논문 2016-11-43

원거리 전기 자동차의 다중 충전을 위한 레이저 파워 빔 기반의 무선 전력 전송 시스템

(Laser Power Beaming Based Wireless Power Transmission System for Multiple Charging of Long-distance Located Electric Vehicle)

엄정숙,김건정,최정희*, 박용완*

(Jeongsook Eom, Gunzung Kim, Jeonghee Choi, Yongwan Park)

Abstract : This paper presents the design and simulation of a laser power beaming (LPB) system for an electric vehicle that establishes an optimal power transmission path based on the received signal strength. The LPB system is possible to transfer power from multiple transmitters to a single receiver according to the characteristics of the laser and the solar panel. When the laser beams of multiple transmitters aim at a solar panel at the same time, the received power is the sum of all energy at a solar panel. Our proposed LPB system consists of multiple transmitters and multiple receivers. The transmitter sends its power characteristics as optically coded pulses with a class 1 laser beam and powers as a high-intensity laser beam. By using the attenuated power level, the receiver can estimate the maximum receivable powers from the transmitters and select optimal transmitters. Throughout the simulation, we verified the possibility that different LPB receivers were achieved their required power by the optimal allocation of the transmitters among the various transmitters.

Keywords : Laser power beam, Wireless power transmission, Electric vehicle, Multiple transmitter, DS-OCDMA

Ⅰ. 서 론

전기 자동차 (Electric Vehicle, EV) 보급에 있 어서 낮은 총소유비용 (Total Cost of Ownership, TCO)과 단순한 충전은 소비자의 구매 결정에 가장

*Corresponding Author (choijh@daegu.ac.kr, ywpark@yu.ac.kr)

J. Eom, G. Kim, Y. Park: Yeungnam University J. Choi: Daegu University

※ 논문은 2013년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신 인력양성사업의 지원 (NRF-2013H1B8A2031879)과 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT 연구센터 육성지원사업의 결과로 수행되었음 (IITP-2016-R2718-16-0035). 큰 영향을 미치는 요인이다. 현재 전기 자동차들이 사용하는 플러그인 충전 방식은 과정이 복잡하고 건강과 안전성, 신뢰성 측면에서 잠재적인 문제를 초래한다. 특히 노상의 공공 충전설비는 파괴 행위 로 인한 손상의 우려가 있고, 도시경관을 해칠 수 있다. 퀄컴을 비롯한 선도 업체들은 무선 충전이 제 공하는 단순하고 편리하고 향상된 사용자 경험이 전기 자동차 보급의 열쇠가 될 것으로 보고 있으며, 결국은 모든 전기 자동차의 표준 충전 수단이 될 것으로 예상하고 세계 각 지역에서 운용 가능한 범 용 무선 충전 기술을 개발하고 있다. 무선 충전은 최소한의 운전자 개입으로 조작할 수 있는 단순화 된 기능도 중요하지만, 여기에 높은 전력 전송 효율 이 보장되어야 한다. 전기 자동차 무선충전 기술의 보급은 자동차 충전 행위의 큰 변화를 의미한다. 운 전자들은 충전을 조금씩 자주 하게 되고, 정차 시 충전을 보충하기 위한 다이내믹 충전의 이용도 생

Received: Aug. 22 2016, Revised: Oct. 19 2016, Accepted: Oct. 21 2016.

각할 수 있어, 이를 통해 전기 자동차의 항속 거리 에 대한 불안을 해소할 수 있다. 또한 배터리를 더 욱 소형화함으로써 전기 자동차의 저가격화와 경량 화가 가능하다 [1-13].

무선 충전을 위한 무선 전력 전송 기술은 자기 유도 방식이 스마트폰 충전에 도입되어, 관련 제품 의 가격 하락과 보급 확대가 이루어지고 있다. 전기 자동차의 경우 수 m이내의 거리에서 전력을 전송하 기 위하여 코일에서 발생하는 자기장을 이용하여 에너지를 전송하는 자기 공명 방식이 상용화되어 사용된다. 자기 유도 방식은 가장 효율적인 무선 전 력 전송 방식으로, 수 밀리미터 (mm) 내외의 거리 에서 95% 이상의 전력 전송 효율이 가능하다. 자기 유도 방식은 전력 전송 거리가 짧아서 교통카드와 같이 비접촉식에 주로 사용된다. 자기 공명 방식은 수 m 내외의 거리에서 무선 전력 전송이 가능하다. 송수신 코일의 크기와 위치에 영향을 많이 받아서 상용화에 어려움을 많이 겪고 있다 [14-19].

수 킬로미터 (km) 이상 거리에서 수십 킬로와트 (kW) 이상의 전력을 전송할 수 있는 원거리 무선 전력 전송 기술은 기초 연구 단계에 머무르고 있으 며, 마이크로파와 레이저를 이용한 방식이 사용되고 있다. 마이크로파를 이용한 방식은 수 기가헤르츠 (GHz)의 고주파를 이용하여 고출력 에너지를 원거 리에 전송하는 기술이다. 이 방식은 매우 큰 송수신 안테나가 필요하고, 전파 간섭과 인체에 유해할 수 있다는 단점이 있다. 레이저를 이용한 무선 전력 전 송 기술은 고출력의 레이저 파워 빔 (LPB, Laser Power Beaming)을 이용하는 기술로서 우주에서 태양광 발전을 통해 생성된 전력을 지상에 보내거 나. 지구에서 달에 전력을 전송하거나. 군사용 무인 항공기처럼 중장거리 전력 전송이 요구되는 분야에 적용되고 있다. 레이저를 이용한 무선 전력 전송은 전력 전송 효율을 높이는 방법과 전력을 수신하는 이동체를 추적하는 기술을 위주로 연구되고 있다. 마이크로파를 이용한 방식과 마찬가지로 레이저를 이용한 방식도 인체에 상해를 끼칠 수 있어서, 사용 상에 주의를 필요로 한다 [20-25].

전기 자동차의 고속 무선 충전을 위해서는 동시 에 다중으로 무선 전력 전송이 가능해야 한다. 코일 을 이용하는 무선 전력 전송 방식인 자기 유도 방 식과 자기 공명 방식에서 한 개의 전력 송신기를 이용하여 여러 개의 전력 수신기에 전력을 전송하 는 것은 많이 이용되고 있으나, 여러 개의 전력 송 신기를 이용하여 한 개의 전력 수신기에 전력을 전 송하는 것은 매우 힘들다. 코일을 이용하는 경우 송 신기의 코일과 매칭이 되는 코일이 쌍으로 존재해 야 하고, 좁은 공간에 여러 개의 코일이 있을 경우 코일 간에 상호 간섭이 발생하여 적절한 타협점을 찾기 힘들다. 전기 자동차의 경우 여러 개의 코일을 사용하여 다수의 송수신 쌍을 만들어서 전송 전력 을 높이는 방법을 추구하고 있다. 레이저를 이용하 는 무선 전력 전송 방식은 레이저와 솔라 패널의 특성으로 한 개의 수신기에 여러 개의 송신기가 전 력을 전송하는 것이 가능하다. 레이저는 상호 간섭 이 없으므로 여러 개의 송신기가 밀집하여도 상호 영향을 미치지 않는다. 솔라 패널은 동시에 여러 개 의 레이저를 수신할 경우, 솔라 패널이 생성할 수 있는 전력의 최대치를 넘지 않으면 수신된 모든 전 력의 합이 최종 수신한 전력이 된다.

본 논문에서는 레이저 파워 빔을 이용하여 전기 자동차와 같은 무선 전력 전송 시스템에서 여러 개 의 전력 수신기와 여러 개의 전력 송신기가 있을 경우, 전력 수신기가 자신에게 필요한 전력을 전송 받기 위하여 여러 개의 전력 송신기 중에서 적절한 송신기를 선택하는 방법을 제안한다. 2장에서 제안 하는 다중 레이저 송수신 시스템의 구조와 동작에 대하여 설명하고, 3장에서 여러 가지 시나리오에 따 른 다중 송수신 시스템의 동작을 시뮬레이션으로 검증하였다.

II. 레이저 파워 빔 기반의 전기 자동차용 다중 무선 전력 송수신 시스템

전기 자동차의 경우 장착된 배터리의 용량이 클 수록 한 번 충전하여 오랫동안 사용할 수 있으나, 배터리의 용량이 커짐에 따라 배터리 가격이 상승 하여 전기 자동차 가격도 상승하지만, 오히려 배터 리 무게로 인하여 연비가 줄어드는 단점이 있다. 현 재 연구 중인 무선 전력 전송을 이용한 전기 자동 차 무선 충전 방식들은 근거리에서 동작하는 자기 공명 방식의 무선 전력 전송 기술을 응용한다. 이 방식은 전송 효율이 높지만, 근거리에서 동작하여 상시 충전을 위해서는 도로에 전력 송신기 내장이 필수적이라는 단점이 있다.

레이저 파워 빔을 이용한 원거리 무선 전력 전 송 방식은 전기 자동차가 레이저 파워 빔을 수신할 수 있는 솔라 패널과 같은 장치만 갖추면 수십 km 떨어진 곳에서도 전력 전송이 가능하여 기존의 도 로와 같은 인프라를 변경할 필요가 없다. 신호 대기



그림 1. 레이저 파워 빔과 V2I 기반의 다중 무선 전력 송수신 시스템의 전반적인 구성도 Fig. 1 Overall system configuration for wireless laser power beaming and V2I using multiple transmitter and receiver



그림 2. 전력 송신기에서 전송하는 고유 전력 정보 Fig. 2 Unique power properties of the transmitter

를 위하여 사거리나 횡단보도에 정차하였을 때, 교 통 신호등에 탑재된 레이저 파워 빔 기반의 무선 전력 전송 장치에서 순간적으로 높은 전력을 제공 한다면 작은 배터리를 장착하여도 지속적인 충전이 가능하여 항속 거리에 대한 불안감을 없을 수 있다. 이 방식은 전력 송신기와 전력 수신기의 거리와 입 사각, 전력 수신기의 솔라 패널 면적과 전력 변환 효율에 따라서 수신되는 전력이 결정된다. 전력 수 신기에서 요구하는 전력을 한 개의 전력 송신기가 공급할 수 없을 경우, 다수의 전력 송신기가 동시에 전력을 공급하여 전력 수신기가 요구하는 전력을 충족시킬 수 있다.

제안하는 레이저 파워 빔 기반의 무선 전력 전 송 시스템은 다수의 전력 송신기와 전력 수신기로 구성된다. 전력 송신기는 교통 신호등에 탑재되며, 전기 자동차와 V2I (Vehicle to Infrastructure)로 통신한다. 전기 자동차의 요구가 있으면 전송 가능 한 모든 무선 광채널로 자신의 고유 전력 정보를 부호화된 레이저 펄스 형태로 전송하고, 전기 자동 차에 의하여 적합한 전력 송신기로 선택이 되면 고 출력의 레이저 빔을 선정된 무선 광채널로 전송한 다. 무선 광채널은 전력 송신기와 송출한 레이저 빔 이 전력 수신기에 도달하는 경로이며, 전력 송신기 에서 레이저 빔을 송출하는 각도를 구좌표계를 이 용하여 표현한다.

전기 자동차에 부착된 전력 수신기는 교통 신호 등과 같은 주변 인프라에 V2I로 연결되어 통신하 고, 솔라 패널이 부착되어 수신한 레이저 파워 빔을 전기 신호나 전력으로 변환한다. 새로운 전력 공급 이 필요할 경우 전력 수신기는 전력 송신기들이 전 송한 레이저 빔을 수신한 후, 전력 송신기들의 특성 을 분석하여 가장 최적의 전력 송신기와 무선 광채 널을 선택하여 전력을 전송받는다. 4개의 전력 수신 기와 12개의 전력 송신기로 구성된 레이저 파워 빆 을 이용한 다중 무선 전력 송수신 시스템의 전반적 인 구성은 그림 1과 같다. 4개의 전력 송신기는 최 대 전송 전력과 무선 광채널이 서로 다르고, 전력 송신기와 전력 수신기 사이의 거리와 입사각이 서 로 달라서 기하학적 위치 관계에 따라 전력 수신기 의 수신 가능한 전력이 다르다. 전력 수신기는 수급 이 필요한 전력에 따라 1개 이상의 전력 수신기와 전력 전송 경로를 생성하여, 전력을 수급 받을 수 있다.





1. 전력 송신기

전력 송신기는 레이저 파워 빔을 이용하여 전력 수신기에 무선으로 공급하며, 교통 신호등에 장착되 어 전기 자동차와 V2I로 통신하는 장치이다. 32비 트 크기의 고유 전력 정보는 그림 2와 같이 1비트 크기의 시작 신호, 전력 송신기를 구분하도록 고유 하게 부여된 4비트 크기의 장치 식별 번호 (TX ID), 전송 가능한 무선 광채널마다 고유하게 부여된 7비트와 9비트 크기의 2가지 무선 광채널 식별 번 호 (Polar angle Θ , Azimuthal angle ϕ), 8비트 크 기의 kW 단위의 최대 전송 전력 (Max Power), 3 비트 크기의 체크섬 (CRC, Cyclic Redundancy Check)으로 구성된다. 무선 광채널 식별 번호는 그 림 3과 같은 반구형 좌표계에서 레이저 빔이 송출 되는 방향을 나타낸다. 7비트 크기의 0는 구면 좌 표계에서 z축 양의 방향과 이루는 각도이고, 9비트 크기의 ₀는 xy 평면으로의 사영이 x축 양의 방향과 이루는 각도이다. 체크섬은 전력 정보 송신 과정에 서 오류를 검출하기 위하여 사용하며, 장치 식별 번 호, 무선 광채널 식별 번호, 최대 전송 전력 정보를 CRC로 생성한 것이다.

전력 송신기는 탐색 단계에서는 자신의 고유 전 력 정보를 레이저 빔를 이용하여 전력 수신기에 송 출하고, 전력 공급 단계에서는 최대 전송 전력의 레 이저 파워 빔으로 송출한다. 항상 V2I로 연결되어 수신기가 방송하는 메시지를 수신한다. 전력 송신기 가 전송하는 고유 전력 정보들은 다른 전력 전송기 가 전송하는 고유 전력 정보들과 섞여도 구분을 할 수 있도록 DS-OCDMA (Direct-Sequence Optical Code Division Multiple Access)로 부호화된 데이 터이다. 본 논문에서 사용하는 DS-OCDMA 방식은 1차원 단극성 동기식 프라임 시퀀스 코드 (1D Unipolar Synchronous Prime Sequence Code)로 대역 확산 (Spread Spectrum)을 한 후, 비제로-복 귀 온-오프변조 (Non-Return-to-Zero On-Off Keying, NRZ-OOK) 방법으로 디지털 변조을 수행 한다. 4비트 크기의 장치 식별 번호를 가진 16개의 전력 송신기마다 서로 다른 코드를 할당할 수 있도 록 길이가 17인 동기식 프라임 시퀸스 코드를 사용 한다. [26-29].

전력 송신기의 동작 단계는 대기 단계, 탐색 단 계, 전력 공급 단계로 나누어진다. 대기 단계는 레 이저 송신을 하지 않는 단계로서, V2I로 전력 수신 기의 정보 요청 메시지를 수신할 때까지 기다린다. 탐색 단계는 전력 수신기의 정보 요청 메시지를 수 신하면 수행되는 단계로서, 전력 송신기마다 자신의 고유 전력 정보를 DS-OCDMA로 부호화한 후 레이 저 노출에 대한 위험이 전혀없는 1급 노출방출한계 에 부합하도록 펄스 하나당 46µJ/m'의 레이저 전력 으로 송출한다. 전력 송신기는 부호화한 정보를 한 번에 하나의 채널만 사용하여 자신들이 전송 가능 한 무선 광채널에 대하여 순차적으로 송출한다. 탐 색 단계는 정보 요청 메시지를 수신한 모든 전력 송신기가 동시에 수행을 시작하지만, 전력 송신기마 다 무선 광채널의 개수가 다르므로 끝나는 시간은 서로 다르다. 모든 무선 광채널에 대하여 전력 정보 송출이 끝나면 대기 단계로 전환하여, 전력 수신기 의 메시지를 기다린다. 전력 공급 단계는 전력 수신 기에 의하여 전력 공급을 요청받은 전력 송신기만 동작하는 단계이다. 전력 수신기가 탐색 단계에서 수신한 정보를 분석하여 최적의 전력 송신기를 선 택한 후, 해당 전력 송신기에게 전력을 전송할 무선 광채널을 지정하여 공급 시작 메시지를 보낸다. 전 력 송신기는 해당 무선 광채널로 레이저 파워 빔을 이용하여 최대 전력을 송출한다. 전력 수신기로부터 공급 중단 메시지를 받으면 전력 송출을 중단하고 대기 단계로 전환한다.

2. 전력 수신기

전력 수신기는 교통 신호등과 V2I로 통신하는 전기 자동차로서 솔라 패널을 이용하여 전력 송신 기가 공급한 레이저 파워 빔을 전력으로 전환하여 사용한다. V2I로 전력 송신기에게 정보 요청 메시 지, 공급 시작 메시지, 공급 중단 메시지를 보낼 수 있다. 전력 송신기가 DS-OCDMA로 보낸 정보를 복호화하여 전력 송신기와 무선 광채널에 따른 고 유 정보를 수신하고, 이 때 레이저 빔의 수신 세기 를 기반으로 전력 전송기와 무선 광채널에 따라 수 신 가능한 최대 전력을 계산한다. 수급이 필요한 전 력에 따라 최적의 전력 전송기와 무선 광채널을 선 택하여 전력을 수급한다.

전력 수신기의 동작 단계는 대기 단계, 탐색 단 계, 전력 수급 단계로 나누어진다. 대기 단계는 레 이저 수신을 하지 않는 단계로서, 전력 수급이 필요 하면 탐색 단계로 전환한 후 V2I로 정보 요청 메시 지를 방송한다. 탐색 단계에서는 메시지를 방송한 후 전력 송신기가 레이저로 송출한 응답을 솔라 패 널로 수신하면서 신호의 세기를 함께 기록한다. 솔 라 패널로 수신한 데이터를 DS-OCDMA로 복호화 한 후, CRC로 체크섬을 비교하여 오류가 없이 수신 된 전력 정보만 신호 세기와 함께 저장한다. 모든 전력 송신기는 펄스 하나당 46µJ/m'의 전력으로 자 신의 고유 전력 정보를 송신하기 때문에, 전력 송신 기와 전력 수신기 사이의 거리와 입사각에 의하여 수신 신호 세기가 다르게 수신된다. 수신 신호 세기 를 이용하면 전력 송신기가 무선 광채널로 보낼 수 있는 최대 전력에 따라 전력 수신기에서 수신 가능 한 최대 전력을 계산할 수 있다. 전력 수신기에서 솔라 패널로 전송받은 레이저의 수신 신호 세기 (P_R)는 수식 (1)로 나타낸다 [30].

$$P_R = \cos\theta_t \frac{4P_{Tclass1}A}{\pi (D_L + \alpha_T R_T)^2} \tau_{atm} \tag{1}$$

P_R: 수신 신호 세기 (W)
P_{Tclass1}: 전송한 레이저의 크기 (W)
θ_t: 솔라 패널에서 레이저의 입사각 (°)
A: 솔라 패널의 면적 (mⁱ)
D_L: 송신한 레이저의 지름 (m)
α_t: 송신한 레이저의 발산 각도 (rad)
R_T: 송신기와 수신기 사이의 거리 (m)
τ_{atm}: 대기 환경에 의한 에너지 전송률

수식 (1)의 파라메터를 중에서 전송한 레이저 에 너지의 크기 ($P_{Tclass1}$)는 탐색 단계동안 펼스 하나 당 46µJ/㎡의 에너지 크기를 가지지만, 레이저 에너 지를 전송할 때는 전력 송신기에서 송출하는 최대 전력으로 바뀐다. 솔라 패널의 면적 (A)는 전력 수 신기의 특성이므로 전력 수신기가 동일할 경우 모 든 전력 송신기가 동일한 값을 가진다. 따라서 전력 송신기에 따라서 탐색 단계에서 달라지는 수신 신 호 세기로 계산한 에너지 전송률 (τ_{sys})은 수식 (2) 로 간략화 된다.

$$\tau_{sys} = \frac{P_R}{P_{Tclass1}} = \cos\theta_t \frac{4}{\pi \left(D_L + \alpha_T R_T\right)^2} \tau_{atm}$$
(2)

탐색 단계동안 수신한 레이저의 신호 세기로 계 산한 에너지 전송률 (τ_{sys})을 이용하여 전력 수신기 가 최대 전력 (P_{Tmax})을 송출했을 때, 전력 수신기 에서 수급 가능한 전력의 크기 (U)는 수식 (3)으로 나타낸다.

$$U = \frac{P_{Tmax}}{\tau_{sys}} \tag{3}$$

전력 수신기는 전력 송신기의 고유 전력 정보와 수신 신호 세기를 수식 (3)에 대입하여 계산한 전력 수신기와 무선 광채널마다 수급 가능한 최대 전력 의 크기를 이용하여 가장 적합한 전력 수신기와 무 선 광채널을 선택하여 최적의 전력 전송 경로를 생 성한다. 전력 수신기는 전력 수급 단계로 전환하고, 선택된 전력 송신기에 공급 시작 메시지와 함께 무 선 광채널 정보를 송신한다. 한 개의 전력 송신기에 서 송출하는 전력으로 필요로 하는 전력을 수급하 지 못할 경우, 여러 개의 전력 송신기에게 필요한 전력을 배분하여 공급 시작 메시지를 전송한다. 전 력 수신기는 솔라 패널을 이용하여 수신된 레이저 파워 빔을 전력으로 전환하여, 필요한 전력을 수급 한다. 전력 수급이 필요 없을 경우 해당하는 전력 송신기에게 공급 중단 메시지를 전송한다. 전력을 공급하던 모든 전력 송신기가 전력 전송을 중단하 면, 전력 수신기는 전력 수급이 필요할 때까지 대기 상태로 전환한다.

3. 최적의 전력 전송 경로 생성

전력 수신기와 전력 송신기는 최적의 전력 전송 경로를 생성하기 위하여 다음과 같은 과정을 거친 다.

 대기 단계에 있는 전력 수신기 중에서 전력 수급이 필요한 전력 수신기는 탐색 단계로 전환한 후 V2I로 정보 요청 메시지를 방송한다.
 정보 요청 메시지를 수신한 전력 송신기 중

에서 대기 상태에 있는 전력 송신기는 탐색 단계로 전환 한 후, 자신의 고유 전력 정보 를 DS-OCDMA로 부호화하여 펄스 하나당 46µJ/㎡의 레이저 전력으로 각각의 무선 광 채널마다 순차적으로 송출한다.

- ③ 정보 요청 메시지를 방송한 전력 수신기는 솔라 패널로 받은 전력 정보와 수신 세기를 기록한다.
- ④ 전력 수신기는 전력 정보를 DS-OCDMA로 복호화하고, 체크섬으로 전송 오류를 검출한다.
- ⑤ 전력 수신기는 전송 오류가 없는 전력 정보 와 수신 신호 세기를 수식 (2)와 수식 (3)을 이용하여 수급 가능한 전력의 크기로 환산하 여 저장한다.
- ⑥ 전력 수신기는 일정 시간 대기하면서 수신한 모든 전력 정보에 대하여 ③, ④, ⑤의 과정 을 통하여 전력 수급이 가능한 모든 경로에 대한 정보를 수집한다.
- ⑦ 전력 정보 송출이 끝난 전력 송신기는 대기 상태로 전환한다.
- ⑧ 전력 수신기는 전력 수급이 가능한 모든 경 로 중에서 최적의 전력 전송 경로를 선택한 다. 한 개의 전력 송신기로 필요한 전력을 수급하지 못할 경우, 다른 여러 개의 전력 수신기에게 필요 전력을 배분하여 최적의 전 력 전송 경로를 선택한다.
- ⑨ 전력 수신기는 전력 수급 단계로 전환한 후, V2I로 선택된 전력 송신기에 공급 시작 메시 지와 선택한 무선 광채널 정보를 전송한다.
- ⑩ 선택된 전력 송신기는 전력 공급 단계로 전 환한 후, 선택받은 무선 광채널로 최대 전력 의 레이저 파워 빔을 송출한다.
- 전력 수신기는 솔라 패널로 수신한 레이저 파워 빔을 전력으로 변환하여 사용한다.
- 12 전력 수급이 필요없을 경우, V2I로 전력 송 신기에게 공급 중단 메시지를 방송한다.
- ③ 공급 중단 메시지를 받는 전력 송신기는 전 력 송출을 중단하고 대기 단계로 전환한다.
- ④ 전력을 공급하던 모든 전력 송신기가 공급을 중단한 것을 확인한 전력 수신기는 대기 상 태로 전환한다.

Ⅲ. 시뮬레이션

서로 다른 전력 수급이 필요한 3개의 전력 수신 기 (R1 ~ R3)와 최대 전력이 서로 다른 4개의 전력



그림 4. 시뮬레이션에 사용된 3개의 전력 수신기와 4개의 전력 송신기의 기하하적 배치도 Fig. 4 Geometric position of three LPB receivers and four LPB transmitter

표 1. 시뮬레이션에 사용된 전력 수신기의 특성 파라메터

Table 1. Parameters of LPB receiver used to simulations

	LPB receiver			
	R1	R2	R3	
Power				
consumption (kW)	200	300	150	
Position (x, y, z) (m)	7, 12, 1.5	20, 16, 2	12, 20, 15	
PV cell area (m²)	1	1	1	

송신기 (T1 ~ T4)를 그림 4와 같이 배치하여 시뮬 레이션을 수행하였다. 전력 수신기와 전력 송신기의 위치는 3차원 직교 좌표계를 사용하여, 그림의 좌측 하단을 원점으로 하여 가로축은 x, 세로축은 y, 높 이는 z축으로 각각 표기하였다. 전력 수신기가 적절 한 전력 송신기를 선택하여 최적의 전력 전송 경로 를 생성하는 알고리즘에 따라 다양한 결과를 얻을 수 있었다.

1. 시뮬레이션 환경

솔라 패널로 수신한 레이저 파워 빔을 전력으로 변환하면서 지속적으로 수신 세기가 측정가능하고,

Laser Power Maximum **Optical Channel Information** LPB Beam Power Position Trans Diverg Size (x, y, z) (m) Number Gad Range Supply mitter ence (kW) (Θ, ϕ) (Θ, ϕ) (°) (Θ, ϕ) (°) (m) (rad) 90 ~ 180, Т1 300 10, 18, 20 91, 360 1, 1 0.01 0.01 0 ~ 359 $90 \sim 180$ T2250 10, 10, 20 91, 360 0.01 0.01 1, 1 0 ~ 359 90 ~ 180, T3 200 18, 10, 20 91, 360 0.01 0.01 1, 1 $0 \sim 359$ 90 ~ 180, 18, 18, 20 91, 360 1, 1 0.01 0.01 T4 150 0 ~ 359

표 2. 시뮬레이션에 사용된 전력 송신기의 특성 파라메터 Table 2. Parameters of laser power beaming transmitter used to simulations

V2I로 통신하는 전기 자동차를 전력 수신기로 사용 한다. 전력 수신기는 솔라 패널을 이용하여 DS-OCDMA로 부호화된 신호를 수신받아서 복호화 하여 처리 가능하며, V2I로 전력 송신기에게 전력 전송에 관련된 메시지를 방송한다. 시뮬레이션에 사 용된 3개의 전력 수신기는 충전 전류는 다르지만, 동일한 면적과 특성을 가진 솔라 패널을 장착하고 있으며, 이들의 특성은 표 1과 같다.

전력 송신기는 교통 신호등에 장착되어 전기 자 동차와 V2I로 통신하는 장치로서 전력 조절이 가능 한 레이저 빔을 이용하여 신호와 전력을 원하는 무 선 광채널로 송신한다. 전력 송신기는 DS-OCDMA 로 부호화된 데이터를 펼스 하나당 46µJ/㎡의 레이 저 빔으로 송신하고, 최대 전력의 레이저 파워 빔을 선택된 무선 광채널로 전송한다. V2I로 전력 전송 에 관련된 메시지를 수신하여, 그에 따른 동작을 수 행한다. 실험에 사용된 4개의 전력 송신기는 서로 다른 최대 전력을 송신할 수 있으며, 이들의 특성은 표 2와 같다.

2. 시뮬레이션 결과

전력 전송 채널 검색 명령어를 수신한 송신기들 은 자신의 고유 부호를 펼스 하나당 46µJ/㎡의 전 력으로 송신이 가능한 모든 채널로 전송한다. 전력 수신기에 따라 가장 수신 신호 세기가 높은 전력 송신기의 무선 광채널은 표 3과 같다. 각 셀들은 전 력 송신기의 무선 광채널 정보와 수신 신호 세기를 나타낸다. 수식 (1)에서 표현했듯이 전력 송신기의 무선 광채널에 따라 전력 수신기에 입사되는 레이저 빔의 세기가 달라져서 수신 신호 세기가 달라진다.

표 3. 전력 수신기에서 측정한 수신 신호 세기가 가장 높은 전력 송신기의 무선 광채널 Table 3. Optical pathway of maximum received channel power at the receiver side

	R1	R2	R3
T1	(162, 189)	(153, 103)	(173, 63)
	/44.426µJ/m²	/42.366µJ/m²	/45.678µJ/m²
T2	(173, 333)	(149, 56)	(154, 13)
	/46.678µJ/m²	/39.836µJ/m²	/42.642µJ/m²
Т3	(154, 283)	(161, 283)	(150, 326)
	/42.642µJ/m²	/44.436µJ/m²	/39.836µJ/m²
Τ4	(150, 236)	(173, 153)	(162, 279)
	/39.836µJ/m²	/45.678µJ/m²	/44.436µJ/m²

표 4. 전력 수신기와 전력 송신기의 조합에 따라 가장 에너지 전송률이 좋은 무선 광채널과 전송률 Table 4. Best engergy transmission efficiency at each comibnation of four receivers and eight transmitters

	R1	R2	R3
	(162, 189)	(153, 103)	(173, 63)
T1	/289.8kW	/276.3kW	/297.9kW
	/0.966%	/0.921%	/0.993%
	(173, 333)	(149, 56)	(154, 13)
Τ2	/248.25kW	/216.5kW	/231.75kW
	/0.993%	/0.866%	/0.927%
	(154, 283)	(161, 283)	(150, 326)
Т3	/185.4kW	/193.2kW	/173.2kW
	/0.927%	/0.966%	/0.866%
	(150, 236)	(173, 153)	(162, 279)
Τ4	/129.9kW	/148.95kW	/144.9kW
	/0.866%	/0.993%	/0.966%

전력 수신기와 송신기의 조합에 따라 표 3의 수 신 신호 세기를 수식 (2)와 수식 (3)을 이용하여 계 산한 에너지 전송률이 가장 좋은 전력 전송 채널 및 그에 따른 에너지 전송률은 표 4와 같다. 표의 각 셀들은 전송채널 (θ, φ)/최대 공급 전력/에너지 전송률을 순서대로 나타낸다.

표 5, 표 6, 표 7은 전력 수신기 R1부터 R3이 차례대로 전력을 요구할 경우 전력 송신기를 선택 하는 다양한 알고리즘을 시뮬레이션으로 수행한 결 과이다. 표의 각 셀들은 전력 수신기의 경우 수급전 력/요구전력를 나타내고, 전력 송신기의 경우 무선 광채널/전송전력을 나타낸다. 셀의 색상이 흰 색인 것은 해당 차수에서 전력 수신기가 전력 송신기 선 택을 완료한 경우이며, 셀의 색상이 회색인 것은 이 전 차수에서 이미 완료한 것이다. 셀의 내용이 '-' 로 표시된 것은 아직 사용하지 않은 전력 송신기와 수신기임을 나타낸다.

표 5와 그림 5는 전력 송신기가 전송할 수 있는 최대 전력과 전송률의 곱을 계산하여, 가장 큰 전력 을 제공할 수 있는 전력 송신기부터 차례대로 전력 송신기로 선택되는 알고리즘의 시뮬레이션 결과이 다. 첫 번째로 선택된 전력 송신기에서 제공하는 전 력이 부족할 경우 부족한 전력량을 보충할 수 있는 가장 큰 전력을 제공하는 전력 송신기를 순차적으 로 선택한다. 1회차에서 전력 수신기 R1은 전력 송 신기 중에서 가장 큰 전력 송신이 가능한 T1을 송 신기로 선택하였고, 전력 송신기 T1이 무선 광채널 (162, 189)로 전송한 전력을 수신하여 필요한 전력 인 200kW보다 큰 289.8kW의 전력을 제공받았다. 2회차에서 전력 수신기 R2는 전력 송신기 T1을 제 외한 전력 송신기 중에서 가장 큰 전력 송신이 가 능한 T2와 T3을 송신기로 선택하였다. 전력 송신 기 T2와 T3에서 동시에 전력을 제공받아서 필요한 전력인 300kW보다 큰 409.7kW의 전력을 제공받 았다. 전력 송신기 T2는 무선 광채널 (173, 333)를 사용하였고, 전력 송신기 T3은 무선 광채널 (154. 283)을 사용하였다. 3회차에서 전력 수신기 R3는 할당되지 않은 전력 송신기 T4에서 전력을 제공받 았다. 필요한 전력인 150kW보다 낮은 144.9kW의 전력만 제공받을 수 있었다. 가장 큰 최대 전송 전 력을 가진 전력 송신기부터 선택하는 알고리즘을 사용한 경우 전력 수신기가 필요로 하는 전력량과 상관없이 가장 큰 최대 전송 전력을 가진 전력 송 신기부터 차례대로 할당되었다. 그 결과 전력 수신 기 R1은 필요한 전력의 145%를 제공받았고, 전력 수신기 R2도 필요한 전력의 145%를 제공받았지만, 표 5. 가장 큰 최대 전송 전력을 가진 전력 송신기부터 선택하는 알고리즘의 수행 결과 Table 5. Result of maximum transmission power based selection algorithm

	LPB receiver allocation sequence		
	1th step	2nd step	3rd step
R1	289.8kW /200kW	289.8kW /200kW	289.8kW /200kW
R2	_	433.65kW /300kW	433.65kW /300kW
R3	-	_	129.9kW /150kW
T1	(162, 189) /300kW	(162, 189) /300kW	(162, 189) /300kW
T2	_	(173, 333) /250kW	(173, 333) /250kW
T3	_	(154, 283) /200kW	(154, 283) /200kW
T4	_	_	(150, 236) /150kW



그림 5. 가장 큰 최대 전송 전력을 가진 전력 송신기부터 선택하는 알고리즘에 따른 전력 전송 경로

Fig. 5 Power transmission path of maximum transmission power based selection algorithm

전력 수신기 R3의 경우 필요한 전력에 비하여 낮은 87%의 전력을 제공받았다.

표 6과 그림 6은 전력 송신기가 전송할 수 있는 최대 전력과 전송률의 곱을 계산하여, 필요한 전력 을 제공할 수 있는 전력 송신기들 중에서 가장 작은 표 6. 가장 작은 전력을 수급할 수 있는 전력 송신기부터 선택하는 알고리즘의 수행 결과 Table 6. Result of minimum receivable power based selection algorithm

	LPB receiver allocation sequence		
	1th step	2nd step	3rd step
R1	315.3kW /200kW	315.3kW /200kW	315.3kW /200kW
R2	_	492.8kW /300kW	492.8kW /300kW
R3	_	_	0kW /150kW
T1	_	(153, 103) /300kW	(153, 103) /300kW
T2	_	(149, 56) /250kW	(149, 56) /250kW
Т3	(161, 283) /200kW	(161, 283) /200kW	(161, 283) /200kW
T4	(173, 153) /150kW	(173, 153) /150kW	(173, 153) /150kW



송신기부터 선택하는 알고리즘에 따른 전력 전송 경로

Fig. 6 Power transmission path of minimum receivable power based selection algorithm

전력을 제공할 수 있는 전력 송신기부터 차례대로 전력 송신기로 선택되는 알고리즘의 시뮬레이션 결 과이다. 첫 번째로 선택된 전력 송신기에서 제공하 는 전력이 부족할 경우 부족한 전력량을 보충할 수 있는 전력 송신기들 중에서 가장 적은 전력을 제공 하는 전력 송신기를 순차적으로 선택한다. 1회차에 서 전력 수신기 R1은 전력 송신기 중에서 가장 작 은 전력 송신이 가능한 T3과 T4를 송신기로 선택 하여, 필요한 전력인 200kW보다 큰 315.3kw의 전 력을 제공받았다. 전력 송신기 T3이 무선 광채널 (161, 283)을 사용하였고, T4는 무선 광채널 (173, 153)을 사용하여 전력을 전송하였다. 2회차에서 전 력 수신기 R2는 전력 송신기 T3과 T4를 제외한 전력 송신기 중에서 가장 작은 전력 송신이 가능한 가능한 T1과 T2를 송신기로 선택하였다. 전력 송 신기 T1과 T2에서 동시에 전력을 제공받아서 필요 한 전력인 300kW보다 큰 492.8kW의 전력을 제공 받았다. 전력 송신기 T1은 무선 광채널 (153, 103) 를 사용하였고, 전력 송신기 T2는 무선 광채널 (149. 56)을 사용하였다. 3회차에서 전력 수신기 R3는 할당되지 않은 전력 송신기 가 없어서 전력 전송이 불가능하였다. 가장 작은 전력을 제공할 수 있는 전력 송신기부터 차례대로 전력 송신기로 선 택하는 알고리즘을 사용한 경우 전력 수신기가 필 요로 하는 전력량과 상관없이 가장 작은 전력을 제 공할 수 있는 전력 송신기부터 차례대로 할당되어, 한 개의 전력 전송기가 아니라 두 개의 전력 전송 기로부터 동시에 전력을 제공받았다. 그 결과 전력 수신기 R1은 두 개의 전력 전송기에서 필요한 전력 의 158%를 제공받았고, 전력 수신기 R2도 두 곳에 서 필요한 전력의 164%를 제공받았지만, 전력 수 신기 R3의 경우 남아있는 전력 전송기가 없어서 전 력을 전혀 제공받지 못 했다.

표 7과 그림 7은 전력 수신기가 전송률이 가장 좋은 전력 송신기부터 차례대로 전력 송신기로 선 택되는 알고리즘의 시뮬레이션 결과이다. 첫 번째로 선택된 전력 송신기에서 제공하는 전력이 부족할 경우 다음으로 전송률이 가장 좋은 전력 송신기를 순차적으로 선택한다. 필요한 전력을 모두 전송받을 수 있을 때까지 전력 송신기 선택 작업을 계속 수 행한다. 1회차에서 전력 수신기 R1은 전력 송신기 중에서 전송률이 가장 좋은 T2를 송신기로 선택하 였고, 전력 송신기 T2가 무선 광채널 (154, 13)으 로 전송한 전력을 수신하여 필요한 전력인 200kW 보다 큰 231.75kW의 전력을 제공받았다. 2회차에 서 전력 수신기 R2는 전력 송신기 T2를 제외한 전 력 송신기 중에서 가장 전송률이 좋은 T3과 T4를 송신기로 선택하였다. 전력 송신기 T3과 T4에서 동시에 전력을 제공받아서 필요한 전력인 300kW보 다 큰 318.1kW의 전력을 제공받았다. 전력 송신기 T3은 무선 광채널 (150, 326)을 사용하였고, 전력

표 7. 가장 전송률이 좋은 전력 송신기부터 선택하는 알고리즘의 수행 결과

Table 7. Result of power transmission factor based selection algorithm

	LPB receiver allocation sequence		
	1th step	2nd step	3rd step
R1	231.75kW /200kW	231.75kW /200kW	231.75kW /200kW
R2	_	318.1kW /300kW	318.1kW /300kW
R3	_	-	297.9kW /150kW
T1	_	_	(173, 63) /300kW
T2	(154, 13) /250kW	(154, 13) /250kW	(154, 13) /250kW
Т3	_	(150, 326) /200kW	(150, 326) /200kW
T4	-	(162, 279) /150kW	(162, 279) /150kW





송신기 T4는 무선 광채널 (162, 279)를 사용하였 다. 3회차에서 전력 수신기 R3는 할당되지 않은 전 력 송신기 T1에서 전력을 제공받았다. 필요한 전력 인 150kW보다 높근 297.9kW의 전력을 제공받을 수 있었다. 전송률이 가장 좋은 전력 송신기부터 선 택하는 알고리즘을 사용한 경우 전력 수신기가 필 요로 하는 전력량과 상관없이 가장 큰 전송률을 가 진 전력 송신기부터 차례대로 할당되었다. 그 결과 전력 수신기 R1은 필요한 전력의 116%를 제공받았 고, 전력 수신기 R2도 필요한 전력의 106%를 제공 받았고, 전력 수신기 R3도 필요한 전력의 197%의 전력을 제공받았다.

전력 송신기와 전력 수신기 사이의 거리와 기하 학적인 위치에 따라서 전력 송신기가 전송한 전력 이 전력 수신기에 제공되는 전송률이 달라진다. 세 가지 알고리즘과 시뮬레이션에서 사용한 전력 송신 기와 전력 수신기의 특성과 배치에 따라서 전력 송 신기와 전력 수신기의 연결이 다르게 되었다. 세 가 지 알고리즘 중에서 전송률이 가장 좋은 전력 송신 기를 먼저 선택하는 알고리즘만 모든 전력 수신기 가 필요로 하는 전력을 제공할 수 있었다. 전력 송 신기와 전력 수신기의 배치와 특성에 따라서 가장 큰 전력 송신이 가능한 전력 송신기부터 선택하는 알고리즘이나 가장 작은 전력 송신이 가능한 전력 송신기부터 선택하는 알고리즘은 모든 전력 수신기 가 필요로 하는 전력을 제공할 수 있다. 또한 전기 자동차에 내장된 배터리의 남은 전력량에 따라 제 공되는 전력에 따른 충전 시간이 달라지므로 신호 등에서 대기하는 시간에 따라서 전력 송신기는 전 력 수신기가 필요로 하는 전력을 모두 제공받은 후 에는 다른 전력 수신기에게 추가로 전력을 제공할 수 있다.

Ⅳ. 결 론

전기 자동차의 배터리 소형화와 항속 거리 증가 를 위하여 무선 충전을 위한 무선 전력 전송에 관 한 연구가 주목을 받고 있다. 가장 많이 연구가 진 행되고 있는 코일을 이용한 자기 유도 방식과 자기 공명 방식은 전력을 전송할 수 있는 거리가 최대 수매에 불과하여 전기 자동차에 사용하기 위해서는 기존의 도로 인프라에 변경이 필요하다. 수 km 이 상의 거리에 있는 무인 항공기나 인공 위성의 충전 에 사용되던 마이크로파와 레이저를 이용한 방식은 도로 인프라에 변경이 필요없으므로 전기 자동차에 응용이 상대적으로 용이하다. 마이크로파를 이용한 방식은 전파 간섭이 발생할 수 있어서 제약 사항이 많지만, 레이저 빔을 이용한 방식은 간섭 현상이 없 고 동시에 여러 곳에서 전력을 수신할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서는 여러 개의 전력 송신기와 전기

자동차와 같은 전력 수신기가 존재할 경우 전력 수 신기가 자신에게 필요한 전력을 전송받기 위하여 여러 개의 전력 송신기 중에서 가장 적합한 전력 송신기를 선택하는 방법에 관하여 논하였다. 시뮬레 이션을 통하여 전력 전송량이 서로 다른 4개의 전 력 송신기가 있는 환경에서 전력 소모량이 서로 다 른 3개의 전력 수신기가 순차적으로 전력을 요구할 경우 최적의 전력 송신기들을 할당하는 것을 확인 하였다. 전력 수신기가 필요로 하는 전력을 제공할 수 있는 전력 송신기가 여러 개 있거나, 복수의 전 력 송신기로 필요한 전력을 제공할 수 있는 경우 최적의 전력 송신기를 선택하는 알고리즘이 매우 중요하므로, 다양한 상황에서 전력 송신기를 선택하 는 알고리즘에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

References

- R. Shadid, S. Noghanian, A. Nejadpak, "A literature survey of wireless power transfer," Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Electro Information Technology, pp. 1787–1782, 2016.
- [2] G.D. Capua, J.A.A. Sánchez, A.T, Cabrera, D.F. Cabrera, N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, "A losses-based analysis for electric vehicle wireless chargers," Proceedings of the 2015 International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design, pp. 1-4, 2015.
- [3] Z. Bi, T. Kan, C.C. Mi, Y. Zhang, Z. Zhao, G.A. Keoleian, "A review of wireless power transfer for electric vehicles: prospects to enhance sustainable mobility," Applied Energy, No. 179, pp. 413–425, 2016.
- [4] T.S.C. Rao, K. Geetha, "Categories, standards and recent trends in wireless power transfer: a survey," Indian Journal of Science and Technology, Vol. 9, No. 20, pp. 1–11, 2016.
- [5] G. Buja, M. Bertoluzzo, K.N. Mude, "Design and experimentation of WPT charger for electric city car," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 12, pp. 7436–7447, 2015.
- [6] D.H. Tran, V.B. Vu, V.L. Pham, W. Choi,

"Design and implementation of high efficiency wireless power transfer system for on-board charger of electric vehicle," Proceedings of the 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference, pp. 2466–2469, 2016.

- [7] M.K. Naik, M. Bertoluzzo, G. Buja, "Design of a contactless battery charging system," Proceedings of the AFRICON, pp. 1–6, 2016.
- [8] F. Baronti, M.Y. Chow, C. Ma, H. Rahimi-Eichi, R. Saletti, "E-transportation: the role of embedded systems in electric energy transfer from grid to vehicle," EURASIP Journal on Embedded Systems, Vol. 2016, No. 1, pp. 1–12, 2016.
- [9] R.J. Parise, "Model to predict performance of all electric transportation with wireless power beams," Proceedings of the 2002 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, pp. 731–736, 2002.
- [10] M. Bertoluzzo, M.K. Naik, G. Buja, "Preliminary investigation on contactless energy transfer for electric vehicle battery recharging," Proceedings of the 2012 IEEE 7th International Conference on Industrial and Information Systems, pp. 1–6, 2012.
- [11] X. Mou, H. Sun, "Wireless power transfer: survey and roadmap," Proceedings of the 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference, pp. 1–5, 2015.
- [12] S. Li, C.C. Mi, "Wireless power transfer for electric vehicle applications," IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, Vol. 3, No. 1, pp. 4–17, 2015.
- [13] S.R.A. Bolonne, A.K.K. Chanaka, G.C. Jayawardhana, I.H.T.D. Lionel, D.P. Chandima, "Wireless power transmission for multiple devices," Proceedings of the 2016 Moratuwa Engineering Research Conference, pp. 242–247, 2016.
- [14] S.Y.R. Hui, W. Zhong, C.K. Lee, "A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, No. 9, pp. 4500–4511, 2014.
- [15] R. Johari, J.V. Krogmeier, D.J. Love,

"Analysis and practical considerations in implementing multiple transmitters for wireless power transfer via coupled magnetic resonance," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 4, pp. 1774 - 1783, 2014.

- [16] K. Lee, D.H. Cho, "Diversity analysis of multiple transmitters in wireless power transfer system," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 49, No. 6, pp. 2946 - 2952, 2013.
- [17] D. Ahn, S. Hong, "Effect of coupling between multiple transmitters or multiple receivers on wireless power transfer," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 7, pp. 2602 - 2613, 2013.
- [18] C.R. Valenta, G.D. Durgin, "Harvesting wireless power: survey of energy-harvester conversion efficiency in far-field, wireless power transfer systems," Microwave Magazine, Vol. 15, No. 4, pp. 108 - 120, 2014.
- [19] R. Pudur, V. Hanumante, S. Shukla, K. Kumar, "Wireless power transmission: a survey," Proceedings of the 2014 IEEE Recent Advances and Innovations in Engineering, pp. 1 - 6, 2014.
- [20] M. Shidujaman, H. Samani, М. Arif. "Wireless power transmission trends," Proceedings of the 2014 International Conference on Informatics, Electronics & Vision, pp. 1 - 6, 2014
- [21] L. Summerer, O. Purcell, "Concepts for wireless energy transmission via laser," Europeans Space Agency (ESA)-Advanced Concepts Team, 2009.
- [22] T.J. Nugent Jr, J.T. Kare, "Laser power

beaming for defense and security applications," Proceedings of the SPIE 8045, pp. 804514, 2011.

- [23] A. Massa, G. Oliveri, F. Viani, P. Rocca, "Array designs for long-distance wireless power transmission: state-of-the-art and innovative solutions," Proceedings of the IEEE, Vol. 101, No. 6, pp. 1464–1481, 2013.
- [24] P. Sprangle, B. Hafizi, A. Ting, R. Fischer, "High-power lasers for directed-energy applications," Applied optics, Vol. 54, No. 31, pp. F201-F209, 2015.
- [25] I. Haydaroglu, S. Mutlu, "Optical power delivery and data transmission in a wireless and batteryless microsystem using a single light emitting diode," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 24, No. 1, pp. 155 - 165, 2015.
- [26] C. Goursaud-Brugeaud, A. Julien-Vergonjanne, J.P. Cances, "Prime code efficiency in DS OCDMA systems using parallel interference cancellation," journal of communications, Vol. 2, No. 3, pp. 51 57, 2007.
- [27] G.C. Yang. W.C. Kwong, Prime codes with applications to CDMA optical and wireless networks, Artech House, 2002.
- [28] W.C. Kwong, G.C. Yang, Optical Coding Theory with Prime, CRC Press, 2013.
- [29] H. Ghafouri-Shiraz, M.M. Karbassian, Optical CDMA networks: principles, analysis and applications, John Wiley & Sons, 2012.
- [30] R. Sabatini, M.A. Richardson, Airborne laser systems testing and analysis, NATO Science and Technology Organization, 2010.

Jeongsook Eom (엄정숙)



She received the B.S. and M.S. degrees Computer Science and Engineering from Yeungnam University, Korea, in 1998 and 2002, respectively.

Between 2002 and 2013, she worked for several small and medium-sized companies as a Hardware Engineer. She is currently Ph.D student in Mobile Communication Laboratory at the department of Multimedia and Communication Engineering, Yeungnam University. Korea. Her research interests lie in the fields of Wireless power transfer and Laser power beaming.

Email: jseom@ynu.ac.kr

Jeonghee Choi (최 정 희)



She received the B.S. degrees in Electrical Engineering from Kyungpook National University, Korea, in 1982. She received the M.S. and Ph.D. degrees

in Electrical and Electronics Engineering form State University of New York, USA, in 1989 and 1992, respectively. She is currently a professor in Daegu University. Her research interests Mobile communication and Radar signal processing.

Email: choijh@daegu.ac.kr

Gunzung Kim (김 건 정)



He received the B.S. and M.S. degrees Computer Science and Engineering from Yeungnam University, Korea, in 1995 and 1997, respectively.

Between 1997 and 2013, he worked for several small and medium-sized companies as a Firmware Engineer. He is currently Ph.D student in Mobile Communication Laboratory at the department of Multimedia and Communication Engineering, Yeungnam University, Korea. His research interests focus on LIDAR and Wireless optical communication.

Email: gzkim@ynu.ac.kr

Yongwan Park (박 용 완)



He received the B.S. and M.S. degrees in Electrical Engineering from Kyungpook National University, Korea, in 1982 and 1984, respectively, and his

M.S. and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from State University of New York at Buffalo, U.S.A, in 1989 and respectively. He 1992. ioined the California Institute of Technology as a research fellow from 1992 to 1993. From 1994 to 1996, he has served as a for chief researcher developing IMT-2000 system at SK Telecom. Korea. Since September 1996, he has been a Professor of Information and Communication Engineering at Yeungnam University, Korea. From Jan. to Feb. of 2000, he was an invited Professor at NTT Mobile Communications Network Inc. (NTT DoCoMo) Wireless Lab. Japan. He was also a visiting Professor at UC Irvine, U.S.A. in 2003. From 2005 to 2009, he is serves as a director of Technology Innovation Center for wireless multimedia bv Korean government. From 2008 to 2009. He also serves as the president of IEEE VTS Seoul Chapter. Currently, he is president of IT Convergence Industry Technology Gyeongbuk, Ins. And he is Hyundai-KIA MOTORS Automotive IT Innovation Center Advisor. He also serves as Eco committee Chair of 5G Forum in Korea, etc. His research intersts include Mobile communication, Wireless multimedia design technology, Telematics, Autonomous vehicle and Location-based system. Email: ywpark@yu.ac.kr