

PLC용 자심재료의 첨가제에 따른 자기적 특성의 변화

안용운* · 김종령 · 오영우

경남대학교 재료공학과, 경상남도 마산시 월영동 631-701

(2003년 8월 18일 받음, 2003년 11월 5일 최종수정본 받음)

고주파 대역에서 전자기적 특성이 안정적으로 유지되는 Ni-Zn 페라이트를 제조하기 위해 $Ni_{0.8}Zn_{0.2}Fe_2O_4$ 를 기본조성으로 Bi_2O_3 와 CaO를 첨가하였다. Bi_2O_3 의 첨가량이 0.3 wt%까지는 손실이 증가하였고 그 이상의 첨가량에서는 감소하였으며, 투자율은 Bi_2O_3 첨가량이 증가할수록 증가하였다. Bi_2O_3 와 CaO는 고용체를 형성하여 입계에 편석 됨으로서 비저항층을 형성하여 각각 0.7 wt%, CaO 0.3 wt% 첨가할 경우 가장 낮은 손실과 높은 공명주파수를 나타내었다.

주제어 : Ni-Zn 페라이트, 전력선 통신, 전력손실, 첨가제

I. 서 론

10 Mbps급 고속 전력선 통신을 위한 자심재료의 투자율 및 완화주파수 등의 전자기적 특성은 20 MHz 대역에서도 우수하고 안정적으로 유지되어야 한다.

페라이트는 주요 용도가 마그네틱 코어나 전자 회로 내에서의 변압기에 집중되어 있기 때문에, 페라이트의 응용 연구는 주로 고투자율과 저손실의 연질 페라이트를 개발하는 것이며, 특히 전력선 통신을 위한 커플링 유닛용 페라이트에 대한 연구결과는 미흡하기 때문에 고주파 대역에서 한 단계 높은 전자기적 성질을 갖는 자심재료에 대한 연구개발이 요구되고 있다. 일반적으로 통신 필터에 사용되는 자심재료는 저주파 대역에서 자기적 특성이 안정적으로 유지되지만 고속 전력선 통신 네트워크를 위한 고주파 대역에서는 와전류 손실로 인한 큰 열적 손실을 수반하므로 안정적인 자기적 특성을 가지지 못해 그 역할을 다할 수 없다. 이 손실을 최소화시킬 수 있는 기술소재인 연질 페라이트는 전기비저항이 금속계 코어에 비해 $10^4 \sim 10^6$ 배정도 크기 때문에 와전류 손실이 적고 고주파까지 사용할 수 있다. 페라이트 코어에서 전력손실은 일반적으로 이력 손실과 와전류 손실의 합으로 식 (1)로 나타낸다[1].

$$P_L = P_h + P_e = K_h B^2 f + K_e S B^2 f / \rho \quad (1)$$

P_L = Power loss

P_h = hysteresis loss

P_e = eddy current loss

B = magnetic flux density

K = a constant depending on the shape of the component

S = cross sectional area of the grain

f = operating frequency

ρ = resistivity

주파수가 증가함에 따라 이력손실은 선형적으로 증가하지만 와전류 손실은 주파수의 제곱에 비례하여 증가함을 알 수 있으며, Ni-Zn 페라이트는 낮은 주파수 영역에서는 높은 저항으로 인해 와전류로 인한 손실이 거의 없지만 주파수가 커짐에 따라 코어 손실에 대한 와전류 손실의 비중이 증가한다. 와전류 손실은 식 (1)에 나타난 것처럼 재료측면에서 제어 가능한 입자크기와 비저항의 함수로 나타나며, 와전류 손실을 줄이기 위해 이차상을 입계에 편석시켜 비저항을 증가시키거나 Co를 치환시켜 고주파 특성을 향상시킨다.

따라서 본 연구에서는 전력선 통신용 LC 공진 필터에 적용되는 고주파 대역에서 고투자율, 저손실의 Ni-Zn 페라이트를 개발하기 위하여 $Ni_{0.8}Zn_{0.2}Fe_2O_4$ 를 기본조성으로 선택하고 소결촉진과 비저항층을 형성하기 위해서 Bi_2O_3 와 CaO를 첨가하여 미세구조와 전자기적 특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

II. 실험 방법

2.1. 실험장치

주파수 특성이 우수한 $Ni_{0.8}Zn_{0.2}Fe_2O_4$ 조성을 선택하여 99.9% 이상의 순도를 갖는 Fe_2O_3 , NiO, ZnO를 출발원료로 사용하여 24시간 동안 습식 혼합하고 건조하였다. 건조된 분말을 950 °C에서 2.5시간 동안 하소하였고, 1%의 PVA(Poly Vinyl Alcohol) 수용액 0.5 wt%를 첨가하고 attrition milling 하여 슬러리를 제조한 후 분무건조하여 과립화하였다. 과립화된 분말에 Bi_2O_3 와 CaO를 각각 0~1.5 wt%, 0~0.7 wt% 첨가하여 1.5 ton/cm²의 압력으로 toroid 성형체를 제조하고 1200 °C에서 2.5시간 소결하였다.

*Tel: (011)9315-2712, E-mail: anywoon@hanmail.net

2.2. 특성평가

하소분말과 소결분말을 X선 회절 분석기를 이용하여 결정상 분석하였고, 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 소결체의 미세구조를 분석하였다. 1, 2차 코일을 각각 5회 권선하여 B-H Analyzer(IWATSU/SY-8232)를 이용하여 손실특성을 측정하였고, 소결밀도는 아르키메데스 법으로 측정하였으며 투자율은 Impedance Analyzer(HP, model 4294A, USA)를 이용하여 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

그림 1은 950°C에서 하소한 분말의 X선 회절분석 결과이다. 하소과정에서 스피넬화 반응이 진행 및 완료되어 α-Fe₂O₃나 2차상의 잔존 없이 출발원료들이 모두 스피넬 상을 이루고 있는 것을 확인할 수 있기 때문에 950°C의 하소 온도는 스피넬화 반응이 완결되는데 충분한 온도로 판단된다[2].

그림 2는 Bi₂O₃(m.p. 820°C)의 첨가량에 따른 주파수 특성을 나타낸 것으로서, Bi₂O₃의 첨가량이 증가함에 따라 투자율이 증가하여 Bi₂O₃가 1.0 wt% 첨가된 경우 134의 최고 값을 나타냈으며 그 이상의 첨가량에서는 큰 변화가 없다. Globus는 자구 모델을 세워서 초투자율이 결정 입자 크기에 선형적으로 비례함을 유도하였다. 투자율은 입계에 고정된 자벽이 부풀리게되어 생기는 것이므로 입자 크기가 클수록 자벽의 부풀림 부피(bulging volume)가 크게 되어 투자율이 증가하므로 [3], 소결과정에서 Bi₂O₃ 액상이 형성되어 소결을 촉진시키고 결정립이 성장하여 투자율이 증가한 것으로 여겨진다. 그리고 Bi₂O₃의 첨가량이 증가함에 따라 투자율은 증가하지만 공진 주파수가 감소하는 것을 볼 수 있다. 자벽이동의 용이성은 자구의 크기에 영향을 미치므로 자벽의 이동을 방해하는 입계,

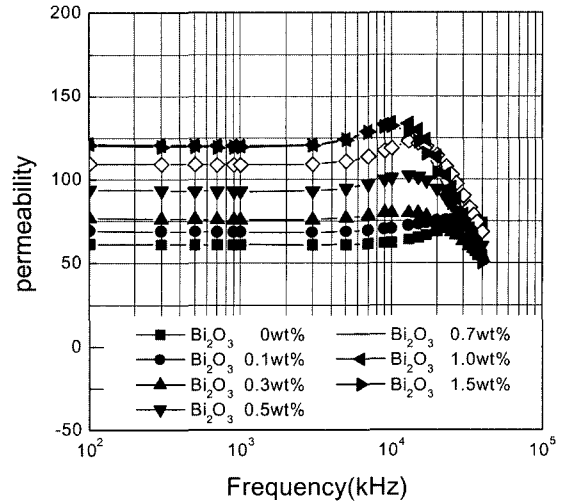


그림 2. Bi₂O₃ 첨가량에 따른 투자율 변화.

기공, 불순물 등은 페라이트의 전자기적 특성에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 페라이트의 입계는 반자계 영역(demagnetizing field)을 형성하고, 자벽을 고정시키는 피닝(pinning) 사이트로 작용하는데, 결정립이 현저하게 성장하여 결정립계가 감소함에 따라 피닝 사이트의 감소와 반자계 효과의 약화를 수반하므로 투자율은 증가하게 되지만[3, 4], 피닝 사이트의 감소는 자벽이 입계에 고정되려는 힘을 약화시키게 되므로 공진주파수는 더 낮은 주파수 영역으로 이동하게 된다.

그림 3은 Bi₂O₃의 첨가량에 따른 전력손실을 나타낸 것이다. Bi₂O₃의 첨가량 증가에 따라 주파수 손실은 증가하여 0.3 wt%에서 최대손실을 나타냈고, 그 이상에서는 손실이 다시 감소하여 1.0 wt% 이상에서는 큰 변화가 없는 것이 관찰된다.

Bi₂O₃는 소결과정에서 액상을 형성하여 소결을 촉진시켜 첨

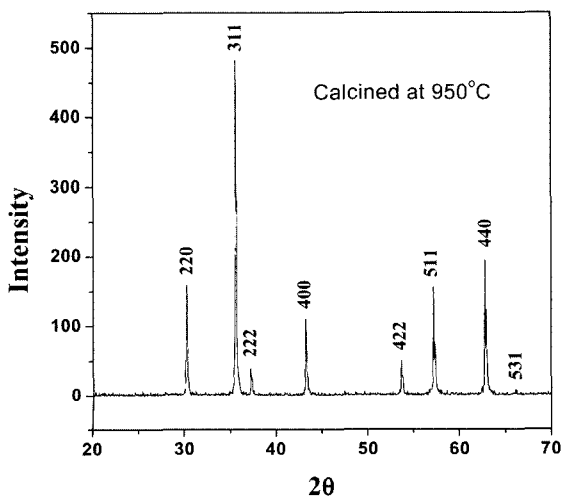


그림 1. Ni-Zn ferrite의 X선 회절 분석 결과.

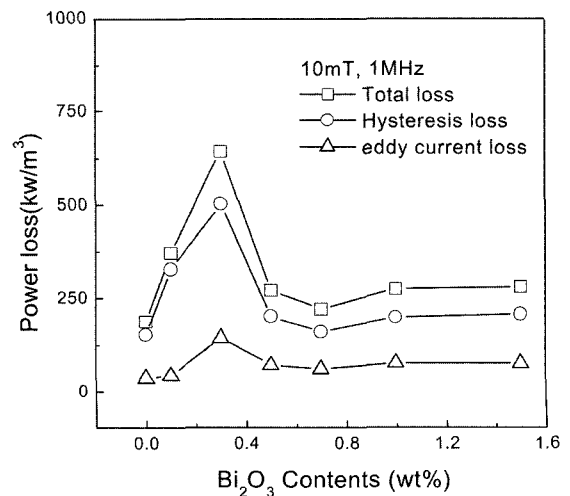


그림 3. Bi₂O₃ 첨가량에 따른 전력손실.

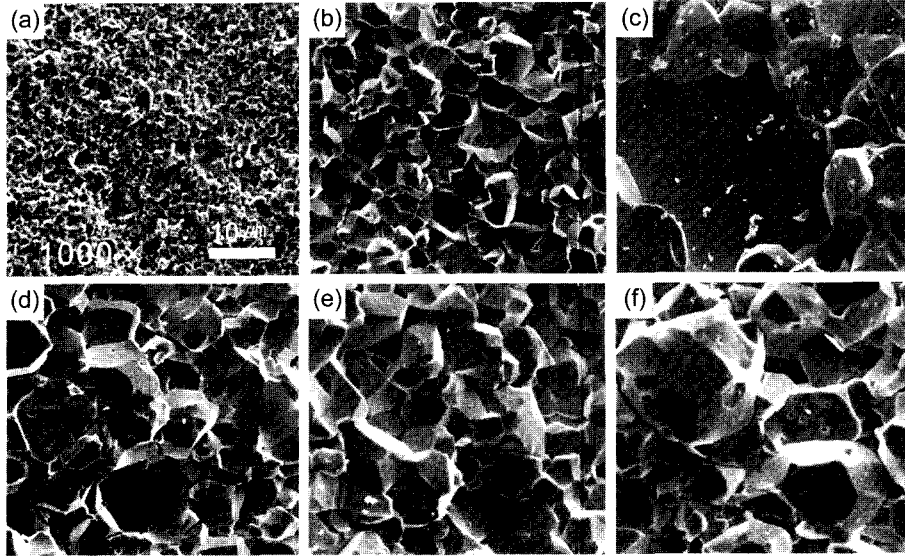


그림 4. Bi₂O₃ 첨가량에 따른 미세구조 변화. (a) Bi₂O₃ free additive, (b) 0.1 wt%, (c) 0.3 wt%, (d) 0.5 wt%, (e) 0.7 wt%, (f) 1.0 wt%.

가하지 않은 조성의 시편보다 높은 투자율을 가지지만, 그림 4의 미세구조에서 관찰되듯이 0.3 wt%의 Bi₂O₃ 첨가량에서는 입계에 균일하게 분포하지 못하고 부분적으로 존재하여 불규칙 입자 성장을 유발함으로써 고립기공과 같은 결함을 발생시켜 순수한 조성의 시편보다 높은 손실을 갖게된다[5-8]. 그러나 Bi₂O₃가 0.3 wt% 이상 첨가된 경우에는 손실이 감소하여 0.7 wt% 첨가되었을 때 가장 낮은 손실 값을 나타냈으며 와전류 손실보다 자기이력 손실에 지배적인 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 이는 결정입계에 Bi₂O₃ 액상이 균일하게 분포되어 크고 균일한 결정립이 형성되어 투자율은 증가하지만, 손실측면에서 보면 입자크기가 클수록 자벽이 차지하는 분율이 높아져 이력 손실이 증가하여 전체 손실이 증가하게 되는 것이다.

그림 4는 Bi₂O₃ 첨가량에 따른 미세구조를 나타내었다. 첨가량이 증가함에 따라 결정립 크기가 증가하여 Bi₂O₃ 0.3 wt% 첨가된 시편에서 가장 큰 결정립 크기를 나타냈으며 비정상 결정립 성장으로 인하여 다수의 기공을 함유하고 있다. 그러나 그 이상의 첨가량에서는 결정립 크기가 감소하고 균일한 크기의 결정립으로 구성되어 있는 것을 볼 수 있다. 이는 그림 2의 투자율 결과와 같으며, 액상소결에서 첨가되는 액상량이 증가함에 따라 평균 결정립이 감소하는 것과 일치한다. Bi₂O₃ 0.3 wt% 첨가된 경우 용융점이 820 °C인 Bi₂O₃가 소결 중에 생성하는 액상이 입계에 불균일하게 분포함으로써 비정상 결정립 성장이 일어나게 되어 결정립 크기는 가장 크지만, 투자율은 0.3 wt% 이상 첨가된 것에 비해 높지 않다. Igarashi는 실험적으로 $\mu \propto D^{1/3}$ 임을 밝혀내고 이론에 비해 투자율이 감소하는 것을 기공으로 인한 반자장이 생성되었기 때문으로 해석하였다. 관계식에서 입자크기가 크면 투자율이 커

지는 것을 알 수 있으나 입경의 세제곱근에 비례하므로 일정 크기 이상에서는 큰 효과가 없게된다. 따라서 비정상 결정립 성장에 의한 기공으로 인해 결정립 크기에 따른 투자율 증가 효과가 상쇄된 것을 알 수 있다. 그러나 그 이상의 첨가량에서는 크고 균일한 결정립 성장으로 인하여 투자율이 증가된 것으로 판단된다[6, 9].

그림 5는 Bi₂O₃의 함량이 0.7 wt% 첨가된 시편의 미세구조를 나타낸 것으로써 액상이 입계에 균일하게 분포하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 Bi₂O₃의 함량이 0.7 wt% 첨가된 시편에서는 비정상 입자성장이 일어나지 않고 균일한 결정립들이 분포되어 있음을 알 수 있고, 이로 인해서 높은 투자율과 낮은 손실을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

전력선 통신용 LC 공진필터에 적용되는 자심재료는 낮은 전력손실을 요구하고 있기 때문에 본 실험에서는 Bi₂O₃ 1.0, 1.5 wt% 첨가된 시편보다 투자율은 조금 낮지만 손실과 공

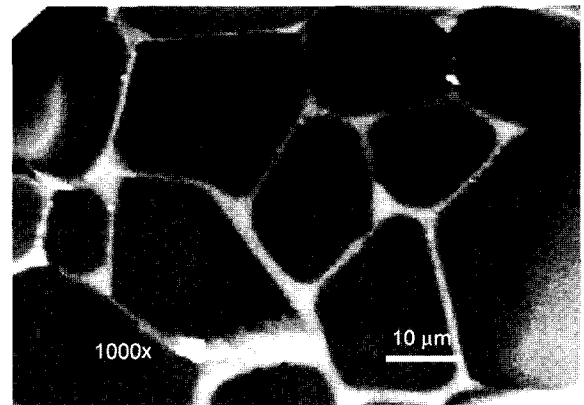


그림 5. 0.7 wt% Bi₂O₃가 첨가된 소결시편의 생성된 액상.

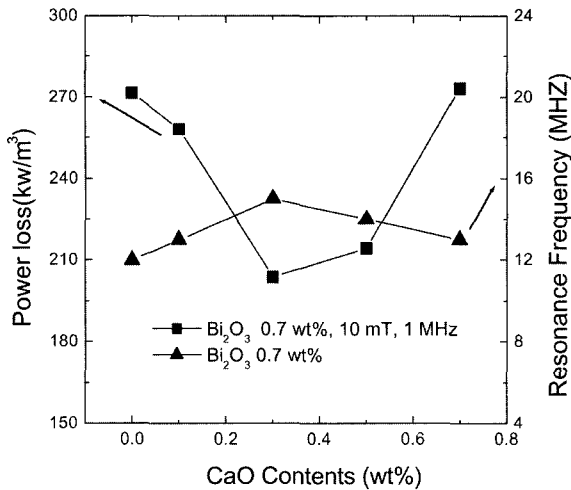


그림 6. CaO 첨가량에 따른 전력손실과 공진주파수 변화.

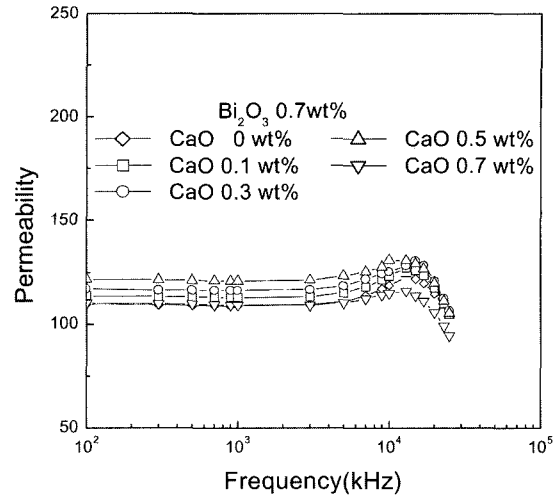


그림 7. CaO 첨가량에 따른 투자율 변화.

진주파수가 향상된 Bi₂O₃ 0.7 wt% 첨가 조성을 선택하였고, 입계에 편석되어 비저항을 증가시키는 CaO를 첨가하여 그 양을 변화시켰다.

그림 6은 CaO 첨가량 변화에 따른 전력손실과 공진주파수 변화를 나타낸 것이다. CaO의 첨가량이 증가됨에 따라 주파수 손실이 감소하여 CaO 0.3 wt% 첨가하였을 때 최소 손실을 나타냈는데 이는 첨가된 CaO와 Bi₂O₃가 고용체를 생성하여 입계에 편석됨으로써, 입계에 고저항층이 형성되었기 때문에 와전류 손실이 감소하여 전체적인 주파수 손실이 감소된 것으로 판단된다. 그러나 CaO 0.3 wt% 이상 첨가된 경우에는 CaO와 Bi₂O₃와 같은 비자성 물질의 다량 첨가로 인해서 전체적인 자기적 특성이 감소되어 손실이 급격히 증가한 것으로 생각된다. 그림 7은 CaO 함량에 따른 투자율 변화를

나타낸 것으로서 CaO가 첨가되지 않은 시편보다 투자율과 공진 주파수는 소폭 증가하였는데, 이것은 CaO와 Bi₂O₃가 고용체와 액상으로 입계에 존재하여 입자의 거대성장을 억제하고 균일한 결정립을 생성시키고 동시에 고저항층이 형성되어 와전류 손실을 감소시켰기 때문이다.

그림 8은 Bi₂O₃와 CaO를 함께 첨가한 시편의 파단면을 나타낸 것으로 그림 4와 비교하면 결정립크기 변화는 CaO보다 Bi₂O₃에 의해 지배적인 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이것은 Bi₂O₃는 액상형성에 의해 입자성장을 촉진시키지만, CaO는 주로 입계에 존재하여 고저항층을 형성시켜 손실을 감소시키는 역할을 하는 첨가제이기 때문인 것으로 판단된다[6].

Ni-Zn 페라이트는 Mn-Zn 페라이트에 비해 비저항이 높지만, 전력선 통신에 적용되는 자심재료는 높은 주파수에서 열

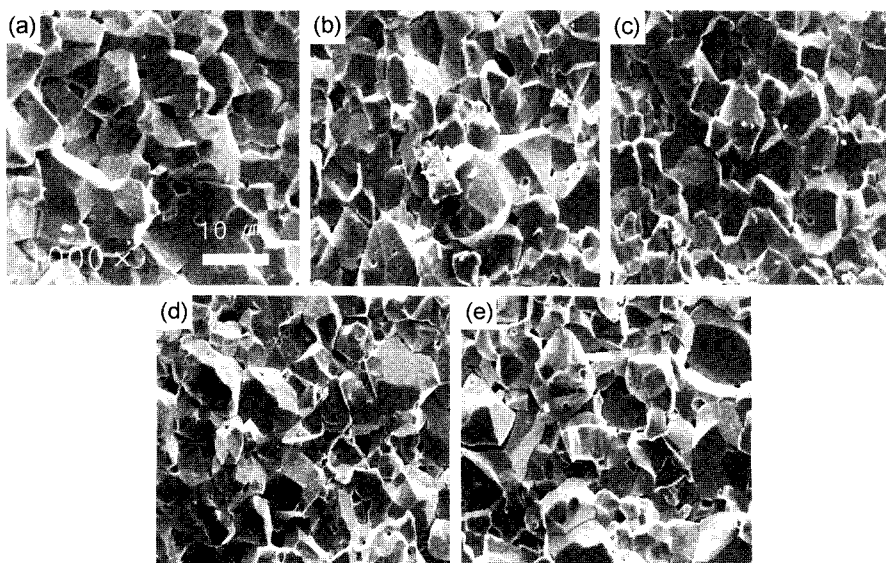


그림 8. CaO 첨가량에 따른 미세구조 변화.

적손실이 적어야 하기 때문에 Bi₂O₃와 CaO 첨가에 따른 투자율 향상과 손실의 감소는 LC 공진필터에 적용 가능 할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

전력선 통신용 LC 공진필터에 적용할 수 있는 저손실 페라이트 코어를 개발하기 위해서 첨가제를 변화시켜 미세구조와 전자기적 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Bi₂O₃가 소결중에 액상을 형성하여 소결이 촉진되어 0.3 wt% 첨가된 시편에서 결정립의 크기는 가장 크지만 다수의 기공형성으로 높은 주파수 손실 특성을 나타내었다.
2. Bi₂O₃, CaO가 첨가됨으로써 균일한 입자성장과 입계에 고저항층이 형성되어 주파수 손실이 감소하였다.
3. CaO의 첨가량 0.3 wt%에서 공진주파수는 다소 증가하였고, 손실은 203.78 kW/m³으로 가장 낮았다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 한국과학재단 목적기초연구 개발사업의 연구지원비로 수행되었으며, 이에 감사하는 바입니다.

참 고 문 헌

- [1] E. Otsuki, S. Yamada, T. Otsuki, K. Shoji and T. Sato, J. Appl. Phys., **69**, p. 5942-5943(1991).
- [2] 이해연, 경남대학교 학위논문(2000).
- [3] A. Globus., IEEE. Trans. Mag. Mag-7 (1971)
- [4] A. Globus, P. Duplex, IEEE Trans. Mag., vol 2, No. 3, (1966).
- [5] 박종태, 한국과학원 학위논문(1981).
- [6] W. Heister, Am. Ceram. Soc. Bull., **64**, 4, p. 602-605(1959).
- [7] H. Igarashi *et al.*, J. Am. Ceram. Soc. **60**, 1-2, p. 51-54(1977).
- [8] 이은구, 한국과학원 학위논문(1981).
- [9] S. C. Byeon., H. J. Je., K. S. Hong., Jpn. J. Appl. Phys. **36**, 8(1997).

Magnetic Properties of Magnetic Core Materials for PLC as a Funtion fo Additives

Yong-Woon An*, Jong-Ryung Kim, and Young-Woo Oh

Dep. of Materials Engineering, Kyungnam University 449 Wolyong-dong, Masan Kyungnam, Korea

(Received 18 August 2003, in final form 5 November 2003)

The electromagnetic properties of Ni_{0.8}Zn_{0.2}Fe₂O₄ having stable characteristics in high frequency range were investigated as functions of Bi₂O₃, CaO contents. Power loss increased in proportion to the amount of Bi₂O₃ up to 0.3 wt% and decreased over 0.3 wt%. Also, permeability increased with Bi₂O₃ contents. The lowest power loss and highest resonance frequency were obtained to the specimens added Bi₂O₃ of 0.7wt% and CaO of 0.3 wt% due to creation of resistivity layers in the grain boundaries originated by the solid solution of Bi₂O₃ and CaO.

Key words : Ni-Zn ferrite, Power Line Communication, Power loss, additives.