

Effect of Sintering Conditions on the Magnetic Property of $Mn_{2/3-x}Zn_{1/3+x}Fe_2O_4$ Ferrites

Eun-Soo Lim and Young-Min Kang*

Department of Materials Science and Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea

Dong-Young Kim

Department of Physics, Andong National University, Andong 36729, Korea

(Received 3 December 2018, Received in final form 11 December 2018, Accepted 12 December 2018)

$Mn_{2/3-x}Zn_{1/3+x}Fe_2O_4$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$) spinel ferrites samples were prepared by conventional ceramic process and the effects of the composition, sintering temperature and atmosphere (air, nitrogen) on the structure and magnetic properties were investigated. X-ray diffraction (XRD) analysis revealed that all the samples sintered at $T \geq 1200$ °C have single spinel phases. The average grain size of the samples increased with increasing sintering temperature, although a clear dependence of the microstructure on x were not shown. Magnetization curves measured on the wire-wound toroidal samples by using a B-H curve tracer showed soft magnetic behaviors for all the samples. The magnetic flux density value and complex permeability ($\mu = \mu' + j\mu''$) spectra sensitively varied with x and processing conditions. The highest dc permeability of dB/dH = 8896 could be achieved at the $x = 0.1$ sample sintered in nitrogen at 1250 °C.

Keywords : Mn-Zn ferrites, solid-state-reaction, B-H curve, complex permeability

소결 조건에 따른 $Mn_{2/3-x}Zn_{1/3+x}Fe_2O_4$ Ferrite의 자기적 특성

임은수 · 강영민*

한국교통대학교 화공고분자신소재공학부, 충북 충주시 대학로 50, 27469

김동영

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

(2018년 12월 3일 받음, 2018년 12월 11일 최종수정본 받음, 2018년 12월 12일 게재확정)

$Mn_{2/3-x}Zn_{1/3+x}Fe_2O_4$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$)를 고상반응법(solid-state reaction)으로 합성한 후 Zn 치환량 (x)와 소결 온도와 소결 분위기에 따른 결정구조 및 미세구조, 그리고 이에 따른 자기적 특성 변화를 연구하였다. XRD 분석을 통해 1200 °C 이상의 온도에서 소결하였을 때 단상의 spinel ferrite 상이 형성됨을 알 수 있었다. x 의 변화에 따라 미세구조의 두드러진 변화는 없었으나 소결 온도의 증가에 따라 평균 결정립의 크기는 증가하였다. 자화 곡선은 toroidal 형태의 시료에 코일을 감아 연자성 측정기로 측정하였고 모든 시료는 연자성의 거동을 보였다. 지속밀도와 복소투자율 spectra는 치환 조성 x 와 공정 조건에 따라 매우 민감하게 변화함을 보였다. $x = 0.1$ 조성의 시료를 1250 °C의 질소 분위기에서 소결하였을 때 최대 dc 투자율 dB/dH = 8896이 얻어졌다.

주제어 : Mn-Zn ferrite, 고상반응법, 자기이력곡선, 복소투자율

I. 서 론

Spinel ferrite 소재는 산화철계 자성 세라믹스로 전자기기 내 고주파 통신 소자나 센서 부품 소자로 다양하게 응용될

수 있어 학계와 산업계에서 수 십 년 간 연구와 개발이 이루어져 왔다[1-5]. 그 중에 Mn-Zn ferrite는 입방정(cubic) spinel 구조를 가지며 높은 투자율과 낮은 자기이력을 갖는 연자성 소재로 인덕터 코어(inductor core), 마이크로파 소자(microwave device) 및 무선 전력전송 시스템의 자기장 차폐 소재 등으로 그 활용도가 매우 높은 소재이다. Spinel ferrite는 MFe_2O_4 의 일반식으로 표현되며, 여기서 $M = Ni^{2+}, Mn^{2+}$,

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.

*Corresponding author: Tel: +82-43-841-5382,

Fax: +82-43-841-5380, e-mail: ymkang@ut.ac.kr

Cu^{2+} , Zn^{2+} 등 +2가의 금속이온이다. 이온 반경이 큰 산소 이온이 면심입방격자(fcc)를 형성하고, 단위 셀에는 24개의 금속이온(M^{2+} 및 Fe^{3+})과 32개의 산소이온(O^{2-})이 포함된다. O^{2-} 의 배치에 따라 8개의 사면체 위치(tetrahedral site)와 16개의 팔면체 위치(octahedral site)가 형성되며 금속이온이 이들 산소 사면체와 팔면체 내의 격자점에 들어가게 된다. M^{2+} 이온이 모두 사면체 위치를 차지하면 normal spinel, 팔면체 위치를 차지하면 inversed spinel이라 하는데 Mn-Zn ferrite는 Zn^{2+} 이온이 주로 사면체 내 위치하고 M^{2+} 이온이 주로 팔면체 내에 위치한 normal spinel과 inversed spinel이 혼합된 mixed spinel 형태로 볼 수 있다[6,7]. 이러한 구조적 특성과 관련하여 양이온 치환 조성 및 열처리 공정 조건에 따라 자기적 특성이 크게 변하는 것으로 알려져 있다[8-11]. 결국, 자기차폐 소재나 흡수 소재로의 고주파 활용을 위해서는 조성 및 공정제어를 통한 복소투자율($\mu = \mu' + j\mu''$)를 효과적으로 제어하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 고상법을 통해 공기(air)와 질소(N_2)에서 분위기, 폭넓은 온도 영역에서 $Mn_{2/3-x}Zn_{1/3+x}Fe_2O_4$ ($0 \leq x \leq 0.3$)를 각각 합성하여 단일상의 spinel 구조가 얻어지는 영역을 확인하였고, 단일 spinel 상 소결 시료에 대해 Zn^{2+} 의 치환 조성(x)과 소결 온도 및 분위기에 따라 자기적 특성의 변화를 체계적으로 연구하였다.

II. 실험 방법

$Mn_{2/3-x}Zn_{1/3+x}Fe_2O_4$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$)를 일반적인 고상 반응법을 통해 합성하였다. MnO_2 (99.9%)와 ZnO (99%), Fe_2O_3 (99%) 분말들을 각 조성의 화학양론적 비에 맞게 칭량하여 혼합(mixing) 후 900 °C 공기 중 에서 1차 하소를 진행하였다. 하소한 분말을 재분쇄(milling)하여 toroidal 및 disk 형태로 가압 성형하였고, 성형체를 공기 또는 질소 분위기 전기로의 1200~1300 °C의 온도에서 2시간 동안 소결하였다. 질소 분위기 소결 시에는 밀폐형 Tube로 내에 시료를 넣고 일반 등급의 질소 가스를 유량 0.6 L/분으로 흘리며 진행하였다. 그 밖에 분쇄, 성형 및 열처리 상의 세부적인 공정 방법은 이미 보고된 기존의 연구와 동일하다[12]. 결정상 분석은 $Cu K_{\alpha}$ radiation($\lambda = 0.154056$ nm)을 음극 타겟으로 사용하는 X-선 회절분석 장치(XRD, D8-Advance, Bruker)로 진행하였고, 미세구조 관찰은 전자현미경(SEM, JSM-7610F, JEOL)을 이용하여 소결 시료의 파단면을 관찰하였다. 자기 이력곡선(B-H curve)과 초기자화곡선은 연자성측정기(Remagraph C0530, Magnet-Physik)를 사용하여 각각 $-30 \text{ Oe} \leq H \leq 30 \text{ Oe}$ 과 $0 \text{ Oe} \leq H \leq 5 \text{ Oe}$ 구간에서 측정하였다. 복소투자율($\mu = \mu' + j\mu''$)의 실수부 μ' 및 허수부 μ'' 를 임피던스 분석기

(Impedance Analyzer)를 사용하여 측정하였는데, 저주파 대역에서부터 ~13 MHz까지는 LF Impedance analyzer(HP4192A)를, 1 MHz~1 GHz 주파수 대역에서는 Impedance analyzer(E4991A, Agilent Technologies)를 사용하여 각각 측정 후 두 data를 조합하여 plot하였다.

III. 결과 및 논의

Fig. 1(a)는 800 °C부터 1300 °C까지 100 °C 간격으로 공기 중에서 하소하였을 때 $Mn_{2/3}Zn_{1/3}Fe_2O_4$ ($x = 0$) 시료의 XRD 분석 결과이다. 그림에 표기된 바와 같이 저온 구간에서는 spinel 상과 함께 Mn_2O_3 와 Fe_2O_3 상이 확인되다가 1200 °C에서부터 단상의 spinel 상이 합성되었음을 알 수 있다. Fig. 1(b)는 공기 중 900 °C에서 1차 하소한 분말을 질소 분위기에서 900 °C부터 1300 °C까지 100 °C 간격으로 2차

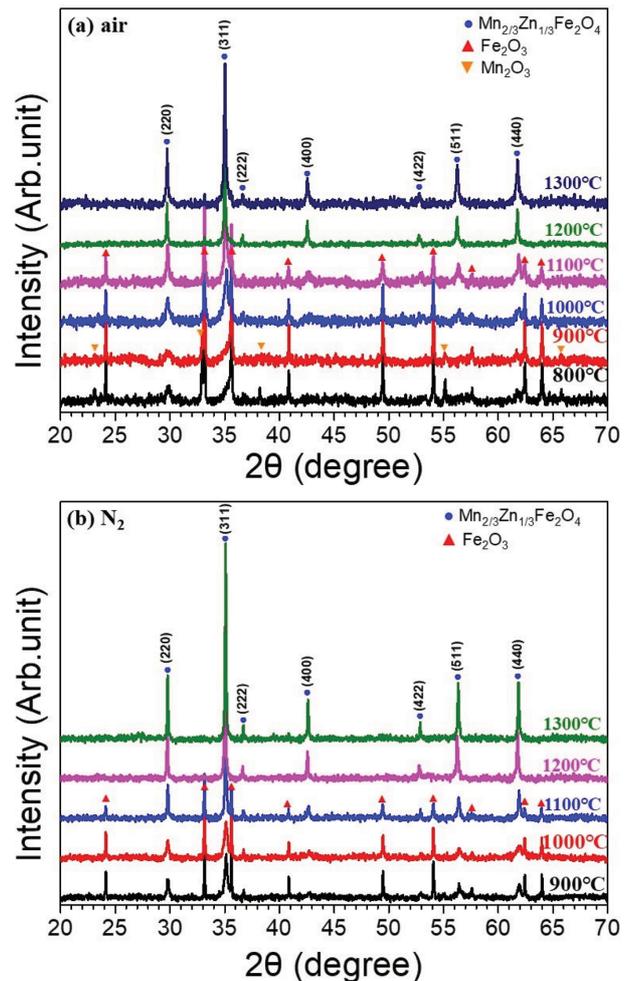


Fig. 1. (Color online) XRD patterns of $Mn_{2/3}Zn_{1/3}Fe_2O_4$ samples sintered at 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300 °C in air (a) and those sintered at 900, 1000, 1100, 1200, 1300 °C in nitrogen (b).

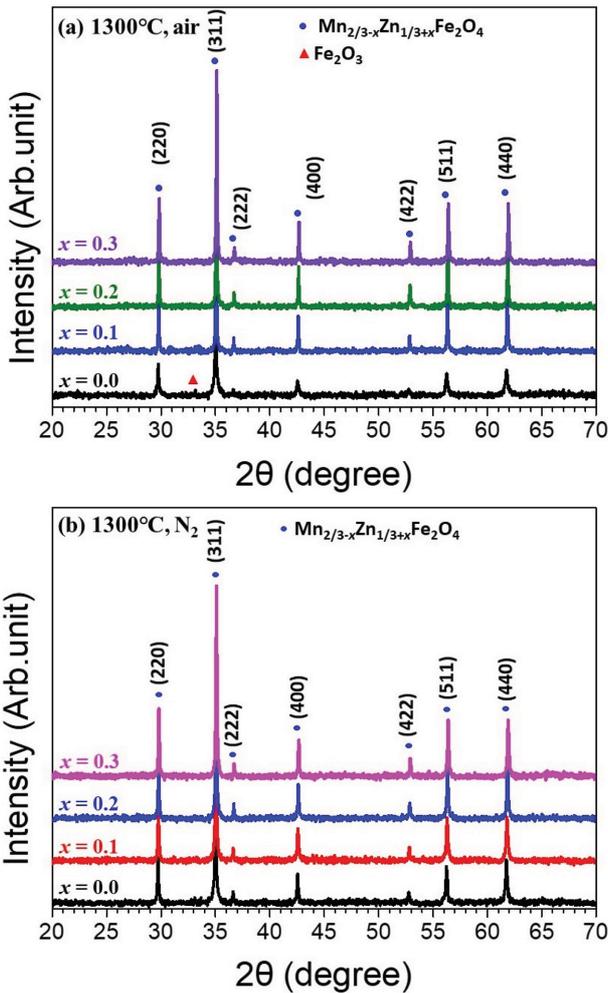


Fig. 2. (Color online) XRD patterns of $Mn_{2/3-x}Zn_{1/3+x}Fe_2O_4$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$) samples sintered at 1300 °C in air (a) and in nitrogen (b).

하소한 분말의 XRD 패턴을 보여준다. 여기서도 마찬가지로 1200 °C부터 단상의 spinel ferrite가 얻어 짐을 알 수 있다. Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)는 1300 °C의 공기와 질소 분위기에서 각각 소결한 $Mn_{2/3-x}Zn_{1/3+x}Fe_2O_4$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$) 시료의 조성 따른 XRD 회절 패턴을 보여준다. 1300 °C 공기 분위기에서 소결한($x = 0$) 시료에서 극소량에 해당하는 Fe_2O_3 상의 peak이 확인되는 것을 제외하고 모든 시료들은 단일 spinel 상의 패턴이 확인 된다. 1300 °C 질소 분위기에서 소결한 $Mn_{2/3-x}Zn_{1/3+x}Fe_2O_4$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$) 시료에서는 x 의 변화에 상관 없이 모두 단일 spinel 상의 패턴을 보였다. x 에 따른 격자 상수 및 단위 셀의 부피 변화를 Table I에 제시하였고, 격자 상수(a)의 변화를 Fig. 3에 plot하였다. 공기 및 질소 분위기에서 소결한 경우 모두 a 는 x 에 따라 순차적으로 감소한다. 이는 Zn^{2+} 이온 반경(0.82 Å)이 Mn^{2+} 이온 반경(0.91 Å)보다 작기 때문이다[13]. 격자 상수의 변화로 볼 때 두 분위기 조건 모두에서 Zn의 치환이 잘 이루어져 있음

Table I. lattice parameter (a), lattice volume (vol.) of $Mn_{2/3-x}Zn_{1/3+x}Fe_2O_4$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$) sample sintered at 1300 °C in air and in nitrogen.

Atm.	x	a (Å)	vol. (Å ³)
Air	0	8.4873	611.370
	0.1	8.4787	609.525
	0.2	8.4726	608.212
	0.3	8.4650	606.575
N ₂	0	8.4916	612.296
	0.1	8.4836	610.581
	0.2	8.4787	609.525
	0.3	8.4693	607.491

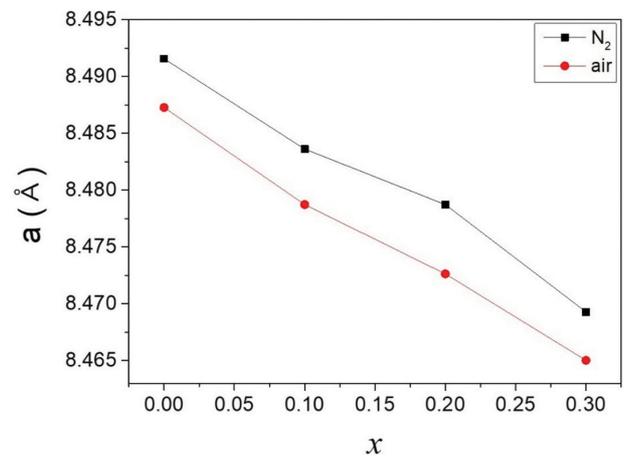


Fig. 3. (Color online) Plots of lattice parameter (a) vs. x for $Mn_{2/3-x}Zn_{1/3+x}Fe_2O_4$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$) samples sintered at 1300 °C in air and in nitrogen.

을 알 수 있다. 또한 각 조성에서 질소 분위기 소결 시료가 공기 분위기 소결 시료에 비해 미미한 정도로(~0.06%) 격자 상수가 큰 것으로 확인된다.

Fig. 4(a)~4(l)는 $Mn_{2/3-x}Zn_{1/3+x}Fe_2O_4$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$) 을 1200 °C(a~d), 1250 °C(e~h), 1300 °C(i~l) 질소분위기에서 각각 2시간 동안 소결한 시료들의 파단면의 전자현미경 사진이다. 모든 시료에서 결정립의 날카로운 면(facet)들이 확인되어 결정상이 잘 형성되었음을 알 수 있다. 결정립의 크기는 Zn 함량(x)의 증가에 따라 대체로 소폭 감소하는 경향을 보이고 있으나 뚜렷한 경향성은 보이지 않는다. 동일 조성 조건에서는 소결 온도가 1200 °C에서 1300 °C로 상승했을 때 결정립 크기가 증가함을 알 수 있다. 여기서 제시한 사진 상으로는 잘 나타나지 않지만 1250 °C 이상에서 소결한 경우 모든 조성의 시료들에서 수 십~수 백 μm 크기로 비정상 입 성장(abnormal grain growth)한 결정립들이 포함되어 있었다.

Fig. 5(a)~5(d)에서는 질소 분위기에서 1200 °C, 1250 °C 및 1300 °C에서 그리고 공기 분위기 1300 °C에서 toroidal 형태로 소결한 시료에 대한 자기이력곡선(B-H loop)을, Fig.

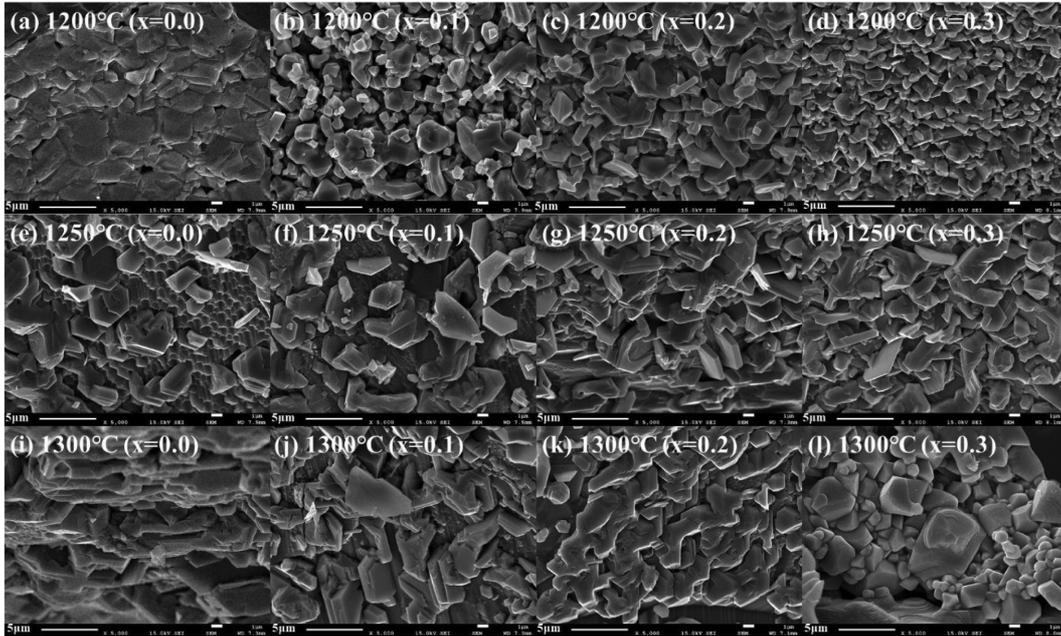


Fig. 4. Micrographs of $Mn_{2/3-x}Zn_{1/3+x}Fe_2O_4$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$) samples sintered in nitrogen at 1200 °C (a-d) 1250 °C (e-h) and 1300 °C (i-l).

5(e)~Fig. 5(h)에서는 같은 시료들의 초기자기곡선(initial B-H curve)을 나타내었다. 1200 °C, 1250 °C 질소 분위기와 1300 °C 산소 분위기에서 소결한 경우 x 의 증가에 따라 자속밀도 ($B_{H=30 Oe}$)가 순차적으로 감소하나 1300 °C 질소 분위기에서 소결한 경우 공기중 소결 시료에 비해 자속밀도 값이 감소함과 동시에 $x = 0.1$ 시료에서 가장 높은 $B_{H=30 Oe}$ 값을 보인다. 소결 온도와 분위기에 상관 없이 $x = 0.3$ 조성의 시료는

자성 특성을 거의 띄지 않는 것으로 보인다. XRD 패턴 상에서 확인된 바 결정구조 변화 없이 x 에 따른 자기적 특성의 변화를 보이는 것은 자성을 띄지 않는 Zn가 자성원소인 Mn을 치환해 감에 따라 단위 셀의 총 자기모멘트가 변화하기 때문이며, 공정 온도와 분위기에 따라 자기적 특성이 변화하는 것은 Fe나 Mn과 같은 자성 원소들의 원자가 변화가 주요인으로 추정된다. 1300 °C의 동일한 온도 조건에서 공기보

Table II. Sintering density (ρ), magnetic flux density at $H = 30 Oe$ ($B_{H=30 Oe}$), coercivity (H_c), maximum permeability (μ_{max}) in B-H curves, real part of permeability at low frequency range of $< 100 kHz$ (μ'_s), maximum imaginary part of permeability (μ''_{max}), frequency at μ''_{max} ($f_{\mu''max}$), and resistivity (ρ) of $Mn_{2/3-x}Zn_{1/3+x}Fe_2O_4$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$) samples sintered in nitrogen (1200, 1250, 1300 °C) and in air (1300 °C).

Atm.	T (°C)	x	ρ (g/cm ³)	$B_{H=30 Oe}$ (G)	H_c (Oe)	μ_{max}	μ'_s	μ''_{max}	$f_{\mu''max}$ (MHz)	ρ (MΩcm)
N ₂	1200	0.0	5.01	3698	0.2853	4912	335	123	9.653	-
		0.1	5.07	2955	0.2688	3671	272	99	9.960	-
		0.2	4.91	1294	1.3619	203	91	30	11.010	-
		0.3	4.95	187	-	35	4	-	-	-
N ₂	1250	0.0	4.99	3712	0.253	4951	264	84	10.617	-
		0.1	4.98	3184	0.166	8896	480	182	5.105	-
		0.2	5.04	1741	0.0813	1826	268	95	7.412	-
		0.3	5.05	123	-	30	2	-	-	-
N ₂	1300	0.0	4.85	2261	0.464	857	321	146	6.456	0.0425
		0.1	4.81	2693	0.242	4511	482	170	2.818	0.0794
		0.2	4.92	1455	0.0899	1975	849	238	1.189	6.91
		0.3	5.01	189	-	65	28	-	-	10.7
Air	1300	0.0	4.88	2309	0.482	847	208	39	6.388	5.54
		0.1	4.90	1989	0.344	894	229	45	60.95	35.5
		0.2	5.05	607	-	121	122	11	124.1	13.9
		0.3	4.86	154	-	77	3	-	-	45.5

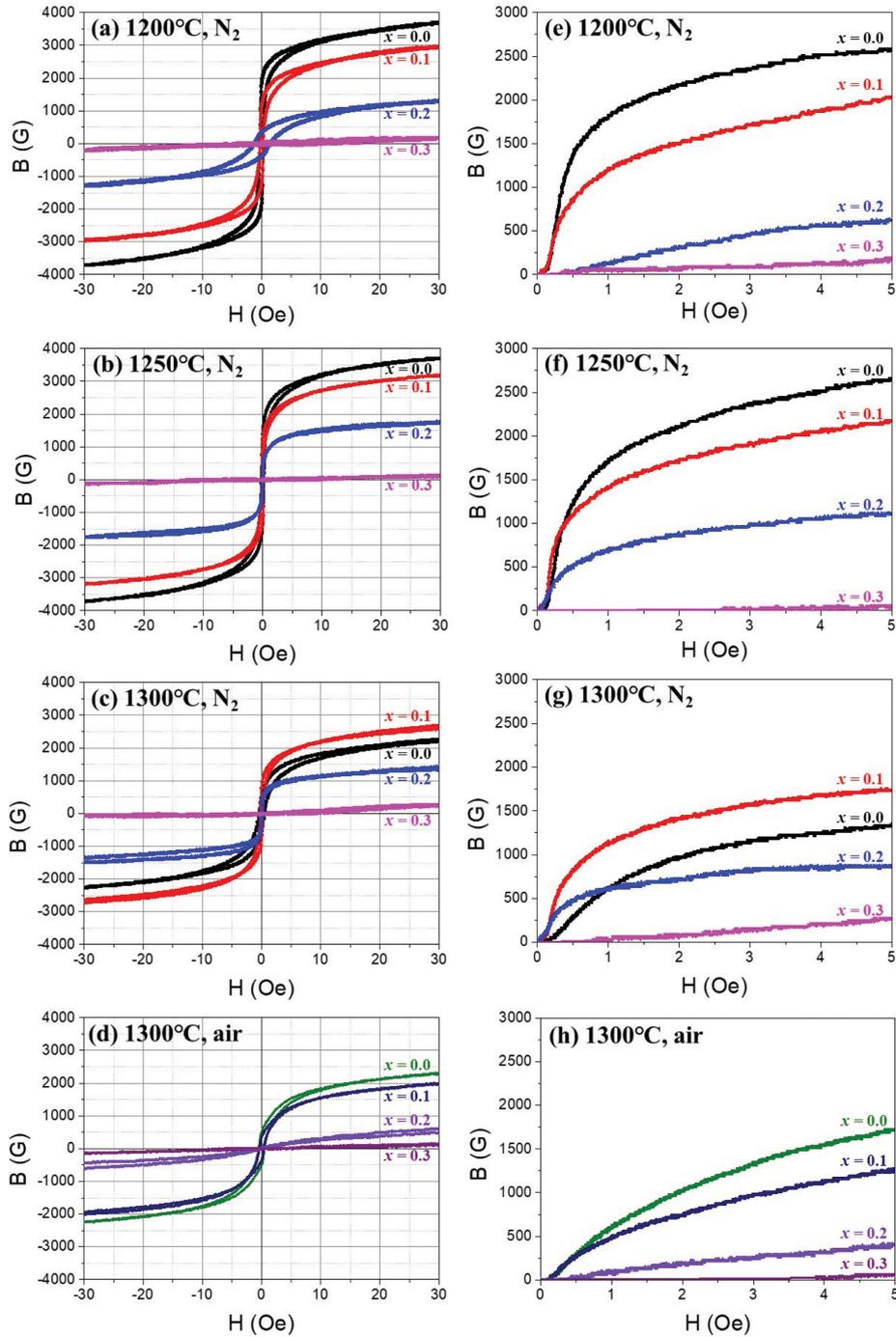


Fig. 5. (Color online) B-H loops and initial B-H curves of $Mn_{2/3-x}Zn_{1/3+x}Fe_2O_4$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$) samples sintered in nitrogen at 1200 °C (a, e) 1250 °C (b, f), 1300 °C (c, g) and those sintered in air at 1300 °C (d, h).

다 질소 분위기에서 소결 시 더 높은 자속밀도 값이 얻어진다. XRD 상에서 도출한 격자상수의 x 에 따른 변화 그래프 (Fig. 3)로부터 질소 분위기 소결한 시료의 격자 상수가 미미하게나마 더 큰 값을 갖는 것을 알 수 있는데, 이는 환원 분위기에서 양이온들의 원자가 감소에 따른 이온 반경의 증가 때문으로 추정할 수 있다. 초기 자화 곡선의 미분 값으로부터

도출한 투자율 $\mu = dB/dH$ 의 최대값(μ_{max})을 포함하여 인가자장 $H = 30$ Oe에서의 자속밀도($B_{H=30\text{Oe}}$)와 보자력(H_C) 값들을 Table II에 정리하였다. 본 연구에서는 질소 분위기 1250 °C에서 소결한 $x=0$ 시료에서 가장 높은 $B_{H=30\text{Oe}} = 3712$ G를 얻었고, 질소 분위기 1250 °C에서 소결한 $x=0.1$ 시료에서 가장 높은 $\mu_{max} = 8896$ 를 얻었다. H_C 값은 질소 보다 공기

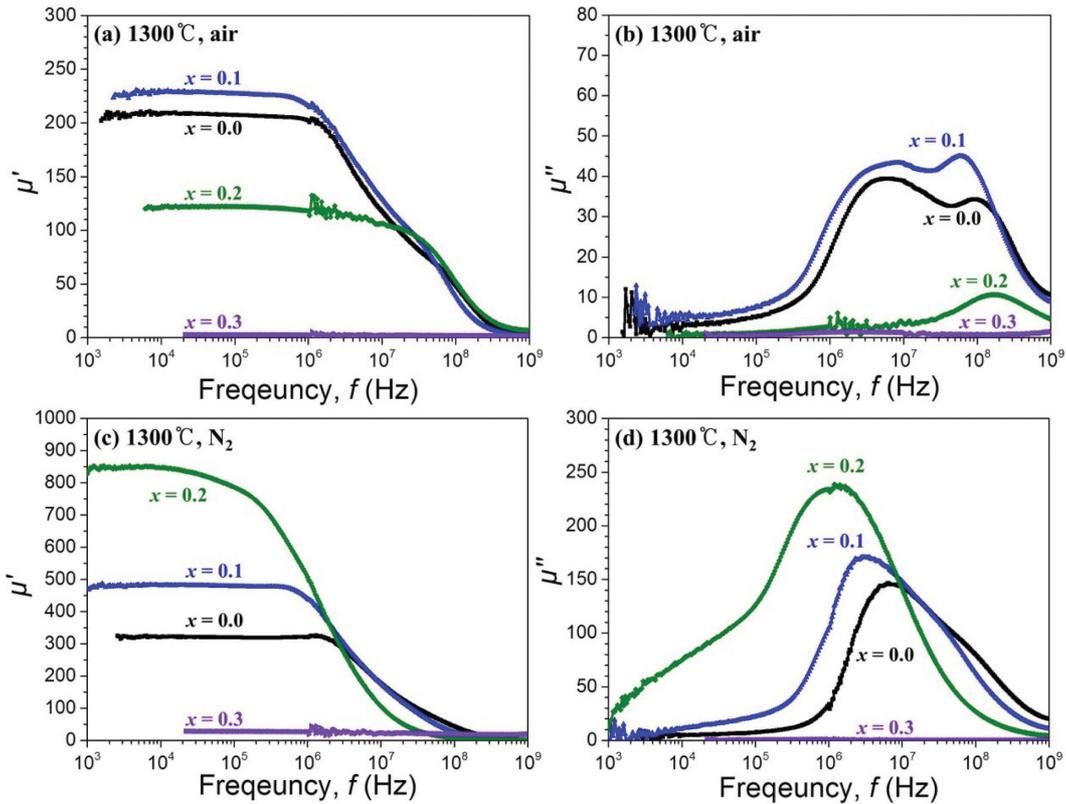


Fig. 6. (Color online) Real and imaginary part permeability of $Mn_{2/3-x}Zn_{1/3+x}Fe_2O_4$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$) sintered at $1300\text{ }^\circ\text{C}$ in nitrogen (a, b) and at $1300\text{ }^\circ\text{C}$ in air (c, d).

분위기 중에서 소결한 시료들에서, 그리고 $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 의 낮은 소결 온도에서 상대적으로 더 큰 값이 얻어짐을 알 수 있다.

Fig. 6(a)~6(d)는 공기 및 질소 분위기 $1300\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 소결한 $Mn_{2/3-x}Zn_{1/3+x}Fe_2O_4$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$) 시료들의 주파수 (수 kHz~1 GHz)에 따른 투자율의 실수부(μ')와 허수부(μ'') 스펙트럼을 보여준다. 저주파 대역(< 100 kHz) 직선 구간의 μ' 값(μ'_s), 허수부 투자율의 최대값(μ''_{max})과 그 때의 주파수 ($f_{\mu'' max}$), 그리고 전기비저항(ρ) 값을 Table II에 제시하였다. 전체적인 복소투자율 spectra를 보면 질소 분위기에 소결했을 때의 μ' 및 μ'' 가 동일 조성의 공기 중 소결 시료보다 저주파 대역에서 훨씬 더 큰 값을 갖는다. 소결 분위기에 상관없이 B-H 곡선에서 자성 특성을 거의 갖지 않는 $x = 0.3$ 시료는 μ' 및 μ'' 가 다른 시료들에 비해 매우 낮은 값을 보인다. 조성에 따라서는 공기 중 소결 시료의 경우 $x = 0.1$ 시료가 저주파 대역에서 가장 높은 값의 μ' 및 μ'' spectra를 보이며 $\mu'_s = 229$ 를 갖는 반면, 질소 분위기 소결 시료는 $x = 0.2$ 에서 가장 높은 μ' 및 μ'' spectra를 보이며 $\mu'_s = 849$ 를 갖는다. 복소투자율의 spectra 곡선은 Snoek's law[14,15]를 따라 μ'_s 가 작을수록 $f_{\mu'' max}$ 는 증가함을 보인다. Mn-Zn ferrite에서 복소투자율에 기여하는 주요 기구(mechanism)들은 자벽(magnetic domain wall)의 진동 운동과 스핀(spin)의 회전

운동을 들 수 있는데[8], 질소 분위기 소결 시료들이 저주파 대역에서 큰 투자율(μ' 및 μ'') 값을 갖는 이유는 자벽의 진동 운동이 공기 분위기 소결 시료들 보다 용이하기 때문으로 해석할 수 있다. 같은 맥락에서 μ'' spectra는 자벽과 스핀, 두 기구의 중복된 damping 작용에 의한 것으로 해석할 수 있다[8]. 여기서 자기적 에너지를 흡수하여 μ'' 의 증가에 기여하는 두 기구의 흡수 주파수 대역이 다른데, 보다 미시적 기구인 스핀 운동의 공진 주파수가 자벽 진동의 공진 주파수 보다 높은 것으로 알려져 있다. 질소 분위기 소결 시료들은 두 흡수 기구의 주파수 대역이 적절히 겹치면서 하나의 μ'' peak을 갖는 spectra를 보인다. 한편 μ'_s 값이 크게 낮은 공기 중 소결 시료 $x = 0$ 과 $x = 0.1$ 에서는 스핀 공진 주파수가 Snoek's law를 따라 고주파 쪽으로 증가하여 peak 분리에 의해 쌍봉(double peak)으로 나타나고 있다(Fig. 6(b)). $x = 0$ 시료의 것과 비교했을 때 $x = 0.1$ 시료에서는 오른쪽 peak(스핀 공진 주파수)의 높이가 왼쪽 peak(자벽 진동 주파수) 보다 상대적으로 더 높은 데 이는 자벽 진동에 의한 흡수 보다 스핀 공진에 의한 흡수가 상대적으로 더 큰 것으로 해석할 수 있다. 같은 맥락에서 $x = 0.2$ 시료에서는 자벽의 진동 운동에 의한 μ'' 값 기여는 거의 없고 주로 스핀 공진에 의해 고주파에서 자기적 에너지를 흡수하고 있음을 알 수 있다. 이러

한 측면의 이해를 바탕으로 저주파 대역에서 투자율의 실수부(μ')를 획기적으로 증가시키기 위해서는 자기장 변화에 따라 자벽의 진동 운동을 용이하게 하는 구조적, 조성적 특성 최적화가 필요할 것으로 판단된다. 시료의 비저항(ρ)(Table II)은 조성(x)과 소결 분위기에 따라 크게 달라지고 있다. 같은 조성에서 본다면 공기 분위기에 소결 시료가 질소 분위기 소결 시료보다 더 높은 비저항 값을 보이는데 이는 앞서 언급한 바와 같이 환원 분위기에서 일부 양이온(Fe 및 Mn)의 원자가 전자가 감소하면서 다원자기를 갖는 원자들 간의(Fe^{3+}/Fe^{2+}) electron hopping에 의한 전기전도가 발생하기 때문으로 이해할 수 있다.

IV. 결 론

$Mn_{2/3-x}Zn_{1/3+x}Fe_2O_4$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$)를 일반적인 고상 반응법으로 합성하여 Zn 치환 조성(x), 소결 온도 및 분위기에 따른 자기적 특성의 변화를 연구하였다. 공기 및 질소 분위기 공통적으로 1200 °C 이상의 온도에서 소결하였을 때 Zn가 Mn 자리에 잘 치환된 단일 spinel 상이 합성되었다. B-H 측정과 복소투자율 측정을 통해 평가한 자기적 특성은 Zn의 치환량과 소결 온도 및 분위기에 매우 민감하게 변화하였다. 인덕터의 코어 특성과 관련된 dc 투자율의 최대값은 $x = 0.1$ 조성의 시료를 1250 °C, 질소 분위기에서 소결하였을 때 $dB/dH = 8896$ 로 얻어졌다. 복소투자율 값은 공기 중보다 질소 분위기에서 소결하였을 때 훨씬 더 큰 값을 보였다. 이는 환원 분위기에서 양이온의 원자가 변화 등이 특성 변화에 주요한 요인으로 작용했을 것으로 판단된다. 초투자율(dB/dH at $H = 0$)의 주파수 특성을 평가하는 복소투자율 측정에서 보다 높은 실수부 투자율을 얻기 위해서는 정밀한 소결 온도 및 분위기 제어를 통해 자벽의 진동 운동을 용이하게 하는 미세 구조 및 조성의 최적화가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017R1C1B2002394).

References

- [1] F. G. Brockman and K. E. Matteson, *J. Am. Ceram. Soc.* **53**, 517 (1970).
- [2] H. Igarashi and K. Okazaki, *J. Am. Ceram. Soc.* **60**, 51 (1977).
- [3] G. G. Bush, *J. Appl. Phys.* **63**, 3765 (1988).
- [4] J. Lee, Y. Hong, W. Lee, and J. Park, *J. Magn.* **18**, 428 (2013).
- [5] S. An, I. Kim, S. Son, S. Song, and J. Han, *J. Korean Magn. Soc.* **20**, 182 (2010).
- [6] J. Smit and H. P. J. Wijn, *Ferrites*, Philips' Technical Library, Eindhoven, Netherlands (1959), pp. 136-176.
- [7] S. Chikazumi, *Physics of ferromagnetism* (2nd Ed.) Clarendon Press, Oxford (1997), pp. 197-221.
- [8] T. Tsutaoka, *J. Appl. Phys.* **93**, 2789 (2003).
- [9] Z. Kryszicki and T. Lubanska, *J. Magn. Magn. Mater.* **19**, 107 (1980).
- [10] K. Jalaiah and K. V. Babu, *J. Magn. Magn. Mater.* **423**, 275 (2017).
- [11] J. Kalarus, G. Kogias, D. Holz, and V. T. Zaspalis, *J. Magn. Magn. Mater.* **324**, 2788 (2012).
- [12] K. R. Mun and Y. M. Kang, *J. Korean Magn. Soc.* **28**, 1 (2018).
- [13] L. M. Levinson, *Electronic Ceramics: Properties: Devices, and Applications*, Marcel Dekker, Inc. New York (1988), p. 156.
- [14] J. L. Snoek, *Physica (Amsterdam)* **4**, 207 (1948).
- [15] T. Nakamura, *J. Appl. Phys.* **88**, 348 (2000).