

나노결정 연 자성 물질로 제조한 코어를 이용한 유도결합기 특성

손경락[†] · 오세진¹

(Received August 8, 2016 ; Revised September 26, 2016 ; Accepted September 27, 2016)

Characteristics of inductive coupling unit using toroidal core made of nano-crystalline soft magnetic material

Kyung-Rak Sohn[†] · Sae-Gin Oh¹

요약: 나노 결정 연 자성 물질은 전기전자 분야에서 고주파 응용을 위해 전력 페라이트 및 무정형 물질을 대체 할 수 있는 것으로 알려져 있다. Fe를 기본으로 Si, B, Nb, Cu 등이 첨가된 나노 결정 합금은 낮은 자기 손실, 페라이트보다 1.5~50배 높은 투자율, 그리고 2배 이상 큰 포화 자속밀도 때문에 전력 전자 분야에서 주목받는 재료이다. 나노 결정 코어는 통상 15-25 마이크로미터 두께의 리본으로 만들어지며, 주로 공통모드 초크와 인버터 트랜스용 코어 등으로 활용되고 있다. 본 연구에서는 나노 결정 연 자성 코어를 이용하여 비접촉식 유도 결합기를 구현하고 전력선 통신 특성을 조사하였다. 제작된 소자의 스펙트럼 분석을 통해 고속 전력선 통신에 사용할 수 있으며, 기존의 페라이트 코어기반 결합기보다 결합손실이 우수함을 확인하였다. 2차 코일 권선 수에 결합손실이 의존하며 권선 수가 증가함에 따라 손실이 증가함을 확인하였다. 2차코일 권선이 1회 일 때 나노결정 코어기반 유도 결합기는 80 m 전력선 길이에서도 1 Mbytes/s 이상의 통신 속도를 유지할 수 있게 하였다. 실내 전력선으로 사물인터넷을 위한 센서 네트워크 구축이 가능함을 보여 주기 위하여 웹캠을 이용한 비디오 전송을 시도하였으며, 19-20 kbps 통신 속도로 실시간 비디오 전송이 성공적으로 이루어졌다. 연구결과는 기존의 건축물 또는 선박과 같은 거리 제한적인 구조물에 사물인터넷 기반 센서 시스템이나 감시 시스템을 구축할 경우 추가적인 통신 선로 확보 없이도 전력선만으로 적용 가능함을 보여주었다.

주제어: 나노결정립, 유도형 신호결합기, 비접촉식 통신, 전력선 통신, 포화자속밀도

Abstract: Nano-crystalline soft magnetic materials are known to be able to replace power ferrites and amorphous materials for high frequency applications in the field of electronics and electronics. Fe-based nanocrystalline alloys containing Si, B, Nb, and Cu are attracting attention in the power electronics field due to low magnetic loss, 1.5 to 50 times higher permeability than ferrite, and 2 times higher saturation flux density than ferrite. Nano-crystalline cores are usually made of 15-25 micron thick ribbons and are mainly used for common mode chokes and cores for inverter transformers. In this study, we implemented an inductive coupler using nano-crystalline soft magnetic core and investigated power line communication characteristics. Transmission spectral responses of the fabricated coupler shows that it can be used for high-speed power line communication and has lower coupling loss than conventional couplers made of ferrite core. It was confirmed that the coupling loss depends on the number of secondary coil windings and the loss increases as the number of windings increases. When the secondary coil winding is one turn, the nano-crystalline coupler maintained a communication speed of more than 1 Mbytes/s even at 80 m powerline length. We demonstrated a video transmission using a webcam to show that it is possible to construct a sensor network for the internet of things (IoT) based indoor powerline communication. Real time video transmission was done at 19-20 kbps communication speed. The results of the study show that if an IoT system or a surveillance system is built in a structure with limited space such as a existing building or a ship, it can be usefully applied only to a power line without additional communication lines.

Keywords: Nano-crystalline, Inductive coupler, Contactless communication, Powerline communication, Saturation flux density

1. 서론

전력 전송에서부터 가전제품에 이르는 분야까지 우수한

연 자성 물질을 응용하는 것은 에너지 소비를 줄이는 데 크게 기여할 것으로 예상되어, 낮은 코어 손실과 높은 포화

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8888-1241>): Major of Electronics and Communications Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: krsohn@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4312

¹ Department of Ship Operation, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: osgengen@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-5094

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.

선속밀도를 가지는 자심재료는 관련 연구 분야와 시장에서 오래 동안 요구되어져 왔다. 자성 제품의 전기에서 자기로의 변환 시 코어 손실에 따른 에너지 손실은 전 세계 전체 전기 소비량의 3.4 %에 달하는 것으로 알려져 있다[1]. 그러나 변압기 및 모터 제품 중 90 % 이상의 비율을 차지하는 철 및 실리콘 자성 제품은 핵심 소재로서의 자기 성능의 측면에서 한계에 도달하는 것으로 보고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 등장한 기술이 나노 결정 연 자성 합금이다[2]. 나노 결정 연 자성 물질은 고주파 응용을 위해 전력 페라이트 및 무정형 물질을 대체 할 수 있는 것으로 더 잘 알려져 있다. 자기 손실이 낮고, 투자율이 기존의 페라이트보다 1.5~50배 높으며, 또한 포화 자속밀도도 2배 이상 큰 값을 가지므로 나노 결정 합금은 전력 전자 분야에서 주목받는 재료가 되었다[3].

나노 결정 연 자성 물질로 만들어진 코어는 통상 20 μm 내외 두께의 리본으로 구성되므로 서로 격리되어 있으며 공통모드 초크, 인버터 트랜스용 코어 등으로 적용되고 있다[4]. 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 나노결정형 다중 토로이달 코어를 제안하였다[6].

MgZn 페라이트 코어를 이용한 비접촉식 결합기 구현과 이를 이용한 전력선 통신 연구는 많은 결과들이 발표되고 있다[7-19]. 본 연구에서는 Fe를 기본으로 Si, B, Nb, Cu 등이 첨가된 나노 결정 연 자성 코어를 이용하여 비접촉식 신호결합기를 구현하였다. 투과 스펙트럼 분석을 통해 고속 전력선 통신에 적합한 30 MHz 부근의 차단 주파수를 가지고 있음을 확인하고, 무배선 전력선 통신의 비접촉식 결합기로서의 적합한 성능을 보고하였다. 비접촉식 전력선 통신에 사용하는 기존의 페라이트 코어와 비교하여 결합 손실이 3 dB 작음을 통해 신호 결합효율이 개선될 수 있음을 보였다.

또한 기존 건물이나 폐쇄된 구조물에 사물인터넷을 구현할 경우 추가적인 통신선로를 확보할 필요 없이 내부 전력선망을 이용할 수 있는 유리한 방식이다. 본 실험에서는 나노결정 유도결합기의 실용성을 확인하기 위하여 서로 다른 위치에 있는 실내 전원 콘센트와 실외 전원 콘센트를 송신단과 수신단의 접점으로 이용하여 통신 속도를 확인하고 실시간 웹캠 비디오 전송을 수행하였다. 두 콘센트를 연결하는 전력선이 내부적으로 분기점을 형성하고 있더라도 전기적 접점만 있다면 통신 채널 역할을 할 수 있기 때문이다.

2. 나노결정 연 자성 물질 기반 코어

나노결정 합금은 비정질 제조기술을 응용하여 수십 nm의 결정립을 만든 결과이다. 비정질은 물질내부 원자들이 규칙적인 배열구조를 갖추지 못한 상태이지만 금속이 용융되어 내부 원자들이 활성화된 상태에서 온도가 내려가면 원자들은 고유의 규칙적인 결정 상태로 돌아가므로 최종적으로는 결정질 금속이 된다. 그러나 원자가 규칙적인 상태로 돌아갈 수 없을 정도로 빠르게 냉각되면 비정질합금이 된다.

본 연구에 사용한 나노결정 합금은 Table 1의 조성비로 만들어진 연 자성 물질이며 자기특성은 Table 2와 같다 [10]. 나노결정 연 자성물질의 포화자속 밀도는 1.2T 로 0.5 정도의 페라이트 보다 훨씬 높아 고주파 고전력 적용에 유리하다.

Table 1: Composition ratio of nano-crystalline

elements	Fe	Cu	Nb	Si	B
wt%	74	1.2	4	13	7

Table 2: Magnetic properties of nano-crystalline

Parameters	value	
Saturation magnetic induction, Bs (T)	≥ 1.2	
Coercive force, Hc (A/m)	≤ 1	
Remanence ratio, Br/Bs	0.6-0.8	
Initial magnetic permeability, μ_i	$\leq 100 \times 10^3$	
Maximum magnetic permeability, μ_m	$\geq 1000 \times 10^3$	
Resistivity ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	130	
Core loss (W/kg)	@1kHz, 1T	≤ 1.0
	@20kHz, 0.5T	≤ 25

나노결정립은 급냉 응고 기술에 의해 20 μm 내외의 두께로 비정질 스트립을 만들고 적당한 넓이의 리본으로 가공한다. Figure 1 (a)는 리본 형태로 제작된 비정질합금이다. 이를 권선으로 말아 원통 형태로 만든 다음 500~600 $^{\circ}\text{C}$ 로 열처리하게 되면 비정질 구조에서 미세한 나노 결정립을 가지는 결정구조로 변하게 된다. Figure 1 (b)와 같이 토로이달 형태로 열처리된 코어는 다시 Figure 1 (c)와 같이 코어보호와 절연을 위하여 플라스틱 재질의 케이스로 패키징 한다. Figure 1 (d)는 완성된 나노결정 코어를 보여준다. 본 연구에서 사용한 코어의 크기는 외경 40 mm, 내경 25 mm, 높이 20 mm 이다.

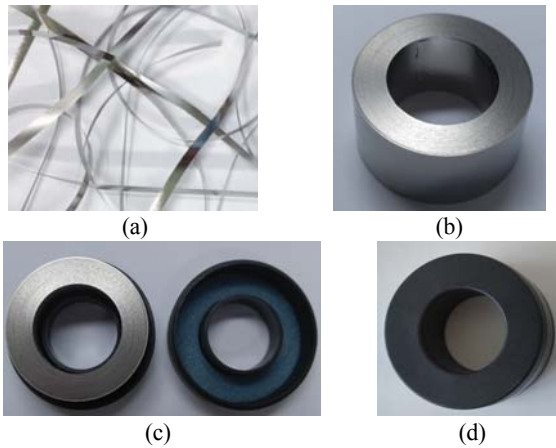


Figure 1: Photograph of nano-crystalline. (a) alloy strip, (b) wound alloy strip, (c) packaging, and (d) nano-crystalline core

나노결정 코어의 자기이력곡선은 **Figure 2**와 같다[10]. 1 A/m까지의 외부 인가 자기장(H)에 대하여 자속밀도(B)의 변화는 1.2 T까지로 거의 선형적인 이력 특성을 보임에 따라 전자기 유도에 의한 전력선 통신용 비접촉식 결합기로 응용할 수 있다.

나노결정 코어의 결합손실과 이와 유사한 크기의 Mn-Zn 페라이트 코어의 결합손실을 측정하여 비교한 결과는 **Figure 3**과 같다. **Figure 3 (a)**와 같이 네트워크 분석기에 1차 권선과 2차 권선이 1회씩 감긴 코어를 이용하여 투과 손실에 해당하는 S_{21} 값을 측정하였다. 나노결정 코어의 1차 코일과 2차 코일 간 결합손실은 **Figure 3 (b)**와 같이 대략 30 MHz 까지 -3 dB로 거의 일정한 값을 유지한다. 그러나 MnZn 페라이트 코어는 -6 dB의 최저손실이 3 MHz까지만 유지되고 있다. 고속 전력선 통신 주파수 영역이 2~30 MHz 임을 고려한다면 페라이트 코어보다는 나노결정 코어가 신호결합 및 통신 속도 측면에서 유리함을 알 수 있다.

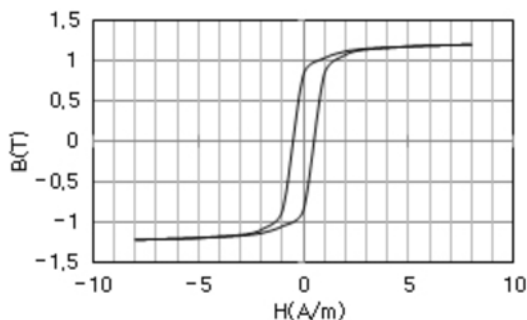


Figure 2: B-H curve of nano-crystalline

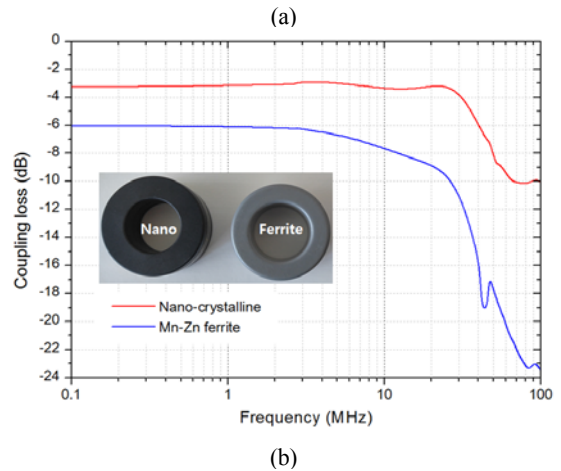


Figure 3: Coupling loss. (a) measurement setup and (b) spectral response

3. 나노결정 코어 기반 유도형 결합기

Figure 4는 나노결정 코어를 이용하여 제작한 유도형 결합기이다. 결합기는 코어 중심으로 1차 권선인 전력선이 관통하며 2차 권선은 일반 전선을 이용하여 감는 구조로 되어 있다. 2차 권선 끝단은 BNC 형 커넥터를 부착하였다.



Figure 4: Inductive coupler using a nano-crystalline

2차 코일의 권선 수가 결합손실에 미치는 영향을 조사하기 위하여 권선수를 각각 1회, 2회, 3회로 달리 제작하였다. 네트워크 분석기로 측정한 결합손실 비교 결과는 **Figure 5**와 같다. 세 가지 유형의 권선 수에 대하여 반치대역폭 (Full width at half maximum: FWHM)은 30MHz 정도로 거의 동일하지만 권선 수가 증가하면 결합손실도 증가함을 알 수 있다. 1회 권선에 비해 3회 권선의 경우 -2 dB 이상의 손실을 보이며, 이러한 결합손실의 증가는 결합기의 신호 대 잡음비 저하를 가져오므로 전력선 통신 시 통신 속도가 떨어질 수 있으므로 본 실험에서는 1회 권선을 적용하였다.

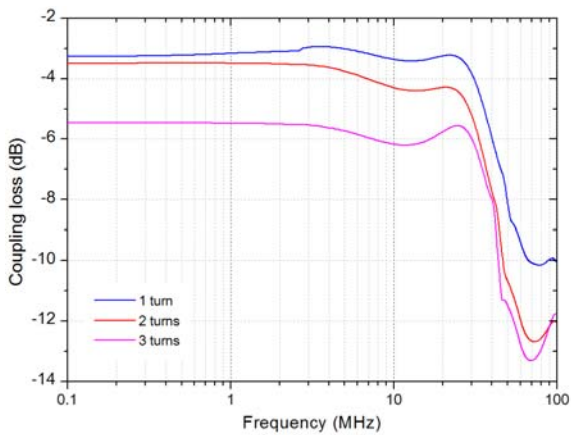


Figure 5: Coupling loss for number of secondary windings

본 연구에서 결합기의 권선 수, 통신 거리, 통신 속도와 의 관계를 조사하기 위하여 **Figure 6 (a)**와 같은 실험 시스템을 구성하였다. 100 m 길이의 전력선에 장착된 두 결합기 간격을 10m 단위로 조정하면서 통신 속도를 측정할 수 있도록 하였다. **Figure 6 (b)**는 클라이언트 부분의 실물 사진을 보여준다. 결합기와 모뎀 그리고 네트워크 대역폭을 체크하는 프로그램인 iperf를 이용한 서버와 클라이언트 간 통신 속도를 모니터링하기 위한 PC로 구성되어 있다.

2차 코일의 권선 수별 통신거리에 따라 3초간 10회 측정된 평균 통신 속도는 **Figure 7**과 같다. 1회 권선의 경우 40 m 까지 6 Mbytes/sec (48Mbps) 정도의 비교적 일정한 통신 속도를 유지하였다. 그러나 40 m 이후에는 통신 속도가 저하되면서 80 m 거리에서는 1 Mbytes/sec 정도의 통신 속도를 유지하였다. 2회 권선의 경우 20 m 까지 5.2 Mbytes/sec 정도의 일정한 통신 속도를 유지하다가 20 m 이후에는 통신 속도가 저하되면서 80 m 거리에서는 0.5 Mbytes/sec 이하의 통신 속도를 보였다. 3회 권선의 경우 10 m 에서 4 Mbytes/sec 정도의 통신 속도를 보이지만 거리가 멀어짐에 따라 지속적으로 통신 속도가 저하된 후 70 m 부터는 통신이 되지 않는다.

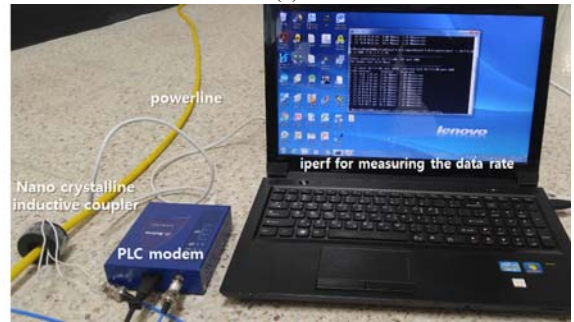
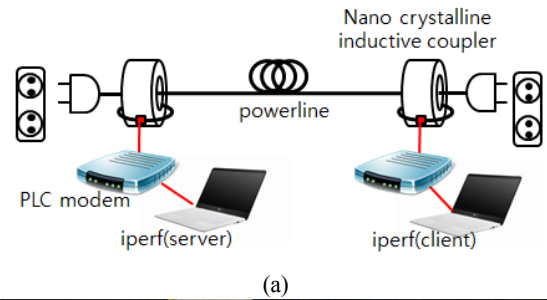


Figure 6: Experimental setup for measuring communication speed by powerline length. (a) basic schematic and (b) photograph of client setup

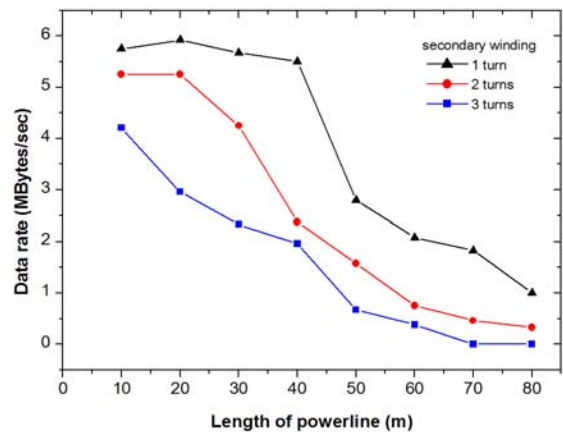


Figure 7: Data rate by powerline length

실험 결과를 통해 실내 전력선 망을 기반으로 제한된 구역의 사물인터넷을 위한 센서 네트워크 구축이 가능함을 알 수 있다. 나노결정 코어기반 유도 결합기를 실내 전력선 망에 적용하기 위한 실험 구성도는 **Figure 8**과 같다. 실험은 임의의 벽면에 있는 전원 콘센트를 이용하여 비 접촉식 전력선 통신을 수행하는 것이다. 이를 위해 웹캠을 포함한 송신측 비접촉식 전력선 통신 시스템은 건물의 복도에 위치한 전원 콘센트에 연결한다. 수신측은 실험실 내부에 있는 전원 콘센트를 이용하여 전력선 채널을 통해 전송되는 웹캠의 영상을 모니터링 할 수 있게 구현하였다.

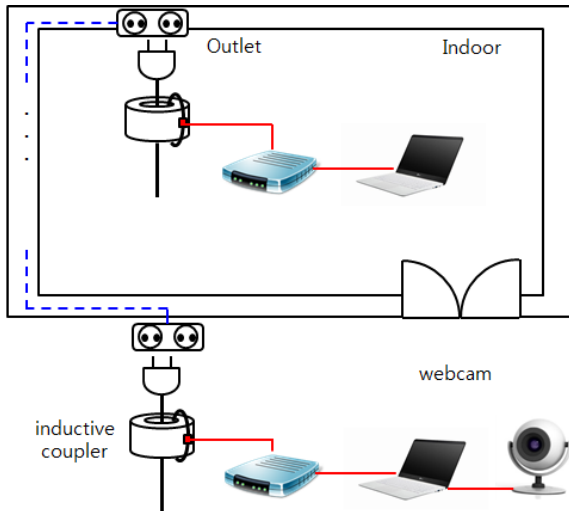


Figure 8: Experimental setup for testing indoor powerline communication

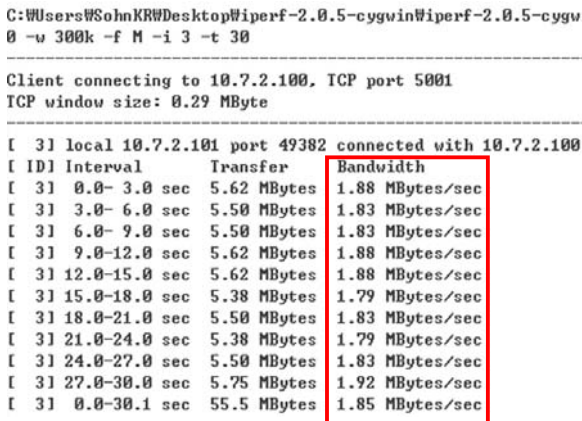


Figure 9: Captured client screen for showing the transmission rate



Figure 10: Real-time video transmission of webcam using nano-crystalline inductive coupler

웹캠을 이용한 비디오전송시험에 앞서 iperf를 이용하여 송신 시스템과 수신 시스템 간 연결된 배선의 통신 속도를 측정된 결과는 Figure 9와 같다. 3초 간격으로 10회 전송한 결과 평균 1.8 Mbytes/sec (14.4 Mbps) 정도의 안정적인 통

신 속도가 유지됨을 보여준다.

Figure 10는 실험중인 복도를 촬영한 웹캠의 이미지를 수신단에 전송한 결과의 모니터링 PC를 캡처한 화면사진이다. 영상의 끊어짐 없이 성공적으로 실시간 전송됨을 확인하였다. 웹캠의 데이터 전송속도는 19-20 kbps 이므로 본 연구에서 사용한 전력선통신 채널은 충분한 대역폭을 제공할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 무배선 전력선 통신의 유도형 결합기에 사용하던 페라이트 코어를 대신할 수 있는 나노결정 연 자성 물질을 유도형 결합기로 활용할 수 있음을 보고하였다. 토로이달 형태의 코어로 제작된 시편을 사용하여 유도형 결합기로 구현한 후 2차 코일 권선 수에 따른 통신성능을 시험하였다. 나노결정 코어가 페라이트 코어형보다 결합손실이 3 dB 정도 우수하며, 통신 대역폭 또한 30 MHz 정도로 고속 전력선 통신에 적합함을 확인하였다. 2차 코일의 권선이 증가할수록 결합손실이 증가함을 보였고 통신 속도는 1회 권선일 때 가장 우수함을 밝혔다. 이때 80 m 전력선 길이에서도 8 Mbps 이상의 통신 속도를 유지함에 따라 실내 전력선 망을 기반으로 사물인터넷을 위한 센서 네트워크 구축이 가능함을 보여주었다. 실제 실내 전력선환경에서 웹캠을 이용한 이미지 전송시험 또한 성공함으로서 기존의 건축물 또는 선박과 같은 거리 제한적인 구조물에 사물인터넷 기반 센서 시스템이나 감시시스템을 추가적인 통신 선로 확보 없이도 적용 가능할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부의 중견연구자지원사업 (NRF2017R1A2B4010993)과 교육부의 사회맞춤형 산학협력 선도대학 육성사업의 지원으로 수행된 연구결과물입니다.

References

- [1] <http://www.tohoku-timt.net/english/technology/magnetic.html>, Accessed September 27, 2017.
- [2] M. A. Willard, T. Francavilla, and V. G. Harris, "Core-loss analysis of an (Fe, Co, Ni)-based nanocrystalline soft magnetic alloy," Journal of applied physics, vol. 97, 10F502, 2005.
- [3] V. Valcheva, A. V. Bosscheb, and P. Sergeant, "Core losses in nanocrystalline soft magnetic materials under square voltage waveforms," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 320, no.1, pp. 53-57, 2008.
- [4] <http://www.hitachi-metals.co.jp/products/elec/tel/pdf/hl-fm9-h.pdf>, Accessed September 27, 2017.
- [5] J. Binkofski, "Influence of the properties of magnetic materials on the size and performance of PLC cou-

- plers,” Proceedings of International Symposium on PLC and Its Applications, pp 281-284, Apr. 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.
- [7] 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 (in Korean).
- [8] K. H. Kim, S. U. Jeong, S. Y. Nam, H. S. Kim, and K. R. Sohn, “Performance analysis of legacy line communication using high current powerlines in mid-range wind turbines,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 40, no. 4 pp. 336-341, 2016 (in Korean).
- [9] K. R. Sohn, K. H. Kim, S. U. Jeong, S. Y. Nam, and H. S. Kim, “Performance analysis of the power-line communication for condition monitoring system of an MW class offshore wind turbine’s nacelle,” Journal of Korean Navigation and Port Research, vol. 40, no. 3, pp. 159-164, 2016 (in Korean).
- [10] Nanocrystalline Alloy Strip, <http://www.avertec.kr>, Accessed October 26, 2017 (in Korean).