

송전선용 비접촉식 커플러의 설계와 적용연구

Study on Design and Application of an Inductive Coupler for Power Transmission Line

김현식^{1,a}, 이동철², 김민호¹, 이진¹, 오영우³, 민병훈⁴

(Hyun-Sik Kim^{1,a}, Dong-Chul Lee², Min-Ho Kim¹, Gean Lee¹, Young-Woo Oh³, and Byung-Hoon Min⁴)

Abstract

An inductive coupler, which feeds communication to the electric power transmission line, is required to establish Power Line Communication(PLC). The electro-magnetic property of magnetic core and design technology for coupler are very important to manufacture an inductive coupler for power transmission line. The magnetic core with superior electro-magnetic property was manufactured by using nano-crystalline alloy and an inductive coupler, which can operate at the maximum 2,000 A current, was designed and manufactured by establishment of current saturation, signal out winding, and electro-magnetic simulation in this study. Communication speed of 14 Mbps in 600 meter communication distance of the real electric power transmission line was obtained by using the inductive coupler and application possibility of the inductive coupler for the electric power transmission line was certified.

Key Words : Power line communication, Power transmission line, Inductive coupler, Nano-crystalline

1. 서론

최근 전력선 통신(power line communication) 기술의 발달과 더불어 세계적으로 관심도가 높아짐에 따라 이에 대한 연구 개발 및 자본 투자가 활발히 진행되고 있다. 이 전력선 통신 기술은 새로운 통신망으로 관심을 받게 되었고, 특히 전력선의 감시 및 제어 시스템으로의 적용 연구와 응용이 진행되고 있다.

송전선과 같은 고압선에서 전력선 통신시스템을 구현하기 위해서는 전력선과 모뎀 사이에서 통신 신호의 전달 기능을 하는 커플러(coupler)가 요구

되는데, 전력선 외부에 단순 클램핑(clamping) 작업으로 설치되는 비접촉식(inductive) 커플러는 신호전송특성과 전기적 안정성이 우수하고 설치가 용이하며, 접촉식(capacitive) 커플러에 비해 제조 단가가 낮기 때문에 응용성이 높다[1-3].

그런데 현재까지 국내뿐만 아니라 해외에서도 송전선용 비접촉식 커플러를 개발하였거나, 설계 및 제조조건에 대한 연구 사례도 없기 때문에, 송전선에서 전력선 통신을 이용한 전력 감시/제어 시스템의 구축 또는 상용화가 전혀 이루어지지 않고 있다.

송전선용 비접촉식 커플러를 개발하기 위해서는 자기코어의 설계와 제조, 커플러 구성기술, 회로기술, 손실 제어 기술, 주파수 특성 제어 기술 등의 다양한 기술이 융합되어야 한다.

즉, 154 kV급 송전선에는 최대 2,000 A의 전류가 유입되는데, 비접촉식 커플러에 내장되는 자기코어는 이와 같은 대전류에서 자기 포화(saturation)되지 않고 낮은 삽입손실(insertion loss, S_{21})특성으로 통신 주파수에서 안정적인 전자기적 특성을 발

1. (주) 매트론 기술연구소
(경남 마산시 내서읍·중리 1121-9)
2. 한전 KDN(주) 송변전사업처
3. 경남대학교 나노공학부
4. 현대중공업(주) 기전연구소
a. Corresponding Author : hskim@matttron.kr
접수일자 : 2009. 7. 22
1차 심사 : 2010. 2. 1
심사완료 : 2010. 2. 23

휘해야 하는데, 자기코어는 대전류에 의해 포화되어 자기적 특성을 상실하므로 최대 자속 밀도(B_m)가 높으면서 히스테리시스 곡선(hysteresis curve)의 기울기가 낮은 재료를 사용하고, 절단면 사이에 에어-갭을 적용하여 포화 전류를 증가시킬 수 있다.

또한 자기코어의 공진주파수 이상의 주파수에서는 자기코어의 기능을 상실하여 커플러가 통신능력을 급격하게 저하시킬 수 있으므로, 공진주파수가 통신 주파수 대역 이후에 위치할 수 있도록 자기코어의 형상 설계가 이루어져야 한다. 이러한 특성들은 재료에 따라 서로 상반관계에 있기 때문에 요구되는 사양에 따라 적절한 제어가 필요하다.

그리고 커플러가 최소의 삽입손실 특성을 발휘하기 위해서는 신호 출력부의 권선조건 및 커플러의 구성 기술이 확립되어야 한다.

현재까지 송전선용 비접촉식 커플러가 개발되지 못한 것은, 커플러의 구성기술에 대한 어려움도 있지만, 실제 송전선에서의 적용 연구가 현실적으로 이루어지기 어렵기 때문이다.

따라서 본 논문에서는 최적의 자기코어를 선택하고, 가장 우수한 특성을 나타내는 공정으로 자기코어를 제조한 후, 커플러의 구성기술 연구를 통해 2,000 A급 송전용 비접촉식 커플러를 제조하고자 하였으며, 현재 운용중인 가공 송전선에서의 통신 실험을 실시하여, 그 적용 가능성을 관찰하였다.

2. 실험 방법

송전선용 비접촉식 커플러의 제조와 적용연구에서, 자기코어의 제조, 비접촉식 커플러의 구성, 송전선에서의 통신실험의 순서로 진행하였다.

먼저 자기코어 제조에서, 투자율과 자속밀도가 높고 코어손실이 작은 나노결정립(nanocrystalline) 재료(Fe-Si-B-Nb-Cu)를 사용하였다. 리본 형태의 재료를 권취(winding)한 후, 450 ~ 530°C의 범위에서 1 시간동안 열처리하여 공기 중에서 냉각시켰다. 이 때 열처리는 진공 처리 후 N_2 가스분위기에서 실시하였다.

송전선용 비접촉식 커플러 구성에서, 송전선은 최대 2,000 A까지 전류가 유입될 수 있으므로 자기코어가 이 전류에서 포화되지 않도록 설계하는데, 본 연구에서는 Flux 2D 프로그램을 이용하여, 전자장 모의해석을 통해 자기코어의 형상 조건을 설정하였다. 또한 전력선통신 주파수대역(2 ~ 30 MHz)에서 가장 우수한 신호전송 특성을 나타내는 권선조건을 적용하기 위한 실험이 진행되었고, 신호

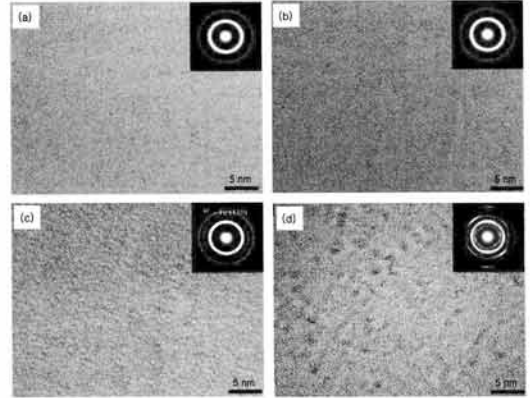


그림 1. 열처리 온도에 따른 미세구조 및 결정상 형성 분석(TEM) 결과: (a) 450°C, (b) 480°C, (c) 510°C, (d) 530°C.

Fig. 1. TEM images shown micro-structure changes with heating temperatures: (a) 450°C, (b) 480°C, (c) 510°C, (d) 530°C.

전송 특성은 삽입손실(insertion loss, S_{21}) 특성을 기준으로 평가하였는데, 이것은 네트워크 분석기(8751A, Agilent)를 이용하여 측정하였다. 커플러의 제조는 자기코어 형상 설정, 케이스 설계, 권선조건 설정, 에폭시 몰딩, 절단 및 에어-갭 크기 설정 등의 순서로 진행되었다. 그리고 가공 송전선은 외부 절연피복이 없으므로 커플러의 외부 금속물질에서 방전사고가 발생할 수 있으므로, 절연 지그를 제작하여 결합하였다.

마지막으로 제작된 비접촉식 커플러의 응용 가능성을 평가하기 위해, 현재 운용중인 154 kV급 가공 송전선에 커플러를 체결하여 통신실험을 진행하였다. 통신실험에 사용된 전력선 모델은 Intellon Co. 칩셋을 적용한 200 Mbps급이었고, 전기적 안정성을 고려하여 송전선은 휴전상태에서 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

나노결정립 재료는 수 ~ 수십 nm 크기의 결정이 형성되었을 때, 가장 우수한 전자기특성을 나타내기 때문에 열처리 공정에서 최적의 온도 조건의 설정이 필요하다. 그림 1은 나노결정립 재료의 열처리 온도에 따른 결정화 및 미세구조 변화를 나타낸 것이다. 그림 1에서 열처리 온도가 증가할수록 결정화가 진행되는데, 510°C에서 α -Fe의 결정핵이

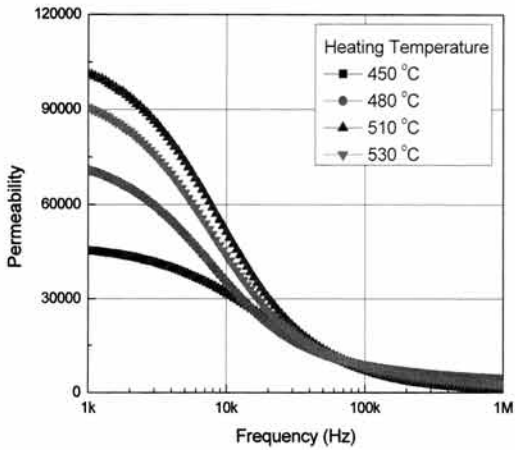


그림 2. 열처리 온도에 따른 투자율 변화.
 Fig. 2. Changes of permeability nano-crystalline core as heating temperature.

생성되어 온도 증가에 따라 점점 성장함을 알 수 있다. 이것은 그림 2의 TEM 미세구조 및 결정분석 결과로 확인할 수 있는데, 510°C에서 α -Fe 결정이 석출되어 온도증가에 따라 결정이 성장함을 알 수 있다[3].

그림 2는 나노결정립 재료를 이용하여 제조한 코어의 열처리 온도에 따른 투자율 변화를 나타낸 것이다. 열처리 온도가 증가함에 따라 투자율은 증가하여 510°C에서 최대점을 나타내었고, 530°C에서 다시 감소하였다. 이것은, 그림 1에 나타내었듯이, 510°C에서 수 nm의 α -Fe 결정이 석출되면서 투자율은 증가하고, 열처리 온도의 증가에 따라 결정이 성장하면서 자기이방성이 증가하여 다시 감소하기 때문이다[1].

그림 3은 2,000 A급 자기코어를 설계하기 위한 전자기장 모의해석의 개념도를 나타낸 것이다. 해석 결과의 오차율을 최소화하기 위해서는 전자기장 모의해석의 개념도를 자기코어가 적용되는 전력선 환경과 동일하고 명확하게 고정시킨 다음 이루어져야 한다. 그림의 개념도는 전력선 주위를 자기코어가 둘러싸고 있는 형태이며, 전력선 외경 및 절연체의 두께를 고려하여, 전력선의 전류와 자기코어의 크기(내경 x 외경 x 높이)를 각각 2,000 A와 64 x 100 x 20 mm로 고정된 다음 자기코어에 형성된 에어-갭 크기를 변화시켰다. 그림에서 path 경로를 나타내는 화살표는 자기코어의 외경에서 내경방향으로 모의해석이 이루어졌음을 나타내며, 이때의 자기코어 경로의 길이를 path 길이 $[(\text{외경}-\text{내경})/2]$ 라고 한다.

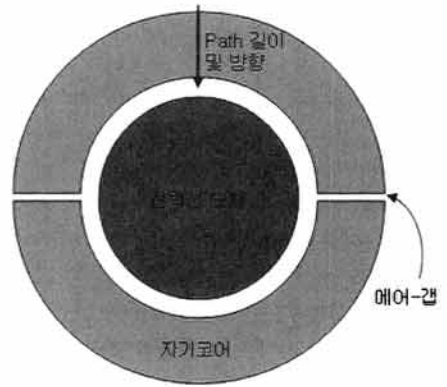


그림 3. 자기코어의 전자기장 모의해석 개념도.
 Fig. 3. Diagram for electromagnetic simulation of magnetic core.

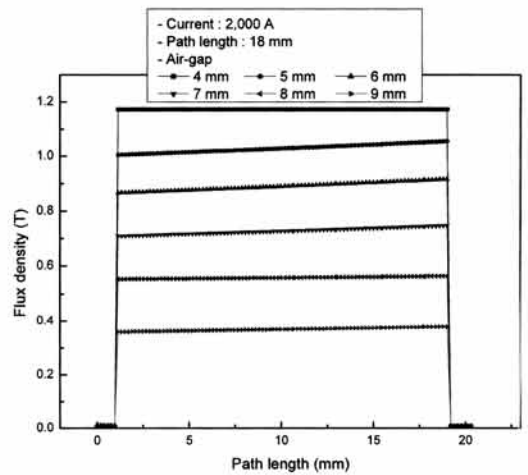


그림 4. 2,000 A의 전류에서 에어-갭 크기에 따른 자속밀도 변화.
 Fig. 4. Change of flux density as a function of air-gap size at the 2,000 A.

그림 4는 전력선의 도체에 2,000 A의 전류가 흐를 때, 자기코어의 path 길이와 에어-갭 크기에 따른 자속밀도의 변화를 나타낸 것이다. 본 연구에 사용된 나노결정질 합금 재료의 포화자속밀도는 1.2 T인데, 자기코어에 에어-갭이 형성되면 에어-갭 사이로 자속의 누설이 발생하고, 식 (1)에 의해

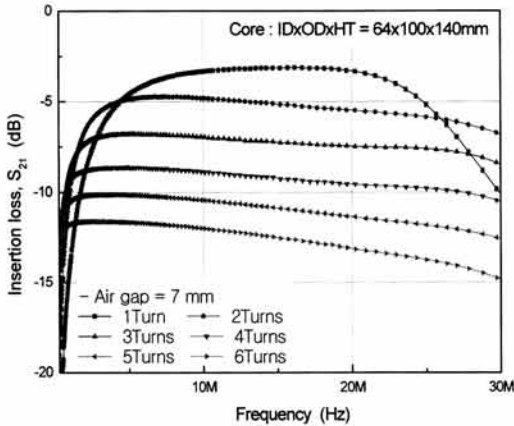


그림 5. 에어-갭 크기와 권선수에 따른 삽입손실 변화.

Fig. 5. Change of insertion loss as a function of air-gap size and winding number.

누설되는 자속의 양만큼 포화 전류량은 증가하게 된다.

$$I_{\max} = \frac{B_m \cdot l_c}{\mu \cdot N} \quad (1)$$

[I_{\max} : 최대 사용 전류량, B_m : 자속밀도,
 μ : 투자율, N : 권선수]

그림에서 에어-갭이 4 mm일 때까지는 자속밀도가 약 1.2 T로 자기코어가 포화됨을 알 수 있으며, 그 이후 에어-갭의 크기가 증가함에 따라 자기코어의 자속밀도는 감소하였다. 일반적으로 전자부품에 사용되는 자기코어는 사용 전류가 코일에 흐를 때, 최대자속밀도의 50~75% 정도가 되도록 설계된다. 따라서 에어-갭이 약 6~7 mm일 때가 2,000 A의 전류에서 가장 효율적으로 동작할 수 있을 것이라 예측되었다.

그림 5는 커플러가 전력선에 체결되었을 때 환경에서, 전력선을 1회 권선을 가지는 신호선으로 가정하여 구성하여, 커플러의 출력 신호선의 권선수에 따른 삽입손실변화를 나타낸 것이다. 이 때, 본 연구에서 제조된 자기코어를 이용하여 커플러를 제조하였으며, 입력 및 출력 신호선 간의 전기기계 결합계수(k_p)를 증가시키기 위해, 출력 신호선은 가능한 높은 비표면적으로 가지도록 박판을 사용하여 구성하였다. 그리고 자기코어에 형성된

에어-갭의 크기는 그림 4의 전자장 모의해석 결과인 7 mm를 적용하였다.

그림에서 에어-갭의 크기에 관계없이 자심재료의 삽입손실(S_{21})은 권선수가 증가할수록 증가하였다. 이것은 권선수에 증가에 의한 유도 자장의 증가로 인해 삽입손실이 감소하리라 예상할 수도 있지만[4,5], 유도 자장의 증가에 의한 삽입손실의 감소 효과보다 권선수 증가에 따른 고주파 손실의 급격한 증가로 인해 삽입손실의 증가 효과가 더 크게 작용하기 때문인 것으로 분석된다. 그러나 5 MHz 이하의 주파수 대역에서는 고주파 손실의 증가분이 유도 자장의 증가에 의한 삽입손실의 감소 효과보다 작기 때문에 권선수가 증가함에 따라 삽입손실이 감소하였다.

여기서 커플러는 전력선 통신 주파수 대역인 2 ~ 30 MHz에서 가장 작은 삽입손실을 나타내어야 하므로, 2회 권선이 가장 적합한 조건으로 판단되었다.

그림 6은 내경 x 외경 x 높이가 64 x 102 x 140 mm인 자기코어에 2회 권선을 적용하여 비접촉식 커플러를 제작하여 5 mm 이상의 에어-갭과 전류량에 따른 삽입손실 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 에어-갭의 크기가 5 mm일 때, 통신대역에서 약 5 ± 2 dB 정도의 삽입손실 특성을 나타내었고, 약 1,500 A까지는 안정적인 특성을 발휘하였다. 하지만 2,000 A에서는 전체적으로 약 2 dB 정도의 손실이 증가하면서 불안정한 특성을 나타내었다. 반면 에어-갭의 크기가 7 mm 일 경우에는 5 mm 일 때보다 평균적으로 약 0.5 dB의 삽입손실이 증가되지만, 약 6 ± 1 dB 정도 삽입손실 특성을 2,000 A까지 안정적인 경향을 나타내었고, 9 mm의 에어-갭에서는 안정적인 전류특성을 유지하면서, 전체적으로 손실이 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 최대 2,000 A의 전류가 유입되는 송전선용 비접촉식 커플러는 7 mm의 에어-갭을 적용할 때, 가장 우수한 특성을 나타냄을 확인할 수 있다.

그림 7은 본 연구에서 제조된 송전선용 비접촉식 커플러를 이용하여 실시한 전력선 통신 시험 모식도를 나타낸 것이다. 전력선은 154 kV급 송전선이며, 안전성을 고려하여 휴전상태에서 진행하였다. 휴전상태에서는 고전류가 유입되지 않기에 실제 송전선과 비교될 수 있으나, 사용된 커플러의 전류 특성은 그림 6에서 확인되었고, 그 외의 노이즈 및 기타 환경은 동일하기 때문에 통신특성은 실제 고전류가 유입되는 송전선과 동일할 것으로 예상되었다. 그리고 통신시험에서 사용된 커플러와

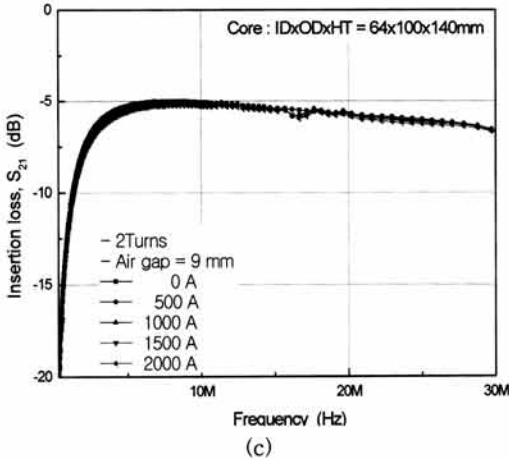
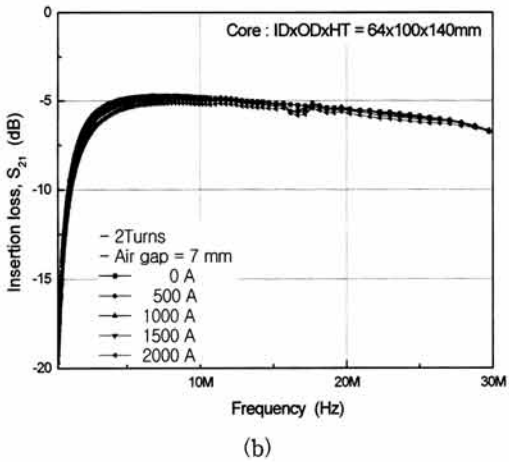
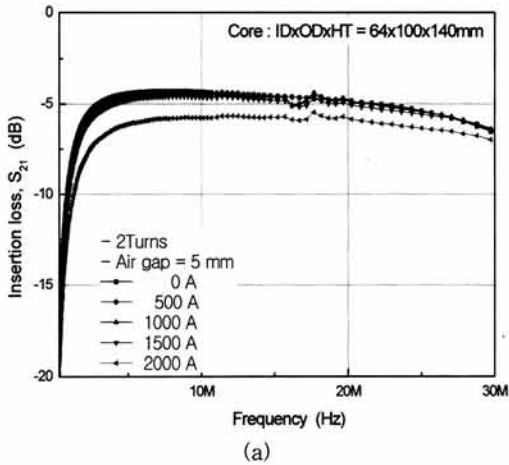


그림 6. 에어-갭과 전류에 따른 삽입손실 변화.
 Fig. 6. Change of insertion loss as a function of air-gap size and current.

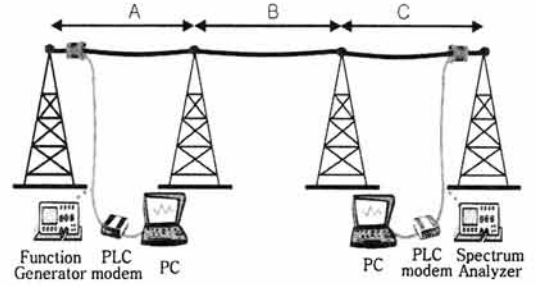


그림 7. 송전선에서 비접촉식 커플러를 이용한 전력선 통신 시험.
 Fig. 7. Test of power line communication using the inductive coupler in the power transmission line.

표 1. 송전선용 비접촉식 커플러의 사양.
 Table 1. Specifications of inductive coupler for the power transmission line.

품 목	Inductive Coupler
삽입손실	- 6 ± 1 dB (2~30 MHz)
최대사용 전류	2,000 A
크 기 (ID x OD x HT)	40 x 114 x 158 mm
무 게	5.5 kg
인터페이스	BNC

표 2. 통신시험 환경 및 장치.
 Table 2. Conditions of environments and equipments for PLC test.

통신매체	154 kV 송전선
송전선 길이	최대 800 M
송전선 높이	약 15 M
전력선 모델	Intellon, 200 Mbps
전 원	배터리 + 인버터
통신속도 측정	IPERF program

송전선이 서로 전기적으로 단락되는 것을 방지하기 위해 절연 지그를 커플러 외부에 삽입하였다. 표 1과 표 2는 통신시험에 사용된 커플러의 사양과 통신시험 환경 및 장치의 조건을 나타낸 것이다.

표 3. 전선 통신 시험 결과.

Table 3. Result of PLC test in the power transmission line.

송전선 구간		A	B	C
거리 (meter)		250	600	800
통신 속도 (Mbps)		22	14	0.3
신호 레벨	- dBm	17	20	27
잡음 레벨	@10 MHz	27		

표 3은 송전선에서 실시한 통신시험 결과를 나타낸 것으로서, 통신시험 최대 거리인 800 M까지 통신이 성공하였다. 통신속도는 250 M와 600 M에서 각각 22 Mbps와 14 Mbps의 속도를 나타내었고, 800 M에서 0.3 Mbps로 급격히 감소하였다. 거리증가에 따라 통신속도가 감소하는 것은 통신 신호 레벨에 비해 잡음(Noise)의 레벨이 점점 증가하여 전력선 모델에서의 처리속도가 늦어지기 때문인 것으로 분석되며, 특히 800 M에서 통신속도가 급격히 떨어지는 것은 잡음레벨이 신호레벨과 동일한 값으로 증가하였기 때문인 것으로 분석되었다[6,7].

하지만 송전선에서의 전력선 통신 시스템은 500 M 이상의 통신거리와 2 Mbps 이상의 통신속도를 요구하기 때문에 본 연구에서 제작된 비접촉식 커플러는 특성이 우수하고 적용 가능성이 높다고 판단할 수 있다.

4. 결 론

송전선에서 전력선 통신 시스템을 구현하기 위해서는 통신신호를 전달하는 비접촉식 커플러가 요구되며, 송전선용 비접촉식 커플러를 제조하기 위해서는 우수한 전자기적 특성을 나타내는 자기코어와 커플러 구성 기술이 요구된다.

송전선용 비접촉식 커플러를 제조하기 위한 본 연구에서, 나노결정립 합금재료의 열처리 온도를 최적화하여 자기코어를 제조할 수 있었고, 전자장모의해석을 통해 대용량의 자기코어의 형상과 에어-갭 조건을 설정할 수 있었다. 또한 출력 권선

수, 전류 포화특성 등에 대한 조건을 확립하여 2,000 A급 비접촉식 커플러를 제조할 수 있었다. 이 대용량 비접촉식 커플러는 실제 운용중인 송전선에 설치되어 600 meter에서 14 Mbps의 통신 속도를 발휘하여, 전력선 통신 시스템으로의 적용 가능성을 나타내었다.

참고 문헌

- [1] H. S. Kim, J. R. Kim, H. Y. Lee, K. U. Kim, J. S. Huh, J. H. Lee, Y. W. Oh, W. B. Byon, K. Y. Gwak, and S. H. Ju, "Signal transmission properties of the inductive coupler using the high permeability magnetic materials", J. of KIEEME(in Korean), Vol. 19, No. 4, p. 339, 2006.
- [2] 이재조, 박영진, 오휘명, 김관호, 이대영, "고압 배전선로 전력선 통신 신호결합장치 개발", 대한전기학회논문지 시스템및제어부문D, 54권, 6호, p. 409, 2005.
- [3] 김현식, 김종령 허정섭, 이해연, 이준희, 정원재, 오영우, 변우봉, "전력선 통신용 비접촉식 커플러의 신호전송특성 연구", 전기전자재료학회 2006추계학술대회논문집, p. 239, 2006.
- [4] 박병석, 최영림, 유동희, 현덕화, "저저압 인입선에서의 고속 전력선통신 특성 분석", 전력전자학회, 10권, 3호, p. 264, 2005.
- [5] H.-S. Kim, J.-R. Kim, K.-U. Kim, J.-H. Lee, W.-B. Byon, B.-S. Park, and T.-Y. Lee, "Properties of high permeability magnetic materials for signal transmission at the high frequency", Proc. 2005 Summer Conf. KIEEME, p. 272, 2005.
- [6] 조성국, 김동성, 권옥현, 명관주, 윤지훈, "Software protocol에 기반한 옥내 전력선 통신 장치의 설계", 대한전자공학회, 23권, 2호, p. 485, 2000.
- [7] H. S. Kim, J. R. Kim, H. Y. Lee, K. U. Kim, Y. W. Oh, W. B. Byon, and B. S. Park "The characteristics of inductive coupler for power line communication(PLC) using the nanocrystalline magnetic materials", Mag-05-128, p. 21, 2005