

광대역 전력선 통신을 위한 연자성체 코어형 결합기 구현

양승호*, 정재환*, 김현식**, 손경락^o

Implementation of Soft Magnetic Core Type Coupler for Broadband Power Line Communication

Seung-Ho Yang^{*}, Jae-Hwan Jeong^{*}, Hyun-Sik Kim^{**}, Kyung-Rak Sohn^o

요약

본 연구에서는, 페라이트보다 포화자속밀도가 3-4배 높은 나노 결정립 코어를 이용하여 광대역 전력선 통신을 위한 유도형 결합기를 구현하였다. 연자성체 물질의 비선형 BH 특성 곡선과 유도형 결합기 코어의 일차전류를 이용하여 결합기의 조건별 자속밀도분포와 자속에너지를 계산하기 위하여 FEMM 시뮬레이션 하였다. 유도형 전력선 통신 시스템의 성능은 Jperf 프로그램으로 측정된 통신거리와 채널 대역폭으로 비교하였다. 선박 전력선망에서 임의의 두 지점간 채널 대역폭 측정에서, 나노결정립 코어 한 개를 사용한 결합기는 페라이트 코어 일곱 개를 사용한 결합기와 비슷한 1 Mbps 대역폭을 보였다. 선박의 전력선망을 이용한 운송도 및 이미지 데이터 전송 실험에서도 나노 결정립 코어 한 개만 사용한 결합기로 유도형 전력선 통신을 성공적으로 수행하였다.

Key Words : Broadband powerline communication, soft magnetic material, inductive coupler, ferrite, nanocrystalline

ABSTRACT

In this paper, an inductive coupler using a nanocrystalline core with a saturation magnetic flux density three to four times higher than that of ferrite is realized, and a broadband power line communication (PLC) system using this coupler is demonstrated. The nonlinear BH characteristic curve of the soft magnetic material and the primary current of the coupler were used to simulate the FEMM to calculate the flux density distribution and flux energy of each coupler. The network performance of the inductive PLC system is compared to the communication distance and channel bandwidth measured by the Jperf program. In measuring the channel bandwidth of the ship's internal powerline network, the coupler using the nanocrystalline core showed similar communication bandwidth to the coupler using the seven ferrite cores. An inductive coupler made of a single nanocrystalline core has successfully delivered sensor and image data through the ship's power grid. The use of nanocrystalline cores with high permeability can be used to build broadband PLC systems in a variety of fields, including ships and automobiles, since couplers can be made smaller than ferrite types.

※ 본 연구는 중소벤처기업부 재원의 지역특화산업육성사업 (P0002774) 지원과 과학기술정보통신부 재원으로 한국연구재단의 중견연구지원사업 (NRF2017R1A2B4010993)의 지원으로 수행되었습니다.

• First Author: Korea Maritime & Ocean University, gonggongeo@naver.com, 학생회원

◦ Corresponding Author : Korea Maritime & Ocean University, krsohn@kmou.ac.kr, 중신회원

* Korea Maritime & Ocean University, 01098116888@hanmail.net, 학생회원

** Mattron corporation, hskim@mattron.kr, 정회원

논문번호 : 201812-384-D-RN, Received December 11, 2014; Revised January 24, 2019; Accepted February 20, 2019

I. 서론

전력선은 이미 잘 설치된 최고의 통신 인프라이다. 이를 이용한 전력선통신 기술은 1914년 미국의 통신사인 AT&T가 최초로 상업화하였을 만큼 오래된 기술이지만 현재까지 홈오토크메이션부터 인터넷망 접속까지 다양한 분야에 응용되고 있다^[1]. 사용주파수 범위에 따라 저주파 장거리 통신, 홈오토크메이션, 홈네트워킹 등 몇 가지 기술로 분류되고 있으나, 1990년대 이후에는 1.7-30 MHz 대역폭의 광대역 전력선 통신이 지배적이다. 전력선 통신의 기본원리는 50~60 Hz의 교류 전력주파수에 저전력 고주파 신호를 중첩하여 전력선으로 전송하는 것이며 스마트 그리드를 위한 협대역 및 광대역 전력선 통신이 주목받고 있다^[2]. 한편 전력선 통신에서는 고주파 신호를 급속도선에 결합하기 위한 결합장치가 반드시 필요하다^[3,4]. 접속식의 경우 특별한 커패시터가 선로에 병렬 연결되는 형태로 도체와 물리적으로 연결된다^[5]. 또 다른 방식은 비접촉식으로 자성체 코어에 의한 전자기 유도원리를 이용한 유도결합방식이 있다^[6]. 유도형 결합기로는 연자성체 재료의 토로이달 코어가 사용되는데 세라믹과 유사한 페라이트가 주종을 이룬다. 페라이트는 투자율이 10,000 이하며 포화자속밀도가 0.4 T 내외이다. 따라서 페라이트형 코어로는 통신거리대비 Mbps급 대역폭을 유지하는 결합기로 소형화하여 구현하는 데는 한계가 있다^[7,8].

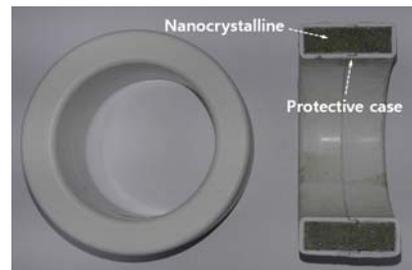
본 연구에서는 페라이트보다 투자율과 포화자속밀도가 3배 이상 높은 나노 결정립 코어로 결합기를 구현하였고, 광대역 전력선 모델과 연동하여 Jperf로 통신대역폭을 측정하였다^[9]. 실제 선박 내부의 전력선 통신에 적용하여 코어 종류와 크기에 따라 통신 대역폭의 변화를 측정하였으며 Mbps급 통신을 위한 최소 코어 크기를 추정하였다. 또한 최소 개수의 코어를 사용한 조건에서 센서 데이터 전송과 영상 데이터 전송이 선박 전력선 네트워크 환경에서 가능한지 실험을 수행하였다.

II. 두 종류의 연 자성체 코어

본 연구에 사용한 연자성체 코어는 ㈜에버택에서 제공한 두 가지 종류로 나노결정립과 페라이트이다. 나노 결정립은 Fe를 기본으로 Si, B, Nb등이 첨가된 연자성체 물질이며 코어 외형은 Figure 1(a)과 같다. 급냉응고 기술에 의해 20 μ m 두께를 가지는 스트립을 만들고 적당한 넓이의 리본으로 가공 후 권선을 원통

형태의 코어로 만들어 500-600 $^{\circ}$ C에서 열처리하면 비정질 구조에서 평균 10-40 nm의 미세한 나노 결정립을 가지는 구조로 변한다^[10]. 적절한 열처리를 하면 비정질구조의 자성체가 나노 결정립 구조로 바뀌는 것이다. 코어는 외력으로부터의 보호와 절연을 위하여 플라스틱 케이스로 보호한다. 페라이트는 Fe, Mn, Mg, Zn 등의 금속 이온들로 이루어진 자성체 재료로 세라믹과 유사하며 코어 외형은 Figure 1(b)와 같다.

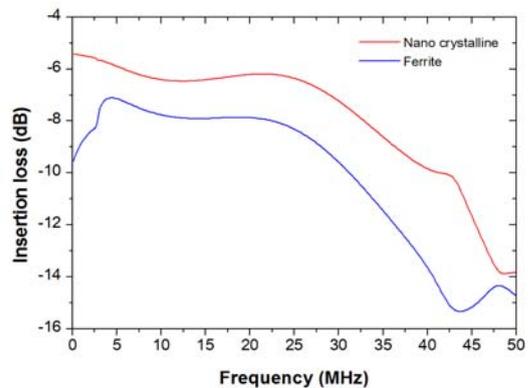
사용한 나노 결정립 코어는 초기투자율이 30,000 이상, 포화자속밀도는 1.2 이상으로 높을 뿐 아니라 낮은 보자력과 높은 비저항, 초박의 리본 형태로 권선



(a)



(b)



(c)

그림 1. 연자성체 코어. (a) 나노 결정립 코어, (b) 페라이트 코어, (c) 코어의 삽입손실
Fig. 1. Soft magnetic cores. (a) Nano-crystalline core, (b) ferrite core, (c) Insertion loss

에 의한 최소한의 와전류 손실을 보인다. 그러므로 같은 용도의 페라이트 코어에 비하여 크기를 줄일 수 있으므로 부가가치가 높다. 또한 Figure 1(c)은 두 코어의 삽입손실(S₂₁)을 나타낸 전달특성곡선으로 페라이트 코어가 나노에 비해 2 dB 정도 높게 나타난다. 이런 특성 차이가 유도결합기에 의한 전력선통신 대역폭에 영향을 줄 것이라 예상된다.

코어의 자속밀도분포와 자속에너지를 계산하기 위하여 사용한 나노 결정질 코어와 페라이트 코어의 BH 곡선은 Figure 2와 같다^[11]. 교번 자계가 연 자성 재료에 인가되면 자속밀도 (B)는 자기장 (H)에 따라 변한다. 자기장은 전류와 권선 수에 비례하며 식 (1)로 주어진다.

$$H[A/m] = \frac{0.4 \pi N I}{l} \quad (1)$$

여기서 N은 권선 수, l은 코어의 유효 둘레길이, I는 권선에 흐르는 전류이다. 식 (1)에서 자기장은 전류에 비례하지만 일정 전류 이상에서는 BH 특성에 의해 코어의 자속이 포화되어 자계변화에 대한 자속밀도 변화를 유도할 수 없게 된다. 그러므로 전력선 통신에서 코어의 특성에 따라 전력선 통신 대역폭을 보장할 수 있는 최대 전류 범위 내에서 시스템이 구성되어야 한다.

Figure 3은 나노 결정질 코어와 페라이트 코어에 대한 FEMM (Finite Element Method Magnetics) 시뮬레이션 결과를 보여준다. 두 토로이달 코어가 포화되기 전의 전류조건으로 코어 중심을 관통하는 10 mm 직경의 구리선에 2 A의 전류가 흐르는 경우를 가정하였다. 코어의 투자율이 주변 물질 (여기서는 공

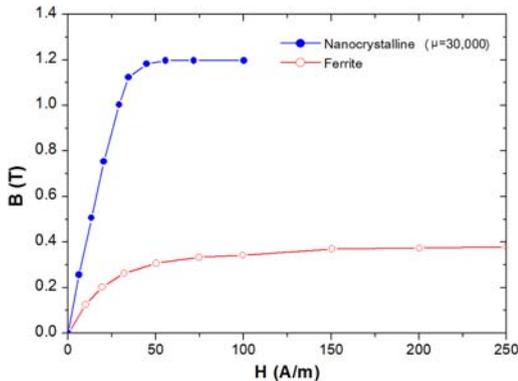


그림 2. 연자성체 물질의 BH 곡선
Fig. 2. BH curves of soft magnetic materials

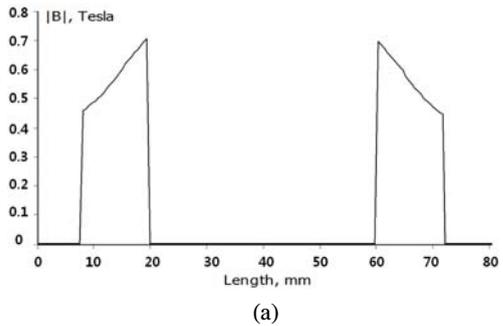
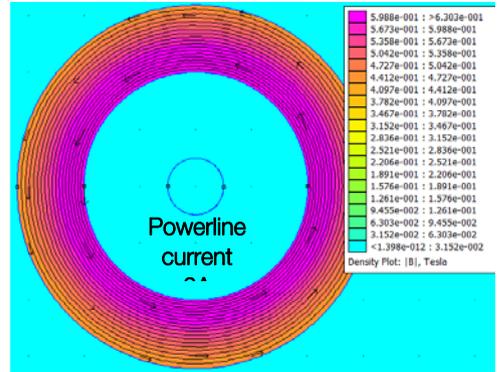


그림 3. 2차원 자속밀도분포를 보여주는 FEMM 시뮬레이션 결과 (코어 중심전류 2 A 조건에서). (a) 나노결정질 코어, (b) 페라이트코어
Fig. 3. FEMM Simulation result to show the flux density distribution (@ 2 A current). (a) Nano-crystalline core, (b) ferrite core

기)의 투자율보다 훨씬 크기 때문에 자속밀도는 코어 내부에 한정되어 분포한다. 코어 중심에서 수평방향으로 분포한 자속밀도 크기를 비교해보면 2 A의 동일한 전류에 조건에서 나노 결정립 코어의 평균 자속밀도는 0.55 T로 페라이트의 0.15 T와 비교하여 3배 이상 높다. 코어 중심 전류에 의해서 유도되는 자계에 의한 자속밀도는 코어내부에 자속에너지(W)를 축적시키며 식 (2)로 계산된다.

$$W = V_e \int_0^B HdB = \frac{V_e}{2} \frac{1}{\mu_0 \mu_e} \left(\frac{\mu_0 \mu_e N}{l} I \right)^2 \quad (2)$$

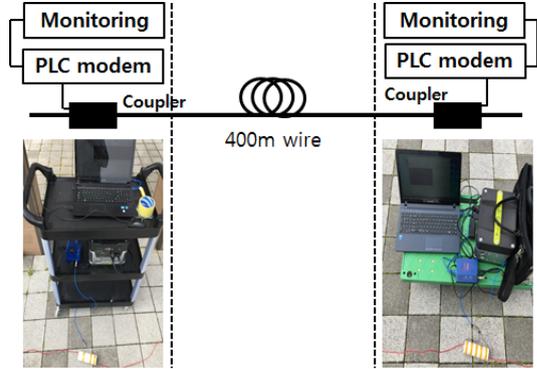
여기서 V_e 는 코어의 유효체적, μ_e 는 코어의 유효 투자율이다. 이를 바탕으로 FEMM 전산모의를 이용하여 두 코어가 가지는 체적에 따른 자계에너지를 계산하였으며 그 결과는 Figure 4와 같다. 코어의 체적을 늘리는 방법으로 직렬 연결된 코어 개수를 페라이트는 7개, 나노결정립은 10개 까지 증가시켰다. 자계에너지는 체적의 증가에 대해 선형적으로 증가하였다. 일차전류 2 A의 동일한 조건하에서 나노 결정립 코어 3개를 적층한 경우 자계에너지는 페라이트 코어를 7개 적층하였을 때와 거의 비슷한 수준이다. 그러나 자계에너지가 높아짐에 따라 자속밀도는 포화될 수 있으므로 적절한 코어의 체적을 선정하는 것이 필요하다.

III. 실험결과 및 고찰

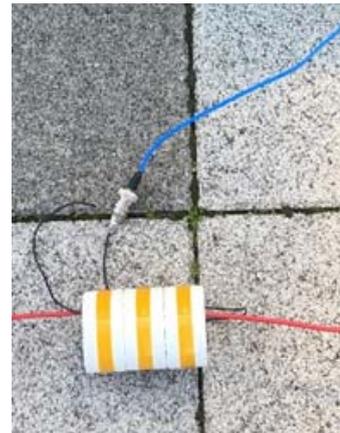
3.1 통신 거리에 대한 결합기별 대역폭 측정

Figure 4는 코어별 통신거리에 대한 대역폭을 측정하기 위한 실험 장치들로 분기점이 없는 600 m의 구리선을 펼쳐놓고 송수신단에 유도형 결합기를 연결한 모습이다. 토로이달 결합기는 전선이 코어 중심을 통과하게 끼워 넣어야 하지만 컷 코어는 체결형이므로 임의의 위치에 설치할 수 있다. 결합기는 BNC 커넥터를 이용하여 전력선 모델과 연결되고 전력선 모델은 다시 LAN 포트를 통해 PC와 연결된다. 각 결합기 조건별 통신 대역폭을 측정하기 위하여 Jperf 프로그램을 이용하였다^[10] Jperf 프로그램은 클라이언트와 서버간의 네트워크 트래픽을 측정하는 기존의 iperf 프로그램에서 시각적 자료를 더하고 사용자가 친화적인 기능을 추가적으로 제공한다.

Figure 5는 나노결정립 코어와 페라이트 코어로 제작한 토로이달 형 결합기와 컷 코어형 결합기 등 4



(a)



(b)

그림 4. 채널 대역폭 측정을 위한 유도형 광대역 전력선통신 시스템. (a)실험 장치도, (b) 유도형 결합기
Fig. 4. Inductive BPLC system for channel bandwidth measurement. (a) Experimental setup, (b) inductive coupler

가지 종류에 대하여 통신 대역폭을 선로 길이에 따라 측정한 결과이다. 컷 코어형 결합기 보다는 토로이달 코어형 결합기의 대역폭이 넓게 나타나는 이유는 식 (2)로부터 컷 코어는 절단면의 공기간극을 통해 자속이 누설되므로 코어의 자속에너지가 감소하기 때문이며 이로 인해 신호결합효율이 낮아진다.

표 1과 같이 10 Mbps의 통신 대역폭을 유지하는 거리를 기준으로 통신가능거리를 살펴보면 나노결정립 토로이달 코어형 결합기는 350 m, 페라이트 토로이달 코어형 결합기는 250 m, 페라이트 컷 코어형 결합기는 200 m, 나노 결정립 컷 코어형 결합기는 150 m 까지 이다. 토로이달형 결합기의 경우 나노결정립 코어가 페라이트 코어보다 투자율이 높으므로 통신거리와 대역폭에서 우수하게 측정되었다. 그러나 컷 코어의 경우에는 반대로 페라이트 컷 코어형 결합기가 나노결정립보다 우수하였다. 그 이유는 절단면의 매끈

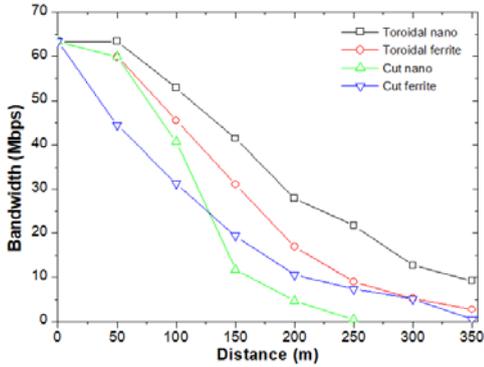


그림 5. 결합기 유형별 거리에 따른 채널 대역폭
Fig. 5. Channel bandwidth according to the distance by coupler types

표 1. 10 Mbps 대역폭을 보장하는 통신거리
Table 1. Communication distance to ensure 10 Mbps bandwidth

| Coupler type | Toroidal nano | Toroidal ferrite | Cut nano | Cut ferrite |
|------------------------|---------------|------------------|----------|-------------|
| Distance up to 10 Mbps | 350 m | 250 m | 200 m | 150 m |

한 정도와 공기간격 때문이다. 나노결정립은 리본형 박막이 원형으로 감겨 있기 때문에 잘린 단면을 페라이트와 같이 매끈하게 처리하는 데는 한계가 있었다.

3.2 광대역 전력선 통신 성능 시험

Figure 6 (a)는 선박을 이용하여 광대역 전력선 통신을 실험하기 위한 구성품의 배치도이다. 선박내부에 전력선망을 이용할 수 있는 두 구역을 임의로 지정하였다. A 구역과 B 구역은 직선거리로 20 m 정도 떨어져 있으며, 통신에 활용할 벽면 콘센트들은 전기적으로 연결된 상태임을 확인하였다.

Figure 6 (b)는 A 구역에 설치된 전력선 통신 시스템을 보여준다. 벽면에 설치된 콘센트에 10 m 정도의 리드선을 연결하고 리드선 위에 결합기를 장착한 후 전력선 모델, 모니터링 컴퓨터, 웹캠과 센서를 장착한 라즈베리파리를 설치하였다. Figure 6 (c)는 B 구역으로 객실이며 A 구역과 동일한 방법으로 시스템을 구축하였다. 모니터링 컴퓨터에는 네트워크 성능 측정을 위한 프로그램인 Jperf 가 실행중이다.

두 구역 간 통신 채널의 대역폭은 코어 5개를 직렬 결합한 페라이트 코어형 결합기와 나노결정립 코어형 결합기를 사용하였으며 결과는 Figure 7과 같이 확인

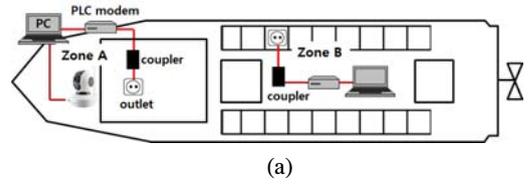


그림 6. 유도형 광대역 전력선 통신 시스템의 선박 적용 통신 성능시험. (a) 선박에 배치된 전력선 통신 시스템, (b) A 구역, (c) B 구역.
Fig. 6. Ship performance test of inductive BPLC system. (a) inductive BPLC system deployed on ship, (b) Zone A, (c) Zone B.

하였다. 나노 결정립 코어형 결합기를 사용한 경우 Figure 7 (a)와 같이 3.5 Mbps의 통신 대역폭을 가지면서 안정적임을 보여준다. 그러나 페라이트 코어형 결합기를 사용한 경우 Figure 7 (b)와 같이 0.46-0.76 Mbps의 통신 대역폭을 보이면서 안정적이지 못하다. 동일한 개수의 코어로 제작된 결합기에서는 나노결정립이 페라이트 보다 신호결합효율이 우수하여 넓은 대역폭을 제공한다.



(a)



(b)

그림 7. Jperf로 측정한 대역폭. (a) 나노 결정립 코어형 결합기, (b) 페라이트 코어형 결합기.
Fig. 7. Bandwidth measurement using Jperf. (a) nano crystalline core type inductive coupling unit, (b) ferrite core type inductive coupling unit.

결합기의 코어 개수를 달리하였을 때 선박에서 측정한 통신 대역폭의 변화는 Figure 8과 같다. 페라이트의 경우 코어를 7개 적층하여 제작한 결합기로부터 1.2 Mbps 정도의 대역폭을 얻을 수 있었다. 그러나 나노 결정립의 경우 코어 1개만 사용한 결합기로도 1 Mbps의 대역폭을 얻었다. 3개 이상의 코어가 적층된 경우에는 최소 3.5 Mbps의 통신 대역폭을 보장하였지만 증가

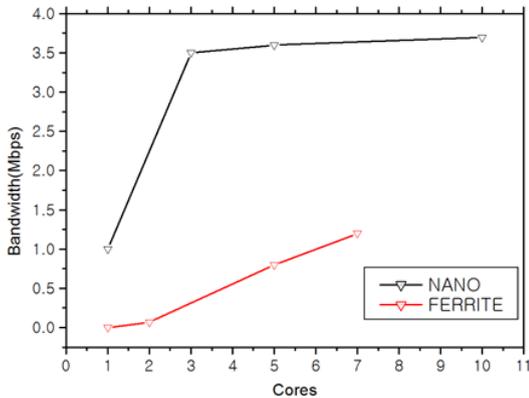


그림 8. 코어 개수에 따른 통신 대역폭.
Fig. 8. Channel bandwidth according to the number of cores.

폭은 급격히 둔화된다. 동일 대역폭을 기준으로 할 경우 나노결정립 코어형 결합기는 페라이트형 결합기보다 훨씬 작은 크기로 제작 가능함을 알 수 있다.

구역 A 와 구역 B간 유도형 전력선 통신의 데이터 전송능력을 확인하기 위하여 IP 카메라를 이용한 이미지 전송과 온습도 센서를 이용한 데이터 전송을 시도하였다. Figure 6(a)의 구성도에서 나노 결정립 코어 1개만 사용한 결합기를 적용하였다. Figure 9는 웹캠으로 유도형 전력선 통신을 이용하여 이미지 전송을 시도한 결과 화면이다. 실험에 사용한 IP 카메라의 데이터 전송 속도는 수백 Kbps급 이므로 실시간 이미지 전송은 성공적이었다.



그림 9. IP 카메라로부터 수신한 영상.
Fig. 9. Image received from IP camera.

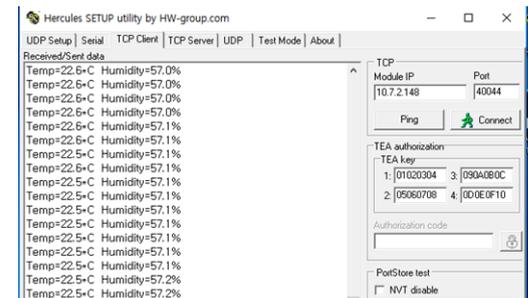


그림 10. 수신된 온습도 데이터.
Fig. 10. Received temperature and humidity data.

구역 B에 설치된 전력선 통신 시스템에 온습도 센서가 장착된 라즈베리파이 시스템을 추가하여 선실 내부의 환경 모니터링 데이터 전송 시험을 수행하였다. 구역 A에 설치된 수신 모니터링 컴퓨터에는 센서 데이터를 확인할 수 있는 Hercules 셋업 유틸리티 프로그램 실행중이며 전송 결과는 Figure 10과 같다. 선박내의 전력선을 통해 오류 없이 센서 정보가 실시간으로 전송됨을 확인함에 따라 전력선 망을 이용한 유도형 결합기 기반 선내 센서 네트워크 구축이 가능할 것이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 나노 결정립 코어와 페라이트 코어를 사용한 유도형 결합기 기반의 광대역 전력선 통신 시스템에 대해 실험하였고, 두 코어의 유도결합기 성능을 비교하였다. 통신거리 측면에서 나노결정립 코어형 결합기는 350 m 거리에서 10 Mbps의 통신대역폭을 보였으며, 250 m 까지 10Mbps 의 대역폭을 유지한 페라이트형 결합기보다 우수하다는 것을 확인하였다. 또한 제한된 조건의 선박 내에서 코어의 개수를 달리한 결합기의 전력선 채널 대역폭을 측정하였을 때 나노 결정립 코어형 결합기의 크기를 페라이트형보다 최대 7배 정도 줄일 수 있음을 확인하였다. 1 Mbps의 선로 대역폭을 갖는 나노결정립 코어 조건에서 한 개의 나노결정립 코어로 만든 유도형 결합기로 온습도 센서 데이터 및 웹캠 이미지 데이터가 성공적으로 전송되어 페라이트 결합기보다 소형화에 유리함을 보였다. 본 연구결과를 바탕으로 향후 고속 전력선 통신에 소형화된 나노 결정립 코어형 결합기가 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

References

[1] <https://en.wikipedia.org/wiki/Power-linecommunication>.
 [2] A. M. Tonello and A. Pittolo, "Considerations on narrowband and broadband power line communication for smart grids," *IEEE Intl. Conf. SmartGridComm.*, pp. 13-18, Miami, USA, Mar. 2016.
 [3] L. G. da S. Costa, A. C. M. de Queiroz, B. Adebisi, V. L. R. da Costa, and M. V. Ribeiro, "Coupling for power line communication: A survey," *J. Commun. and Inf. Syst.*,

vol. 32, no. 1, pp. 8-22, 2017.

[4] H. S. Kim, S. Y. Nam, and K. R. Sohn, "Characteristics of legacy line communication using a high-current welding machine," *J. Korean Soc. Marine Eng.*, vol. 41, no. 6, pp. 557-562, 2017.
 [5] A. Kosonen and J. Ahola, "Comparison of signal coupling methods for power line communication between a motor and an inverter," *IET Electric Power Applications*, vol. 4, no. 6, pp. 431-440, 2010.
 [6] J. Binkofski, "Influence of the properties of magnetic materials on the size and performance of PLC couplers," *Int. Symp. Power Line Commun. and Its Appl.*, pp. 281-284, 2005.
 [7] J. H. Jeong, S. H. Yang, H. S. Kim, and K. R. Sohn, "Power line communication characteristics of inductive cut-core coupling unit robust to current fluctuation," *J. Korean Inst. Commun. and Inf. Sci.*, vol. 43, no. 9, pp. 1469-1475, 2018.
 [8] S. H. Yang, J. H. Jung, and K. R. Sohn, "Comparison of inductive powerline communication performance using nanocrystalline alloy and ferrite coupling device in ship," *J. KICS*, vol. 43, no. 4, pp. 740-746, 2018.
 [9] <https://code.google.com/archive/p/xjper/> downloads
 [10] <http://www.avertec.kr>
 [11] <https://www.mouser.com/pdfdocs/VACChokesandCoresDatasheet.pdf>

양 승 호 (Seung-Ho Yang)



2018년 2월 : 한국해양대학교 전자통신공학과 졸업
 2019년 현재 : 한국해양대학교 전자통신공학과 석사과정
 <관심분야> 인공지능, 머신러닝, 전력선 통신

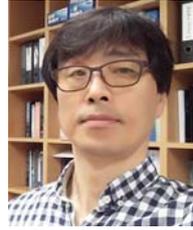
[ORCID:0000-0003-3568-6818]

정 재 환 (Jae-Hwan Jeong)



2018년 2월 : 한국해양대학교 전자통신공학과 졸업
2019년 현재 : 한국해양대학교 전자통신공학과 석사과정
<관심분야> 인공지능, 머신러닝, 전력선 통신
[ORCID:0000-0002-7201-6728]

손 경 락 (Kyung-Rak Sohn)



1992년 2월 : 경북대학교 전자공학과 학사
2002년 8월 : 경북대학교 전자공학과 박사
2003년 9월~2019년 현재 : 한국해양대학교 전자통신공학과 교수
<관심분야> 광센서, 센서 네트워크, 에너지 하베스팅, 전력선통신, 머신러닝
[ORCID:0000-0001-8888-1241]

김 현 식 (Hyun-Sik Kim)



1995년 2월 : 경남대학교 대학원 재료공학과 석사
1998년 8월 : 경남대학교 대학원 재료공학과 박사
1995년~2000년 : 한국전기연구원 선임연구원
2000년~2019년 현재 : (주)메트론 대표이사

<관심분야> 광대역 전력선통신, 나노자성재료
[ORCID:0000-0003-0625-168X]