Microwave Properties of Co₂ Ferrite for Miniaturization of Antenna

김 재 식[†] · 최 의 선^{*} · 김 강^{**} · 이 영 희^{***} · 송 성 호[§] · 안 종 복^{§§} · 김 병 환^{§§§} · 최 지 영[#]
 (Jae-Sik Kim · Eui-Sun Choi · Kang Kim · Young-Hie Lee · Sung-Ho Song ·
 Jong-Bok Ahn · Byung-Hwan Kim · Ji-Young Choi)

Abstract - The sintering behavior and microwave properties of ferrite (Ba₃Co_{2-2x}Zn_{2x}Fe₂₄O₄₁ ceramics) were investigated for microwave applications. Also PIFA type antenna with ferrite was simulated. All samples were prepared by the solid state reaction method and sintered at 1350°C. All ceramics had relatively density above of 92% compare with theoretical density of Ba₃Co₂Fe₂₄O₄₁ ceramics. From the XRD patters, the Z-type phase was existed as main phase in Ba₃Co_{2-2x}Zn_{2x}Fe₂₄O₄₁ ceramics. The permittivity and permeability of Ba₃Co_{2-2x}Zn_{2x}Fe₂₄O₄₁ ceramics were increased with Zn additions and decreased rapidly over frequency of 200~600 MHz. Several PIFA type antennas with ferrite and FR4 were simulated. All antenna structure had return loss of less than -10 dB at each resonant frequency. Simulated antenna using both ferrite and FR4 showed size reduction of 25% without a significant decrement of efficiency.

Key Words : Ferrite, Permittivity, Permeability, Miniaturization of antenna

1. 서 론

최근 이동통신 (Mobile Communication) 및 정보기술 (Information Technology)의 비약적인 발전에 따라 정보의 생산과 전달, 보존을 위한 전자기기인 휴대폰이나 노트북 등의 사용이 증가되면서 기기의 소형화 및 사용주파수의 고주파화가 진행되고 있다. 이러한 전자기기의 핵심부품인 안테나 역시 사용이 증가되면서 그 영역을 확장하고 있을 뿐만 아니라 사용주파수 대역을 확장함과 동시에 안테나의 소형화, 고주파화가 요구되고 있으며 소형안테나, 광대역 안테나 등이 안테나 기술의 새로운 연구 분야로 떠오르고 있다[1]. 회로 설계 개발에 의한 안테나 개발은 특정 대역에서 구조적인 문제를 해결한 것일 뿐 꾸준히 요구되는 안테나 소형화의 근본적인 해결책이 되지 못하고 있다. 안테나와 같은 RF 부품들의 크기는 동작 주파수에서의 파장 길이에 의존한다. 이와 같이 파장 길이에 의존하는 안테나의 소형화를 위하여 다양한 방법이 오랫동안 시도되어 왔으며, 이 중

가장 일반적인 방법은 파장의 길이를 줄일 수 있는 높은 유전율을 갖는 유전체 기판을 이용하는 것이다[2]. 그러나 이는 기판의 높은 유전율로 인하여 안테나로 전달되는 에너지가 유전체 내에 갇히는 경향이 있어 패치 안테나의 적용에 있어서 임피던스 대역폭이나 효율을 감소시키는 현상을 나타낸다[3]. 또한 최근에 이용되고 있는 폴리머 역시 대역폭 문제로 인하여 고주파용 안테나 기판으로의 사용이 불가능하다. 이를 극복하기 위한 방법으로 페라이트와 같은 자성-유전 재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 자성-유전 재료를 기판으로 사용한 안테나의 전기적 파장 길이, 크기, 대역폭 등은 유전율(ϵ)과 투자율(μ)에 관련되어 있다[4].

$$\lambda_g \approx \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad BW \approx \frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

여기서 λ , λ_g 와 BW는 각각 자유공간 및 안테나에서의 파장과 대역폭 (Bandwidth) 이다. 식 (1)에서 높은 유전율 또는 높은 투자율은 소자의 크기를 줄이는데 유용함을 알 수 있다. 그러나 높은 유전율과 높은 투자율은 각각 대역폭의 감소나 탄젠트 손실의 증가를 가져오기 때문에 유전율과 투자율 중 어느 하나만 큰 값을 가지는 재료는 효과적이지 못하다. 반면 비교적 높고 서로 비슷한 값의 유전율과 투자율을 가진 자성-유전 재료를 사용하면 대역폭의 감소 없이 소자의 크기를 줄일 수 있게 된다.

이를 가능하게 하는 기능성 재료로 페라이트가 주목받고 있다. 현재 대표적인 RF 부품용 연자성 재료는 NiZn 페라이트가 주로 사용되고 있다. 그러나 NiZn 페라이트와 같은 스핀넬 페라이트는 Snoek의 제한에 의해 사용 가능 주파수가 제한되어 있어 고주파 대역에서는 사용이 불가능하다[5].

† 교신저자, 정회원 : 광운대 전자재료공학과 박사
 E-mail : kiee@kiee.or.kr

* 정 회 원 : 광운대 전자재료공학과 박사

** 정 회 원 : 한국폴리텍III대학 춘천캠퍼스 전자과 교수

*** 펠로우회원 : 광운대 전자재료공학과 교수

§ 정 회 원 : 한국폴리텍IV대학 청주캠퍼스 전기에너지과 교수

§§ 정 회 원 : 한국폴리텍IV대학 청주캠퍼스 전자과 교수

§§§ 정 회 원 : 한국폴리텍II대학 인천캠퍼스 컴퓨터정보과 교수

정 회 원 : 한국폴리텍I대학 서울정수캠퍼스 유비쿼터스 통신과 교수

접수일자 : 2011년 7월 20일

최종완료 : 2011년 11월 9일

반면 육방정계 구조를 가지는 Ba 페라이트는 Snoek의 제한을 뛰어넘어 수백 MHz 대역까지 사용이 가능한 것으로 보고되고 있다[6].

본 논문에서는 소형안테나 재료로서 응용이 가능한 페라이트 조성을 개발하기 위하여 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스를 제조하여 조성 및 주파수에 따른 마이크로파 특성을 조사하였다. 또한 안테나로의 응용 가능성을 고찰하기 위하여 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스 중 우수한 마이크로파 특성을 나타내는 조성을 선택하여 PIFA (Planar Inverted-F Antenna) 형태의 안테나를 설계, 모의실험 하여 주파수 특성을 고찰하였다.

2. 실험방법

본 실험에서는 일반적인 고상반응법을 사용하여 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스를 제조하였다. 출발물질로 높은 순도로 정제된 BaCO_3 , CoO , ZnO , Fe_2O_3 를 사용하였다. 출발물질들을 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 의 화학식량에 맞게 평량한 후, 알코올을 분산매로 사용하여 지르코니아볼로 24시간 동안 혼합 분쇄하였다. 혼합 분쇄한 분말을 100°C 전기오븐에서 충분히 건조한 후, 알루미늄 도가니에 넣어 1000°C 에서 3시간 동안 하소하였다. 하소한 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 분말을 도넛형 금형에 넣고 단축 성형하였다. 성형한 시편을 전기로에 넣고 1350°C 의 온도에서 3시간 동안 소결하였다. 하소 및 소결 시 전기로의 온도 상승률은 $5^\circ\text{C}/\text{min.}$ 으로 하였다.

하소온도 및 소결온도에 따른 결정구조의 변화 및 고용체 형성과정을 고찰하기 위하여 X-선 회절분석을 하였다. X-선은 $\text{CuK}\alpha_1$ ($\lambda=1.542\text{\AA}$)을 사용하였으며, 스텝폭과 주사속도는 각각 0.1° 와 $2^\circ/\text{min.}$ 으로 하였다. 시편의 소결상태를 알아보기 위하여 아르키메데스 법을 이용하여 소결밀도를 측정하였고, 전자현미경으로 미세구조를 분석하였다. 소결된 시편의 마이크로파 특성은 유전율과 투자율을 동시에 측정할 수 있는 동축선로법을 사용하여 측정하였다[7]. 마이크로파 특성을 확인하기 위하여 HPE5071B 네트워크 분석기를 사용하였다.

안테나 소형화에 대한 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 영향을 조사하기 위하여 3D 전자기파해석 툴인 Computer Simulation Technology 2010 (CST2010)를 이용하여 PIFA 형태의 안테나를 설계, 모의실험 하였다.

3. 결과 및 고찰

1350°C 에서 소결한 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 X-선 회절패턴을 그림 1에 나타내었다. 1000°C 에서 하소한 파우더는 Z-, Y- 그리고 W-형 상이 공존하였다. 이는 Z-형 상의 결정구조가 매우 복잡하기 때문에 하소과정에서 단일상을 형성하기 어렵기 때문으로 생각한다. 소결이 진행됨에 따라 Y-형 상과 W-형 상의 회절강도는 감소하였고 모든 조성에서 Z-형 상이 주상으로 나타났다. 이는 1350°C 의 소결온도에서 Z-형 상이 충분히 성장되었고, Y-형 상과 W-형 상이 결합하여 Z-형 상으로 형성되기 때문으로 생각한다. Zn의 첨가에 따라 시편의 회절패턴은 큰 변화를 나타내지 않았다. 이는 0.133 nm 의 원자반경을 가지는 Zn이 0.125

nm의 원자반경을 가지는 Co 자리에 치환되더라도 세라믹스의 소결성 및 결정구조에는 큰 영향을 미치지 않기 때문으로 생각한다.

그림 1 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 X-선 회절 패턴.
Fig. 1 XRD patterns of the $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ ceramics.

(a) $x=0.1$

(b) $x=0.2$

(c) $x=0.3$

(d) $x=0.4$

(e) $x=0.5$

그림 2 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 미세구조.
Fig. 2 SEM images of the $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ ceramics.

그림 2에 1350℃에서 소결한 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 미세구조를 나타내었다. 모든 조성에서 기공이 없는 치밀한 미세구조를 나타내었다. 이는 충분한 열에너지의 공급으로 결정립의 성장이 촉진되었기 때문으로 생각한다. 또한 복잡한 결정구조를 가지는 육방정계의 Z-형 상이 원활히 형성되어 직사각형 모양의 결정립을 나타내었다.

소결온도에 따른 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 소결밀도를 그림 3에 나타내었다. 모든 조성에서 1350℃의 소결온도에서 최대값을 나타내었다. 이 현상은 XRD 패턴 (그림 1)과 미세구조 결과 (그림 2)에서 알 수 있듯이 1350℃의 온도에서 치밀화가 증진되어 결정립이 성장하고 기공이 감소하였기 때문으로 생각한다. 1350℃에서 소결된 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스는 $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 이론밀도에 (5.356 g/cm^3) 비하여 약 92%의 상대밀도를 나타내었다. Co자리에 분자량이 다른 Zn을 치환하였기 때문에 $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스에 대한 상대밀도는 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 소결성을 판단하는 직접적인 요인이 되기 어렵다. 그러나 X-선 회절 분석 결과로부터 Zn의 치환에 따른 결정구조의 큰 변화가 나타나지 않았음을 확인할 수 있기 때문에 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스가 충분히 소결되었다고 생각한다.

그림 3 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 소결밀도.
Fig. 3 Bulk densities of the $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ ceramics.

1350℃에서 소결한 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 주파수에 따른 유전율을 그림 4에 나타내었다. 주파수가 증가함에 따라 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 유전율은 감소하였다. 이는 다른 세라믹스의 경우에서와 마찬가지로 주파수 증가에 따라 유전분산이 증가하기 때문으로 생각한다. Zn의 첨가량이 증가함에 따라 유전율은 증가하였다. 그림 2의 미세구조에서 알 수 있듯이 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스는 1350℃의 소결온도에서 모두 치밀한 구조를 나타내었다. 따라서 조성에 따른 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 유전율 증가는 기공 감소에 의한 것이 아니라 치환되는 Zn의 영향 때문으로 생각한다.

그림 5에 조성 및 주파수에 따른 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 투자율을 나타내었다. $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 투자율은 주파수가 증가함에 따라 감소하였다. 이는 주파수가 증가함에 따라 자성 분산이 증가하기 때문으로 생각한다. 투자율이 급격히 감소하는 주파수 대역은 조성에 따라 약 200~400 MHz 대역으로 나타났으며, 이 주파수 대

역이 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 자기공진주파수 대역으로 생각된다. Zn을 첨가함에 따라 투자율이 약간 증가하였다. 이는 Zn과 Co의 자성모멘트의 차이로 ($\text{Zn} : 0.875 \mu/\mu\text{N}$, $\text{Co} : 4.627 \mu/\mu\text{N}$) 인하여 결정구조 내의 강자성 이온들 간의 서로 상쇄되는 스핀 양을 줄임으로써 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 자기 모멘트에 영향을 주기 때문으로 생각한다[8].

그림 4 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 유전율.
Fig. 4 Permittivities of the $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ ceramics.

그림 5 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 투자율.
Fig. 5 Permeabilities of the $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ ceramics.

식 (1)에서 안테나의 소형화와 넓은 대역폭을 위하여 사용되는 재료의 투자율은 클수록 유리하다. 본 실험을 통하여 $x=0.5$ 의 조성에서 가장 큰 투자율을 나타내었다. 하지만 $x=0.5$ 에서 자기공진주파수는 약 200 MHz이다. 일반적으로 자기공진주파수 이상의 대역에서는 투자특성이 급격히 나빠지기 때문에 $x=0.5$ 의 조성을 안테나에 적용한다면 고주파에서 좋은 안테나 특성을 기대하기 힘들 것으로 생각한다. 따라서 페라이트를 적용시킨 안테나의 소형화 가능성을 고찰하기 위하여 $\text{Ba}_3\text{Co}_{1.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스 ($x=0.2$) 선택하여 모의실험을 진행하였다. $\text{Ba}_3\text{Co}_{1.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 유전율과 투자율은 410 MHz에서 각각 16.593과 16.356이었다.

페라이트를 적용시킨 안테나의 소형화 가능성을 고찰하기 위하여 PIFA 형태의 안테나를 설계하여 모의실험을 진행하

였다. 설계된 안테나의 접지면의 크기는 $90 \times 50 \times 1 \text{ mm}^3$ 이며, 안테나의 크기는 $10 \times 50 \times 3 \text{ mm}^3$ 이다. 안테나의 구조를 FR4, 페라이트, 페라이트+FR4의 3가지 구조로 설계하였으며 안테나 구조를 그림 6에 나타내었다. 이때 사용된 FR4의 유전율과 투자율은 각각 4.4와 1이다.

모의실험한 안테나 구조들의 반사손실특성을 그림 7에 나타내었다. FR4대신 페라이트를 사용함으로써 같은 안테나 크기에서 공진주파수가 200 MHz정도 감소하였다. FR4와 페라이트를 같이 사용한 구조의 공진주파수도 약 650 MHz로 페라이트를 사용함으로써 공진주파수가 감소하였다. 공진주파수의 감소로부터 페라이트를 사용함으로써 안테나의 크기를 소형화시킬 수 있을 것으로 생각한다. 또한 페라이트를 사용함으로써 반사손실이 증가하였다. 하지만 모든 구조에서 -10 dB 이하의 낮은 반사손실을 나타내었다. -10 dB의 반사손실은 정재파비 (Voltage Standing Wave Ratio, VSWR) 특성이 1:2 되는 지점으로, -10 dB 이하의 반사손실에서 안테나로 활용할 수 있다. 이상의 결과로 페라이트를 적용한 안테나는 크기의 소형화와 함께 안테나로 동작할

수 있을 것으로 생각한다.

표 1에 모의실험한 안테나의 특성을 나타내었다. FR4와 페라이트만을 사용하였을 경우, 대역폭과 효율은 각각 46 MHz, 70% 그리고 39 MHz, 17%를 나타내었다. FR4대신 페라이트를 사용함으로써 대역폭은 크게 감소하지 않았지만 효율이 크게 감소하였다. 페라이트 적용 시 나타나는 효율 감소를 보완하기 위하여 페라이트와 FR4를 같이 사용하여 안테나를 설계하였다 (그림 7-(c)). 이때 페라이트를 전계가 가장 강한 open단에 (b) 위치시킬 경우 효율은 26%로 크게 증가되지 않았다. FR4를 open단, 페라이트를 전계가 약한 급전부분(a)에 위치시킴으로 42%의 효율을 나타내었다.

그림 7-(d)에 안테나의 크기를 감소시키기 위하여 페라이트와 FR4를 이용하여 제안한 구조를 나타내었다. FR4만을 사용했을 경우와 비교하여 크기를 25% 감소시킬 수 있었다. 제안된 구조의 안테나는 44 MHz의 대역폭과 51%의 효율을 나타내었다. 페라이트와 FR4를 파트별로 나누어서 사용함으로써 안테나의 크기 감소와 함께 효율 감소를 억제할 수 있었다.

그림 6 페라이트를 적용한 PIFA 형태 안테나 구조.

Fig. 6 Structure of PIFA type antenna with $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ ceramics.

그림 7 모의실험한 PIFA 형태 안테나의 반사손실 특성.

Fig. 7 Return losses of simulated PIFA type antenna.

표 1 모의실험한 PIFA 형태 안테나의 안테나 특성

Table 1 Antenna properties of simulated PIFA type antenna.

구조	공진주파수	대역폭	효율
FR4	770 MHz	46 MHz (5.9%)	70%
Ferrite	541 MHz	39 MHz (7.2%)	17%
FR4 + Ferrite	629 MHz	31 MHz (4.9%)	26%
Ferrite + FR4	650 MHz	37 MHz (5.6%)	42%
Suggested structure	768 MHz	44 MHz (5.7%)	51%

본 연구를 통하여, 기본적인 Ba 페라이트에 Zn을 치환함으로써 비교적 높은 주파수 영역까지 유전율과 투자율을 유지하는 페라이트 조성을 개발할 수 있었다. 그 중 우수한 특성을 나타내는 조성을 안테나로 적용하여 모의실험한 결과 안테나 크기의 감소효과를 확인할 수 있었다. 이상의 결과로 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스는 안테나 재료로 응용가능 할 것으로 생각한다.

4. 결 론

본 연구에서는 조성 및 주파수에 따른 $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 구조적 특성과 마이크로파 특성을 조사하였다. 소결밀도는 1350℃의 소결온도에서 최대값을 나타내었다. X-선 회절분석 결과, 치밀화가 충분히 진행된 1350℃의 소결온도에서 Z-형 상의 단일상이 나타났다. 주파수가 증가함에 따라 유전율과 투자율은 일정한 값을 유지하다가 200~600 MHz 이상에서 급격히 감소하였다. 또한 Zn의 첨가량이 증가함에 따라 유전율과 투자율은 약간 증가하였다. 투자특성을 분석한 결과, $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-2x}\text{Zn}_{2x}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 자기공진 주파수는 약 200~400 MHz 대역인 것으로 확인하였다. 1350℃에서 소결된 $\text{Ba}_3\text{Co}_{1.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 세라믹스의 유전율과 투자율은 410 MHz에서 각각 16.593과 16.356이었다. 페라이트와 FR4를 파트별로 나누어 사용하여 설계한 안테나는 25%의 안테나 크기 감소와 함께 효율 감소를 억제하였다. 제안된 안테나 구조의 공진주파수, 대역폭, 효율은 각각 768 MHz, 44 MHz(5.7%), 51%였다.

참 고 문 헌

- [1] Y. M. M. Antar, Proceeding of the 20th National Radio Science conference, 2003.
- [2] Jae-Sik Kim, Eui-Sun Choi, Gi-Won Ryu, Young-Hie Lee, "Structural and Dielectric Properties of Magneto-Dielectrics for Antenna Application", International Conference on Electrical Engineering, 2009.

- [3] Yih-Chien Chen, Shi-Li Yao, Ren-Jie Tsai, Kuei-Chien Chen, "Investigation of the microwave dielectric properties of $\text{Ca}_{1-x}\text{Mg}_x\text{La}_4\text{Ti}_5\text{O}_{17}$ ceramics for application in coplanar patch antenna", Journal of Alloys and Compounds, Volume 486, Issues 1-2, pp.410~414, 2009.
- [4] R. C. Hansen and Mary Burke, Microwave and optical technology letters, Vol. 26, No. 2, pp.75~78, 2000.
- [5] Nakamura, T. Hatakeyama, K., "Complex permeability of polycrystalline hexagonal ferrites", IEEE Trans. Mag., Vol. 36, No. 5, pp.3415~3417, 2000.
- [6] T. Nakamura, Ferrites, pp.976~969, 2000.
- [7] L. F. Chen, C. K. Ong, C. P. Neo, V. V. Varadan and V. K. Varadan, "Microwave Electronics; Measurement and Materials Characterization", John Wiley & Sons, Ltd., pp.182~187, 2000.
- [8] 최준혁, "광대역 안테나용 $\text{Co}_2\text{-Z}$ type ferrite 합성에 관한연구", 석사학위논문, 한양대학교, pp.46, 2008.

저 자 소 개

김 재 식 (金 在 植)

2003년도 광운대 전자정보대 반도체및신소재공학과 졸업. 2004년도 광운대 대학원 전자재료공학과 석사. 2010년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(공학박)

Tel : 02-940-5164

E-mail : hulhaha@kw.ac.kr

최 의 선 (崔 儀 善)

1998년 서남대 공대 전자공학과 졸업. 2000년 광운대 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(공학박).

Tel : 02-940-5164

E-mail : sunsee@kw.ac.kr

김 강 (金 剛)

1984년 광운대 공대 전자재료공학과 졸업. 1986년 광운대 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 현재 한국폴리텍Ⅲ대학 춘천캠퍼스 전자과 교수.

Tel : 033-260-7686

E-mail : kkk@kopo.ac.kr

이 영 희 (李 永 熙)

1973년 연세대 공대 전기공학과 졸업.
1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박).

현재 광운대 공대 전자재료공학과 교수

Tel : 02-940-5164

Fax : 02-915-8084

E-mail : yhlee@kw.ac.kr

송 성 호 (宋 星 鎬)

1998년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국폴리텍IV대학 청주캠퍼스 전기에너지과 교수

Tel : 043-279-7457

Fax : 043-279-7409

E-mail : sosho@kopo.ac.kr

안 종 복 (安 鍾 福)

1989년 청주대 공대 전자과 졸업.
1995년 동아대 대학원 전자과 졸업(석사).
2000년 강원대 대학원 공학박사 수료.
현재 한국폴리텍IV대학 청주캠퍼스 전자과 교수

Tel : 043-279-7433

Fax : 043-479-7469

E-mail : aha@kopo.ac.kr

김 병 환 (金 炳 煥)

1986년 숭실대 전자계산학과 졸업. 1990년 명지대 대학원 정보처리학과 졸업(석사). 현재 한국폴리텍II대학 인천캠퍼스 컴퓨터정보과 교수.

Tel : 032-325-9626

E-mail : kbh1122@kopo.ac.kr

최 지 영 (崔 持 榮)

1997년 세명대 전자계산학과 졸업. 1999년 세명대 대학원 전산정보학과 졸업(석사). 2000년 청주대학교 전자공학과 졸업(공박). 현재 한국폴리텍I대학 서울정수캠퍼스 유비쿼터스통신과 교수

Tel : 02-2001-4076

Fax : 02-2001-4076

E-mail : cjy03@kopo.ac.kr