

나노 결정립 재료를 이용한 비접촉식 커플러의 설계 및 특성

김종령*

(주)매트론 기술연구소, 경남 마산시 내서읍 중리 1121-9 마산밸리 711호, 630-857
경남대학교, 경남 마산시 월영동 449, 631-701

김현식 · 허정섭 · 이해연 · 이준희

(주)매트론 기술연구소, 경남 마산시 내서읍 중리 1121-9 마산밸리 711호, 630-857

오영우

경남대학교, 경남 마산시 월영동 449, 631-701

변우봉

한국전기연구원, 경기도 의왕시 내손동 665, 437-808

(2006년 9월 26일 받음, 2006년 10월 17일 최종수정본 받음)

저손실 고효율 특성을 가지는 Fe-Si-B-Nb-Cu계 나노결정립 재료로 α -Fe 나노결정 자심재료를 제조하기 위한 열처리 온도 변화에서, 510 °C의 열처리 조건에서 가장 높은 투자율과 가장 낮은 코어손실 특성을 나타내었다. 제조된 자심재료를 이용한 비접촉식 커플러 제조에서, 저주파 대역에서의 신호전송 특성은 자심재료의 자기적 특성에 지배적인 영향을 받는데 열처리 온도에 따른 투자율 변화의 결과와 일치하는 결과를 나타내었으며, 고주파 대역의 신호전송 특성은 임피던스 매칭으로 향상시킬 수 있었다. 그리고 300 A의 고전류가 흐르는 지중선로에서 자기적 포화 없이 안정적인 특성을 발휘하기 위해서는 500 μ m 이상의 에어갭이 필요하였다. 또한 나노 결정립 자심재료 제조에 대한 연구결과를 통해 5 dB 이하의 삽입손실을 나타내는 전력선 통신용 비접촉식 커플러를 제조할 수 있었다.

주제어 : 전력선 통신, 비접촉식 커플러, 신호 감쇄율, 나노결정 재료

I. 서 론

전력선 통신(Power Line Communication) 기술은 전력선의 상용주파수에 1.7~30 MHz의 주파수 범위의 통신신호를 실어 보내고 사용자가 전력선에서 통신신호만을 분리해내어 사용하는 방식으로 최근 이에 대한 연구와 투자가 활발하게 진행되고 있다. 전력선 통신을 원활하게 실현하기 위해서는 전력선에 흐르는 통신신호를 모뎀까지 최소 손실로 전송시켜야 하는데, 전력선에서 통신신호를 분리하여 모뎀으로 전달하는 역할을 하는 것을 커플러(Coupler)라고 하며 이것은 전력선 통신을 실현하기 위한 핵심소자이다[1, 4-8]. 이 커플러는 접촉식(Capacitive)과 비접촉식(Inductive)으로 나눌 수 있으며, 접촉식의 경우 전력선에 직접적으로 연결되므로 신호전송 특성은 우수하나 설치 및 작업의 어려움, 높은 단가, 고전압에 대한 불안정성 등의 단점을 나타내고 있다. 반면, 비접촉식은 자기유도원리를 이용하는 것이므로 전력선 외부에 쉽게 체결할 수 있고 절연 처리된 전력선에 체결되므로 고전압에 대한

안정성이 높으며, 접촉식 커플러에 비해 무게, 부피, 단가 등이 낮기 때문에 적용범위가 보다 넓은 형태라고 볼 수 있다.

이 비접촉식 커플러의 신호감쇄 특성을 좌우하는 것은 자심재료와 고주파 대역에서의 신호전송 기술이라고 할 수 있는데, 자심재료의 경우 전력선에는 수백 A의 전류가 흐르기 때문에 높은 투자율과 높은 포화전류 특성을 나타내어야 하고, 고주파 대역 신호전송 특성은 절연재 함침, 출력권선의 구조 등에 대한 기술이 확립되어야 하지만, 현재 커플러용 고주파 신호전송 기술에 대한 구체적인 연구는 이루어지지 않고 있다[2, 9].

따라서 본 연구에서는 나노 결정립 Fe-Si-B-Nb-Cu 재료의 열처리 공정에 따른 자심재료의 특성 변화와 모의 해석을 통한 자심재료의 전류 특성을 파악하여 비접촉식 커플러를 제조하고자 하였으며, 이에 대한 신호전송 특성 평가와 지중선 고압망용 비접촉식 커플러로의 응용 가능성을 관찰하고자 하였다.

II. 실험 방법

본 커플러 제조실험에 사용된 자심재료의 원료는 Fe-Si-B-Nb-Cu 재료로써, 8 °C/mim의 속도로 500 °C까지 승온시키고

*Tel: (055) 232-5941, E-mail: jrkim@matttrone.com

480~570 °C의 범위까지 1 °C/min의 속도로 승온시킨 후, 1시간 동안 열처리하여 공기 중에서 냉각시켰다. 이 때 열처리하는 진공 처리 후 N₂ 가스분위기에서 실시하였다.

자심재료는 국내에서 최대 사용 전류가 약 300 A인 지중 전력선(conductor area : 325 mm²)에 적용 가능하도록 내경 ×외경이 64×94 mm로 설계하여 제조하였으며, 자심재료의 열처리 후 결정 상 분석과 투자율 및 전력손실 등의 전자기 특성을 측정하였다. 커플러의 구성에서 자심재료의 적층 및 입·출력 권선비, 고주파 임피던스 매칭을 통한 커플러 구성 후 전력선에 체결이 가능하도록 반(半) 원기둥 형태로 절단하였다. 그리고 300 A의 전류가 인가되었을 때, 자심재료의 포화특성을 관찰하기 위해 에어-갭에 따른 자속의 변화를 Flux2D/3D 프로그램을 이용하여 모의해석하였다. 또한 제작된 커플러 절단면 사이의 Air gap에 따른 신호감쇄 및 전류 특성을 측정하였다.

자심재료와 커플러의 특성평가는 열처리 온도에 따른 결정상을 XRD로 분석하였고, 자심재료의 투자율과 전력손실은 Impedance Analyzer(4294A, Agilent)와 B-H Analyzer(SY-8232, IWATSU)를 이용하여 측정하였다. 그리고 커플러의 신호 감쇄율 변화를 Network Analyzer(8751A, Agilent)를 이용하여 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

Fig. 1은 나노 결정화를 위한 Fe계 비정질 합금의 열처리 온도에 따른 x-선 회절분석 결과를 나타낸 것이다. 열처리 온도가 증가할수록 결정화가 진행되고 회절면의 강도가 증가하는 것을 알 수 있으며, 510 °C에서 결정화가 시작되어

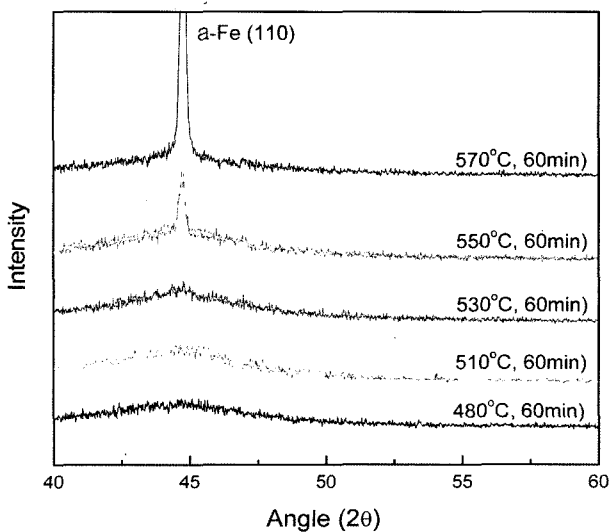


Fig. 1. X-ray diffraction of nanocrystalline Fe-Si-B-Nb-Cu materials.

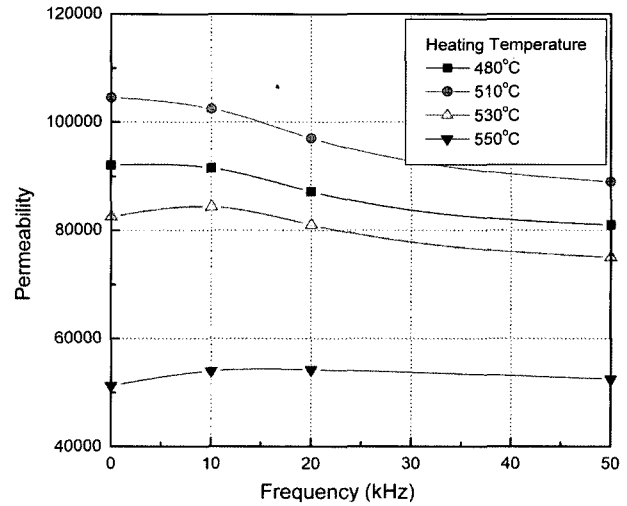


Fig. 2. Changes of permeability for nanocrystalline Fe-Si-B-Nb-Cu materials as heating temperature.

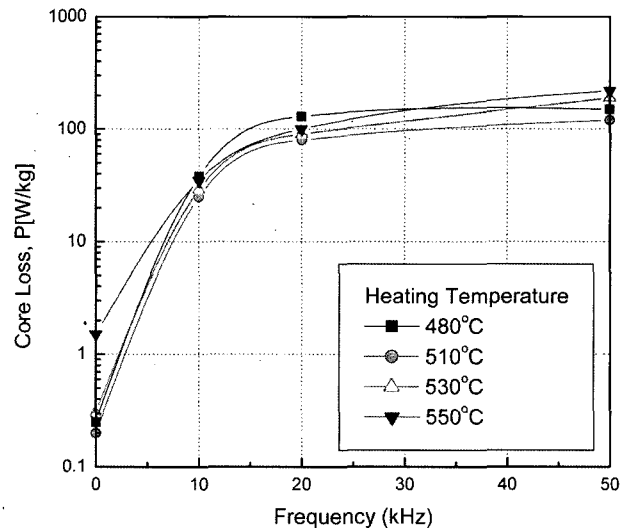


Fig. 3. Changes of core loss for nanocrystalline Fe-Si-B-Nb-Cu materials as heating temperature.

550 °C 이후에는 완전 결정화가 일어났다.

Fig. 2와 Fig. 3은 열처리 온도에 따른 자심재료의 투자율과 전력손실의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 2에서 510 °C에서 가장 높은 투자율을 나타낸 후 열처리온도가 증가할수록 투자율은 감소하였다. 그리고 Fig. 3에서 가장 낮은 전력손실을 나타내었고, 열처리온도가 증가할수록 전력손실은 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 Fig. 1에서 나타낸바와 같이 약 510 °C에서 Fe-Si 결정이 석출되는데, 수 nm 정도의 grain 직경이 domain wall 두께보다 작기 때문에, domain wall pinning 효과에 의한 자기 이방성에 크게 영향을 미치지 못하기 때문이다[3, 10].

Fig. 4는 열처리온도에 따라 제조된 자심재료를 이용하여 구성한 커플러의 신호감쇄특성을 나타낸 것이다. 10 MHz 이

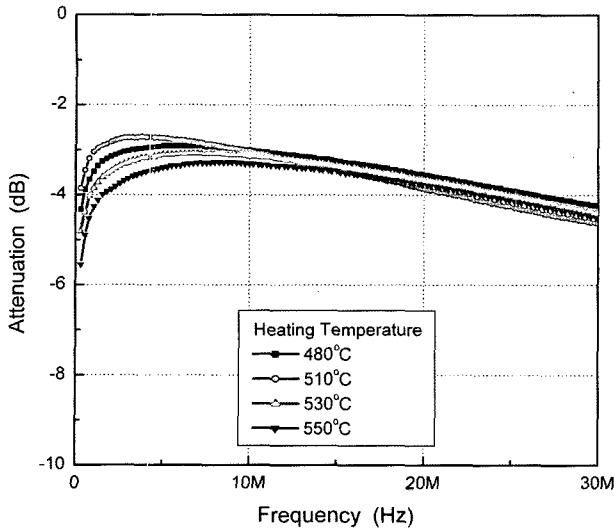


Fig. 4. Changes of attenuations for magnetic core as heating temperature.

하의 주파수영역에서는 510 °C에서 열처리한 자심재료를 이용한 커플러의 신호감쇄가 가장 낮게 나타났고, 열처리온도가 증가할수록 증가하였다. 이것은 Fig. 2에 나타난 자심재료의 투자율 변화와 일치하는 경향으로, 비접촉식 커플러의 신호 감쇄율은 자심재료의 투자율 특성에 지배되는 것으로 볼 수 있다. 하지만 10 MHz 이상의 고주파 대역에서는 그 경향성을 잃어버리고 전체적으로 유사한 값을 나타내었다.

한편, 전력선 통신을 위한 커플러는 2~30 MHz 범위에서 -5 dB 이상의 신호 감쇄율을 나타내어야 하므로 전체적으로 -5 dB 이상의 신호감쇄 특성을 나타내지만 주파수 증가에 따라 급격히 저하하여 불안정한 특성을 나타내므로 고주파 대역의 신호전송 특성의 개선이 요구되었다.

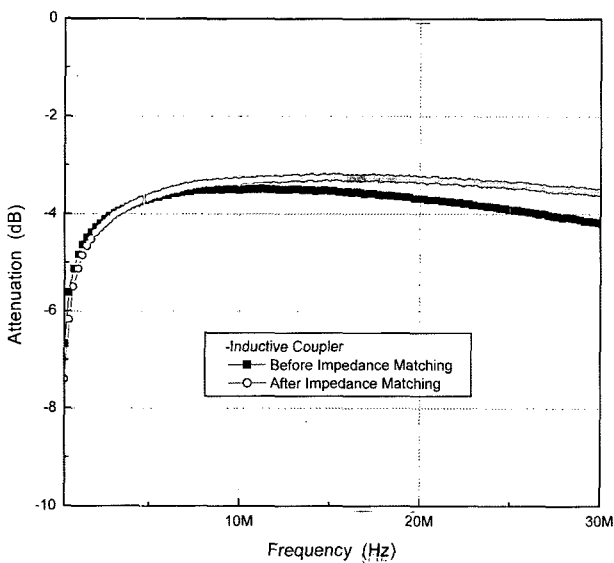


Fig. 5. Changes of attenuations as impedance matching.

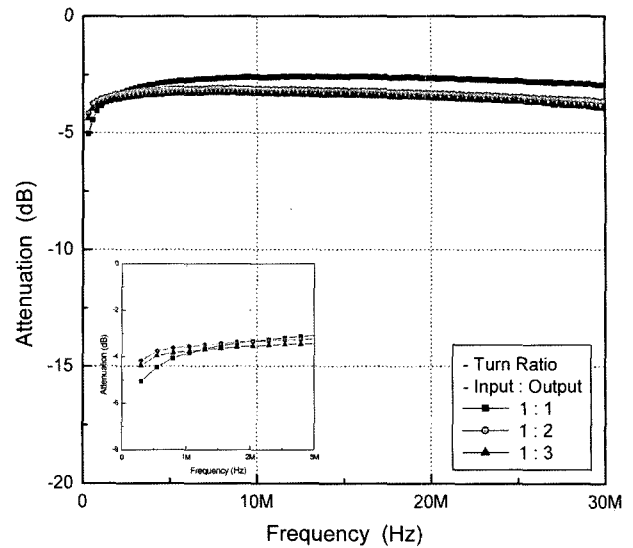


Fig. 6. Changes of attenuations for inductive coupler as number of turns.

Fig. 5는 고주파 대역에서의 임피던스 매칭회로의 적용에 따른 비접촉식 커플러의 신호 감쇄율 변화를 나타낸 것으로서, 10 MHz 이상의 주파수에서 임피던스 매칭에 의해 고주파 특성이 급격하게 향상되어 주파수 변화에 대해 보다 균일한 신호 감쇄율을 나타내었다. 따라서 비접촉식 커플러의 신호전송 특성은 원천적으로 자심재료의 자기적 특성에 좌우되며, 자심재료 특성과 무관한 고주파 대역의 신호전송 특성은 임피던스 매칭에 의해 향상시킬 수 있다.

Fig. 6은 커플러의 통신신호 입·출력선의 권선비에 따른 신호전송 특성을 나타낸 것으로, 전력선 통신용 커플러에서 입력 신호선은 전력선(1회 권선)이 되므로 출력 권선 수 변화에 대한 특성 변화를 나타내었다. 출력선의 권선수가 1회인 경우, 출력선의 권선수가 2회와 3회인 경우에 비해 1.5 MHz 이상의 고주파 대역에서는 더 우수한 신호전송 특성을 나타내지만, 1.5 MHz 이하의 저주파 영역에서는 출력선의 권선수가 1회인 경우가 더 낮은 특성을 나타내었다. 그리고 출력선의 권선수가 2회인 경우와 3회인 경우를 비교해 보았을 때, 2회인 경우가 더 우수한 특성을 나타내었다. 여기서 출력선의 권선수가 많을수록 입력선으로 부터 여기되는 자속량이 증가하여 신호전송 특성이 향상될 수 있지만 권선수가 증가함에 따라 선로(線路) 손실도 증가하게 된다.

본 연구 결과에서는 자속 여기량의 증가보다 선로손실에 의한 특성 저하가 보다 크게 작용하는 것으로 보인다. 한편, 1.5 MHz 이상의 고주파영역에서는 출력선의 권선수가 1회인 경우가 가장 높은 신호전송 특성을 나타내었는데, 이 경우에는 선로손실이 보다 낮기 때문인 것으로 보인다. 따라서 통신 주파수 범위에 따라 커플러의 출력 권선수를 변화시킴

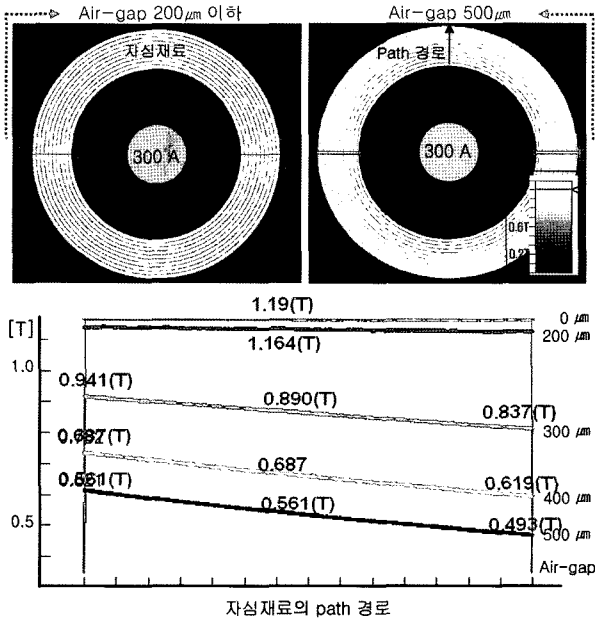


Fig. 7. Changes of flux density for inductive coupler as air-gaps at the 300 A.

로서 커플러의 특성을 향상시킬 수 있을 것으로 보인다.

Fig. 7은 300 A의 전류가 인가되었을 때, 자심재료의 포화 특성을 관찰하기 위해, 에어-갭에 따른 자속 변화에 대한 모의해석 결과를 나타낸 것이다. 에어-갭이 200 μm 이하에서는 완전 포화가 일어나 자심재료의 성질을 잃어버리게 되었고, 에어-갭이 약 300 μm일 때, 약 0.9 T의 자속밀도를 나타내어 포화는 일어나지 않았지만, 포화자속밀도(1.2 T)의 약 80% 수준이므로 투자율은 급격히 감소하게 되므로 자기적 성질의 불안정성이 나타나기 쉽다. 한편, 에어-갭이 약 400~500 μm 일 때는 약 0.6~0.7 T(포화자속밀도의 50~60%)의 자속밀도를 나타내어 가장 적당한 에어-갭 범위로 예측되었다.

Fig. 8은 커플러 절단면 사이의 air gap과 전력선에 인가되는 전류량에 따른 신호감쇄 특성을 나타낸 것이다. 22.9 kV 이상의 고압 지중선에는 약 300 A의 대전류가 흐르는데, 전력선 통신이 원활하게 운용되기 위해서는 비접촉식 커플러에 내장된 자심재료가 이 대전류에서 포화되지 않아야 한다. 자심재료의 포화전류는 절단면 사이에 air gap을 생성시켜 자심재료의 높은 자속밀도를 유지시키고 투자율을 감소시킴으로써 증가시킬 수 있다. Fig. 8(a)의 인가전류가 0 A일 때는 커플러의 절단에 의한 자심재료 특성의 저하와 전력선에서의 임피던스 변화에 의해 일부 흔들리는 경향이 있지만, air gap의 증가에 따라 고주파대역의 신호전송 특성은 비교적 안정적인 특성을 나타내었다. 그러나 Fig. 8(b)의 인가전류가 300 A일 때는 air gap이 300 μm까지는 주파수에 따라 신호전송 특성이 아주 불안정한 경향을 나타내었지만, 500 μm 이상의

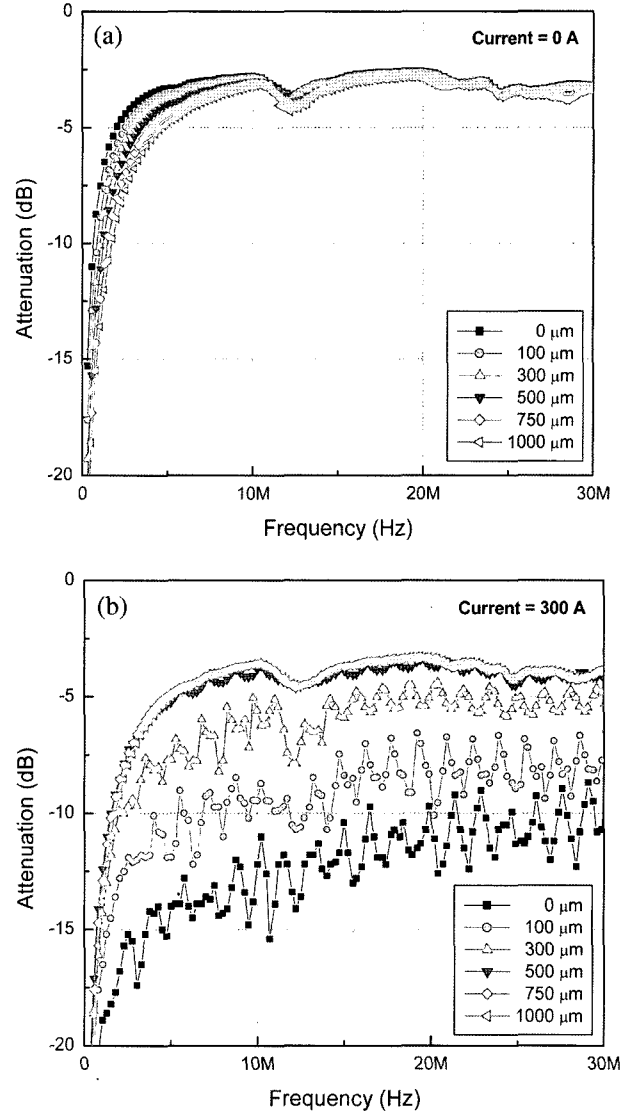


Fig. 8. Changes of attenuations for inductive coupler as air-gaps.

air gap에서는 보다 안정적인 경향을 나타내었다. 또한 저주파대역에서 나타나는 신호전송특성의 저하 현상도 현저히 감소한 것을 볼 수 있었으며, Fig. 7에 나타낸 자심재료의 에어-갭에 따른 시뮬레이션 결과와 거의 일치하는 결과를 나타내었다. 따라서 2~30 MHz 대역에서 운용되고 지중선로에 적용되는 전력선 통신용 비접촉식 커플러는, Fe-계 나노 결정 합금재료를 자심재료로 사용하여 500 μm 이상의 air gap을 형성시킴으로써, 신호전송 특성과 포화전류를 만족하도록 제조할 수 있을 것으로 판단되었다.

IV. 결 론

전력선 통신용 비접촉식 커플러의 제조방법을 확보하기 위

한 비정질 합금재료를 이용한 자심재료의 제조와 이를 이용한 비접촉식 커플러의 제조조건에 따른 신호전송 특성에 대한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 510 °C에서 열처리하여 나노 결정을 석출한 Fe-계 합금 재료에서 가장 높은 투자율과 가장 낮은 전력손실을 나타내었고, 이를 이용한 커플러에서 가장 우수한 신호전송 특성을 발휘하였다.

2. 저주파 대역에서 비접촉식 커플러의 신호전송 특성은 자심재료의 투자율에 좌우되며, 자심재료 특성과 무관한 고주파 대역의 신호전송 특성은 임피던스 매칭에 의해 향상시킬 수 있다.

3. 고주파 대역에서는 입력선 : 출력선의 권선비가 1 : 1일 때, 가장 우수한 신호전송 특성을 나타내지만, 1.5 MHz 이하의 저주파 영역에서는 1 : 2일 때 가장 우수한 특성을 나타내었다.

4. 지중선로에 적용되는 전력선 통신용 비접촉식 커플러는, Fe-계 나노결정 합금재료를 자심재료로 사용하고 500 μm 이상의 air gap을 형성시킴으로써, -5 dB 이상의 신호전송 특성

과 300 A의 대전류에서 안정적인 특성을 나타내었다.

참고문헌

- [1] 김현식, 김종령, 김기욱 외 4인, 한국전기전자재료학회 하계학술대회 논문집, p. 272 (2005).
- [2] 김현식, 김종령, 김기욱 외 4인, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, p. 1942 (2005).
- [3] H.-S. Kim, J.-R. Kim, 한국전기전자재료학회, **19**(4), 339 (2006).
- [4] O. Bilal, 7th ISPLC Proceedings, p. 85 (2004).
- [5] Walter Hagmann, Ascom Powerline, p. 8-13 (2000).
- [6] Y. Murata and T. Kimura, Technical Reports of Mitsubishi Electric Advanced Technology R&D Center, Technical Reports, p. 18 (2005).
- [7] O. Bilal, 7th ISPLC Proceedings, p. 85 (2004).
- [8] IEEE, IEEE Standard p. 643 (1980).
- [9] Petrus A. J. V. Rensburg, H. C. Ferreira, Proc. of 7th ISPLC, p. 204-209 (2003).
- [10] K. H. J. Buschow, Handbook of Magnetic Materials, **10**, 417 (1997).

The Design and Characteristics of the Inductive Coupler Using the Nanocrystalline Materials

Jong-Ryung Kim*

*MATTRON Co. Ltd., R&D Center, #711, GITEC, 1121-9, Jung-ri, Masan 630-857, Korea
Kyungnam University, 449, Wolyoung-dong, Masan, Gyeongnam 631-701, Korea*

Hyun-Sik Kim, Jeong-Sub Huh, Hae-Yeon Lee, and Jun-Hui Lee

MATTRON Co. Ltd., R&D Center, #711, GITEC, 1121-9, Jung-ri, Masan 630-857, Korea

Young-Woo Oh

Kyungnam University, 449, Wolyoung-dong, Masan, Gyeongnam 631-701, Korea

Woo-Bong Byun

KERI, 665, Naeson-dong, Euiwang-city, Kyunggi-do 437-808, Korea

(Received 26 September 2006, in final form 17 October 2006)

The varied heating temperatures were used for magnetic core materials, which nano sized α -Fe crystalline was created in nanocrystalline Fe-Si-B-Nb-Cu materials, with high permeability and low power loss. The highest permeability and lowest power loss were obtained to the specimen heat-treated at 510 °C. The signal transmission characteristics of inductive coupler, which was manufactured by using the magnetic core materials prepared in this study, at low frequency range, was influenced strongly by magnetic property of magnetic core materials as this result is corresponding to the permeability as a function of heat treatment temperature, as well, it was improved by impedance matching at high frequency range. Over 500 μm of air gap in coupler is required to maintain the magnetic properties without magnetic saturation on the subterranean line transferred high current of 300 A. The inductive coupler for PLC, which has an attenuation characteristics of less than 5 dB, was manufactured using nano-crystalline magnetic core materials through the above mentioned research results.

Key words : power line communication, inductive coupler, signal attenuation, nanocrystalline materials