

배전자동화시스템의 실시간 감시를 위한 광대역 전력선통신용 유도성 커플러 설계

강석근*

Design of an Inductive Coupler for Broadband Powerline Communication for Real-Time Monitoring of Distribution Automation System

Seog Geun Kang*

*Professor, Department of Semiconductor Engineering, Gyeongsang National University, Gyeongnam, 52828
Korea

요 약

본 논문에서는 광대역 전력선통신을 실현할 수 있는 유도성 커플러를 Fe계 나노결정립 합금을 이용하여 제작하고 성능을 분석하였다. 배전자동화시스템의 주상 및 지상개폐기에 적용하여 현장시험을 수행한 결과, 광대역 전력선통신의 주요 주파수대역에서 제작된 커플러는 분기 유무에 따라 통신속도의 차이는 있으나 비교적 우수한 데이터통신을 달성하는 것으로 측정되었다. 또한, 배전선로에서 발생하는 대전류 환경에서도 통신거리에 따라 전송률의 차이는 있으나 실시간 데이터 전송이 가능한 통신속도를 유지하는 것으로 확인되었다. 따라서 제작된 유도성 커플러는 접근성이 낮은 지역에 위치한 배전자동화시스템의 배전설비 상시 감시 및 원격제어에 활용함으로써 지능형 전력망 실현을 위한 핵심소자로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT

In this paper, inductive couplers realizing broadband powerline communication (PLC) are fabricated using Fe-based nanocrystalline alloy and their performance is analyzed. As a result of the field tests using the distribution automation system (DAS), the couplers achieve comparatively excellent data communication in the principal frequency band of broadband PLC although there is a difference in communication rate depending on the presence or absence of a branch. In addition, it has been confirmed that the communication speed is maintained for a real-time transmission even in a high current environment although there is a difference in the transmission rate depending on the distance. Hence, it is considered that the inductive couplers can be used as a core device to realize the intelligent power network by exploiting them for the monitoring and remote controlling of the power plant equipments for the DAS located in the inaccessible areas.

키워드 : 나노결정립합금, 유도성 커플러, 전력선통신, 배전자동화시스템

Keywords : Nanocrystalline alloy, Inductive coupler, Powerline communication, Distribution automation system

Received 9 August 2019, Revised 13 August 2019, Accepted 22 August 2019

* Corresponding Author Seog Geun Kang(E-mail:sgkang@gnu.ac.kr, Tel:+82-55-772-1737)

Professor, Department of Semiconductor Engineering, Gyeongsang National University, Gyeongnam, 52828 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2019.23.12.1618>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© 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.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

스마트그리드는 전력인프라와 정보통신인프라를 융합하여 고품질 전력서비스를 제공하고 에너지 이용 효율을 제고시키는 지능형 전력망이다. 우리나라는 2010년 스마트그리드 관련 정책 및 산업, 투자, 제도정비 등 국가로드맵을 수립/제시한 바 있다[1]. 또한, 유럽과 미국에서도 노후 전력망 교체계획의 수립과 함께 신재생 에너지 확대, 전력거래 활성화 등을 위하여 Smart Grids Vision & Strategy과 Grid 2030을 각각 추진하고 있다 [1]. 특히, 2018년 발생한 지하공동구 화재사고의 여파로 다양한 센서를 이용하여 현장 전력설비를 실시간 감시하고, 통합관제센터가 설비의 이상작동에 실시간 대응 가능한 전력설비 감시 및 예방진단서비스 등 사회안전망 확충에 대한 관심이 고조되고 있다.

최근에는 사물인터넷(internet-of-things, IoT) 기술을 이용하여 접근이 어렵거나 위험도가 높은 전력시스템을 실시간 감시하여 다양한 사고를 미연에 방지하는 통합솔루션에 대한 관심이 증가되고 있다[2,3]. 이에 한국전력(주), Siemens 등 국내의 유명 기업들은 전력선통신(powerline communication, PLC)을 활용한 원격검침, 송배전 자동화시스템 등을 집중적으로 개발하고 있다 [4]. 특히, 전력 관련 공기업은 사물인터넷과 CCTV를 이용하여 전력설비를 실시간 감시하는 전력IT기술 구축사업을 활발히 진행하고 있다.

전력선통신은 기구축된 전력망을 인프라로 사용하므로 설치시간과 비용 등의 측면에서 전력설비 감시시스템 구축에 가장 합리적인 해법이 될 수 있다. 다양한 종류의 센서 정보와 고성능 CCTV 영상정보의 전송이 요구되는 전력설비 감시시스템에서는 광대역 및 장거리 전력선통신기술이 필수적이다. 하지만 일반적인 광대역 전력선통신시스템은 통신거리에 대한 제약으로 인하여 장거리 송배전을 위해서는 핵심소자의 추가 개발이 필요하다. 선로에 비접촉식으로 체결이 가능한 유도성 커플러(inductive coupler)는 형상변경이 거의 불가능한 기구축 구조물의 전력선 네트워크를 스마트그리드화시키는 핵심부품이다[5,6]. 하지만 기존의 커플러는 투자율(permeability)과 자속밀도가 낮은 페라이트 자심재료를 사용하므로 장거리 광대역 전력선통신용 부품으로 활용하기에는 부적합한 면이 있다.

본 논문에서는 배전자동화시스템(distribution automation

system, DAS)의 실시간 감시를 목적으로 배전선로에 체결 가능한 유도성 커플러를 이용하여 광대역 전력선 통신시스템을 구현한다. 여기서는 커플러의 전자기 특성을 개선시키기 위하여 Fe계 나노결정립 합금(nanocrystalline alloy)을 이용하여 커플러용 자심재료를 제작한다. 제작된 유도성 커플러를 배전자동화시스템의 주상개폐기와 지상개폐기에 설치하여 현장시험을 수행한 결과, 커플러 사이의 분기 유무에 따라 통신속도의 차이는 있으나 배전설비 실시간 감시를 위한 데이터 통신을 충분히 달성할 수 있는 것으로 확인되었다. 또한, 대전류 환경에서도 통신거리에 따라 전송률의 차이는 있으나 전력설비의 감시와 제어를 위한 광대역 전력선통신시스템으로 충분히 활용 가능한 성능을 가지는 것으로 판단되었다.

II. 전력선통신의 표준 기술규격

우리나라는 스마트그리드 실증단지 운용과 함께 최근 4차 산업혁명 관련 응용분야 솔루션으로 전력선통신과 사물인터넷을 접목하여 접근이 어려운 지하공동구나 고산지대 전력설비를 상시 감시하는 전력설비 예방진단서비스 사업을 활발히 진행하고 있다[2,3]. 전력선통신은 전력선을 통신선로로 사용하여 60 [Hz] 전력신호와 수 [kbps] ~ 수십 [Mbps] 데이터통신 신호를 동시에 전송하는 기술로서 현재 원격검침용 전력량계 모니터링과 전관방송시스템 등에 사용되고 있다[4-6].

전력선통신시스템의 구현에는 데이터통신용 신호를 전력선에 인가하기 위한 전력선통신 모뎀과 커플러가 반드시 필요하다. 이러한 전력선통신은 500 [kHz] 이하의 저주파 협대역 신호전송을 위하여 RS-232 등 직렬통신을 기반으로 주파수편이키잉(frequency shift keying, FSK)를 이용하는 IEEE Std. 1901.2 표준[7]과 100 [MHz] 주파수대역을 이용하여 최대 500 [Mbps]급의 고속 데이터통신을 달성하는 직교 주파수분할다중화(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 기반 IEEE Std. 1901-2012로 표준화되어 있다[8]. 특히, CCTV 영상과 다양한 센서 정보의 전송이 요구되는 전력설비 감시 및 진단서비스를 구축하기 위해서는 광대역 전력선통신시스템이 적합하다. 하지만 기존의 유도성 커플러는 주로 협대역 통신용으로 제작되어 활용 주

파수 대역의 차이가 있으며, 광대역 통신용 커플러는 전송거리의 제약이 심하여 표 1에 제시된 기술규격을 충족하지 못하는 문제점이 있다. 따라서 최소 100 [m] 이상 장거리 송배전시스템에의 적용을 위해서는 새로운 커플러의 개발이 필요하다.

Table. 1 The technical specifications for narrowband and broadband PLC [7,8]

	Narrowband	Broadband
Bandwidth	9 ~ 450 [kHz]	1 ~ 40 [MHz]
Transmission rate	Tens [kbps]	more than 2 [Mbps]
Coverage	Several [km]	Hundreds [m]
Modulation	FSK	OFDM

III. 광대역 전력선통신시스템용 커플러

데이터통신 신호를 전력선에 인가하거나 전력선으로부터 추출하기 위해서는 인터페이스 소자가 필요하다. 이러한 소자로는 전력선에 직접 체결되는 전도성 커플러와 전자기유도를 이용하여 비접촉식으로 연결하는 유도성 커플러가 있다. 일반적으로 접촉식 커플러는 후자에 비하여 우수한 통신특성을 가지나 역류 차단과 과전압 억제에 위한 회로가 요구되는 단점이 있다[5,6]. 또한, 접근이 어려운 지하공동구나 산악지대에 위치한 배전자동화시스템의 감시 목적으로는 기존 전력선에 비접촉식 체결이 가능한 유도성 커플러를 사용하여 전력선통신 네트워크를 구축하는 것이 합리적이다.

현재 상용화된 일반적인 전력선통신시스템은 IEEE 1901.2 기술표준을 기반으로 설계되며, 주로 저속 협대역 데이터통신용으로 사용된다[7]. 여기서 전력선과 통신단말기를 연결하는 장치인 유도성 커플러는 주로 페라이트 자심재료를 이용하여 제작하여 왔다. 하지만 이는 광대역 전력선통신에서 요구되는 높은 투자율과 자속밀도, 고주파 대역에서 낮은 삽입손실 등의 특성을 만족시키지 못할 가능성이 높다[9]. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 본 논문에서는 Fe계 나노결정립 합금을 이용하여 20 [kV] 이상 고압선로가 연결된 배전자동화시스템을 실시간 감시하기 위한 전력선통신시스템에 적용 가능한 유도성 커플러를 제작한다.

일반적인 배전자동화시스템은 주상개폐기와 지상개

폐기를 갖추고 있다. 주상개폐기는 고압배전선로의 지물인 전신주 상부에 위치하므로 접지일체형의 구조를 가진다. 이에 비하여 지상개폐기는 일반적으로 지중화되거나 도로변에 설치되므로 고압선로와 접지가 분리되는 구조를 가진다. 따라서 주상개폐기 선로는 외경(outer diameter)이 약 50 [mm] 정도인 반면 지상개폐기 선로는 외경이 30 [mm] 정도이므로 각 개폐기의 배전선로에 체결되는 유도성 커플러의 내경(inner diameter)도 이에 따라 결정되어야 한다.

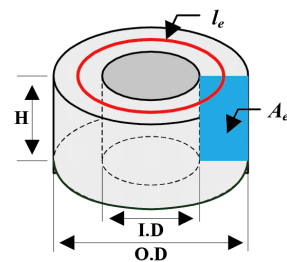


Fig. 1 The structure of a toroidal magnetic core

커플러는 매우 얇은 스트립 리본 형태의 자심재료를 권취시켜 토로이달 형태로 만든 다음 이들을 적층하여 제작된다. 따라서 리본의 폭은 그림 1에 나타낸 바와 같이 토로이달 자심재료 1개 층의 높이 H가 된다. 여기서 I.D와 O.D는 자심재료의 내경과 외경을 각각 나타낸다. 그리고 A_e 는 자심재료의 단면적이고 l_e 는 자로의 평균 길이이다. 토로이달 자심재료의 투자율이 μ 이고, 전류와 권선 수가 각각 I와 N일 때, 단일 자심재료의 자속밀도는 $B = \mu NI$ 이다. 이에 따라 자심재료에 축적되는 자계 에너지는 다음과 같이 계산된다.

$$W = \frac{1}{2} \frac{V_c}{\mu} B^2 = \frac{1}{2} \mu V_c N^2 I^2 \tag{1}$$

여기서 V_c 는 자심재료의 체적이다. 이로부터 자심재료 내부의 자계에너지는 재료의 체적과 전류의 제곱에 비례함을 알 수 있다. 따라서 적용되는 자심재료의 수가 증가되면 축적되는 에너지도 체적에 비례하여 증가되므로 커플러의 결합효율이 높아진다. 한편, (1)에서 토로이달 자심재료의 투자율은 다음과 같다[5].

$$\mu = \frac{10^9 \times L l_e}{4\pi N^2 A_e} \tag{2}$$

여기서 L은 인덕턴스이다. 이를 (1)에 대입하면 자계

에너지는 다음과 같이 변형된다.

$$W = \frac{10^9 \times V_{core} l_e}{8\pi A_e} LI^2. \quad (3)$$

커플러의 임피던스는 $Z = R + j2\pi fL$ 으로 나타낼 수 있다. 여기서 f 는 입력신호의 주파수이고 R 은 저항성분이다. 직류 또는 저주파대역에서 임피던스의 지배적인 요소는 저항이지만, 신호 주파수가 매우 높은 고주파대역에서는 인덕턴스가 임피던스의 지배적 성분이 되며, 전류는 인덕턴스에 반비례한다. (3)에 따르면 자체 에너지는 인덕턴스에는 1차 비례하지만 전류에는 2차 비례한다. 따라서 (1)과 (3)으로부터 자심재료의 체적이 증가되면 인덕턴스도 증가되므로 고주파대역에서 자심재료의 자체에너지는 감소하게 된다. 이로 인하여 고주파대역에서는 인덕턴스에 의한 자체에너지 손실이 유도성 커플러의 결합효율을 감소시키는 원인이 된다. 따라서 광대역 전력선통신시스템의 주요 주파수대역에서 삽입손실이 최소화되도록 커플러 외형 설계가 이루어져야 함을 알 수 있다. 본 논문에서는 이러한 점을 고려하여 주상개폐기용으로는 $I.D \times O.D \times H = 64 \times 94 \times 20$ [mm]로, 지상개폐기는 $I.D \times O.D \times H = 39 \times 64 \times 20$ [mm]의 Fe계 나노결정립 합금 자심재료를 제작하여 그림 2에 보인 것처럼 적층하면서 주파수대역에 따른 삽입손실을 측정할 결과를 그림 3에 나타내었다. 여기서 각 자심재료의 권선 수는 1회로 하였다.

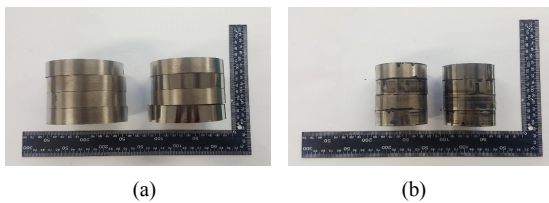


Fig. 2 The laminated magnetic core samples for tests (a) for pole switch (b) for ground switch

자심재료의 적층 수가 증가됨에 따라 삽입손실은 감소되는 경향이 있지만 5개 이상 적층시키면 삽입손실의 변화는 매우 미미해진다. 이러한 경향을 기반으로 삽입손실의 변곡점을 찾아보면 주상개폐기는 약 3.5개, 지상개폐기는 2.7개 정도이다. 따라서 삽입손실의 증가추세에 따른 가장 가까운 정수를 적층 수로 정하면 주상개폐기용으로는 자심재료 4개, 지상개폐기용은 3개를 적층하여 유도성 커플러를 제작하는 것이 바람직하다.

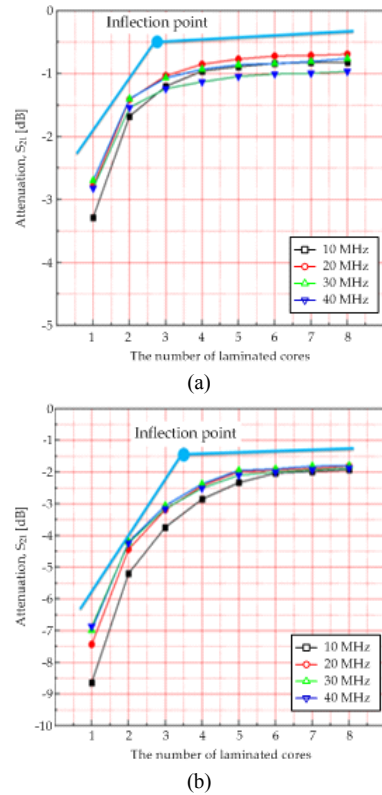


Fig. 3 Attenuation of the couplers according to the number of magnetic cores (a) for pole switch (b) for ground switch

IV. 시험 및 분석

성능분석을 위하여 제작된 유도성 커플러를 배전자동화시스템의 배전전력선을 통신선로로 사용하는 현장 시험을 수행하여 다양한 조건과 거리에 따른 데이터통신 특성을 측정하였다. 전력선과 통신단말기는 그림 4에 간단히 나타낸 구성도처럼 연결하고 시험용 컴퓨터에서 랜덤하게 생성된 데이터를 전송한다. 시험은 커플러 사이의 직선거리가 30 [m]인 시험구간 1, 직선거리 120 [m]이며 중간에 분기점이 1개 있는 구간 2, 분기없이 직선거리 150 [m]인 구간 3에서 실시하였다.

시험에 앞서 배전선로에 신호를 인가하지 않고 주파수 대역에 따라 통신선로의 배경잡음을 측정하여 그림 5에 나타내었다. 0.5 [MHz] 이하 저주파대역에서 발생

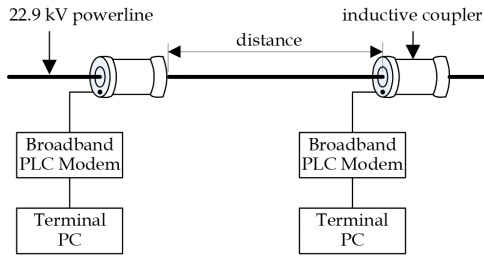


Fig. 4 The connection of powerline and terminal

되는 배경잡음은 -10 [dBm] 수준으로 측정되어 광대역 전력선통신의 주요 주파수 대역인 $1 \sim 40$ [MHz]에서 측정된 잡음보다 최소 10 [dBm] 이상의 세기를 가진다. 또한, 저주파대역의 배경잡음은 시간대의 구분없이 거의 일정한 크기로 측정되었으나 고주파대역에서는 오전보다는 오후 시간대에 배경잡음의 크게 증가하는 것으로 나타났다.

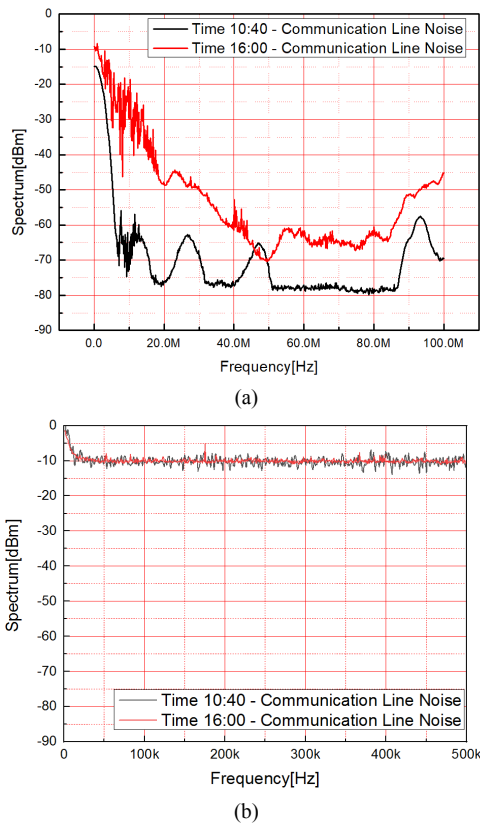


Fig. 5 The background noise of the powerline (a) high frequency region (b) low frequency region

Table. 2 Measured values from the field tests with distribution line

Test place	Rate [Mbps]	Current [A]	Remark
1	53.5	19.9	
2	9.0	16.1	1 branch
3	62.0	17.0	

진술한 3곳의 시험구간에서 수행된 데이터통신 현장 시험의 결과는 표 2에 나타내었다. 시험구간 1에서 통신 속도는 평균 53.5 [Mbps]로 측정되었으며, 선로 전류는 약 20 [A] 정도로 나타났다. 통신거리 150 [m]에 분기가 없는 경우 선로전류는 17 [A] 정도로 감소되지만 평균 62 [Mbps] 정도의 고속 데이터통신이 달성되는 것을 알 수 있다. 이에 비하여 분기가 있는 경우 통신거리가 120 [m]로 감소되더라도 불구하고 통신속도가 약 9 [Mbps]로 현저히 감소되었으며, 선로전류는 약 16 [A] 정도로 측정되었다. 따라서 모든 시험구간에서 배전선로를 이용한 데이터통신은 성공적으로 수행되나 분기 유무에 따라 전송율은 현저한 차이가 발생할 수 있다.

배전선로의 대전류 환경에서 제작된 유도성 커플러의 통신특성을 확인하기 위하여 그림 6과 같은 구성으로 시험하였다. 통신거리는 $100, 200$ [m]로 하고 선로전류는 $0, 50, 100$ [A]로 변경시키면서 iperf 소프트웨어와 ping 테스트로 통신속도를 측정하였다.

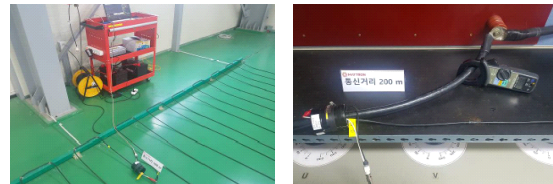


Fig. 6 The set-up for communication characteristic tests of the couplers in high current environments

Table. 3 Communication characteristics according to the distance and current

Distance [m]	Current [A]	Rate [Mbps]
100	0	45.2
	50	45.2
	100	45.8
200	0	8.11
	50	8.13
	100	8.17

시험 결과 표 3에 제시된 것처럼 통신거리 100 [m]에 서는 전류 0 ~ 100 [A] 범위에서 45 [Mbps] 이상의 통신 속도가 안정적으로 측정되었다. 이에 비하여 200 [m] 거 리에서 통신속도는 약 8 [Mbps] 정도로 측정되어 100 [m]에 비하여 현저히 감소되지만 열화상 측정장비나 배 전자동화시스템에 설치된 다양한 센서들의 데이터 전 송에는 충분한 것으로 판단된다. 또한, 이는 표 1에 제시 된 광대역 전력선통신시스템의 규격도 충족한다.

V. 결 론

본 논문에서는 배전자동화시스템의 배전선로에 설치 하여 광대역 전력선통신을 실현할 수 있는 유도성 커플 러를 Fe계 나노결정립 합금을 이용하여 제작하고 성능 을 분석하였다. 현장시험 결과, 제작된 유도성 커플러는 광대역 전력선통신을 위한 주요 주파수 대역에서 비교 적 우수한 데이터통신 속도를 유지하는 것으로 나타났 다. 현장시험을 통하여 배전선로를 이용한 전력선통신 은 분기의 유무에 따라 통신속도에 차이가 발생할 수 있 음을 확인하였다. 또한, 대전류 환경을 고려한 시험결 과, 통신거리가 200 [m]로 증가되어도 배전자동화시스 템에 설치된 각종 센서들이 획득한 데이터를 충분히 실 시간 전송할 수 있는 통신속도를 유지하는 것으로 확인 되었다. 따라서 Fe계 나노결정립 합금을 이용하여 제작 된 유도성 커플러는 지하공동구나 고산지대와 같이 접 근이 어려운 지역에 설치된 배전설비 상시 감시 및 원격 제어시스템에 활용함으로써 스마트그리드 실현을 위한 핵심소자로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] Ministry of Knowledge Economy, *The National Roadmap for the Smart Grid*, Jan. 2010.
- [2] R. Joshi, H. M. Jaday, A. Mali, and S. V. Kulkarni, "IoT application for real-time monitor of PLC data using EPICS," in *Proc. International Conference on Internet of Things and Application*, Pune: India, pp. 68-72, Jan. 2016.
- [3] H.-S. Kim, W. Ju, and S. G. Kang, "A fire prevention system of the nacelle of wind turbine generator system based on broadband powerline communication," *Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no. 6, pp. 1229-1234, Dec. 2018.
- [4] K. S. Park, "Implement of a watt-hour meter monitoring system using powerline communication," *Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 8, no. 8, pp. 1143-1148, Aug. 2013.
- [5] H.-S. Kim and S. G. Kang, "A powerline-based legacy-line communication system for implementation of a communication networks in ship," *Journal of the Korea Institute of Information Communication Engineering*, vol. 19, no. 8, pp. 1831-1838, Aug. 2015.
- [6] H.-S. Kim, S. H. Park, and S. G. Kang, "Development of communication joint tools for implementing a legacy-line communication system in a train," *Journal of the Korea Institute of Information Communication Engineering*, vol. 19, no. 4, pp. 877-887, Apr. 2015.
- [7] IEEE Std. 1901.2a-2015, *IEEE Standard for Low-Frequency (less than 500 kHz) Narrowband Power Line Communications for Smart Grid Applications*, IEEE, Piscataway, N.J., 2015.
- [8] IEEE Std. 1901-2010, *IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications*, IEEE, Piscataway, N.J., 2011.
- [9] K.-R. Sohn and S.-G. Oh, "Characteristics of inductive coupling unit using toroidal core made of nano-crystalline soft magnetic material," *Journal of Korea Society of Marine Engineering*, vol. 41, no. 9, pp. 872-877, Nov. 2017.



강석근(Seog Geun Kang)

1999년 8월: 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
 2003년 4월 ~ 현재: 경상대학교 공과대학 반도체공학과 및 대학원 전기전자공학과, 교수
 2003년 4월 ~ 현재: 경상대학교 공학연구원, 책임연구원
 ※관심분야 : 디지털통신, 무선통신, 오류정정부호, 디지털 신호처리