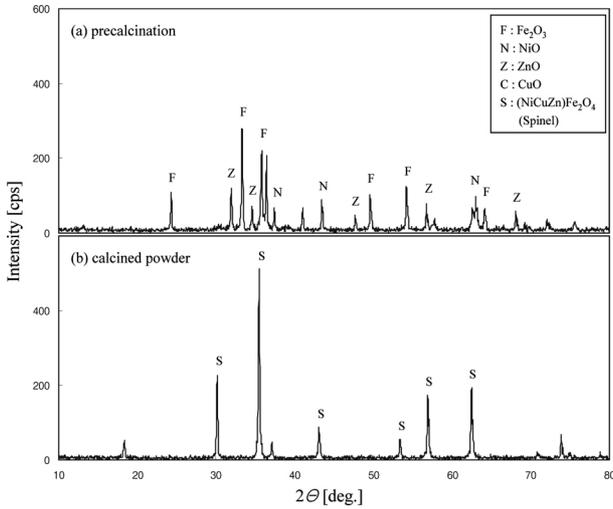


Figure 2. X-ray diffraction patterns of NiCuZn ferrite.

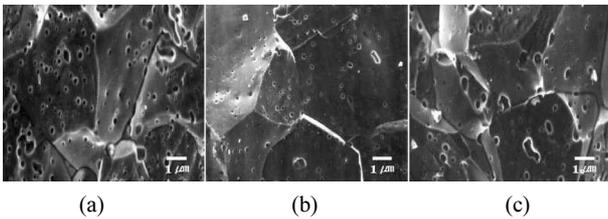


Figure 3. SEM images of NiCuZn ferrites according to mean particle size. ; (a) 1.27 μm, (b) 1.12 μm, (c) 0.77 μm.

의 하소분말을 10 min, 30 min, 90 min 간 고속 건식 분쇄하여 제조한 NiCuZn 페라이트의 미세구조를 확인하기 위하여 주사전자현미경 분석을 하여 Figure 3에 나타내었다. 10 min, 30 min, 90 min 간 고속 건식 분쇄한 분말의 평균입자크기는 각각 1.27 μm, 1.12 μm, 0.77 μm 이었다. 소결체의 미세구조는 전자파 흡수성을 평가하는 항목인 투자율, 유전율 등에 큰 영향을 미친다. 표면의 입자분포 상태가 조밀하여 기공의 발생을 최소화함으로써 반자계 효과를 최소화할 수 있고 향상된 투자율을 얻을 수 있다. 일반적으로 결정립의 크기가 증가함에 따라 투자율은 증가하다가 약 10 μm 이상이 되면 결정립 내의 기공의 발생에 의하여 투자율이 감소하는 것으로 보고되었다[16,17]. 결정립의 크기는 배합한 원료를 900 °C에서 하소하여 제조한 페라이트를 성형, 1080 °C에서 소결한 시편의 소결상태를 관찰한 결과 5~10 μm로 측정되었다. Figure 3(a), (b), (c)를 비교하여 보면, 분말의 평균입자크기는 1.12 μm인 Figure 3(b)가 분말의 평균입자크기가 1.27 μm인 Figure 3(a)와 0.77 μm인 Figure 3(c)에 비하여 기공의 크기가 작고, 기공 수도 적음을 알 수 있다. 따라서 페라이트를 제조할 때 우수한 자기특성을 나타내는 최적의 분말 입자크기가 존재한다는 사실을 알 수 있다.

3.3. 재료정수의 주파수 의존특성

소결한 톨로이드형 시편을 사용하여 네트워크 분석기로부터 복소 투자율을 측정하였다. 복소투자율은 실수부 및 허수부로 나누어 나타낼 수 있는데 일반적으로 허수부 항이 전자파의 손실특성을 결정하게 된다. Figure 4 및 Figure 5는 0.1 MHz에서 10 GHz의 주파수 범위에서 주파수에 따른 복소투자율의 실수부(μ') 및 허수부(μ'')를 각각 나타낸 것이다. 이 결과로부터 NiO의 구성성분비가 8.5~9.0 mol%의 범

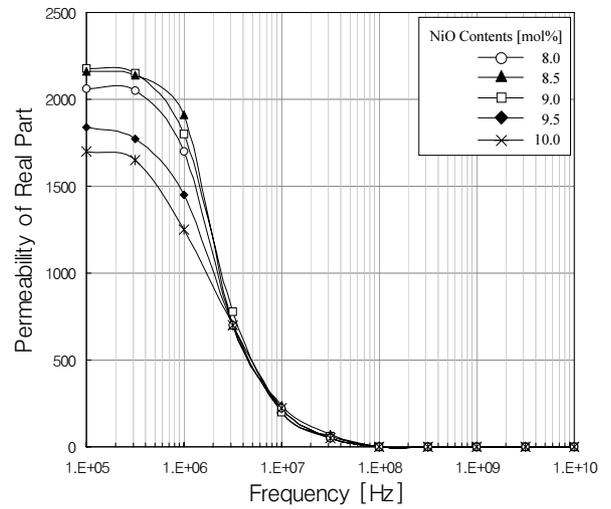


Figure 4. Permeability of real part by the NiO Content.

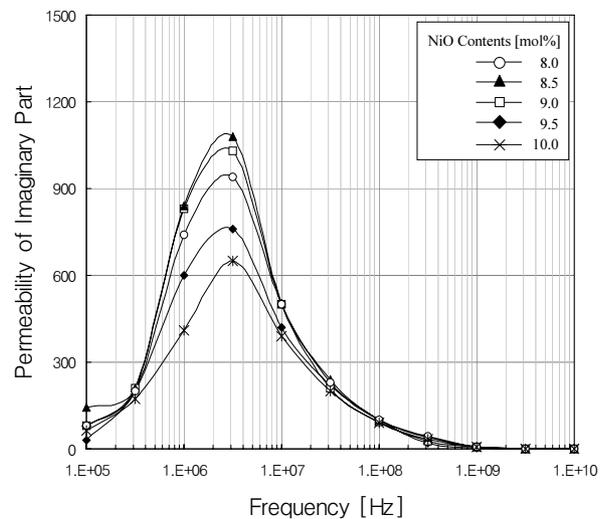


Figure 5. Permeability of imaginary part by the NiO Content.

위에서 초기투자율 및 허수부의 값이 큰 것으로 나타났고 허수부의 값이 실수부보다 큰 주파수대역이 넓게 측정되었다. 스피넬 구조를 가지는 페라이트는 초기투자율이 커질 경우 공진 주파수가 낮은 쪽으로 이동하게 됨으로써 낮은 주파수대역에서 주파수 분산이 일어나기 시작하여 보다 넓은 대역에서의 전자파 흡수가 가능함을 알 수 있다[18].

그리고 투자율의 허수부가 최대가 되는 주파수는 실수부의 크기에 관계없이 약 2 MHz에서 최대치를 보이며 자벽공명(domain wall resonance loss)[19]에 의한 손실을 나타내고 있다.

투자율의 측정결과로부터 전자파 흡수의 주파수 대역을 검토할 수 있다. 전자파 흡수가 발생하는 주파수 대역을 투자율의 허수부와 실수부를 비교하여 손실탄젠트로 나타내었다. 손실탄젠트($\tan \delta = \mu''/\mu'$)가 1 이상의 값을 가지는 주파수 대역이 전자파의 흡수가 발생하는 대역으로서 NiO의 구성성분비가 9.0 mol%의 경우에 1.7 MHz~8.5 GHz의 주파수 범위에서 1 이상의 손실탄젠트 값을 가져 가장 넓은 대역에서 전자파 흡수가 진행되었다. 이상의 결과를 Figure 6에 손실탄젠트의 주파수 의존성으로 나타내었다. 이와 같이 넓은 주파수 대역에서 자기손실을 갖는 페라이트의 특성은 전자부품 및 전자파 흡수용 재료의 설계, 제작에 사용되는 소재로서 요구되는 중요한 특성이

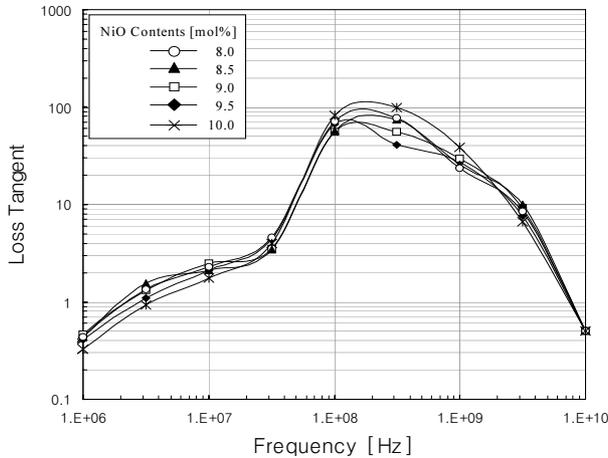


Figure 6. Frequency dependence of loss tangent by the NiO content.

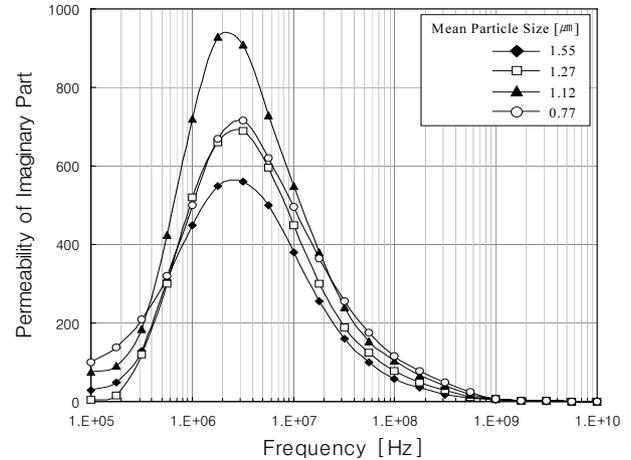


Figure 8. Permeability of imaginary part by the mean particle size.

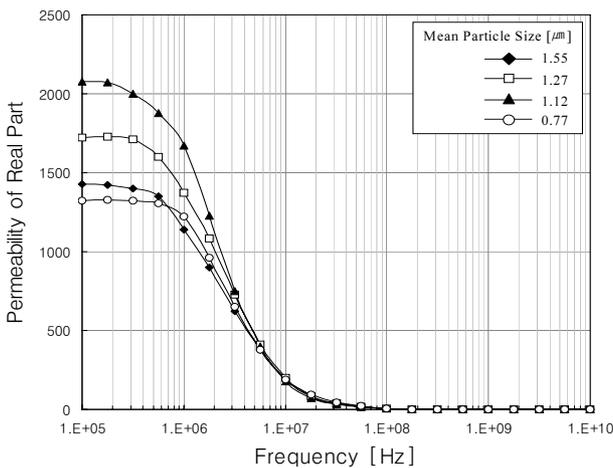


Figure 7. Permeability of real part by the mean particle size.

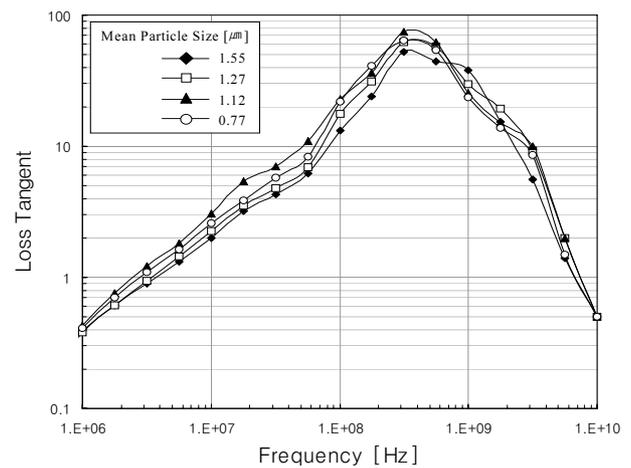


Figure 9. Frequency dependence of loss tangent by the mean particle size.

다. 실험결과 가장 넓은 주파수 대역에서 사용될 수 있는 전자파 흡수용 재료로서의 NiCuZn 페라이트는 Fe₂O₃ 49.0 mol%, NiO 9.0 mol%, CuO 8.0 mol%, ZnO 34.0 mol%의 화학적 조성으로서 구성할 수 있다. Ni 함량은 자왜상수에 영향을 주어 초기투자율을 변화시키고, Cu 함량은 고주파 대역에서 우수한 자기 특성을 가지게 하므로 NiO와 CuO의 적절한 비율이 페라이트 성능을 결정하는 주요한 요인인 것 같다. 따라서 NiO와 CuO가 적절하게 배합된 NiO 8.5~9.0 mol%가 높은 초기투자율과 넓은 대역 주파수 흡수 특성을 나타낸다고 생각된다.

우수한 초기투자율과 넓은 대역 주파수 흡수능을 나타내는 페라이트를 구성하는 분말상의 원료 Fe₂O₃ 49.0 mol%, NiO 9.0 mol%, CuO 8.0 mol%, ZnO 34.0 mol%의 화학적 조성비로 혼합한 후 900 °C의 온도에서 90 min 동안 하소하고 자연 냉각하여 소결한 톨로이드형 시편을 사용하여 평균입자별로 네트워크 분석기로부터 복소투자율을 측정하여, 측정된 투자율에 대한 주파수 의존특성은 Figure 7과 Figure 8에 나타내었다. Figure 7은 0.1 MHz~10 GHz의 주파수 대역에서 주파수에 따른 복소투자율의 실수부(μ')의 의존특성이고, Figure 8은 동일 주파수 대역에서 허수부(μ'')의 의존특성이다. 그 결과 평균입자크기 1.12 μm의 경우 가장 큰 초기투자율 및 자기손실이 측정되었다. 이는 분말의 미세구조를 주사전자현미경 분석한 Figure 3에서 보는 바와 같이 분말의 평균입자크기는 1.12 μm인 경우가 분말의 평균입자크기가 1.27 μm과 0.77 μm인 경우에 비하여 기공의 크기가 작고,

기공 수도 적기 때문에 나타나는 우수한 자기특성이라고 생각된다.

투자율의 측정 결과로부터 전자파 흡수의 주파수 대역을 검토할 수 있다. Figure 9는 평균입자크기의 변화에 따른 손실탄젠트의 변화이다. 손실탄젠트($\tan \delta = \mu''/\mu'$)가 1 이상의 값을 가지는 주파수 대역이 전자파 흡수가 발생하는 대역이며 이 Figure로부터 가장 우수한 전자파 흡수특성을 갖는 경우는 평균입자크기가 1.12 μm의 경우로서 전자파 흡수가 진행되는 주파수 대역은 2.4 MHz~7.5 GHz이다. 그리고 Figure 10에 복소유전율의 주파수 의존특성을 나타내었다. 측정된 복소투자율 및 복소유전율은 페라이트의 전자파 흡수특성을 나타내는 중요한 특성으로서 전자파 흡수재료의 선정에 중요한 요인이다.

평균입자크기에 따른 투자율의 주파수 의존성 검토에서도 투자율 실수부 초기값이 가장 높은 1.12 μm의 경우가 허수부의 경우나 손실탄젠트의 경우 모두 우수한 자기 특성을 나타내었다.

측정된 복소투자율 및 복소유전율로부터 손실계수를 구하여 NiCuZn 페라이트의 전자파 흡수성능을 다음의 식으로부터 평가할 수 있다 [20].

$$Z = \sqrt{\mu_r/\epsilon_r} \times \tanh(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\mu_r \epsilon_r})$$

$$\Gamma = (Z-1)/(Z+1)$$

$$\text{Return Loss [dB]} = -20 \log|\Gamma|$$

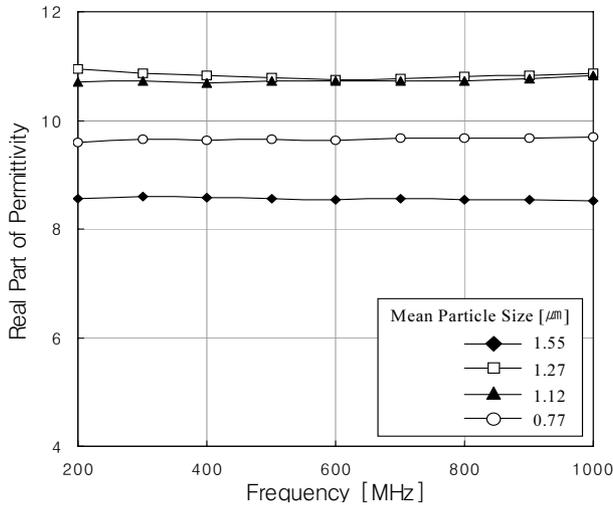


Figure 10. Perceptivity of real part by the mean particle size.

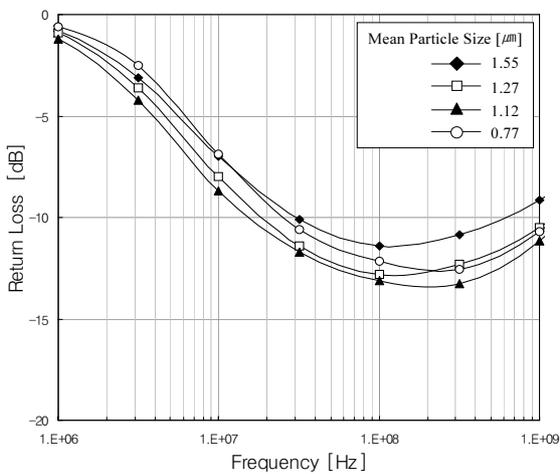


Figure 11. Frequency dependence of return loss by the mean particle size.

이 식은 전자파 흡수재료를 두께 d 의 판상으로 제작한 후 금속판 위에 올려놓은 경우에서 평면파의 수직 입사에 대한 반사계수 Γ 로부터 전자파흡수능을 구하는 식이다. 여기서 μ_r 는 복소비투자율(μ/μ_0), ϵ_r 는 복소비유전율(ϵ/ϵ_0), λ 는 입사한 평면파의 파장이다.

Figure 11은 평균입자크기에 따른 전자파 흡수량을 위 식에 도입하여 구한 결과를 1~1000 MHz의 주파수대역에서 나타낸 결과이다. 투자율 및 손실탄젠트의 결과와 유사하게 1.12 μm 의 평균입자크기를 갖는 시료의 경우 가장 우수하여 100~300 MHz의 주파수 대역에서 약 13 dB의 전자파 흡수가 진행되었다.

4. 결 론

전자파 흡수용 재료로서 NiCuZn 페라이트의 제조조건 중 구성성분비, 소결온도, 평균입자 크기에 대하여 자기적 특성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

NiCuZn 페라이트의 복소투자율에 대한 영향으로서 Fe_2O_3 및 ZnO를 각각 49.0, 34.0 mol%로 고정할 후 NiO 및 CuO의 구성성분비를

변화시킨 결과, NiO의 구성비 8.5~9.0 mol%의 범위에서 초기투자율(μ) 및 허수부(μ'')의 값이 가장 크게 나타났다. 전자파 손실특성을 의미하는 1 이상의 손실탄젠트의 값을 나타내는 경우는 NiO의 구성성분비가 9.0 mol%의 경우에 가장 광대역화 된 주파수 대역을 나타내었다. 전자파 흡수용 재료로서의 NiCuZn 페라이트가 가장 넓은 주파수 대역에 적용될 수 있는 화학적 조성비는 Fe_2O_3 49.0 mol%, NiO 9.0 mol%, CuO 8.0 mol%, ZnO 34.0 mol%이다. 결정립의 크기는 배합한 원료를 900 °C에서 하소하여 제조한 페라이트를 성형, 1080 °C에서 소결한 시편의 소결상태를 관찰한 결과 5~10 μm 로서 최적의 상태를 보였다. NiCuZn 페라이트의 평균입자크기를 약 1.1 μm 로 제조하여 소결 후 결정립 내 기공의 발생을 최소화함으로써 향상된 투자율을 얻었다. 평균입자크기가 1.12 μm 의 경우 가장 우수한 손실탄젠트 및 전자파 흡수특성을 나타내었다.

감 사

본 연구는 2009학년도 동아대학교 학술연구 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- H. Yamashita, N. Ohno, Y. Hashimoto, M. Inoue, and K. Akita, *MSJ*, Vol. J16-B, 729 (1978).
- Y. Hashimoto, K. Ishino, and H. Kurihara, *EMCJ*, **88-6**, 37 (1988).
- 清水康敬, 杉浦行, 石野建, 電磁波の吸収と遮蔽, 日經技術圖書株式會社, 4 (1989).
- 강근덕, 새로운 전자파 장애관련 기준 제/개정, *전자진흥지*, **11** (1996).
- L. B. Gravelle and P. F. Wilson, *IEEE Trans. EMC*, **34**, 109 (1992).
- R. Laroussi and G. I. Costache, *IEEE Trans. EMC*, **35**, 178 (1993).
- Y. Kotsuka, *MSJ*, **21**, 1159 (1997).
- L. I. Im, C. W. Kim, and T. S. Oh, *J. Korea Ceramic Society*, **36**, 571 (1999).
- 内藤喜之, 電波吸收體, 오ーム社, 104 (1987).
- 石野 健, 橋本康雄, 뉴어세라믹스의發展, 91 (1985).
- 平賀 貞太郎, 尾島 輝彦, 奥谷 克伸, フェライト(電子材料シリーズ), 丸善, 100 (1987).
- J. W. Joung and W. J. Lee, *J. Korean Magnetics Society*, **5**, 947 (1995).
- Y.-R. Wang and S.-F. Wang, *Internatinal J. of Inorganic Materials*, **3**, 1189 (2001).
- H. Saita, Y. Fang, A. Nakano, D. Agrawal, M. T. Lanagan, T. R. Shrout, and C. A. Randall, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41**, 86 (2002).
- 近角總信, 太田恵造, 安達健五, 津屋昇, 石川義和, 磁性體ハンドブック, 朝倉 (1987).
- W. Heiser, *J. Appl. Phys.*, **30**, 22 (1959).
- H. Igarshi and K. Okazaki, *JACS*, **60**, 51 (1977).
- J. Smit and H. P. J. Wijn, Ferrites, *Philips' Tech. Library*, 268 (1965).
- J. K. Watson, Applications of Magnetism, John Wiley & Sons, 232 (1980).
- H. M. Musal Jr. and D. C. Smith, *IEEE Trans. on Magnetics*, **26**, 1462 (1990).