통신 부품용 페라이트 소재의 특성 및 응용기술

글 _ 남중희
세인플렉스(주)

1. 서론

페라이트 소재는 여러 가지 응용 분야를 갖고 있는 광범위한 산화철계 세라믹스로 구성되어 있으며, 지난 50여년동안 많은 연구와 개발이 이루어져왔다.[1-10] 자성재료의 응용 범위는 mm-wave의 집적회로에서부터 power handling, 영구자석 그리고 자기기록매체 등에 이르기까지 전자기적 기능을 갖게 하는 수많은 분야에까지 확대되어 왔다. 특히 최근에는 기존의 bulk형의 자성코아 형태에서 전자 기기의 핵심 반도체 소자의 고집적화 추세에 의해, 수동 소자 (저항, 인덕터, 필터, 캐패시터)들의 소형 및 박형화 추세로 급속하게 전환되고 있는 상황에서 적층형 세라믹소재에 대한 개발 수요가 급증하고 응용 분야에 대한 중요성이 부각되면서, 관련 소재 및 부품 개발이 진행되고 있다.

최근 microelectronics device 관련 기술의 비약적인 발전으로 인해 각종 전기·전자기기의 소형화 및 경량화가 이루어지고 있으며 고기능성과 다기능성을 이루기 위한 목적으로 device들의 digital화가 신속하게 추진되면서 구동 주파수 대역이 GHz까지 고주파화가 진행되고 있다. 그와 동시에 transformer coil용 페라이트 소재에 대해서도 소형 및 고성능화가 요구되고 있다. 이러한 용도에는 포화자속밀도가 높고 core loss가 낮은 MnZn계 페라이트가 가장 많이 사용되었지만, NiZn계 페라이트는 일반적으로 전기비저항값이 10 kΩm 이상으로 높기 때문에 MnZn계 페라이트에 비해 유리한 특성을 갖게 된다.

또한 GHz 대역에서의 열적 안정성과 고투자율 및 공명주파수가 높은 것 등이 장점으로 부각되고 있는 Z형 육방정페라이트 소재에 대한 관심이 높아지고 있다. 현재 MHz~GHz용 안테나, 칩 인덕터, LC 필터 등의 기본 소재인 스피넬 페라이트를 대체할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 Co_2Z 페라이트는 소결온도가 1300℃이므로 이를 칩인덕터 소재로 응용하기 위해서는 전극과의 동시소성 문제로 인해 900℃ 이하에서 저온소결이 가능하도록 해야 한다. 전자파 흡수재료로 페라이트 소재를 사용하는 기본 원리는 이 재료의 높은 자기손실 특성에 근거하기 때문에 재료의 화학조성에 따라 그 사용 주파수가 달라진다. 일반적으로 스피넬 페라이트 소결체는 1 GHz 미만의 대역에서 대부분 자연공명주파수(natural resonance frequency)가 나타나는 반면, 육방정 페라이트는 높은 자기이방성의 영향으로 자연공명주파수가 대부분 1 GHz 이상에서 나타나게 되므로 GHz 이상의 고주파 대역에서 전자파 흡수재로 사용이 가능하게 된다.

기존의 페라이트 소재의 개발형태나 응용 분야를 고려하면, 선진국인 일본의 경우 이미 양산 설비를 중국이나 동남아 등지로 옮겨서 생산하고 있고, 일본 내에서는 일부 고급 사양의 제품이나 차세대 자성재료 및 부품 개발에만 치중하고 있는 상황이다. 현재 국내의 페라이트 분말 제조 국산화가 상당 수준 이루어져 있으므로 사용 환경의 고주파화 및 부품 형태의 경박단소화 경향에 따른 새로운 응용 분야 발굴 및 기술 개발의 뒷받침이 지속적으로 진행된다면 우리나라도 앞으로의 페라이트 소재 및

부품 개발 분야에서 상당한 기술경쟁력을 갖출 수 있을 것으로 판단한다.

이번 특집 원고에서는 각종 통신용 전자부품용으로 다양한 개발이 진행되어온 연자성 페라이트 소재를 중심으로, 최근의 전자기기의 디지털화 및 고밀도 실장화, 전자파 대응에 관련된 해당 소재의 특성과 응용 기술 등을 간략히 정리하고자 한다.

2. 연자성 페라이트 소재의 특성 및 응용기술

2.1. 스피넬 페라이트

스피넬형 페라이트인 NiZn 페라이트는 천연광물 스피넬($MgAl_2O_4$)과 같은 형태의 안정한 결정 구조를 갖는 페라이트로서 입방정계의 결정구조를 가지며 모식도로 나타내면 Fig. 1과 같다. 즉, 스피넬 구조를 이루는 4면체와 8면체 위치를 가지며, 격자상수는 8.3~8.7 Å의 범위이고, NiZn 페라이트의 경우는 Ni / Zn 조성비에 따라 8.311~8.418 Å의 분포를 갖는데, Zn 함량이 증가할 수록 격자 상수는 증가한다. 스피넬 페라이트의 기본 화학식은 $M^{2+}O \cdot Fe_2O_3$ 또는 MFe_2O_4로 나타낼 수 있으며 unit cell은 8개의 MFe_2O_4로 구성되어 있다. 이온 반경이 큰 산소 이온이 면심입방격자 (fcc)를 형성하며, unit cell중에는 24개의 금속이온($5\mu_B$의 Fe^{3+}와 M^{2+} 이온)과 32개의 산소이온이 포함되어 있다. 금속이온이 차지하고 있는 격자점은 8개의 A 위치(tetrahedral site)와 16개의 B 위치

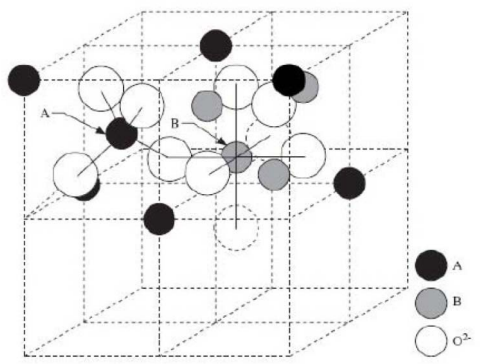

Fig. 1. Unit cell structure of spinel ferrites (A : tetrahedral site, B : octahedral site).

(octahedral site)이다. A 위치는 4개의 산소이온이 구성하는 4면체 배위를 가지며, B 위치는 6개의 산소이온이 구성하는 8면체 배위를 갖게 되는데 M^{2+} 이온이 A 위치를 차지하면 정스피넬(normal spinel), B 위치인 경우는 역스피넬(inversed spinel)이라고 한다. NiZn 페라이트는 정스피넬 구조를 갖는 Zn 페라이트와 역스피넬 구조의 Ni 페라이트가 혼합된 형태(mixed ferrite)로 일종의 고용체를 이루고 있는 것이다.[11,12] 결정구조가 같고 격자상수가 거의 같은 화합물은 서로 고용체를 이루지 않는다. 따라서 서로 다른 종류의 페라이트는 일정 비율로 혼합된 연속고용체가 되며, 이온의 종류(Table 1)에 따라 포화자화, 결정자기이방성 상수, 자기변형 등을 변화시킬 수 있기 때문에 이러한 고용체 형태의 페라이트를 응용하게 되는 경우가 많다.

또한 이러한 스피넬 구조를 갖는 페라이트에서는 격자위치상의 스핀 배향에 따라 서로 다른 결합 형태가 존재하게 되는데, 이중 A-B간의 상호작용이 가장 크다. 스피넬 구조를 갖는 재료의 특징은 각 격자점간의 초교환 상호작용이 형성되며, 모든 교환 적분 J_{AA}, J_{BB} 및 J_{AB}가 음(negative)이며, 이 상호작용에 의해 연결된 스핀이 반평행 배열을 선호한다는 것이다. 그러나 AB 상호작용이 가장 강하기 때문에 A 스핀과 B 스핀들이 반평행되기 위하여 A 스핀들은 서로 평행하게 되고 B 스핀들도 서로 평행하게 되는 것이다. 즉, A 위치의 사면체 격자와 B 위치의 팔면체 격자간의 자화량 차이에 의해 net moment가 결정되어 결과적으로 페라이트의 투자율값으로 나타나게 된다.[11]

페라이트의 투자율에 영향을 주는 주요 인자로는 조성, 입경, 기공율, 온도 등이 있다. 일반적으로 투자율 실수항 μ' 은 어떤 주파수까지는 일정한 값을 유지하다가 그 이상의 주파수 영역에서는 일시적으로 증가했다가 급격하

Table 1. Classification of Cations for Spinel Ferrite Solid Solutions

1+	Li, Cu, Ag
2+	Mg, Ca, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd
3+	Al, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ga, Rh, In
4+	Ti, V, Mn, Ge, Sn

게 감소하는 경향을 나타낸다. 한편, 투자율 허수항 μ''은 주파수가 증가함에 따라 급속히 증가하여 μ'가 감소하는 영역에서 peak를 형성한다. 여기서 투자율 허수항 μ''이 최대값을 갖는 주파수는 μ' 항의 초기값에 반비례하는데, 이것은 고투자율을 가질 수 있는 주파수 영역에 낮은 주파수 영역까지로 제한됨을 의미하며, 이 관계를 Snoek 법칙이라고 한다. 즉, NiZn 페라이트의 투자율 변화는 Ni 함량 (또는 Zn 함량)에 의해 크게 좌우됨을 알 수 있다. Fe_2O_3의 함량에 따른 NiZn 페라이트의 특성 변화의 경우, Fe_2O_3 과잉 조성인 경우보다 결핍된 상태의 경우가 소결밀도 및 전기비저항값이 높다. 따라서, 고투자율 소재를 얻기 위한 NiZn 페라이트의 기본 조성은 $(Ni_yZn_{1-y}O)_{1-w}(Fe_2O_3)_{1+w}$에서 y=0.3~0.4, w〈0의 조건을 가져야 한다.

NiZn 페라이트의 비저항값은 사용 주파수 영역을 고려해 볼 때 손실과 직접적인 연관이 있는 중요한 인자이다. 페라이트의 전기비저항 변화에 가장 큰 영향을 미치는 것이 Fe_2O_3의 함량이다. 즉, Fe_2O_3의 함량이 결핍 조성인지 과잉 상태인지에 따라 비저항값이 현저하게 차이난다. 페라이트의 전기전도기구는 주로 Fe^{2+}와 Fe^{3+}간의 전자 hopping 현상에 의한 것이다. 스피넬 구조에서의 전기비저항은 화학양론 조성을 기준으로 현저하게 변화한다. Fe_2O_3 결핍인 조성에서는 모든 Fe가 Fe^{3+}의 형태로만 존재하게 되어 전기비저항이 상대적으로 높지만, 반면에 과잉인 상태에서는 소성 과정 중에 Fe의 부분적인 환원에 의해 $Fe^{2+} \leftrightarrow Fe^{3+} + e^-$의 반응이 형성되어 Fe^{2+}와 Fe^{3+}간의 전자 이동이 가능하여 전기비저항을 감소시키는 원인이 된다.

한편, 페라이트의 투자율에 영향을 미치는 인자에는 결정립 크기, 기공율과 같은 미세구조와 관련된 사항이 있는데, 소결밀도가 높아지면 단위 부피당 자기모멘트가 증가하기 때문에 투자율값이 상승하게 된다. 이것은 실제의 소성 공정에서도 투자율을 증가시키기 위해 입경을 크게 하면 입경이 어느 정도에 이를 때까지 투자율 변화가 입경에 비례하여 증가하게 되지만, 그 이상 입성장이 일어나면 상대적으로 기공율이 증가하여 페라이트의 투자율이 오히려 감소하는 경향을 보이게 된다. 결국, 미세구조 차원에서의 투자율을 증가시키기 위한 방법으로서는 입경을 크게 하면서도 기공율을 작게 제어하는 것이 효과적임을 알 수 있다.

자기이력곡선(Hysteresis Loop)의 형태는 영구자석 등으로의 용도를 고려할 때에도 중요하지만, 자심재료(magnetic core materials)에 따라서는 투자율도 매우 중요하다. Power transformer와 같이 magnetic field가 크게 되면, 넓은 magnetic field 범위에서의 투자율을 고려해야 하지만, 통신용 고주파 자심 등으로의 응용에서는 인가 자계가 매우 작으므로, 초기투자율에 대한 특성이 중요한 의미를 갖게 된다.

일반적으로 초기투자율 μ_i는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\mu_i \propto \frac{I_s^2}{aK + b\lambda\sigma}$$

(단, I_s : 포화 자화, K : 결정자기이방성 상수, λ : 자기변형 상수, σ : 내부 응력)

여기서 μ_i를 크게 하기 위해서는 K와 λ를 거의 0이 되도록 해야 하지만, 자기이방성이 매우 작게 되면 자화 기구가 자벽 이동에 의한 것인지 자화 회전에 의한 것인지를 구분할 수 없게 된다.

페라이트 소재의 주파수 의존성을 나타내는 특성 (Fig. 2)은 대부분 복소투자율($\mu=\mu' - j\mu''$)의 개념으로 설명할 수 있는데, μ'는 H(교류자장)와 같은 위상에 있는 B(자속밀도) 성분에 관한 것으로서 일반적으로 말하는 투자율에 해당하고, μ''는 H 보다 90° 만큼 벗어난 위상을 갖는 B 성분으로 에너지 손실항에 해당하며, μ''/μ'은 자성 손실항

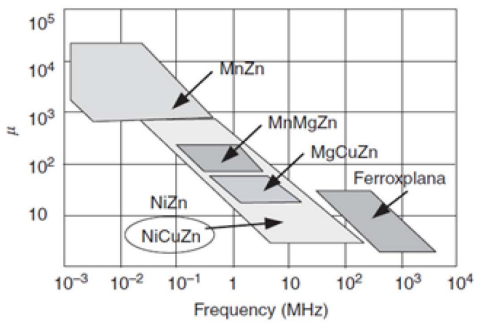

Fig. 2. Frequency dependence of permeability of soft ferrite materials.

을 의미한다. 일반적으로 연자성 재료의 이상적인 특성은 고투자율이면서 손실이 낮은 경우이다. 그러나 주파수에 따라 자화 과정의 변화가 발생하여 손실과 공명 현상 등에 영향을 미치게 된다.[12-15)]

일반적으로 주파수 변화에 의한 자성 재료의 손실은 이력 손실, 맴돌이전류 손실, 잔류 손실의 합으로 나타낼 수 있다. 이력 손실은 강자성체에서 반드시 존재하는 손실이며 hysteresis loop(자기이력곡선) 면적에 비례하는 손실을 갖는다. 맴돌이전류 손실은 주파수에 비례하여 증가하는 손실이며 전기비저항에 반비례한다. 그러나 페라이트의 경우는 전기비저항이 대체로 크기 때문에 와전류 손실이 크지 않으므로 고주파수 영역에서는 잔류 손실이 가장 중요하다. 페라이트의 잔류 손실은 자벽 이동에 의한 공명 또는 완화에 의한 손실, 자연 공명에 의한 손실 그리고 형상공명에 의한 손실 등이 있다.

페라이트의 자벽 공명은 외부 자장의 주파수가 자벽의 고유 진동 주파수에 근접할 때 발생하는데, 상대적으로 자연공명의 경우보다 낮은 주파수 대역에서 발생하며, 자연 공명은 물질 고유의 자기 이방성에 의하여 일어나는 현상으로서 자연 공명 주파수는 자기 이방성의 세기에 비례하게 된다. 일반적으로 스피넬 페라이트에서 나타나는 투자율 실수항 μ' 와 허수항 μ''의 주파수 분산 특성은 자연공명 현상에 의한 것으로서 페라이트 소재에 대한 고주파 손실의 주요 원인으로 작용한다. 이와 같이 스피넬 페라이트는 주파수에 따른 투자율 변곡점이 일정한 기울기 값으로 나타나게 되어 사용가능한 주파수 한계(Snoek's limit)가 존재하게 되는데, 그러한 주파수 영역을 고려하여 사용 가능한 페라이트 소재의 조성을 결정할 수 있게 된다.

NiZn계 페라이트는 상대적으로 전기비저항이 높으므로 고주파 대역에서의 활용이 가능한 재료로 특히 전자파 장해와 관련하여 불필요한 전자파에 대한 제거 및 여과 대책용 소자로 응용하기 위한 기본 재료로 연구되어 왔다. 이러한 인덕터용 페라이트는 저주파 대역에서의 투자율이 높은 반면 낮은 공진 주파수를 가지므로 주로 10 MHz 이하의 노이즈 제거를 목적으로 하는 LC 회로에 사용된다. 한편, 10 MHz 이상의 영역에서는 고주파 대역에서 임피던스 값과 전기비저항이 높은 소재가 요구된다. 즉, 복소투자율 측정 결과로부터 투자율 허수항이 큰 재료 즉, 고주파수 영역에서의 손실이 큰 페라이트 소재를 사용하면 저항 소자로서 동작하여 노이즈를 흡수하여 열로 변환시켜 제거하게 되므로 반사된 노이즈에 의한 또 다른 EMI의 발생을 막을 수 있다.[13-17)]

NiZn 페라이트는 CuZn계 및 MnZn계 페라이트 보다 높은 주파수 영역(50 MHz 부근)까지 사용할 수 있는 장점이 있다. 또한, NiZn계 페라이트는 포화자속밀도가 높고 20 GHz 이상의 높은 주파수 영역에서의 마이크로파용 재료로서도 사용되고 있다(Table 2). 전자 기기 회로의 Digital화, 고주파화 및 시대의 변천에 맞춰 각종 통신 분야의 개발 경쟁 분위기는 한층 더 고조되고 있다. 이러한 부품의 기술 요구 내용을 만족시키기 위해서 폐회로 형태의 자기 shield 효과를 얻기 위하여, 상호 간섭이 적고 고밀도 실장이 가능하며 완전히 monolith화 되어 있어서 높은 신뢰성이 보장되며 또한 소형으로도 높은 인덕턴스값을 유지할 수 있으며, 온도계수가 작고 주위의 온도 변화에도 강한 적층형 칩 인덕터의 개발을 촉진시킨 것이다.

우수한 특성을 갖는 칩 페라이트 부품의 제조에 있어서는 무엇보다도 페라이트 소재와 동시 소성이 가능한 전도성 재료를 효율적으로 적층화하는 것이 중요하다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 저온 소결형 페라이트 소재의 개발이 필수적이며, 기본적인 조성으로는 NiCuZn 페라이트를 예로 들 수 있다. NiZn 페라이트는 고주파용 재료로서 고유 저항은 높지만 우수한 자기적 특성을 갖기

Table 2. Properties of NiZn Ferrites for Applications

Property	Frequency	Wide Band and Pulse Transformer	Antenna, HF* Transformer	Inductor, Antenna, HF Transformer	Inductor I	Inductor II
Initial permeability, μ_i or μ_o	≤100 kHz	2,000	160~480	70~150	35~65	12~30
Saturation magnetization, B_s [G]		2,600	3,000~3,600	2,500~4,200	2,400~2,800	1,500~2,600
Remanence magnetization, B_r[G]		850	1,200~1,600	2,400~3,400	1,500~2,000	800~1,500
Coercive force, H_c[Oe]		0.25	1.0~2.0	2.0~6.0	4.0~6.0	6.0~20
Loss factor, $\tan\delta$ / μ_e	100 kHz 300 kHz 1 MHz 3 MHz 10 MHz 30 MHz	20	 25~70 50~200	 20~50 25~60 60~120	 50~130 200~1,000	 50~130 200~500
Curie temperature, T_c[℃]	≤100 kHz	100	200~370	350~490	300~500	250~510
Electrical resistivity, ρ [Ω·cm]		10^3~10^9	>10^5	>10^5	>10^5	>10^5

* HF : High Frequency

위해서는 고온에서 소성해야 하고 Cu 페라이트는 소성 온도가 비교적 낮지만 재료 자체의 저항과 포화 자속밀도 값이 낮으므로 이러한 두 성분을 일정 조성비로 하여 복합형을 이룰 경우 저온 소결형 페라이트 소재로서 전자기적 특성이 우수한 NiCuZn 페라이트를 얻을 수 있다.

한편, 칩 페라이트 부품용 내부 전극으로는 순수한 Ag이 사용되며 융점이 960.5℃이므로 페라이트 소재와 동시에 소성하기 위해서는 결국 페라이트의 소결온도를 낮춰야 하고, Ag의 확산 여부까지 고려한다면 950℃ 이하의 낮은 온도에서 소결해야 한다. 따라서 이러한 낮은 온도에서도 소결될 수 있는 저온 소결형 페라이트 소재를 개발해야 할 필요가 있는 것이다.

2.2. 육방정 페라이트

육방정 페라이트(Hexagonal ferrite)란 산화철(α-Fe_2O_3)과 2가 금속 산화물들이 고온에서 반응하여 생성되는 매우 복잡한 hexagonal의 결정구조를 지니는 산화물들을 총칭하여 이르는 말이다. 이들은 대체로 육각 판상의 입자형태로 성장하는 것이 일반적이다. 기존의 스피넬 페라이트는 입방정계 결정체로서 a, b 및 c축의 결정 자기이방성 값이 작기 때문에 자연공명주파수가 초기투자율에 반비례하여 나타나는 Snoek's limit를 넘지 못한다. 이러한 이유 때문에 그 사용주파수가 공명주파수에 근접하면 손실이 매우 크게 증가하여, 대부분 GHz 미만의 대역으로 그 사용주파수가 제한되어 있다. 그러나 육방정 페라이트의 경우에는 c축의 큰 일축이방성과 c면의 자화용이성에 의하여 Snoek's limit를 벗어나며, 또한 수백 MHz부터 수 GHz까지 초투자율이 감소하지 않고 손실율도 증가하지 않는 특성을 나타낸다. 이러한 소재들은 Fe 원자들이 상당히 이방성을 갖고 결정구조 내에 위치하기 때문에 강한 자기이방성을 지니고 있어, 자화용이축이 c축과 일치하는 경우와 a-b면과 평행한 경우로 구분할 수 있다.

육방정 페라이트는 Fe와 Ba(또는 Sr, Pb, Ca), 2가 전이금속(Ni, Mg, Co, Fe, Zn, Cu)이 혼합된 자성 산화물(BaO-MeO-Fe_2O_3)이며, 자성을 나타내는 육방정 페라이트는 $BaFe_{12}O_{19}$ (M)-$Me_2Fe_4O_8$(S)와 $BaFe_{12}O_{19}$(M)-$Me_2BaFe_{12}O_{22}$(Y) join에서 존재하게 된다.[14,19] 또한, 결정구조를 형성하는 S-block(Me_6O_8, Me는 Fe^{3+} 또는 Co^{2+}), R-block($BaMe_6O_{11}$), T-block($Ba_2Me_8O_{14}$) 등의 배열 형태에 따라 M($BaFe_{12}O_{19}$), W(MS/$BaMe_2Fe_{16}O_{27}$), X(M_2S/$Ba_2Me_2Fe_{28}O_{46}$), Y($Ba_2Me_2Fe_{12}O_{22}$), U(M_2Y/ $Ba_4Me_2Fe_{36}O_{60}$), Z(M_2Y_2/$Ba_6Me_4Fe_{48}O_{82}$)형 등으로 구분한다(Fig. 3,4). M형인 $BaFe_{12}O_{19}$(BaM)와 W형인 $BaCo_2Fe_{16}O_{27}$(Co_2W)는 육방정 결정 c축이 자화용이축인 경자성 재료이고, Y형인 Co_2Y($Ba_2Co_2Fe_{12}O_{22}$)와 Z형인 Co_2Z($Ba_3Co_2Fe_{24}O_{41}$)는 결정 c면(basal plane)이 자화용이면인 연자성 재료에 해당한다. Co_2Y와 Co_2Z 페라이트는 기존의 스피넬 페라이트의 응용 주파수 보다 높은 영역에서 활용 가능한 소재로 주목받고 있다.

육방정 페라이트의 향후 주요 응용 분야로는 인덕터 소자, 전자파흡수재료에 대한 기술 개발 분야가 될 전망이다. 칩인덕터용 소자의 경우는 작동주파수가 300 MHz 이상의 고주파수 영역에서는 Z-type 육방정 페라이트(Co_2Z)가 갖는 높은 자연공명주파수(3.7 GHz)로 인해 관련 동작 특성의 구현이 가능하게 된다. 일반적인 세라

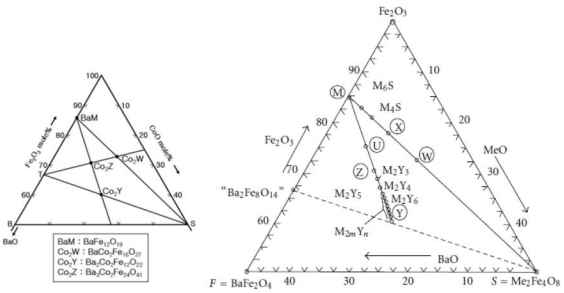

Fig. 3. Phase diagram of hexagonal ferrites (M, W, Y, and Z / S : spinel).

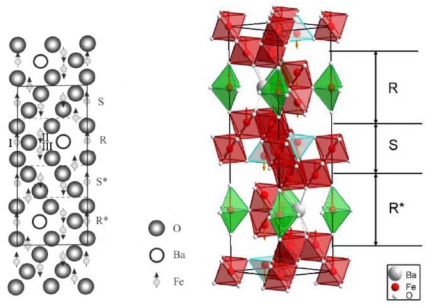

Fig. 4. Schematic diagram for crystal structure of M-type hexagonal ferrite ($BaFe_{12}O_{19}$).

믹 공정으로 Co_2Z 소재를 제조할 때(소결온도 1250~1300 ℃)는, 결정구조가 복잡하기 때문에 단일상을 얻기가 어려우며, 투자율 실수항이 10 이상(300~700 MHz)일 것, Q-factor와 손실이 낮을 것, 낮은 소결온도를 갖는 조성 확보 등이 재료 개발에 요구되는 사항들이다. 더구나, 칩 인덕터 제조 공정상에서 Ag 전극을 사용하기 때문에 950℃ 이하에서 위의 요구 특성들을 만족해야 한다. Co_2Y 조성의 경우는, 자화용이축 방향이 면내에 있고, 투자율의 한계 주파수가 높기 때문에 인덕터용 소재로서 기대되는 또 하나의 조성이다.

한편, 육방정 페라이트는 일반적으로 연자성 페라이트가 나타내는 Snoek's limit를 초과하기 때문에 Co_2Z, Co_2Y, Ni_2Y 등의 조성은 마이크로파 대역에서 발성하는 고주파 신호에 의한 노이즈제거를 위한 전파흡수재료 또는 큰 면내이방성 자계를 갖는 특성을 이용해서 mm파 재료로서도 응용이 기대되고 있다.[14)]

2.3. Garnet 페라이트

Garnet형 페라이트의 결정 구조는 $R_3Fe_5O_{12}$ (R : Y, Gd)이고 기본적으로는 cubic system이며, 비자성이온인 Y^{3+}의 경우는 12면체 배위를 차지하고, 자성 이온인 Fe^{3+}는 8면체와 4면체 배위에 각각 위치하게 된다(Fig. 5). 이러한 결정학적 특성이 갖는 응용상의 장점은 부격자점(sub-lattice point)에 채워진 양이온의 배치가 공간적으로 비교적 균일하며 결정자기이방성이 작기 때문에 전체적으로 전자계 손실이 작아진다는 것이다.

마이크로파 페라이트를 이용한 부품은 통신, 방송, 각종 계측기기에 필수적으로 널리 사용되며, 0.1~500 GHz 범위의 주파수 영역에서 사용되는 세라믹소재로 와전류 손실(eddy current loss)이 적고 비저항이 10^7 Ω·m 이상을 갖는 강자성체 재료(ferromagnetic materials)이다. 일반적으로 페라이트 소재는 비저항값이 높기 때문에 microwave 영역이나 mm-wave 영역에서도 와전류 손실은 무시할 정도로 그 값이 매우 작다.

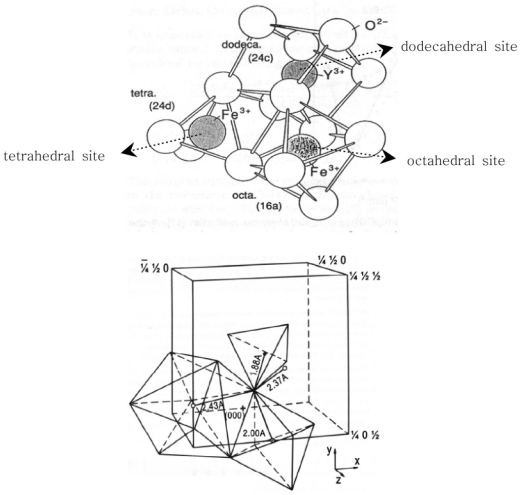

Fig. 5. Schematic diagram for crystal structure of YIG ferrite.

3. 연자성 페라이트의 최근 주요 응용 분야

3.1. 인덕터

페라이트는 주로 low noise amplifier, voltage-controlled oscillators, impedance matching networks 등과 같은 전자회로에서 inductive components의 기능을 하는 부품 소재로 사용되어 왔다. 최근의 부품 개발 추세가 소형집적화 경향으로 진행됨에 따라 페라이트 소재도 수동 부품으로서의 기능을 갖기 위해 적층형으로 개발되었으며, 연자성 페라이트 소재와 금속 코일을 이용하여 인덕턴스를 구현하는 기본적인 인덕터용 페라이트 소재의 적층기술은 1980년대부터 개발되기 시작하였다(Fig. 6).

연자성 페라이트는 일반적으로 각종 트랜스포머, 인덕터, 안테나 등의 자심(core) 재료로 사용되고 있지만 이들 중에서 비교적 약한 자장에서 이용되고 있는 인덕터, 신호용 트랜스포머, 노이즈 제거용 코일 등에 대해서는 적층 기술을 응용한 적층형 칩 인덕터, LC filter, 혼성 집적회로 부품(MHD)등이 개발되어 사용되고 있다. 기기의 고성능화를 이루기 위해 요구되는 부품의 소형화 및 경량화 기술에 있어서의 핵심인 표면 실장 기술(Surface Mount Technology)이 주목을 받게 됨에 따라 bulk형태의 부품 형태에서 표면 실장형 부품인 Chip 형태로의 전환이 급속하게 진행되고 있다. 인덕터는 페라이트 등의

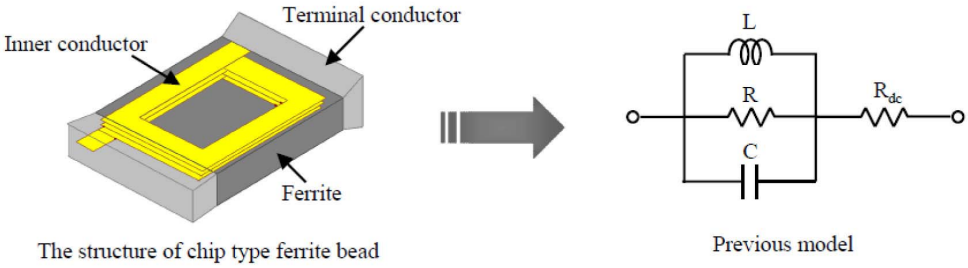

Fig. 6. Schematic diagram for multilayered chip ferrite and basic circuit for application.

core에 도선을 감아 전류를 흘려 발생하는 magnetic flux로 인한 전자기적 특성의 변화를 응용한 임피던스 소자이다. 부품의 소형화 추세에 따라 페라이트의 적층화에 관한 연구가 진행되었고, 기존의 인덕터용 소재인 NiZn계 페라이트를 응용하게 되었다.

최근에는 압전세라믹 소재와 페라이트 소재와 적층 구조를 형성함으로써 자기장 센서를 개발하는 것에 많은 관심이 모아지고 있다. 즉, 자기변형특성(magnetostriction)을 갖는 스피넬 페라이트 소재 중에서 자기변형율이 가장 큰 소재와 압전세라믹소재 PZT와의 혼합물을 3차원 복합체 형태와 2차원 적층 구조로 제조함에 있어서, 최대 자기전기성 감수율(magnetoelectric susceptibility)을 갖도록 복합체 제조 기술을 개발한다. 자기전기성 계수는 압전소자의 압전계수와 같이, 외부 자기장 변화에 따른 자기전기성 물질에서 생성되는 전압의 변화율을 나타낸다. 이러한, 자기전기성 혼합물은 대개 압전소재($BaTiO_3$, $Pb(Zr,Ti)O_3$, $Pb(Mg,Nb)O_3$, $PbTiO_3$, $(Sr, Ba)Nb_2O_5$ 등)와 자기변형소재($NiFe_2O_4$, $CoFe_2O_4$, $Y_3Fe_5O_{12}$, Terfenol-D, metglass 등)를 결합하여 이들이 각각 strain으로 매개 되어, 자기장내의 길이 변화가 압전소재의 길이 변화로 이어지고, 이로부터 전압이 발생함으로써 자기전기성 효과를 나타내게 된다. 따라서 자기 전기성 효과는 물질의 자기 변형 효과 및 압전 효과의 크기와 물질간의 상호 길이 변화를 손실 없이 전달할 수 있는 계면 접촉 정도에 따라 결정된다. 자기 변형소재와 압전소재의 경우, 이미 국내에서도 잘 개발되어 각각 다양한 분야에서 활용되고 있으나, 반면 자기변형소재와 압전소재가 합성된 자기전기성 복합체 합성 및 특성 분석 기술은 국내에서 아직 많이 개발되어 있지 않다.

지금까지 해외에서 연구된 바에 따르면, 이러한 두 물질의 계면 결합력은 두 물질이 혼합되는 형태와 합성되는 온도 조건에 따라 결정된다. 벌크상태의 자기전기성 혼합물을 만들기 위해 크게 두 가지 방법이 많이 이용되어 왔는데, 하나는 분말형태의 두 물질을 혼합, 소결하여 제작하는 3차원 복합체(composite)법이고, 다른 하나는 세라믹 형태의 두 물질을 적층구조로 만드는 다층 혹은 적층 합성법이다. 일반적으로, 적층 합성법으로 만들어진 혼합물이 더 큰 자기 전기성 효과를 가진다고 알려져 있다. 예로, 복합체 방법으로 만들어진 $NiFe_2O_4/Pb(Zr,Ti)O_3$는 최대 115 mV/cm · Oe 크기의 자기전기성 계수를 얻을 수 있지만, 적층합성법으로 합성된 같은 종류의 혼합물은 자기전기성 계수가 400 mV/cm · Oe까지 증가하는 것으로 알려져 있다. 그렇지만, 적층형태의 혼합물은 자기장의 방향에 따라 자기전기성 계수의 크기와 최고 신호 자기장의 크기가 바뀌는 이방성이 나타나는 것이 알려져 있다.

최근의 각종 전자기기에 사용되는 power 용량이 증대됨에 따라 페라이트 소재의 응용 기준은 점차 고용량화가 요구되고 있다. 이러한 power 단자에는 주로 SMPS (switched-mode power supply)의 형태로 사용되는데, 고주파수 영역에서 발생한 power signal이 페라이트 트랜스포머로 전달되고, 이어서 정격 power로 정류되어 기기에 공급하게 하는 기능을 갖는다. 이와 같이 power를 공급하는 용량과 효율을 늘리는 것은 페라이트 트랜스포머

의 작동 주파수를 높임으로써 가능하기 때문에, 고주파수 영역에서의 페라이트 소재의 고용량화가 필요하게 된다.

Power inductor(Fig. 7)의 용도는 주로 RF부에서의 매칭(Matching)과 공진, 전원부에서의 Decoupling과 바이어스에 사용되는 것이다. 휴대 전화 1대에 10~20개 정도 사용되며 그외 Pager, CLP, 무선 LAN 등의 이동통신기기의 고주파 회로부에 최적이다. 최근에는 칩형태가 아닌 벌크형태의 페라이트 코아 제품에서의 이러한 효율을 증가시키기 위해 소재의 비저항을 높게하여 와전류(eddy current)를 감소시키는 방법이 사용되기도 하였으며, 그러한 목적의 미세구조 제어 방안으로써 MnZn 페라이트와 NiZn 페라이트의 고용체를 제조하는 연구도 진행되고 있다.[18,19)]

또한, 고온에서의 power 페라이트 소재의 개발에 있어서는 예를 들어, 자동차 엔진 근처에서는 작동 온도가 보통 80~100℃에서 140℃까지 상승하기 때문에, MnZn 페라이트의 경우 Fe^{2+} 분율을 높게함으로써 조성 변화를 유도하는 방법을 사용하기도 한다. MnZn 페라이트 조성에서의 Fe^{2+} 함량을 조절하면 해당 온도영역(140℃)에서 결정자기이방성이 가장 낮은 조성을 얻을 수 있기 때문에 손실값을 최소로 만들기 위한 소재 개발에 적용된다. 그러나 최근의 소재 개발의 추세는 부품의 소형화 및 박형화에 맞게 형성되어야하기 때문에 페라이트 소재의 개발도 후막 및 박막화, 고분자 복합체 등을 목표로 전환되어 왔으며, 이러한 기반 기술을 토대로 고집적 power circuit의 구성이 가능한 것이다.

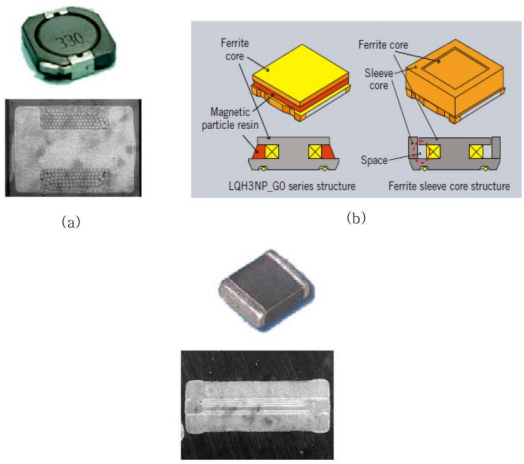

Fig. 7. Samples of chip inductor ; winding type (a, b) and multilayered type (c).[Source for (b) : Murata Manufacturing Co. Ltd.].

3.2. 마이크로파 페라이트

최근의 고주파 응용부품으로서의 수요는 통신과 레이더 기술 분야에서 요구되는 최대 100 GHz 대역폭을 갖는 마이크로파 기술에 중점을 두고 있다. 페라이트 소재는 비전도성 산화물이므로 skin-effect를 갖는 금속 소재와는 다르게 전체 고주파 전자기장의 penetration을 허용한다. 그러한 주파수 영역에서 자벽(domain wall)은 이동할 수 없기 때문에, 스핀 거동에 의한 마이크로파 영역의 흡수가 발생하게 된다. 페라이트 소재에 의한 마이크로파의 흡수는 손실 특성을 포함하는데, 일반적으로 페라이트의 손실은 defect, anisotropy field 분포, 전기전도도 현상(스피넬 페라이트의 경우, Fe^{2+}와 Fe^{3+}에 의한 hopping 전도) 등과 연관된다. 이러한 특성을 응용하는 소자로는 circulator, isolator, phase shifter, antenna 등이 있으며 특히 circulator는 과거에 주로 레이더 시스템에 사용되었으나, 현재는 mobile phone에 사용되고 있다. 또한 최근에는 매우 낮은 자기장에서 마이크로파 출력에 대한 비공명흡수(non-resonant absorption) 현상에 많은 관심이 모아지고 있다. 이러한 현상은 해당 자성재료의 이방성 자장에 영향을 받는 것으로 나타났다.

마이크로파 페라이트를 이용한 부품은 통신, 방송, 각종 계측기기에 필수적으로 널리 사용된다(Table 3). 마이크로파 페라이트는 0.1~500 GHz 범위의 주파수 영역에서 사용되는 세라믹소재로 와전류 손실(eddy current loss)이 적고 비저항이 10^7 Ω m 이상을 갖는 강자성체 재료(ferromagnetic materials)이다. 일반적으로 ferrite 소재는 비저항이 높기 때문에 microwave 영역이나 millimeter 영역에서도 와전류 손실은 무시할 정도로 그 값이 매우 작다.

Garnet과 같은 마이크로파 페라이트 소재의 선택에 있어서 고려되어야 할 사항은 사용주파수, 적은 손실, 온도안정성, 사용 전력 등이다. 사용 주파수와 관련된 항목은 재료의 포화자화이고 손실과 관련된 항목은 자기공명반치폭(ferromagnetic resonance/FMR linewidth, ΔH) 및

Table 3. Microwave Ferrites for Applications

Materials		T_C(℃)	$4\pi M_S$(kG)	f (GHz)	ε_r	Applications
Spinel ferrites	MgMn	290~320	1.8~2.9	7~30	12~14	Phase shifter, Circulator, Resonator, Isolator
	NiZn	300~590	3.2~5.0	5~40	13~16	Faraday rotation isolator, Resonance isolator
	NiCo	500~590	1.8~3.0	0.5~10	10~12.5	Phase shifter, Resonance isolator
	NiAl	160	0.5	1~6	9	Phase shifter
Garnet	YFe	110~265	0.6~1.6	1~36	4~16	Phase shifter, Circulator
	YFeAl	130~280	0.4~1.7	1~6	14~15	Phase shifter, Circulator, Field displacement
	YFeGd	280	1	1~10	15	Temperature stabilization
	YFeCaV	170~220	1~2	1.5~10	14~15	Low loss devices

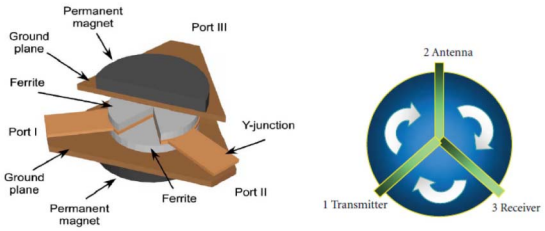

Fig. 8. Schematic diagram for component structure of stripline Y-junction circulator.

복소유전율이며, 사용전력과 관련된 항목은 스핀파 공명 반치폭(spin-wave resonance linewidth, ΔH_k)이다. Garnet은 현재 가장 널리 사용되는 재료로서 포화자화값이 0.3~1.9 kG의 범위를 가지며 수백 MHz~9 GHz 사이의 주파수에서 동작하는 부품에 적합하다. Fig. 8은 마이크로파 페라이트 부품의 한 형태로 circulator의 예를 나타낸 것인데 여기에 사용되는 영구자석(permanent magnet)은 ferrite-loaded junction의 bias에 필요한 자장을 공급하는 역할을 한다.

3.3. Electromagnetic Interference (EMI) Suppressor

최근 휴대용 소형 기기의 사용이 급증하면서 예를 들어, 휴대전화에 탑재된 카메라, 오디오 플레이어, IC 카드 등의 많은 전자부품들이 고주파 신호를 처리하기 위해 고밀도로 실장되고 있기 때문에 기기에서 외부로의 방사를 억제하는 기존의 전자노이즈 대책에서 발전된 기기 내부의 전자부품간 또는 전자회로간의 전자파 간섭대책 마련이 필수적으로 되고 있다(Table 4). 따라서, 소형기기의 제한된 공간에 사용되는 얇은 전자파 간섭 대책용 재료의 개발이 요구되며 RFID 대역(13.56 MHz)의 자기 차폐용 NiZn계 페라이트 후막재료의 경우 두께가

Table 4. Applications of NiZn Ferrite Materials

응용 분야	주파수 영역	소재형태	투자율(μ') 범위	두께
전자파 간섭 제어	10 MHz 이상	후막, 박막	2~160	0.7 ㎛~0.1 mm
인덕터	~35 MHz 이하	벌크, 후막	30~3000	0.1~10 mm

약 100~300 ㎛ 범위로 사용되고 있다. NiZn계 페라이트 박막은 현재 실용화에 접근하고 있는 수준이며, 기존의 노이즈 억제 시트와 같은 형태이기 때문에 elastomer와 같은 비자성물질은 포함되지 않고, 두께가 대략 수 ㎛이면서 광대역 (100 MHz~1 GHz)에서 충분한 전도노이즈 억제 효과를 나타내는 특성을 구현한다. 페라이트 도금 박막의 경우는 film 형성하는 대상의 종류를 가리지 않고 비교적 쉬운 공정으로 개발이 가능하기 때문에, 소자가 고밀도 집적된 SiP나 고밀도 실장을 위한 다층형 PCB의 미세 패턴 등에 대한 전자파간섭대책으로도 활용이 기대되고 있는 분야이다(Fig. 9).[19-21]

일반적으로 페라이트 소재의 복소투자율(complex permeability)의 실수항에 대한 주파수 의존성은 박막을 제외하고는 Snoek의 법칙을 따르기 때문에, 소재의 두께가 얇아질수록(벌크→후막→박막) 투자율 값이 급격히 감소하지만 고주파수 영역에서 사용 가능하게 된다.

벌크 재료의 경우 최근 전자기기의 소형화와 스위칭 주파수의 고주파화 경향에 의해 DC-DC convertor도 소형화되고 있으며 power inductor로도 활용되고 있다. 또한, 대전류화에 대응할 수 있도록 직류전류가 중첩되어도 임피던스 특성이 낮아지는 정도가 최소화되는 재료 및 부품의 구조이어야 하는데 이를 위해서는 core loss가 낮은 재료와 직류저항이 낮은 구조가 요구된다.

최근의 노트북 PC, 카메라, 스캐너 등의 기기들과 같이 소형화된 좁은 공간에서 사용되는 고속의 디지털 인터페이스 수요가 급증함에 따라 EMI 문제가 많이 발생하고 있다. 특히, 무선통신 분야의 급속한 발전은 전자기장에 의해 발생한 전자파 방해 현상과 직면하게 된다. 전자파 방해(EMI)는 회로 신호보다 높은 주파수 영역에서 발생한 기기들로부터 발생한 노이즈 현상으로 정의된다. 이러한 현상을 방지하거나 적어도 EMI 현상을 줄이기 위해서는 suppressor를 사용하여 효과를 얻을 수 있다.

EMI suppressor 소재로 사용되고 있거나 개발 진행 중

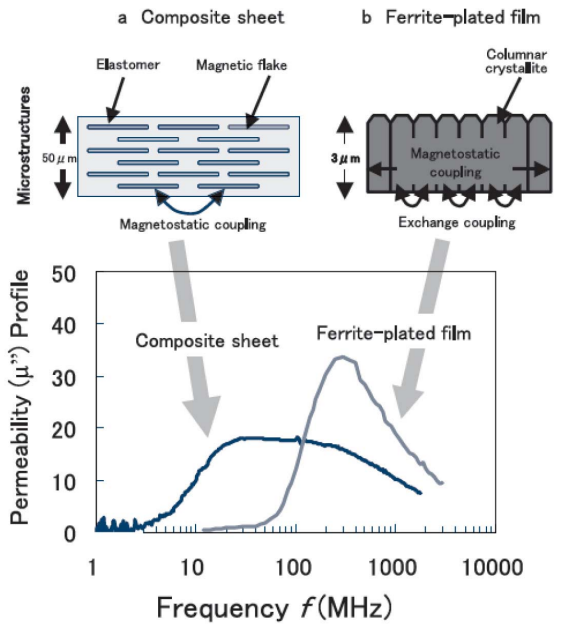

Fig. 9. Microstructures and complex permeability(imaginary part, μ'') of composite-type noise suppression sheet and plated ferrite film.

인 소재로는 연자성 페라이트, 강자성 금속, 강자성 금속/육방정 페라이트 복합체, core-shell 구조의 나노자성입자, 카본 나노튜브 복합체 등이 있다. EMI suppressor용 페라이트 부품은 오래전부터 사용되어 왔으나, 최근에는 전자기기의 소형화 추세에 맞추어 통신기기, 컴퓨터, 정보저장 기기 등에서 집적밀도를 높이고, clock 주파수를 증가시키기 위한 개발 수요가 급증하고 있다. 내부 전극을 사용한 적층형 NiZn 페라이트 소재가 이러한 용도에 맞게 개발되었으며, 20~200 MHz의 영역에서 사용되고 있다. 적층형 suppressor는 일종의 주파수 의존성 resistor의 기능을 갖게 되는데, 저주파수 영역에서 발생하는 손실은 무시할 정도이다. 주파수가 증가할수록 손실항 또한 증가하게 되는데, 강자성 공명점에 이르게 되면, 인덕터는 주파수 의존성을 갖는 resistor의 기능을 갖게 된다.

육방정 페라이트는 EMI suppressor로 쓰이는 스피넬 페라이트의 공명주파수 보다 높은 값을 가지며, 비교적 높은 투자율(마이크로파 주파수 대역)과 전기비저항값을 갖고 있다. 반면에 금속 강자성체는 포화자화값은 훨씬 높으나, 주파수가 증가하면 와전류에 의해 투자율값이 현저하게 감소하는 단점을 지니고 있다. 그러나, 육방정 페라이트와 복합체를 형성하게 되면, EMI suppressor 부품으로서의 활용 가능성이 높은 것으로 알려져 있다. 즉, Co_2Z와 Zn_2Y 조성을 갖는 육방정 페라이트 입자(10~30 ㎛)를 금속 소재인 Ni 입자(2~3 ㎛)와 혼합하여 고분자 복합체를 제조하면 차폐 효율이 높은 소재를 얻을 수 있다.

3.4. Near-Field Communication (NFC)용 고투자율 소재[19]

최근의 대표적 NiZn계 페라이트 후막의 응용 분야는 13.56 MHz 대역 RFID용 자기차폐재료이다. 휴대전화 내부의 인접한 부품의 금속 재질에 의해 RFID용 안테나 본래의 성능을 구현할 수 없게 되어 송수신 통신거리가 낮아지는 것을 방지하기 위해 사용되고 있다. Fig. 10에 RFID용 NiZn계 페라이트 후막의 투자율 특성의 예를 나타낸 바와 같이, 제품의 자기차폐 특성 구현을 위해서는 13.56 MHz에서 투자율 실수항(μ')이 증가하더라도 허수항(μ'')이 동반하여 증가하지 못하도록 최대한 억제하도록 하는 것이 중요하다.

또한 스마트폰의 수요가 급증함에 따라 근거리 통신(NFC) 방식 구현에 요구되는 고투자율 및 저손실 스피넬 페라이트 소재의 개발이 진행되고 있다. NFC 환경에서 통신 효율을 높이기 위하여 안테나용 자성복합재료를 개발함에 있어서 재료설계 차원에서의 복소투자율을 제어 방안과 소결체 제조 공정 기술의 개발이 필요하다. RFID/NFC 시스템은 무선신호를 이용하므로 Reader 또는 Transponder(Tag)의 안테나에 도체가 근접하는 경우 전자계의 분포가 달라져서 영향을 받는다.

LF(125 kHz)와 HF(13.56 MHz) 대역에서 주로 사용하는 유도결합 RFID 시스템에서 코일안테나 근처에 도체판이 접근하면 안테나 코일부터 발생하는 시변자계에 의하여 도체의 표면에 와전류(Eddy Current)가 형성되고, 와전류는 코일안테나를 통과하는 자계와 반대방향으로 자계를 형성하여 자속을 감소하므로 코일안테나의 인덕턴스가 감소하고 Reader와 Transponder(Tag) 사이의 자기적 결합을 약화시켜 데이터통신에 장애가 발생한다. 따라서 전기전도도가 낮고 투자율이 높은 페라이트 시트를 사용함으로써 인접도체로의 자속을 차단하여 인접도

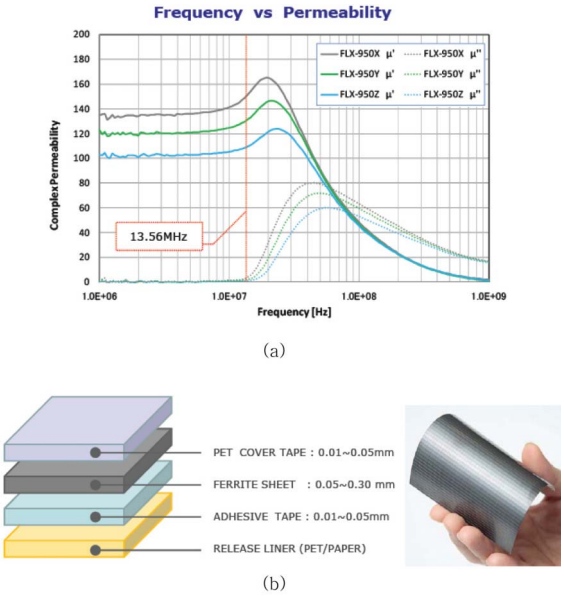

Fig. 10. Performance of permeability (a) and schematic diagram (b) of sintered flexible ferrite sheet (manufactured by Toda Kogyo Co. Ltd.).

체에서 발생하는 와전류에 의한 인덕턴스 감소현상을 방지하는 효과를 얻을 수 있다.

13.56 MHz를 이용하는 NFC 시스템은 전송파로 자계를 이용하기 때문에 금속 shield case, 회로기판의 접지면과 배터리팩 등의 금속면에 루프 안테나가 근접할 경우, 설계했던 통신거리가 확보가 어려움이 발생한다. NFC/RFID용 전자파 차폐소재는 사용 주파수에서 투자율이 높고 전기전도도가 낮은 연자성 페라이트를 주로 사용하고 있으며 주로 소결체 시트 형태로 개발되고 있다. 소결체 시트는 소결 전에 그린 시트 상태에서 격자 모양의 홈을 만들어서 소결하게 되며 소결 후에는 페라이트 시트는 용도에 따라 복소투자율의 투자율 실수항과 허수항(손실 값)의 상대적인 크기에 구분된다. 이때 RFID용 소재는 안테나에 근접해서 사용되는 경우이므로 자성시트의 복소투자율 실수항은 높고 동시에 허수항은 매우 낮아야 하는 특성을 나타내야 한다. 즉, 복소투자율값을 제어하기 위해서는 페라이트 소재를 조성을 결정하는 단계에서부터 최종단계인 시트 형태의 소결체를 얻기까지의 모든 공정과 관련되기 때문에 상당히 많은 개발과정이 필요하다. 이러한 복소투자율 변화 형태를 만족하는 소재는 NiCuZn계 페라이트이며, 후막공정을 적용하여 얻어지는 소결체 시트의 두께는 대략 50~120μm 정도의 범위를 형성하고 있다.

NFC/RFID용 Ferrite Sheet는 EMC 관련 선도업체인 일본의 TDK와 Maruwa가 제품군을 구성하고 시장을 주도하고 있다. 13.56 MHz를 사용하는 RFID용 Magnet Sheet 외에 TDK는 다양한 사용 주파수 영역에서 Maruwa는 저주파 영역에서의 EMI 방지를 위한 제품들을 보유하고 있다. 향후 국내외적 시장에서 NFC에 대한 수요는 지속적으로 증가될 것이 예상되지만, 지금 현재 NFC의 핵심 소재 부품인 자성시트는 그 원료 분말을 일본에서 수입을 하거나, 금속 분말의 경우에는 기 가공된 flaky powder를 일본에서 고가로 수입하여 사용하는 실정임. 게다가 최근에는 엔高 현상으로 인해 자체 기술 개발에 대한 필요성이 대두되고 있어서 국내에서도 많은 기업들이 NFC용 페라이트 소재의 안정적 확보를 위해 다양한 복소투자율 범위를 갖는 소재 개발에 참여하고 있다.

4. 결론

페라이트 소재는 1930년대 이후로 연구 개발되기 시작해서 현재까지도 산업 전반에 걸쳐 광범위하게 사용되고 있고, 단순한 자석에서부터 마이크로파 부품에 이르기까지 다양한 응용 분야를 갖고 있기 때문에 기술적으로는 소위 포화상태라고도 할 수 있다. 그러나, 그 중에서도 최근 10년간 진행된 응용 및 소재 기술의 괄목할만한 발전은 주목할 만하다. 벌크형 페라이트 소재는 그동안의 자성재료의 핵심역할을 해왔고, 최근에는 기존의 벌크형 소재에서 사용되는 페라이트 조성에 대한 나노구조가 기능을 가짐으로써 향후 페라이트 소재 개발 분야 확대에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

특히 스피넬 페라이트 소재의 주요 응용 분야는 스마트폰 수요 확대에 따른 NFC RFID용 소재와 무선충전기술 개발을 중심으로 응용되고 있고, 앞으로도 스마트폰의 기술 개발 및 수요 증가에 따라 적용 성능 수준의 향상이 필요하여 많은 진전이 있을 것으로 기대한다.

반면, 최근의 전력반도체용 스위칭주파수가 5 MHz 이상으로 고주파화되는 추세이며, 각종 모바일 기기(스마트폰, 테블릿 PC, 디지털카메라 등)에서 사용 가능하도록 하기 위한 초소형 파워인덕터의 개발 수요가 급증하면서 LCR 수동소자 중에서의 인덕터 소자에 해당하는 기본 소재 및 설계 기술 등이 중요한 의미를 갖게 되었다. 그러나 이러한 고성능의 인덕터 소자 개발을 위해서는 기존의 페라이트 소재만으로는 제반 특성의 구현이 불가능하여, 연자성 금속재료의 역할이 필수적이어서 resin과의 후막형 복합소재로 개발하여 응용되고 있는 상태이다. 그러나, 연자성 페라이트는 향후에도 노이즈 억제 부품으로의 활용이 기대되고 있어, 페라이트 소재의 공명 특성과 임피던스 특성을 최적화시키기 위한 후막 또는 박막형 소재의 개발에 많은 연구 노력이 집중될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. H. Igarashi and K. Okazaki, "Effects of Porosity and Grain Size on the Magnetic Properties of NiZn Ferrite," *J. Am. Ceram. Soc.*, **60** [1-2] 51-54 (1977).
2. G. F. Dionne and R. G. West, "Magnetic and Dielectric Properties of the Spinel Ferrite System $Ni_{0.65}Zn_{0.35}Fe_{2-x}Mn_xO_4$," *J. Appl. Phys.*, **61** [8] 3868-70 (1987).
3. G. G. Bush, "Generalization of Snoek's Limit for Modeling Initial Permeability of Magnetic Materials," *J. Appl. Phys.*, **63** [8] 3765-67 (1988).
4. H. Momoi, A. Nakano, T. Suzuki, and T. Nomura, "Nano-Structure Control of NiCuZn Ferrites For Multilayer Chip Components," *Ferrites : Proc. 6th Inter. Conf. Ferrites (ICF 6)*, 1202-05 (1992).
5. T. Nomura, "Micro- and Nano-Structure Property Relationships in Soft Ferrites (invited)," *Ferrites : Proc. 6th Inter. Conf. Ferrites (ICF 6)*, 65-70 (1992).
6. J.-Y. Hsu, W.-S. Ko, H.-D. Shen, and C.-J. Chen, "Low Temperature Fired NiCuZn Ferrite," *IEEE Trans. Mag.*, **30** [6] 4875-77 (1994).
7. F. G. Brockman and K. E. Matteson, "Nickel-Zinc Ferrites : I. Effect of Composition on the Magnetic Properties of a Nickel-Zinc-(Cobalt) Ferrite," *J. Am. Ceram. Soc.*, **53** [9] 517-20 (1970).
8. F. G. Brockman and K. E. Matteson, "Nickel-Zinc Ferrites : II. Preparation and Properties of Stoichiometric 32NiO/68ZnO Ferrite," *J. Am. Ceram. Soc.*, **54** [4] 180-83 (1971).
9. J. Xu, G. Ji, H. Zou, Y. Zhou, and S. Gan, "Structural, Dielectric and Magnetic Properties of Nd-doped Co_2Z-type Hexaferrites," *Alloys. Comp.*, **509** [11] 4290-94 (2011).
10. V. G. Harris, A. Geiler *et. al*., "Recent Advances in Processing and Applications of Microwave Ferrites," *J. Mag. Mag. Mater.*, **321** [14] 2035-47 (2009).
11. S. Chikazumi, *Physics of Magnetism* (2nd Ed.), Clarendon Press, pp. 197-221, 1997.
12. J. Smit and H. P. J. Wijn, FERRITES, Philips' Technical Library, Eindhoven, Netherlands, pp. 136-326 (1959).
13. Alex Goldman, *Modern Ferrite Technology*, Van Norstrand Reinhold, New York, pp. 21-344 (1990).
14. Raul Valenzuela, *Magnetic ceramics*, Cambridge University Press, New York, pp. 3-190 (1994).
15. B. D. Cullity, *Introduction to Magnetic Materials*, Addison-Wesley Pub. Co., pp.181-203 (1972).
16. D. J. Craik, *Magnetic Oxides*, John Wiley & Sons, pp. 1-96 (1975).
17. David Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, Chapman and Hall, pp. 69-175 (1991).
18. S. Yang, J. Yoon, W. Choi, and J. Kim, "Magnetic Characteristics of YIG Ferrites with Sintering Temperature," *J. Microelectronics & Packaging Soc.*, **10** [1] 65-69 (2003).
19. K. Kondo, K. Chatani, H. Ono, and S. Yoshida, "Recent Advances in Bulk, Thick-film and Thin-film Ni-Zn Ferrite Materials," *Materials Integration*, **25** [7] 35-40 (2012).
20. J. Suh, "Introduction to Composite Electromagnetic Noise Absorber Technology," *The International J. Electromagnetic Compatibility, Interference Technology (EMC Directory & Design Guide 2007)*, 151-57 (2007).
21. S. Yoshida, K. Kondo, and H. Ono, "High-Frequency Noise Suppression Using Ferrite-Plated Film," *NEC Technical J.*, **1** [5] 77-81 (2006).

남중희

- 1997년 인하대학교 세라믹공학과 박사
- 1997-1999년 University of Missouri-Rolla (Materials Research Center), Post-doc.
- 2004-2006년 한국산업기술대학교 신소재공학과 겸임교수
- 2010년 Oak Ridge National Laboratory 방문연구원
- 2000-2014년 한국세라믹기술원 전자소재융합본부 책임연구원
- 2014-현재 세인플렉스(주) 기술연구소장