DBpia

논문 18-43-09-08 The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '18-09 Vol.43 No.09
https://doi.org/10.7840/kics.2018.43.9.1469

전류 변동에 강인한 유도형 컷 코어 결합기의 전력선 통신 특성

정 재 환◆, 양 승 호*, 김 현 식**, 손 경 락°

Power Line Communication Characteristics of Inductive Cut-Core Coupling Unit Robust to Current Fluctuation

Jae-hwan Jeong◆, Seung-ho Yang*, Hyun-Sik Kim**, Kyung-Rak Sohn°

요 약

광산이나 조선소등은 고위험군에 속하는 곳이지만 작업장 여건상 안정적인 통신망 제공을 위한 고정 인프라 구축이 어렵다. 그래서 작업장의 전력선망을 안전 모니터링 시스템의 통신채널로 활용하는 전력선통신이 주목받고 있다. 본 논문에서는 대전류를 요구하는 장비에 의해서 큰 전류변동이 지속적으로 발생하더라도 안정적인 통신 속도를 보장하는 방법을 연구하였다. FEMM을 이용하여 페라이트형 토로이달 코어와 컷 코어의 일차전류에 의한 자속밀도분포와 자속에너지를 계산하였다. 페라이트 코어의 포화자속밀도는 0.45 T 정도 이지만 일차전류가 증가함에 따라 자속밀도가 포화영역에 쉽게 근접하므로 통신 대역폭에 영향을 미친다. 페라이트 컷 코어는 공기간극을 통해 자속이 누설되므로, 이를 이용하면 자속밀도를 포화시키는 전류를 높일 수 있다. 용접작업에 의해 100 A 이상의 대전류 변동이 발생하더라도 컷 코어 유도형 결합기는 토로이달 코어형 결합기보다 통신거리는 두 배 이상, 통신 속도는 3배 이상 높일 수 있었다. 동일 전류 변동 조건에서 웸캠을 이용한 50 m 길이 전력선 영상전송 실험을 실시한 결과, 토로이달 결합기를 장착한 전력선 통신 시스템은 영상전송에 실패하였지만 컷 코어형 결합기를 장착한 경우는 90 m에서도 영상전송이 가능하였다.

Key Words : Ferrite, Toroidal core, Cut core, Inductive coupling unit, Powerline Communication

ABSTRACT

Mines and shipyards are high-risk workplaces, but due to the structure and location of the workplace, it is not easy to build a fixed infrastructure for a stable communication network. Therefore, power line communication for safety monitoring is being studied using power line of workplace. In this study, we propose a method to guarantee stable communication speed even if large current fluctuation is continuously generated by equipment requiring high current. The magnetic flux density distribution and magnetic flux energy of the ferrite type toroidal core and the cut core were calculated using FEMM. The low saturation magnetic flux density of the ferrite core affects the communication bandwidth as the magnetic flux density easily approaches the saturation region as the primary current increases. The ferrite cut cores leak magnetic flux through air gaps and can

※ 본 연구는 중소벤처기업부 재원의 2018년도 지역특화산업육성사업 (P0002774) 지원과 과학기술정보통신부 재원으로 한국연구재단의 중견연구자지원사업 (NRF2017R1A2B4010993)의 지원으로 수행되었습니다.

◆ First Author : (ORCID:0000-0002-7201-6728)Korea Maritime And Ocean University, 01098116888@hanmail.net, 학생회원
° Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-8888-1241) Korea Maritime and Ocean University, krsohn@kmou.ac.kr, 종신회원
* (ORCID:0000-0003-3568-6818)Korea Maritime and Ocean University, gonggongeo@naver.com, 학생회원
** Mattron corporation, hskim@mattron.kr
논문번호 : 201806-D-015-RN, Received May 8, 2018; Revised August 3, 2018; Accepted August 20, 2018

www.dbpia.co.kr

increase the flux density saturation current. Even if the welding current fluctuates by 100 A or more, the cut core induction type coupler can double the communication distance and the communication speed more than 3 times than the toroidal core type coupler. Under the same current fluctuation condition, a 50 m long power line image transmission experiment using a webcam was performed. As a result of the experiment, the power line communication system equipped with the toroidal coupler failed to transmit the image, but when the cut core type coupler was installed, the image transmission was possible even at 90 m.

Ⅰ. 서 론

터널 작업이나 채굴 또는 조선소 용접등과 같은 작업에는 수백 A 이상의 대전류를 요구하는 장비들이 많이 이용되고 있으나 작업장의 환경이 열악하여 사고의 위험성이 상존하므로 안전 상태를 감시할 필요성이 많이 대두되고 있다. 그러나 광산의 갱도 또는 조선소 야드와 같이 작업장의 특성상 통신전용선을 설치하기 어렵거나 또는 구조물의 재료 특성상 무선통신의 전자파 장애로 현장적용에 대한 한계가 발생한다. 이러한 문제점을 보완할 수 있는 유력한 대안으로 작업장까지 설치된 전력선을 통신채널로 이용하는 전력선 통신이 주목받고 있다[1]. 전력선 통신 방식에는 커패시터를 이용하는 접촉식과 자기코어를 이용하는 유도형의 두 가지 방식이 대표적이다[2]. 접촉식의 경우 전력선 통신으로 모뎀을 연결하기 위해서는 콘센트를 통하거나 때로는 전선을 절단하여 연결해야 하므로 광산이나 조선소 등에는 설치상의 많은 제약이 따른다. 이를 극복하기 위하여 자성체 코어를 신호결합기로 이용하는 유도형 전력선 통신이 주목받고 있는데 이는 비접촉식이므로 전력선을 절단하지 않고도 통신이 가능한 방법이다.

자성체 코어의 재료로는 Mn-Zn 또는 Ni-Zn 등의 페라이트가 대표적이다. 페라이트를 이용한 자기 인덕터의 기본구조는 전력 전자 장치에서 가장 중요한 구성 요소 중 하나이며 고주파 필터, 자기 에너지 저장장치, EMC 초크, 자기 오류 전류 제한기 등으로 구현되었다. 페라이트를 이용한 유도형 결합기는 2005년 일본 미쓰비시 전기에서 공극을 가지는 마그네틱 코어를 이용하여 구현할 수 있음을 최초로 제안하였고, 300A의 전류가 흐르는 배전선에서 결합효율을 실험하여 9MHz 주파수에서 삽입손실이 6 dB 임을 보고하였다[3]. 최근에는 비접촉식 전력선 통신을 위한 Mg-Zn 페라이트 코어가 개발되어 철도, 풍력발전기 등과 같은 곳의 비접촉식 전력선 통신에 연구한 사례들이 발표되고 있다[4-6].

본 연구에서는 페라이트형 토로이달 코어와 컷 코어에 대한 직류 전류 응답특성을 FEMM 기반 시뮬레이션으로 코어의 자속밀도분포와 자속에너지를 계산하여 비교하였다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 용접기와 같이 수백 A의 대전류를 사용하는 전력선에서 작업과 동시에 유도형 전력선 통신이 수행될 수 있는 페라이트형 결합기의 구조를 분석하였으며 통신 성능을 측정하였다. 실험결과를 바탕으로 100 A 이상의 전류변동 조건에서도 영상전송이 가능한 컷 코어 결합기의 측정결과를 제시하였다.

Ⅱ. FEMM을 이용한 수치해석

Figure 1은 토로이달 코어의 기본 구조와 MgZn 페라이트 코어를 보여준다. 결합기의 크기는 페라이트 코어의 인덕턴스와 코어의 중심을 관통하는 도선에 흐르는 전류에 의해 결정된다[7]. Figure 1 (a)와 같이 코어 내경이 d_i, 외경이 d_o, 높이가 h이면 코어의 유효 단면적 A_e 는 식 (1)로 주어진다.

$$A_e = (d_o - d_i)h/2 \tag{1}$$

이때 코어의 유효길이는 $l_e = \pi(d_o + d_i)/2$ 이므로 코어의 유효체적은 식 (2) 와 같다.

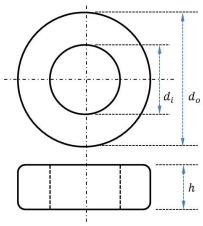
$$V_e = A_e l_e \tag{2}$$

코어의 중심을 관통하는 전류 I 에 의한 유도기전력으로 인해 코어에 저장되는 자계에너지 (W)는 식 (3)으로 계산된다.

$$W = V_e \int_0^B H dB = \frac{1}{2} V_e \frac{B^2}{\mu} = \frac{1}{2}\mu V_e N^2 I^2 = \frac{1}{2} L I^2 \tag{3}$$

여기서 인덕턴스 L은 $L = \mu V_e N^2$로 주어진다. μ는 코어의 투자율이며 N은 권선수이다. 본 연구에서

www.dbpia.co.kr



(a)

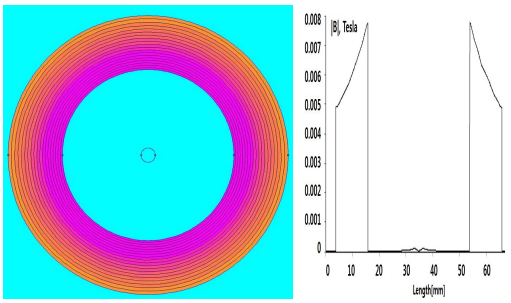
(b)

그림 1. 토로이달 코어. (a) 치수, (b)마그네슘-아연 페라이트 코어
Fig. 1. Toroidal core. (a) Dimension, (b) MgZn ferrite core.

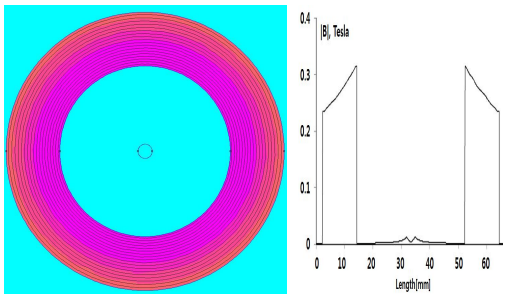
사용한 페라이트 코어의 특성을 결정하는 주요 물질은 마그네슘과 아연으로 투자율은 7,000이며 전도성은 낮다.

2.1 토로이달 코어형

FEMM 4.2 프로그램[8]을 이용하여 Figure 1 (b)의 토로이달 코어와 이를 절반으로 자른 컷 코어에 대한 자속밀도분포를 전산모의하고 축적된 자계에너지를 계산하였다. FEMM은 2 차원 평면 및 축 대칭 영역에서 저주파 전자기 문제를 해결하기 위한 프로그램이다. Figure 2는 코어 중심을 지나는 유도전류가 1 A와



(a) 1 A



(b) 100A

그림 2. 페라이트 토로이달 코어의 자속밀도분포, (a) 1 A, (b) 100 A
Fig. 2. Magnetic flux distribution for ferrite toroidal core. (a) 1 A and (b) 100A.

100 A 일 때 페라이트 코어에 대한 자속밀도 분도를 나타내고 있다. 이때 코어외부는 공기로 설정하였다. 코어의 높은 투자율로 인해 자속밀도는 코어내부에 집중된다.

Figure 2 (a)의 경우 1 A의 낮은 일차전류에 의해 자속밀도분포는 0.005-0.008 T로 코어의 중심으로 갈수록 높게 나타난다. 코어에 축적된 자속에너지는 1.8×10^{-7} J로 계산되었다. Figure 2 (b)는 100 A의 일차전류에 대한 자속밀도분포는 0.23-0.32 T를 보인다. 이를 통해 코어중심을 지나는 유도전류의 크기가 증가함에 따라 코어 내부에 누적되는 자계에너지의 크기가 증가함을 확인할 수 있다. 연자성체로서 페라이트의 포화자속밀도는 0.45 T 정도이다. 계산된 자속에너지는 8.1×10^{-4}J 로 1 A 전류에 비하여 거의 전류제곱에 비례한 값을 보인다.

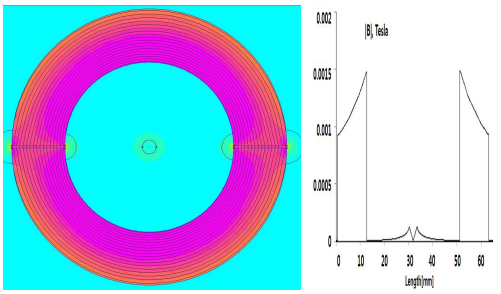
2.2 컷 코어형

토로이달 코어 중심을 지나는 일차전류가 증가함에 따라 자계에 의한 자속밀도도 증가한다. 그러나 코어의 크기에 따라 보유할 수 있는 자속밀도의 한계로 인하여 자속이 포화 상태에 이르게 되면 전기적인 외부 변조 신호에 의한 유도기전력 발생이 매우 미약한 수준에 도달한다. 이것은 통신 대역폭의 감소로 연결되어 결국에는 통신 불능상태를 유발할 수 있다. 자속밀도 포화를 개선하는 방법으로 코어를 자르고 잘린 면 사이에 공기간극을 두어 일부 자속이 누설되도록 하는 것이다.

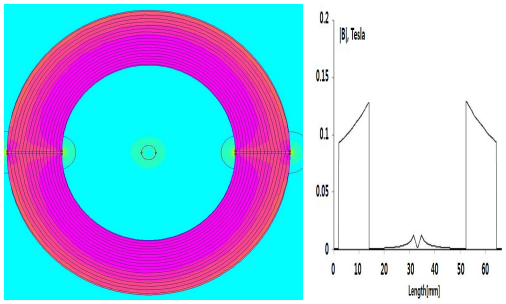
Figure 3은 페라이트 컷 코어에 대한 자속밀도 분포를 계산하기 위한 FEMM 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션을 위한 컷 코어 단면간의 공기간극은 500 μm로 설정하였다. Figure 3 (a)에서 코어중심전류를 1 A 로 설정한 경우 코어의 수직 방향 자속밀도분포는 Figure 2 (a)의 토로이달 코어와 유사하지만 자속은 0.001-0.0015 T로 5배 이상 낮아졌다. 그 이유는 수평방향의 공기간극에서 나타나는 0.001 T 정도의 누설자속 때문이다. Figure 3 (b)의 100A 코어중심전류인 경우에도 Figure 3 (a)와 유사한 자속밀도 분포를 보인다. 이때 수직방향 자속밀도는 0.1-0.13 T로 2배 이상 낮아졌으며, 수평방향으로 누설자속에 의한 공기간극 자속밀도는 0.1 T로 Figure 3 (a)에 비해 100배 정도로 높다. 계산된 자계에너지는 1 A와 100 A의 일차전류에 대해 각각 5.1×10^{-8} J와 6.08×10^{-4} J로 계산되었으며, 식 (3)과 같이 전류의 제곱에 비례하고 있다.

토로이달 코어는 전류에 의해 유도되는 자속밀도가 코어 내부에 갇혀 있으므로 전류가 증가함에 따라 컷

www.dbpia.co.kr



(a)



(b)

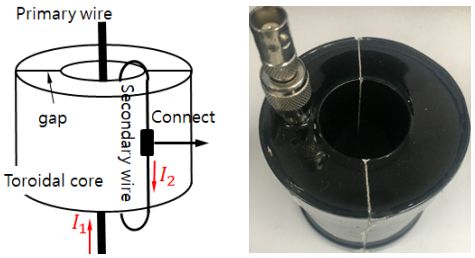
그림 3. 페라이트 컷 코어 코어의 자속밀도분포, (a) 1 A, (b) 100 A
Fig. 3. Magnetic flux distribution for ferrite cut core. (a) 1 A and (b) 100A.

코어보다 훨씬 빨리 포화자속밀도에 근접한다. 컷 코어의 경우 컷 단면을 통해 누설되는 자속이 발생하여 포화자속밀도가 훨씬 높은 전류에서 형성되므로 전류 변동이 많은 전력선 통신에서 넓은 통신 대역폭을 확보하는데 토로이달 코어보다 유리할 수 있다.

Ⅲ. 실험 결과 및 고찰

페라이트 유도형 결합기의 구조는 Figure 4와 같고 Figure 1 (b)의 토로이달 코어 4개가 적층된 구조로 크기는 34×73×80 [mm^3]이다. 일차권선은 토로이달 코어 중심을 통과하며 2차 권선은 코어를 1회 주회한 후 커넥터를 통해 전력선 모뎀과 연결된다.

토로이달 코어와 컷 코어에 대한 삽입손실은 Figure 5와 같다. 토로이달 코어의 경우 저주파 영역에서 고주파 영역으로 갈수록 손실이 커지는 주파수 응답특성을 보인다. 고주파 영역 차단주파수는 5 MHz 부근이다. 그러나 컷 코어의 경우에는 공기간극에 의한 저항성분이 포함되어 저주파 영역으로 갈수록 손실이 커지는 특성을 보인다. 반치대역폭(Full width at half maximum:, FWHM)은 28 MH로 저주파 영역 차단주파수는 2 MHz, 고주파 영역 차단주파



(a)

(b)

그림 4. 유도형 결합기. (a) 기본구조, (b) 페라이트 결합기
Fig. 4. Inductive coupling unit. (a) Basic structure, (b) ferrite coupler

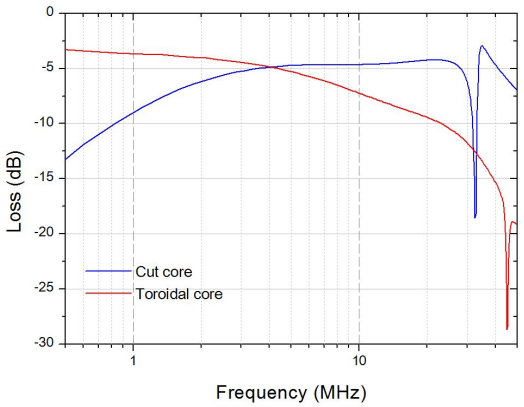


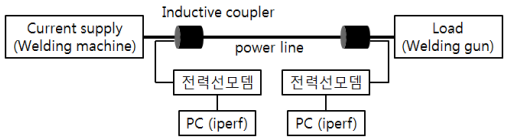
그림 5. 결합기의 삽입손실
Fig. 5. Measured insertion loss of couplers.

수는 30MHz 부근에서 형성된다. 광대역 전력선 통신 주파수 범위가 1.7-30 MHz 영역임을 고려할 때, 전류 변동이 많은 전력선에서 발생하는 1MHz 이하의 저주파 영역 잡음은 토로이달 코어보다는 컷 코어에서 더 많이 억제되므로 컷 코어형 유도 결합기가 본 연구의 목적에 부합한다.

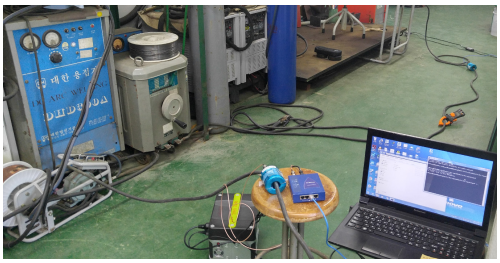
토로이달 코어와 컷 코어로 만든 유도형 결합기의 전력선 통신 성능을 측정하기 위한 실험 구성도는 Figure 6과 같다. 전력선의 큰 전류변동을 만들기 위하여 300A DC 용접기를 이용하였으며, 전력선 통신 대역폭 측정을 위하여 네트워크 성능 측정용 프로그램인 Jperf를 사용하였다[9]. 또한 웹캠을 이용하여 영상전송 가능성도 실험하였다.

Figure 7은 실험에 사용한 전력선에 흐르는 전류의 크기에 따른 신호세기와 배경잡음을 나타낸다. 여기서 잡음수준은 -70 dB 이하이다, 용접을 하지 않는 경우에 전력선에 흐르는 전류는 0A이고, 이때의 신호세기는 약 -30 dB 수준이며 신호 대 잡음비는 40 dB 이다. 최대 100A의 전류가 흐르는 전력선의 조건에서

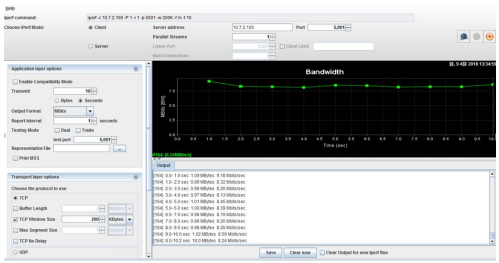
www.dbpia.co.kr



(a)



(b)



(c)

그림 6. 유도형 전력선 통신 성능시험. (a) 구성도, (b) 실험 사진, (c) 네트워크 성능 측정을 위한 Jperf
Fig 6. Inductive PLC performance test. (A) Configuration, (b) experimental setup, and (c) Jperf screen for network performance measurement.

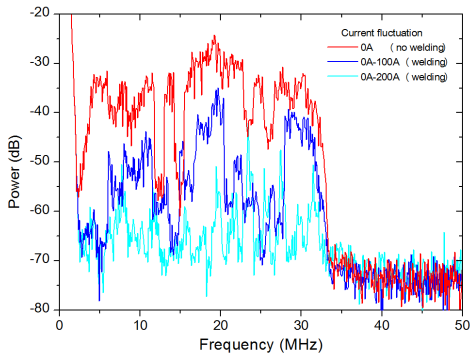


그림 7. 다른 전류 변동에 대한 신호대 잡음 스펙트럼 특성
Fig. 7. Signal-to-noise spectral characteristics for different current fluctuations

는 신호의 세기는 -40 dB 이하로 떨어지고 최대 200A의 전류가 흐르는 조건에서 신호의 세기는 -60 dB 수준으로 신호 대 잡음비는 10 dB 이하이다. 이를 통해 용접에 의한 전류의 크기가 증감함에 따라 잡음의 수준도 동시에 증감하면서 신호 대 잡음비에 영향을 주므로 통신 속도에 직접 연관된다.

Figure 8은 토로이달 코어형 결합기를 이용하여 전류변동이 없을 경우 (용접 중단)와 전류변동이 발생 중 (용접 중)의 통신성능을 거리별로 측정한 결과이다. 전류가 흐르지 않을 때 두 결합기간 간격이 10 m이면 77 Mbps의 통신 속도를 보인다. 거리가 증가함에 따라 통신 속도가 점점 감소하다가 60 m 지점에서 5 Mbps의 통신 속도를 지닌다. 60 m 이상에서는 간헐적 통신이 이루어졌다. 그러나 용접으로 인한 전류 변동 폭이 100 A 일 경우 결합기간 간격이 10 m인 지점에서는 17 Mbps의 통신 속도를 보였으며 40 m지점에서는 약 1 Mbps 정도의 통신 속도를 보였다. 그러나 40 m 이상에서는 통신이 불가능하였다. 전력선에 흐르는 전류가 높고 낮음에 따라 통신 속도에 현저한 차이가 남을 보여준다. Figure 2의 FEMM 시뮬레이션 결과로부터 일차전류에 의해 자성체 코어가 포화자속밀도에 근접할수록 통신 대역폭이 현저히 감소함을 알 수 있다.

본 연구에서 사용한 토로이달형 페라이트 코어는 200 A 부근의 전류에서 자속밀도가 포화에 근접함을 보인다. 그러므로 높은 전류조건의 전력선에서도 안정적인 통신이 유지될 수 있는 방안으로 Figure 3의 FEMM 결과를 이용하였다. 컷 코어의 공기간극을 통해 누설되는 자속을 이용하면 높은 전류에서도 코어의 자속밀도를 감소시킬 수 있기 때문이다. Figure 9는 컷 코어를 이용한 결합기의 전력선 통신성능을 나타내고 있다. 용접 전 전류가 흐르지 않는 조건에서 10 m 지점의 통신 속도는 76 Mbps 이며 20 m 이후의 통신 속도는 통신 거리와 거의 선형적인 관계를 보인다. 100 A 최대전류 변동조건에서 10 m 지점의 통신 속도는 43 Mbps이며 90 m 지점까지 3 Mbps 통신

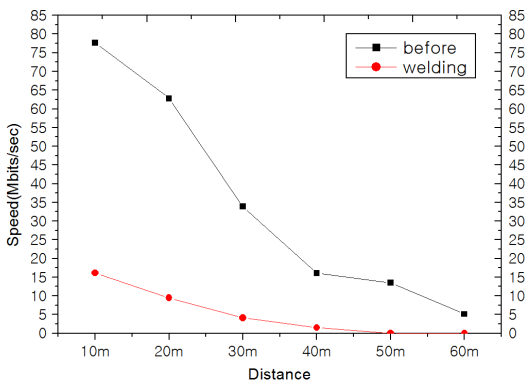


그림 8. 토로이달 형 결합기를 사용한 경우의 전송속도
Fig. 8. Transmission rate by distance for toroidal coupling unit

www.dbpia.co.kr

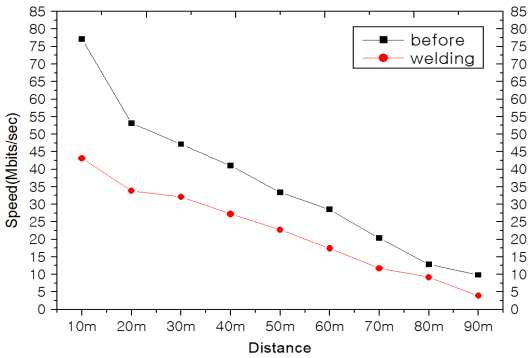


그림 9. 컷-코어 형 결합기를 사용한 경우의 전송속도
Fig. 9. Transmission rate by distance for cut-core coupling unit

속도를 보였다. 토로이달 코어형 결합기와 비교하였을 때 가장 큰 차이점은 저전류 조건과 고전류 조건에서의 통신 속도차가 훨씬 줄었으며 두 배 이상의 통신 거리를 확보할 수 있다는 것이다.

페라이트 컷 코어형 결합기가 용접 중에도 일정한 통신 속도를 유지한다는 결과를 바탕으로 100 A 이상의 전류변동이 발생하는 용접용 전력선을 통해 웹캠 영상전송을 시도하였다. 전력선의 50 m 위치에 토로이달 형 결합기와 컷 코어형 결합기를 각각 설치하고 100 A의 전류변동에도 영상이 전송이 가능한지 실험하였다. 토로이달 코어형 결합기에서는 50 m에서 영상전송이 이루어지지 않았다. 그러나 컷 코어형 결합기의 경우에는 90 m 에서도 Figure 10과 같이 웹캠영상전송이 이루어졌다. 전류변동이 심한 조건의 전력선 통신에는 컷 코어형 결합기가 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

그림 10. 90 m 전력선 위치에서 용접중 웹캠 이미지 전송
Fig. 10. Webcam image received via 90 m powerline during welding

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 전류 변동 폭이 100 A 이상인 전력선 조건을 이용하여 유도형 전력선 통신 성능을 측정하였다. 페라이트 재질의 토로이달 형 코어와 컷 코어에 대한 FEMM 시뮬레이션 결과를 바탕으로 컷 코어가 대전류 조건에서 공기간극으로 일부 자속이 누설되어 포화자속전류가 높게 형성됨을 알 수 있었다. 이를 이용하여 토로이탈 형 결합기보다 컷 코어형 결합기가 전력선 통신에서 통신거리를 두 배 이상 확장할 수 있으며 통신 속도 또한 최소 세 배 이상 매우 안정적으로 확보할 수 있음을 보였다. 이를 통해 작업자가 조선소나 광산 같은 실제 작업환경에서 용접 혹은 채굴 작업시 전류변동이 심하여 전력선 통신의 성능이 저하할 경우 컷 코어형 결합기 기반 유도형 전력선 통신을 이용한다면 매우 강인한 망 구축이 가능할 것으로 기대한다.

References

[1] J.-H. Jung, S.-H. Yang, K.-R. Sohn, H.-S. Kim, and S.-Y. Nam, "Safety alert system for high-risk workers in electromagnetic shaded area," *Autumn Conf. KICS*, vol. 8B, no. 32, 2016.

[2] S. Tsuzuki and Y. Yamada, "Feasibility study of ubiquitous sensor networks by inductively coupled PLC over PV power system," *Int. Symp. Power Line Commun. and its Appl.*, pp. 274-279, 2015.

[3] Y. Murata and Toru Kimura, "Inductive coupling unit and bypass tool for power line communication," *Mitsunishi Electric Advance*, vol. 109, pp. 18-20, 2005.

[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. Navig. Port Res.*, vol. 40, no. 3, pp. 159-164, 2016 (in Korean).

www.dbpia.co.kr

[5] H. S. Kim, S. H. Park, and S. G. K, “Development of communication joint tools for implementing a legacy-line communication system in a train,” *J. KIICE*, vol. 19, no. 4, pp. 877-887, 2015.
[6] K. Sohn, “Smart safety monitoring system using inductive power line communication based Raspberry-pie,” *J. KICS*, vol. 42, no. 9, pp. 1850-1856, 2017.
[7] J. Binkofskt, “Influence of the properties of magnetic materials on the size and performance of PLC couplers,” in *Proc. Int. Symp. PLC and Its Appl.*, pp. 281-284, Apr. 2005.
[8] http://www.femm.info/wiki/HomePage.
[9] https://iperf.fr.

정 재 환 (Jae-hwan Jeong)

2018년 2월 : 한국해양대학교 전자통신공학과 졸업
2018년 3월~현재 : 한국해양대학교 대학원 석사과정
<관심분야> 전력선 통신, 딥러닝

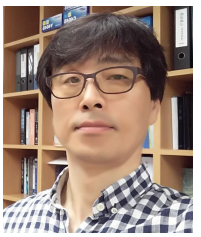
양 승 호 (Seung-Ho Yang)

2012년 2월 : 한국해양대학교 전자통신공학과 졸업
2018년 2월~2018년 현재 : 한국대학교 대학원 석사과정
<관심분야> 인공지능, 머신러닝, 전력선 통신

김 현 식 (Hyun-Sik Kim)

1995년 2월 : 경남대학교 대학원 재료공학과 석사
1998년 8월 : 경남대학교 대학원 재료공학과 박사
1995년~2000년 : 한국전기연구원 선임연구원
2000년~2018년 현재 : ㈜매트론 대표이사
<관심분야> 광대역 전력선통신, 나노자성재료

손 경 락 (Kyung-Rak Sohn)



1992년 2월 : 경북대학교 전자공학과 학사
2002년 8월 : 경북대학교 전자공학과 박사
2003년 9월~2018년 현재 : 한국해양대학교 전자전기정보공학부 교수
<관심분야> 광통신, 전력선 통신, 센서 네트워크, 에너지 하베스팅, 딥러닝

www.dbpia.co.kr