

논문 2017-54-2-1

차량 내 무선 에너지 전송을 위한 분산 안테나 시스템

(Distributed Antenna System for Intra-vehicle Wireless Energy Transfer)

김영환*, 권구형*, 이충용**

(Yeonghwan Kim, Kuhyung Kwon, and Chungyong Lee[©])

요약

본 논문은 차량 내부에서 무선 에너지 전송 기술을 지원하기 위해 분산 안테나 시스템의 사용을 제안한다. 차량 내 무선 에너지 전송 시스템은 에너지 수신 단말기의 이동이 제한적이고, 채널 환경이 정적이며, 인체가 송신기와 가까운 특징을 갖는다. 이러한 상황에서 송신기의 배치는 인체에서의 수신 에너지와 에너지 수신 단말기에서의 수신 에너지의 양에 큰 영향을 미친다. 이에 본 논문은 기존 무선 통신 시스템에서 사용되는 중앙 집중형 안테나 시스템과 분산 안테나 시스템을 적용하였을 때의 차량 내 무선 에너지 전송 성능을 모의실험을 통해 비교하고, 분산 안테나 시스템이 더 좋은 성능을 가짐을 보인다.

Abstract

This paper considers an application of distributed antenna system (DAS) to a system of intra-vehicle wireless energy transfer (WET). The intra-vehicle WET system has features such as limited mobility of energy receiver, static channel environment and short distance between transmitter and human body. Under these conditions, location of transmitter highly affects the amount of energy received by human body and the energy received by energy receiving devices. We compare centralized antenna system (CAS) and the DAS in intra-vehicle WET system by simulation. The results show the DAS has superior performance to the CAS.

Keywords : 분산 안테나 시스템, 무선 에너지 전송, Intra-vehicle communication

I. 서론

최근 무선 에너지 전송 기술은 새로운 연구 주제로써 많은 관심을 받고 있다^[1~4]. 무선 에너지 전송 기술은 크게 세 가지로 분류된다. 첫째는 전자기 유도 현상을

이용한 기술로, 전류를 이용하여 자기장을 형성하고, 형성된 자기장이 전류를 유도하여 무선으로 에너지를 전송하는 방식이다. 이러한 방식의 무선 에너지 전송 기술은 오래 전부터 상용화가 되었고, 최근에는 스마트 기기(스마트폰, 스마트워치 등)에도 사용될 만큼 보편적인 기술이다. 이 기술은 높은 에너지 전송 효율을 갖고 있지만 수 cm 이내의 제한적인 거리에만 에너지를 전송할 수 있다는 단점을 갖고 있다. 두 번째 기술은 공명 방식의 무선 에너지 전송 기술이다. 공명 방식의 무선 에너지 전송 기술은 전자기 유도 방식과 비슷하게 코일에 전류를 발생시켜 자기장을 유도하는 방식으로 에너지를 전송하지만, 수신기와 송신기의 공명 주파수를 맞

* 학생회원, ** 정회원, 연세대학교 전기전자공학과
(Department of Electrical and Electronic Engineering,
Yonsei University)

[©] Corresponding Author(E-mail : cylee@yonsei.ac.kr)

※ “이 논문은 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업
입 (NO. 2015R1D1A1A01058644)”

Received ; September 1, 2016 Revised ; December 7, 2016

Accepted ; January 24, 2017

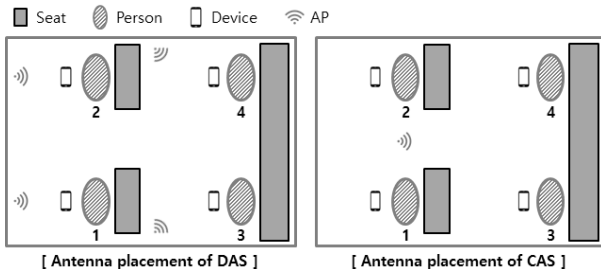


그림 1. 차량 내 통신 시스템의 모델링과 무선 에너지 전송을 위한 분산 안테나 시스템과 중앙 집중형 안테나 시스템의 안테나 배치

Fig. 1. Antenna placement of distributed antenna system (DAS) and centralized antenna system (CAS) for intra-vehicle communication model.

취 더 먼 거리에서도 에너지 전송이 가능하다는 점에서 전자기 유도 방식과 차이가 있다. 하지만, 공명 방식의 에너지 전송 기술 역시 수십 cm 단위의 거리를 지원한다는 한계점이 있다. 마지막으로 RF 신호를 이용한 에너지 전송 기술이 있다. RF 신호는 파동이므로 에너지를 가지며, 안테나를 이용하여 수신 신호를 전류로 변환하여 배터리를 충전할 수 있다. RF 신호를 이용한 방식은 앞서 소개한 두 방식에 비해 훨씬 넓은 수 m ~ 수십 m 범위에 에너지를 전송할 수 있다는 장점이 있다. 또한 현재 운용되는 무선 통신 시스템을 이용하여 무선 에너지 전송을 구현할 수 있다는 점에서 차별점이 있다. 이러한 장점과 잠재력에 따라 최근 RF 무선 에너지 전송과 관련된 연구가 활발하게 진행되고 있다^[4~6].

한편 용량이 크고 지속적인 충전이 가능한 차량 배터리는 무선 에너지 전송 시스템의 전력원으로써 이용 가능하다. 또한 차량 내부의 채널은 송수신단의 거리가 가깝고, 수신기 및 산란체의 정적인 움직임으로 인하여 채널의 변화가 적기 때문에 무선 에너지 전송의 효율을 크게 끌어올릴 수 있는 좋은 조건이 된다. 본 논문은 차량 내부에서의 무선 에너지 전송 기술을 위한 송신 안테나의 배치 방법으로써 중앙 집중형 안테나 시스템 (centralized antenna system, CAS)과 분산 안테나 시스템 (distributed antenna system, DAS) 두 방식을 비교하고 모의실험을 통해 그 성능을 확인한다.

II. 시스템 모델

1. 차량 내 통신

차량 내부의 환경은 일반적인 이동 통신 환경과는 다르게 정적인 채널을 갖는다. 우선, 사람은 정해진 위치 (좌석)에서 크게 벗어나지 않는 공간에 위치하게 된다.

또한 사람이 소지한 모바일 단말기(예: 스마트폰, 웨어러블 디바이스 등) 역시 사람이 위치한 공간에서 작은 반경 내에 존재할 확률이 매우 높다. 이러한 차량 내부에서 RF 신호를 이용한 무선 에너지 전송을 수행하려 할 때, 수신기의 위치가 제한적이고 그 움직임의 범위가 좁기 때문에 송신기의 배치가 시스템의 성능을 좌우하는 중요한 요소가 된다.

또한 무선 에너지 전송 시스템에서 무엇보다 중요한 것은 안전성이다. 인체로 가는 에너지를 차단 혹은 최소화하기 위해 본 논문에서는 시스템 모델에 인체를 일종의 수신기로 모델링하여 포함하였다. 이를 이용하여 인체로 가는 에너지를 측정 및 차단할 수 있다.

본 논문에서는 그림 1과 같이 4인승 승용차를 기준으로 차량 내부의 채널을 모델링하고, 좌석마다 1에서 4의 색인을 부여하여 각 좌석에 탑승한 승객 및 그의 모바일 단말기를 구분한다. 운전석은 1번, 조수석은 2번, 운전석 뒷좌석은 3번, 조수석 뒷좌석은 4번이다.

2. 무선 에너지 전송

무선 에너지 전송 시스템은 신호의 복호가 중요한 기준의 통신 시스템과 수신 신호 파워의 최대화가 중요하다. 모바일 단말기에 수신된 신호를 y^d 라고 할 때, 모바일 단말기가 수확하는 파워는 다음과 같이 정의된다^[1, 7].

$$P^d = \eta |y^d|^2 \quad (1)$$

이때 $0 \leq \eta \leq 1$ 는 RF-DC 변환 효율을 나타내는 계수이다. 무선 에너지 전송 시스템에서 수신 신호의 파워를 최대화 하는 전처리기는 dominant eigenmode transmission 임이 알려져 있다^[1]. 하지만 다중 유저 환경에서 dominant eigenmode transmission은 수신 신호 파워의 총합을 최대화 하는 전처리이기 때문에 사용자 간 수신 신호 파워의 불균형을 초래한다는 문제점이 있고, 또한 인체에 가는 신호를 고려하지 않기 때문에 안전성에도 문제점이 있다. ^[8]은 full-duplex wireless powered communication system (WPCN)에서 self-interference (SI)를 leakage 신호로 규정하여 leakage 신호의 파워를 최소화 하고 목적 신호의 파워를 최대화 하는 leakage signal control 기반의 energy-to-SI-plus-noise-ratio (ESINR) 최대화 전처리기를 제안하였다. 본 논문은 이러한 기법을 차용하여, 인체에 수신되는 신호를 leakage 신호로 간주하고 최소화하는 동시에 모바일 단말기에 수신되는 신호를 목적 신호로 간주하여 최대화 하는 전처리기를 사용한다.

III. 안테나 시스템

1. 중앙 집중형 안테나 시스템

차량 내 무선 에너지 전송을 위해 기존 이동 통신 시스템의 셀룰러 네트워크에서 사용되어 온 중앙 집중형 안테나 시스템을 도입할 수 있다. 송신기 안테나가 총 N_T 개, 모바일 단말기의 안테나가 한 개일 때, 인체를 하나의 수신 안테나로 모델링하면, k 번째($k=1, 2, 3, 4$) 모바일 단말기가 받는 신호는

$$y_k^d = \mathbf{h}_k^d \mathbf{W} \mathbf{s} + n_k^d \quad (2)$$

k 번째 ($k=1, 2, 3, 4$) 탑승객의 인체가 받는 신호는

$$y_k^b = \mathbf{h}_k^b \mathbf{W} \mathbf{s} + n_k^b \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있다. 이때 윗첨자 d 는 단말기를, 윗첨자 b 는 인체를 나타내는 색인이다. $\mathbf{h}_k^d \in \mathbb{C}^{1 \times N_T}$ 는 k 번째 ($k=1, 2, 3, 4$) 모바일 단말기와 송신기 사이의 채널을 나타내고, $\mathbf{h}_k^b \in \mathbb{C}^{1 \times N_T}$ 는 k 번째($k=1, 2, 3, 4$) 탑승객과 송신기 사이의 채널을 나타낸다. $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{N_T \times N_T}$ 는 leakage control 기반의 전처리기 행렬이고 $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$ 는 송신 신호 벡터이다. $n_k^d, n_k^b \sim CN(0, \sigma^2)$ 은 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 복소 가우시안 잡음이다. 중앙 집중형 안테나 시스템에서 N_T 개의 송신 안테나는 모두 같은 곳에 위치한다.

2. 분산 안테나 시스템

분산 안테나 시스템이 기존의 중앙 집중형 안테나 시스템과 다른 점은 송신기의 송신 안테나가 한 곳에 있지 않고 서로 다른 위치에 분산되어 있다는 것이다. 따라서 분산 안테나 시스템은 사용자 단말기와 각각의 송신 안테나 간의 거리가 모두 다르고, 중앙 집중형 안테나 시스템에 비해 더욱 유동적인 안테나 배치가 가능하다. 이러한 특징이 정적인 차량 내부 환경과 결합되면, 차량 내 각 좌석마다 가까운 거리에 안테나를 배치함으로써 좌석 간 에너지 수신량의 불균형을 해소할 수 있다. 분산 안테나 시스템은 안테나 배치에서의 이점 외에도 에너지 효율 측면에서도 이점이 있다. 비어있는 좌석 가까이에 있는 안테나를 끄므로써(혹은 sleep 모드) 송신 신호의 에너지를 제외한 전력 증폭기, ADC 등의 기타 회로 에너지를 절감할 수 있다.

분산 안테나 시스템에서 탑승한 승객들의 색인의 집

합을 $K \subset \{1, 2, 3, 4\}$ 라고 할 때, k 번째($k \in K$) 모바일 단말기가 받는 신호는

$$y_k^d = \tilde{\mathbf{h}}_k^d \tilde{\mathbf{W}} \tilde{\mathbf{s}} + n_k^d \quad (4)$$

k 번째($k \in K$) 탑승객의 인체가 받는 신호는

$$y_k^b = \tilde{\mathbf{h}}_k^b \tilde{\mathbf{W}} \tilde{\mathbf{s}} + n_k^b \quad (5)$$

으로 정의된다. 이때 첨자는 중앙 집중형 안테나 시스템에서의 정의와 동일하다. 중앙 집중형 안테나 시스템과 다른 점은 송신단의 안테나 도메인인데, $k \notin K$ 번째 안테나는 끄기 때문에 송신 안테나 도메인에서 제외된다. k 번째 좌석 가까이에 있는 송신 안테나의 개수는 N_T^k 이고, $k \in K$ 인 N_T^k 들의 합을 M 이라고 하자. 이때 $\tilde{\mathbf{h}}_k^d \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ 는 k 번째($k \in K$) 모바일 단말기와 송신기 사이의 채널을 나타내고, $\tilde{\mathbf{h}}_k^b \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ 는 k 번째($k \in K$) 탑승객과 송신기 사이의 채널을 나타낸다. $\tilde{\mathbf{W}} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 는 leakage control 기반의 전처리기 행렬이고 $\tilde{\mathbf{s}} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 각 송신 안테나에서 송신되는 신호 벡터이다.

IV. 모의실험

본 논문에서는 동일한 채널 상황에서 중앙 집중형 안테나 시스템과 분산 안테나 시스템의 성능을 비교하였다. 본 장의 실험에서는 차량의 실내를 길이 2m, 폭 1.5m, 높이 1m의 직육면체로 모델링하고, 좌석의 위치와 탑승객의 위치, 탑승객이 소유하는 모바일 단말기의 위치를 고정하였다. 위치에 대한 자세한 사항은 표 1에 정리되어 있다. 또한 차량 내부의 모습을 기반으로 송신기와 수신기 사이의 가시선(LOS) 여부를 적용하여 채널을 생성하였다.

$$\mathbf{h} = \sqrt{\frac{K}{K+1}} \bar{\mathbf{h}} + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \mathbf{h}_w \quad (6)$$

여기서 $\bar{\mathbf{h}}$ 는 LOS 채널, \mathbf{h}_w 는 Rayleigh fading 채널을 나타내고 LOS가 있는 채널의 경우 $K=1$ 이고 LOS가 없는 채널의 경우 $K=0$ 이다. 또한 path loss는 (7)과 같이 모델링하고 $d_0 = 1$ m, $PL(d_0) = 35$ dB로 설정하였다^[9].

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log(d/d_0) \quad (7)$$

Path loss exponent n 은 LOS가 있는 채널은 $n=2$, LOS가 없는 채널은 $n=4$ 로 설정하였다. RF-DC 변환

표 1. 탑승객 및 모바일 단말기, 송신 안테나의 위치
Table1. Location of passengers, mobile devices and transmit antennas.

(단위: m)	x-축	y-축	z-축
승객 1	1	0.3	0.5
승객 2	1	1.2	0.5
승객 3	1.8	0.3	0.5
승객 4	1.8	1.2	0.5
단말 1	0.9	0.3	0
단말 2	0.9	1.2	0
단말 3	1.7	0.3	0
단말 4	1.7	1.2	0
CAS	0.9	0.75	1
DAS 1	0.2	0.3	0.5
DAS 2	0.2	1.2	0.5
DAS 3	1.5	0	0.5
DAS 4	1.5	1.5	0.5

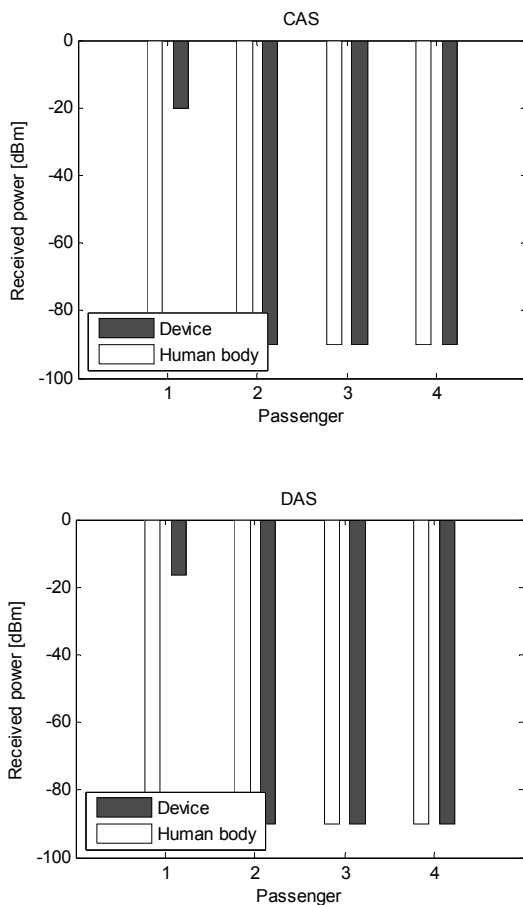


그림 2. $K = \{1\}$ 일 때의 CAS와 DAS에서 수신 파워
Fig. 2. Received power of CAS and DAS when $K = \{1\}$.

효율 $\eta = 1$ 로 설정하였다.

중앙 집중형 안테나 시스템의 경우 모든 송신 안테나가 같은 곳에 위치하게 되는데, 일반적으로 운전자는 대부분의 경우에 탑승 한다는 점과 앞좌석에 사람이 탑승할 경우가 많은 점을 고려하여 송신기를 앞좌석에 가깝게 배치하면서도 뒷좌석 탑승객을 고려하여 앞좌석 실내등이 있는 곳에 설치한다고 가정하였다. 분산 안테나 시스템의 모의실험에서는 각 좌석 주변에 송신 안테나를 배치하였다. 앞좌석의 경우 대시보드의 위치에, 뒷좌석의 경우 차문에 송신 안테나를 설치한다고 가정하였다.

중앙 집중형 안테나 시스템과 분산 안테나 시스템 모두 송신 안테나의 수 $N_T = 8$ 이고, 특히 분산 안테나 시스템에서는 각각의 좌석마다 $N_T^k = N_T/4 = 2$ ($k=1, 2, 3, 4$)개의 송신 안테나를 설치하였다. 두 시스템 모두 송신 신호 파워의 총합 $P_T = 5$ dBm으로 동일하며 수신 신호에 더해지는 가우시안 잡음의 분산은 -90 dBm이다.

그림 2는 차량에 운전자만 탑승한 경우에 대한 모의 실험 결과이다. 중앙 집중형 안테나 시스템은 분산 안테나 시스템보다 더 많은 송신 안테나를 이용한 우수한 빔 형성 능력을 갖고 있음에도 송신기와 수신기의 거리가 더 크기 때문에 모바일 단말의 수신 에너지가 더 작음을 확인할 수 있다. 또한 두 시스템 모두 인체에서의 수신 에너지가 잡음 수준으로 낮다.

그림 3은 운전자와 운전석 뒷좌석에 승객이 탑승한 경우의 모의실험 결과이다. 두 시스템 모두 인체에서의 수신 에너지를 잡음 수준까지 경감시키는 것을 확인할 수 있다. 하지만 모바일 단말기에서 수신되는 에너지에서는 서로 다른 양상을 보이는데, 중앙 집중형 안테나 시스템의 경우 안테나가 모두 한 곳에 집중되어 있기 때문에 더 가까운 앞좌석의 단말기로 에너지가 집중되는 결과를 보인다. 이는 제한된 에너지를 전송하여 단말기의 수신 에너지 합을 최대화하기 위해 더 높은 채널 이득을 갖는 채널에 더 많은 에너지를 할당하는 leakage control 기반의 전처리의 특성에 따른 결과이다. 반면, 분산 안테나 시스템의 경우 각각의 단말 가까이 송신 안테나가 설치되어 있기 때문에 중앙 집중형 안테나 시스템에 비해 좌석 간 수신 에너지의 불균형이 해소된다. 더불어 송신기와 수신기 사이의 거리가 작아지기 때문에, 각각의 모바일 단말기에서 수신되는 에너지의 크기 또한 분산 안테나 시스템이 더 크다.

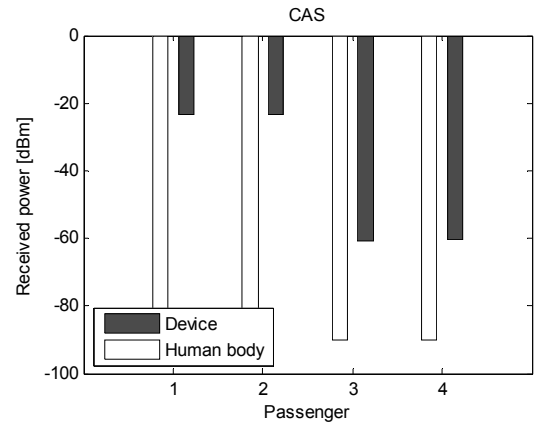
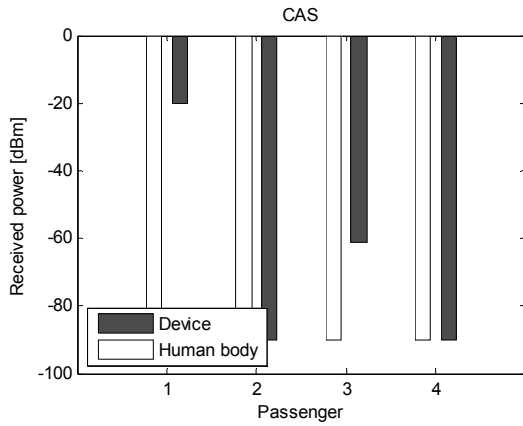


그림 3. $K = \{1,3\}$ 일 때의 CAS와 DAS에서 수신 파워
Fig. 3. Received power of CAS and DAS when $K = \{1,3\}$.

그림 4. $K = \{1,2,3,4\}$ 일 때의 CAS와 DAS에서 수신 파워
Fig. 4. Received power of CAS and DAS when $K = \{1,2,3,4\}$.

그림 4는 모든 좌석에 승객이 탑승한 경우의 모의실험 결과이다. 이 경우에도 그림 3에서 나타난 결과와 같이 분산 안테나 시스템이 중앙 집중형 안테나 시스템에 비해 좌석 간 에너지 수신량의 불균형이 적음과 동시에 수신량이 더 크음을 알 수 있다.

본 논문은 차량 내 통신환경 및 인체를 간략하게 모델링하였는데, 향후에는 실측 데이터 기반의 더욱 정밀한 모델에 대한 연구가 요구된다. 또한, 다양한 방사 패턴에 따른 시스템에 대한 분석 및 분산 안테나 시스템에서 최적의 송신 안테나 설치 위치 등의 후속 연구가 필요하다.

V. 결 론

차량 내 무선 전송 시스템에서의 중앙 집중형 안테나 시스템은 앞좌석에 앉은 탑승객에게는 더 많은 에너지를 전송할 수 있지만, 그 대가로 뒷좌석의 탑승객에게는 매우 작은 양의 에너지를 전송함을 실험적으로 확인하였다. 반면, 분산 안테나 시스템의 경우 전 좌석 간의 에너지 불균형을 크게 개선시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 탑승객이 없는 곳의 송신 안테나는 끄으로써 시스템의 구동 에너지를 절감한다는 점에서도 분산 안테나 시스템은 차량 내 무선 에너지 전송 시스템에 더욱 적합한 시스템이라고 할 수 있다.

REFERENCES

- [1] R. Zhang and C. K. Ho, "MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 12, no. 5, pp. 1989–2001, May 2013.
- [2] K. Huang and V. K. N. Lau, "Enabling Wireless Power Transfer in Cellular Networks: Architecture, Modeling and Deployment," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 13, no. 2, pp. 902–912, February 2014.
- [3] P. Grover and A. Sahai, "Shannon meets Tesla: Wireless information and power transfer," 2010

- IEEE International Symposium on Information Theory, pp. 2363-2367, 2010,
- [4] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim and Z. Han, "Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications," IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 18, no. 2, pp. 1413-1452, Secondquarter 2016.
- [5] N. Antwi, B. Tobias, O. Thomas and R. Leonhard, "Analysis of Passive RF-DC Power Rectification and Harvesting Wireless RF Energy for Micro-watt Sensors," AIMS Energy, Vol. 3, no. 2, pp. 184-200, April 2015.
- [6] H. J. Visser and R. J. M. Vullers, "RF Energy Harvesting and Transport for Wireless Sensor Network Applications: Principles and Requirements," Proceedings of the IEEE, Vol. 101, no. 6, pp. 1410-1423, June 2013.
- [7] H. Ju and R. Zhang, "Throughput Maximization in Wireless Powered Communication Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 13, no. 1, pp. 418-428, January 2014.
- [8] J. Jang, "Leakage Signal Control Based Precoder Design for ESINR Maximization in FD-WPCN," M.S. thesis, School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea, 2016.
- [9] I. Zuazola, J. Elmirghani, and J. Batchelor, "High-speed ultra-wide band in-car wireless channel measurements," IET communications, Vol. 3, no. 7, pp. 1115-1123, July 2009.

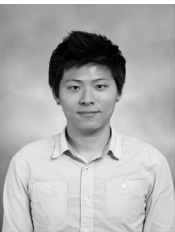
 저 자 소 개



김 영 환(학생회원)
 2015년 연세대학교 전기전자공학과
 학사 졸업.
 2015년~현재 연세대학교 전기전자
 공학과 석박사통합과정
 <주관심분야: 통신신호처리, MIMO>



이 충 용(정회원)
 1987년 연세대학교 전자공학과 학사
 졸업.
 1989년 연세대학교 전자공학과 석사
 졸업.
 1995년 Georgia Tech. 전자공학과
 박사 졸업.
 1996년~1997년 삼성전자 선임연구원
 1997년~현재 연세대학교 전기전자공학부 교수
 <주관심분야: 통신 신호처리, MIMO, 협력통신시
 스템, 군사전자>



권 구 형(학생회원)
 2015년 연세대학교 전기전자공학과
 학사 졸업
 2013년~현재 연세대학교 전기전자
 공학과 석박사통합과정.
 <주관심분야: 통신신호처리, MIMO>