

함침된 나노결정립 리본을 이용한 광대역 유도형 결합기 연구

A Study on Broadband Inductive Coupler using Impregnated Nanocrystalline Ribbon

김 현 식*, 주 우 진*, 손 경락**★

Hyun-Sik Kim*, Woo-Jin Ju*, Kyung-Rak Sohn**★

Abstract

Ferrite cores are used as a soft magnetic material in the fabrication of couplers for inductive powerline communication (PLC). However, it is difficult to adjust the size freely according to the power-line and power-grid environment. In this paper, we report that a nano-crystalline alloy with higher permeability than ferrite can be used as an inductive coupler for non-contact PLC. Since nano-crystalline are produced in the form of a thin ribbon, the size of the coupler can be freely controlled by the number of ribbons wound on the toroidal core. It was fabricated with induction type coupler and showed to be suitable for non-contact power line communication. Experimental results show that the communication bandwidth is 45 Mbps for 100 m and 8 Mbps for 200 m under the current fluctuation of less than 100 A, and the reception ratio is 100%.

요 약

페라이트 코어는 연자성 재료로서 유도형 전력선 통신을 위한 결합기 제작에 사용되고 있다. 그러나 전력선 통신환경에 따라 크기를 자유롭게 조절하기 어려운 재료이다. 본 논문에서는 페라이트 보다 투자율이 높은 나노 결정립합금을 이용하여 광대역 전력선 통신용 유도형 결합기 재료로 적용할 수 있음을 보고한다. 나노결정립은 얇은 리본 형태로 제조되므로 토로이달 코어에 감긴 리본의 횟수로 결합기의 크기를 자유롭게 조절할 수 있다. 함침법으로 만든 코어를 이용하여 유도형 결합기를 제작하였고, 이를 비접촉식 전력선 통신용에 적용할 수 있음을 보여주었다. 실험결과 100 A 이하의 선로 전류변동 조건에서 통신거리 100 m 까지는 45 Mbps, 200 m 까지는 8 Mbps의 대역폭을 보였으며 수신율은 100 %이었다.

Key words : Inductive powerline communication, nano-crystalline, inductive coupler, soft magnetic material., Toroidal core

* Mattron Corp., 678, Gapo-dong, Masanhappo-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, Korea

** Dept. of Electronics and Communications Engineering, Korea Maritime and Ocean University,

★ Corresponding author

Email : krsohn@kmou.ac.kr, Tel : +82-51-410-4312

※ Acknowledgment

This work was supported by through the development of local specialized industries of Ministry of SMEs and Startups (P0002774) and the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (2017R1A2B4010993).

Manuscript received May. 22, 2019; revised Jun. 17, 2019; accepted Jun. 17, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

재료 및 야금 분야에서는 기존 재료보다 강하고 단단하며 더 높은 온도에서 사용이 가능하면서도 가벼운 재료를 개발하거나 기존 재료의 성능을 향상시키기 위해 여러 가지 새로운 비평형 처리 방법을 개발하였다. 특히 금속을 액체 상태에서부터 급속 응고시키게 되면 활성화상태의 내부 원자들이 원자 고유의 규칙적인 결정 상태를 형성하는 결정질 금속이 된다는 것에 주목하였다[1]. 이는 물질을 준안정 상태로 변환시키는 방법으로 결정립계의 원자 비율이 원자 층 내부의 원자 비율보다 높거나 같을 때 그 입자 크기를 수 나노미터의 아주 작은 값으로 줄일 수 있었으며, 이를 나노 결정 물질로 언급하였다. 입자 크기가 10 마이크로미터 이상인 종래의 다결정 물질에 의해 나타나는 특성보다 상당히 우수한 특성을 갖는 것으로 나타나면서 나노결정 물질은 전력 전송에서부터 가전제품에 이르는 분야까지 낮은 코어 손실과 높은 포화 자속밀도를 가지는 자심 연구가 활발하다[2-4]. 한편 시장에서는 오래 동안 에너지 소비를 줄일 수 있는 우수한 연자성 물질 응용이 요구되어져오고 있다. 자성 제품에서 전자기 변환 시 코어 손실에 의한 에너지 손실은 전 세계 전기 소비량의 3.4%에 달하는 것으로 알려져 있다. 변압기 및 모터 제품 중 90% 이상의 비율을 차지하는 철 및 실리콘 자성 제품은 핵심 소재로서의 자기 성능의 측면에서 한계에 도달하는 것으로 보고 있다. 나노 결정 연자성 합금은 이러한 문제를 해결하기 위해서 등장한 기술로서 고주파 응용을 위해 전력 페라이트 및 무정형 물질을 대체 할 수 있는 것으로 더 잘 알려져 있다.

나노 결정립 자심은 통상 20 μm 내외 두께의 리본이 도넛 모양으로 감겨진 형상을 하며 공통모드 초크와 인버터 트랜스용 코어 등으로 적용되고 있다. J. Binkofski는 자성재료의 특성이 전력선 통신 결합기의 성능과 크기에 미치는 영향을 연구하면서 비트로perm(Vitroperm)과 같은 나노결정 자성 물질의 특성을 언급하였고 페라이트 코어에 비해 크기를 9배 정도 작게 할 수 있음을 보고하였다[5]. T. Filchev 등은 펄스형 전력응용을 위한 고전압 고주파 전력변환기를 위한 연구에서 나노결정립 다중 토로이달 코어를 제안하였다[6].

연자성체는 유도형 전력선 통신을 위한 광대역

신호 결합기로 개발되어 적용되고 있다[7]. 주로 도넛형 페라이트 자심을 다수 개 적층한 코어를 사용한다. 그러나 나노결정립 자심의 경우에도 페라이트와 유사한 전자기 특성을 보이지만 투자율이 높으므로 유도형 전력선 통신용 결합기로 적용할 수 있다. 본 논문에서는 비접촉식 전력선 통신의 유도형 결합기로 응용하기 위한 나노 결정립 합금의 특성분석과 투자율 최적화를 위한 열처리 조건을 제시한다. 함침법으로 제작한 나노결정립 자심을 이용하여 유도형 결합기로 구현하였고 이를 전력선 통신에 적용하여 통신성능을 측정하였다.

II. 자심의 특성분석과 결합기 구현

본 논문에서 제안하는 도넛형 나노 결정립 코어는 비접촉 방식으로 통신 선로에 설치되는 결합기의 핵심 구성부품이다. 따라서 안정적인 전력선 통신에 필요한 광대역 결합기 개발이 필요하다. 이를 위하여 표 1과 같이 4가지 유형의 자심으로 각각의 투자율과 삽입손실을 측정하고 비교분석하였다. A와 B는 Fe 기반의 나노결정립 유형의 자심재료이며, C와 D는 니켈과 아연이 포함된 페라이트 유형의 자심재료이다.

Table 1. Type of sample magnetic cores.

표 1. 샘플 자심의 유형

Sample	Material	Main composition	Dimension (mm ³) (ID×OD×H)
A	Metal	Fe, Si, B, Nb, Cu	41×61×20
B	Metal	Fe, B, Zr, Ag	39×63×20
C	Ferrite	Fe ₂ O ₃ , NiO, ZnO	40×61×13
D	Ferrite	CuO, Fe ₂ O ₃ , NiO, ZnO	25×51×58

투자율은 도넛형 자심에 N회 권선 후 측정된 인덕턴스(L_{measured})를 이용하여 식 (1)로부터 계산한다[8]. 주파수에 따른 인덕턴스 값은 HP사의 4294A 임피던스 분석기를 이용하여 1 kHz~100 MHz의 주파수 범위에서 측정하였다.

$$\mu = \frac{l_e}{\mu_0 A_e N^2} \times L_{\text{measured}} \quad (1)$$

여기서 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (H/m)$, A는 토로이달 코어의 유효 단면적, N은 권선 수, l_e 는 유효 자계경

로 길이다. 그림 1은 4개의 시료에 대한 투자율 그래프이다. 시료 A와 B는 1 kHz에서 30,000에 가까운 높은 투자율을 보인 반면, C와 D는 투자율은 700 정도로 낮지만 1 MHz 이상까지 일정한 투자율을 보인다. 자심의 투자율이 높을수록 내부에 축적되는 자속에너지는 증가하므로 결합기의 신호결합효율을 향상시킬 수 있다.

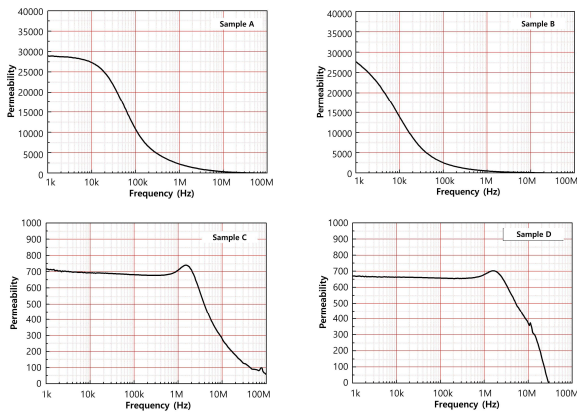


Fig. 1. The permeability of the samples.
그림 1. 자심재료의 투자율

그림 2는 네트워크 분석기로 측정된 4 종류 샘플의 삽입손실이다. 일반적으로 같은 재료라도 부피가 클수록 삽입손실이 작아지는 효과가 있다. 이는 삽입손실이 자심재료의 인덕턴스와 연관된 특성으로 인덕턴스가 자심재료 부피에 비례해서 증가하고 이로 인해 삽입손실이 감소한다. 따라서 본 연구에서는 정확한 비교를 위해 측정된 자심재료의 삽입손실 값에 자심의 부피를 나눈 값으로 나타내었다. 자심은 전형적인 결합기 특성을 나타내고 있

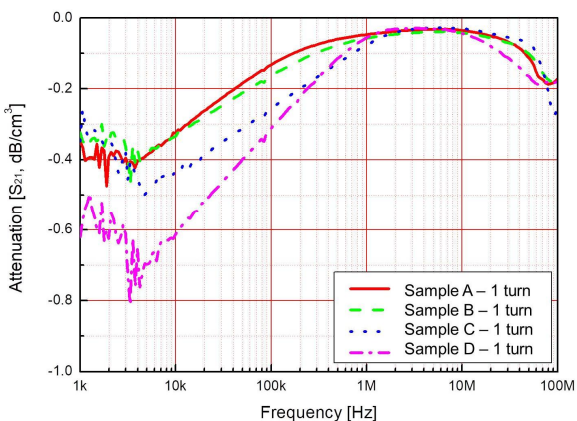


Fig. 2. The insertion loss of core.
그림 2. 자심재료의 삽입손실

지만 주파수 특성이 서로 다를 수 있다. 투자율이 높은 자심의 삽입손실이 넓은 주파수 영역에서 더 작게 나타난다. 광대역 전력선 통신의 주파수 내역이 1-30 MHz이므로 급속계 자심인 나노 결정립 코어가 유도형 결합기에 더 효과적일 것이다.

연자성 특성이 우수한 나노결정립 합금은 급속냉각장치를 통해 비정질 리본 형태로 제조하고, 이를 일정한 형상 및 크기로 감은 뒤에 열처리 공정을 거치게 된다. 도넛형태로 감긴 비정질 자심재료에 300~600 °C의 온도가 가해져서 1 시간동안 열처리되는 과정에 일어나는 자속밀도 변화는 그림 3과 같다. 열처리 온도가 증가함에 따라 자속밀도는 증가하다가 500 °C 이상에서 포화되는데 이는 Fe 결정화에 의한 것으로 사료된다. 그러나 투자율은 500 °C에서 40,000 이상으로 가장 우수한 자기특성을 나타낸 후 다시 감소한다. 본 연구에서는 Fe-계 자심 제작의 최적 열처리 조건을 500 °C로 설정하였다.

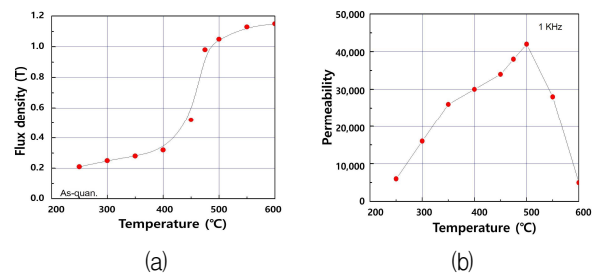


Fig. 3. Characteristics of Fe-based magnetic core according to annealing temperature. (a) magnetic flux density, (b) permeability.
그림 3. Fe계 자심의 열처리 온도에 따른 특성.
(a) 자속밀도, (b) 투자율

III. 결합기 제작과 성능 시험

나노결정립 자심은 매우 얇은 스트립을 적당한 폭의 리본 형태로 가공한 것이기 때문에 결합기는 도넛 형태로 제작하는 것이 일반적이다. 결합기의 길이는 자심 폭과 자심의 개수에 의해 결정된다. 본 연구에서는 20 mm 높이의 나노결정립 리본을 이용하여 도넛형 코어를 제작하였으며 외경은 62 mm, 내경은 40 mm 이다. 동일한 외경과 내경을 가지는 자심재료에 대하여 결합기의 길이가 길어지면 자심에 축적되는 자속에너지가 커지기 때문

에 결합효율이 높아진다. 그러나 자심의 체적이 커 지므로 자체 인덕턴스 값이 올라가게 된다. 인덕턴스는 고주파 제한소자의 특성을 가지므로 주파수가 높아지면 자심의 임피던스가 증가하여 고주파 손실에 의한 신호결합 효율이 제한된다. 그러므로 유도형 광대역 전력선 통신주파수 범위 내에서 삽입 손실이 최소인 코어의 길이를 결정하여야 한다.

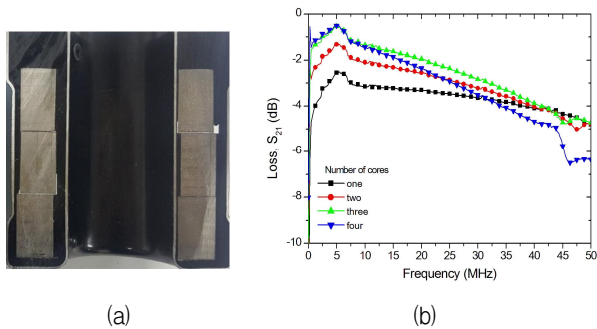


Fig. 4. Inductive coupler. (a) Cross sectional view, (b) insertion loss for the number of cores.

그림 4. 유도형 결합기.

(a) 단면사진, (b) 코어의 개수에 의한 삽입손실

그림 4(a)은 20 mm 높이의 나노결정립 코어 3개를 적층하여 만든 결합기의 단면사진이다. 알루미늄 케이스에 자심을 적층한 후 접착제로 고정하였다. 1회 권선 결합기에 대하여 자심 수에 따른 삽입 손실은 그림 4(b)와 같다. 통신 주파수 영역에서 최소 삽입손실과 통신대역 상한 주파수인 40 MHz에서의 삽입손실차이는 자심재료 개수가 증가함에 따라 증가한다. 즉 자심 개수 증가에 따른 인덕턴스의 증가는 고주파 특성을 저하시키는 것이다. 자심이 3개일 경우 광대역 전력선 통신의 대역폭 상한주파수 영역에서 가장 작은 손실을 보인다. 4개일 경우 손실이 다시 증가하는 것은 자체 인덕턴스 증가에 의한 고주파 손실이 커지기 때문이다. 그러므로 광대역 전력선 통신대역 주파수 영역에서 삽입손실이 최소가 되는 조건으로 자심 3개를 적층한 길이 60 mm로 결정하였다.

Fe-계 나노결정립합금은 우수한 자기적 특성과 저 손실을 가지고 있음에도 불구하고, 도넛형 자심을 제조할 경우에는 가능한 한 점적율을 높이기 위하여 최대한의 장력 하에서 스트립형 리본을 감는다. 이때 리본간의 점착도가 증가하여 층간 저항이 감소하므로 고주파 손실이 증가하게 된다. 이러한

손실을 억제하기 위하여 리본 간 절연 피막을 형성시켜야 한다. 일반적으로 절연 피막을 입히는 방법은 선 도포 후 열처리 방법으로 비정질 리본 상태에서 도넛 형태로 감는 중에 금속 알콕시드 종류의 절연 물질을 도포하여 절연피막을 입히고 열처리하는 졸-겔 방법이 있다. 또 다른 방법은 선 열처리 후 에폭시를 도포하는 방법으로 열처리가 완료된 자심에 절연 피막을 입히는 함침법이다. 본 연구에서는 생산성 향상과 공정의 수월성 측면에서 후자인 함침법을 사용하였다.

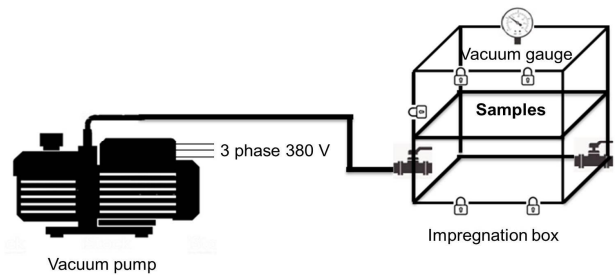


Fig. 5. Vacuum impregnation device.

그림 5. 진공함침장치

그림 5는 절연피막 도포를 위한 진공함침 장치의 구성도이다. 진공펌프는 80 l/min 용량을 가진 로터리 타입을 사용하였다. 함침공정의 최적화를 위해 Fe-계 나노결정립 코어 3개를 금속 케이스에 적층하였으며 에폭시를 이용하여 다양한 시간에서 토로이달 리본의 함침 작업을 수행하였다.

함침이 완료된 결합기는 비접촉식 결합을 위해서 두 조각으로 절단하여야 한다. 현장에 적용 가능한 절단된 결합기의 삽입손실은 그림 6과 같다. 함침된 결합기의 삽입손실은 함침하지 않은 결합기에 비해 다소 감소한다. 함침 전 절단된 결합기의 단면은 매우 거칠지만 5분 이상 함침한 결합기는 절단면이 매끄럽다. 이는 절단면의 상태에 따라 결합면의 밀착정도가 달라지므로 절단면의 거칠기가 결합기의 삽입손실에 영향을 준 것이다. 또한 가장 일반적인 NC-560 에폭시를 사용한 경우 함침시간이 길어질수록 절단된 커플러의 삽입손실이 감소하며 함침시간 5분과 10분에서는 차이가 없다. NC-420 에폭시를 함침 공정에 사용한 경우 함침시간이 3분일 때 NC-560 에폭시로 10분 함침한 경우보다 삽입손실이 작았다. 이는 NC-420 에폭시가 NC-560 에폭시보다 점도가 낮기 때문에 함침시간이 적어 나노결정립 자심에 인가되는 응력이 작어

지기 때문이라 사료된다. 따라서 Fe-계 나노결정립 자심의 경우 점도가 작은 에폭시일수록 함침 공정에 유리함을 알 수 있다.

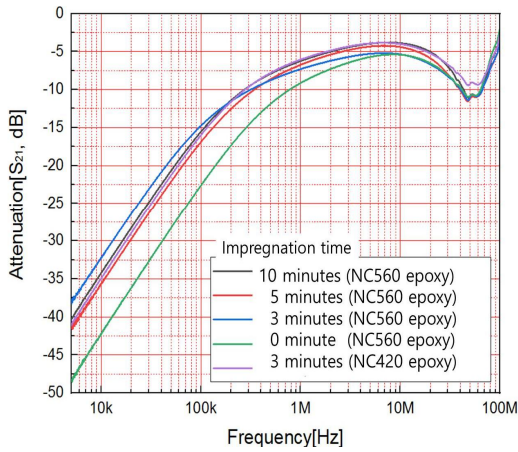


Fig. 6. Impregnation time of core and insertion loss of coupler.
그림 6. 자심의 함침시간과 결합기의 삽입손실

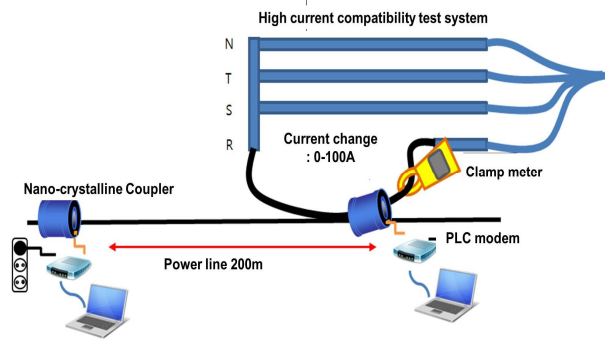


Fig. 7. Experimental setup for inductive PLC test under current change.
그림 7. 전류 변화에 대한 유도형 전력선 통신 실험도

그림 7은 제작된 결합기의 대전류 조건에서 전력선 통신 성능을 측정하기 위한 구성도이다. 전류가변이 가능한 대전류 실험 장치의 선로에 전력선모뎀과 결합기를 체결하고 삽입손실과 통신대역폭을 측정할 수 있다.

그림 8은 선로 전류변화에 대한 결합기의 삽입손실을 보여준다. 간편한 선로 체결을 위해 결합기는 두 조각으로 잘려져 있기 때문에 결합기를 체결하면 두 접촉면 사이에 미세한 공기간극이 존재한다. 공기 간극이 400 um 일 경우 100 A 까지 전류변화에도 삽입손실은 광대역 통신 대역폭 까지 거의 일정함을 보여준다. 그러므로 나노결정립 결합기는 전류 변동이 많은 선로에도 적용가능하다.

두 결합기간 통신거리와 인가전류 변화에 대한

전력선 통신 대역폭은 네트워크 대역폭 측정에 유용한 프로그램인 Jperf를 사용하였으며 그림 9와 같다. 설정 시간 범위 내에서 연속적으로 측정된 결과 값을 시각적으로 보여주므로 대역폭의 변동을 확인하는데도 유용하다.

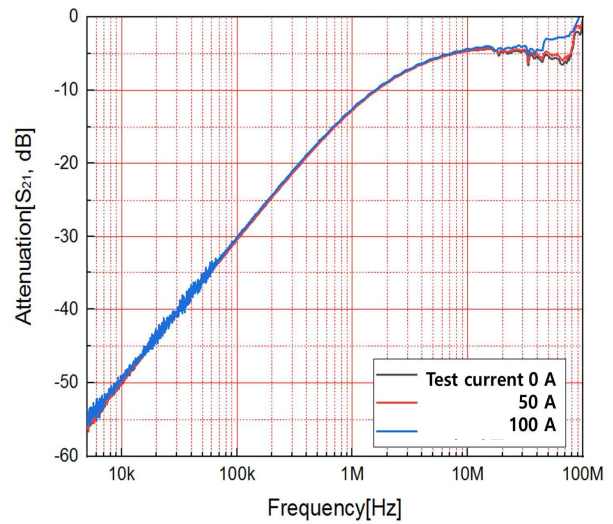


Fig. 8. Insertion loss of coupler due to current change.
그림 8. 전류변화에 의한 결합기의 삽입손실

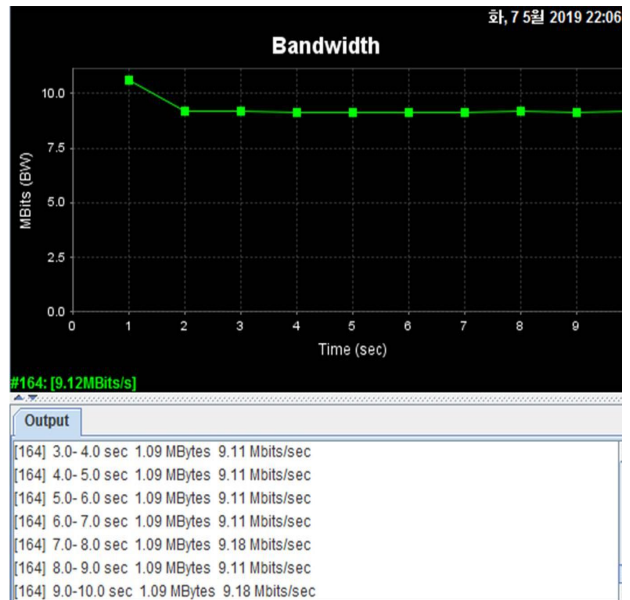


Fig. 9. Measurement of transmission bandwidth using Jperf.
그림 9. 통신 대역폭을 측정하는 Jperf

통신시험을 수행한 결과는 표 2와 같다. 통신거리 100 m와 200 m에 대하여 선로 전류를 0, 50, 100 A로 가변하였을 때 Jperf를 사용한 통신 대역폭과 ping을 이용한 통신 성공률을 측정하였다. 100 m 선로 길이에서 100 A 이하의 전류 변동 조

건이라면 45 Mbps의 통신 속도를 보장할 수 있다. 200 m 선로에서도 동일 조건의 전류변동에 대해 통신 속도는 약 8 Mbps로 측정되었다. 송신패킷에 대한 수신패킷의 정확도에서 패킷손실 없이 100% 수신됨을 보였다. 전력선 통신에서 유도형 결합기를 적용할 경우 나노결정립 코어의 자속포화가 발생하기 않는 전류조건에서는 선로 전류변동이 통신대역폭에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Table 2. PLC performance according to current change and distance.

표 2. 전류와 통신거리에 따른 전력선통신 성능

Distance	Current (A)	Bandwidth (Mbps)	Accuracy (%)	ping time (ms)
100 m	0	45.2	100	4
	50	45.2	100	4
	100	45.8	100	4
200 m	0	8.1	100	21
	50	8.1	100	16
	100	8.1	100	10

IV. 결론

본 논문에서는 나노결정립 합금으로 만든 20 mm 폭의 리본을 환형으로 감은 후 진공에서 함침하여 도넛형 자심을 제작하였다. 나노결정립 합금은 높은 투자율을 가지면서 코어에 감는 리본 수에 따라 크기를 자유롭게 조절할 수 있는 특징을 가진다. 최소 삽입손실을 갖는 조건으로 자심 3개 적층하여 60 mm 길이의 유도형 결합기를 제작하였다. 제작된 결합기는 전류변동이 있는 환경에서도 일정한 대역폭을 유지하여 유도형 전력선 통신에 적합함을 보였다. 그러므로 광산, 선박, 자동차, 수중, 또는 고전압 송전탑 전력선 통신 등 다양한 유형의 비접촉식 전력선 통신 환경에 유연하게 대처할 수 있으므로 기존의 페라이트 결합기를 대체하여 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

References

[1] C. Surtanarayana, "Structure and properties of nanocrystalline materials," *Bull. Mater. Sci.*, vol.17, no.4, pp.307-346, 1994.
DOI: 10.1007/BF02745220

[2] H. S. Kim, S. Y. Nam, K. R. Sohn, "Characteristics of legacy line communication using a high-current welding machine," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol.41, no.6 pp.557-562, 2017.

DOI: 10.5916/jkosme.2017.41.6.557

[3] S. Tsuzuki and Y. Yamada, "Feasibility study of ubiquitous sensor networks by inductively coupled PLC over PV power systems," *IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)*, pp.274-279, 2015.

DOI: 10.1109/ISPLC.2015.7147627

[4] K. R. Sohn, K. H. Kim, S. U. Jeong, S. Y. Nam, and H. S. Kim, "Performance analysis of the powerline communication for condition monitoring system of an MW class offshore wind turbine's nacelle," *J. Korean Navi. and Port Research*, vol.40, no.3, pp.159-164, 2016.

DOI: 10.5394/KINPR.2016.40.3.159

[5] J. Binkofski, "Influence of the properties of magnetic materials on the size and performance of PLC couplers," *International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, pp.281-284, 2005.

[6] T. Filchev, F. Carastro, P. Wheeler, and J. Clare, "High voltage high frequency power transformer for pulsed power application," *Proceedings of the 14th International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp.T6-165 - T6-170, 2010.

DOI: 10.1109/EPEPEMC.2010.5606517

[7] K. R. Sohn and S. G. Oh, "Characteristics of inductive coupling unit using toroidal core made of nano-crystalline soft magnetic material," *J. Korean Soc. of Marine Engineering*, vol.41, no.9 pp.872-877, 2017.

DOI: 10.5916/jkosme.2017.41.9.872

[8] S. Ito, "Basics of ferrite and noise countermeasures," http://product.tdk.com/en/products/emc/guidebook/eemc_basic_06.pdf

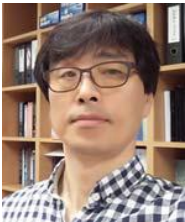
BIOGRAPHY

Hyun-sik Kim (Member)

1995 : MS degree in Materials Engineering, Kyungnam Univ.
1998 : PhD degree Materials Engineering, Kyungnam Univ.
1995~2000 : Research Engineer, KERI
2000~2019 : CEO, Mattron Corp.

Woo-jin Ju (Member)

2016 : BS degree in Information and Communication Engineering, Kyungnam Univ.
2016~2019 : Research Engineer, Mattron Corp.

Kyung-rak Sohn (Member)

1992 : BS degree in Electronics Engineering, Kyungpook National Univ.
2002 : PhD degree in Electronics Engineering, Kyungpook National Univ.

2003~2019 : Professor, Korea Maritime and Ocean University