

## 무선전력 통신 네트워크에서 최적의 멀티홉 전송 방식

최현호\*

### An Optimal Multi-hop Transmission Scheme for Wireless Powered Communication Networks

Hyun-Ho Choi\*

\*Professor, School of ICT, Robotics & Mechanical Engineering, Hankyong National University, Anseong, 17579 Korea

#### 요약

본 논문에서는 무선전력 통신 네트워크에서 소스에서 목적지 노드까지 종단간 데이터 전송률을 최대화하기 위한 최적의 멀티홉 전송 방식을 제안한다. 에너지 하베스팅을 하면서 멀티홉 전송을 위한 프레임 구조를 제시하고, 노드 간 서로 다른 에너지 수확량과 링크 품질을 고려하여 종단간 전송률을 최대화하는 각 노드의 전송 시간을 수학적 분석을 통하여 도출한다. 아울러, 고려하는 무선전력기반 멀티홉 전송의 시스템 모델링을 통하여 최적화 문제를 도출하고, 이 최적화 문제가 convex 함을 보임으로써 전역 최적해가 존재함을 증명한다. 이를 통하여 최적화 문제를 계산 가능한 형태로 변형하여 손쉽게 최적해를 찾는다. 제안한 최적 멀티홉 전송 방식은 모든 링크의 전송률이 같아도록 노드별 전송 시간을 최적으로 할당함으로써 종단간 전송률을 최대화한다.

#### ABSTRACT

In this paper, we propose an optimal multi-hop transmission scheme to maximize the end-to-end data rate from the source to the destination node in a wireless powered communication network. The frame structure for multi-hop transmission is presented to transmit multi-hop data while harvesting energy. Then, the transmission time of each node that maximizes the end-to-end transmission rate is determined through mathematical analysis in consideration of different harvested energy and link quality among nodes. We derive an optimization problem through system modeling of the considered wireless powered multi-hop transmission, and prove that there is a global optimal solution by verifying the convexity of this optimization problem. This analysis facilitates to find the optimal solution of the considered optimization problem. The proposed optimal multi-hop transmission scheme maximizes the end-to-end rate by allocating the transmission time for each node that equalizes the transmission rates of all links.

**키워드**: 무선전력 통신 네트워크, 무선전력 멀티홉 전송, 무선 에너지 하베스팅, 종단간 전송률 최대화, 최적화

**Key word**: Wireless-power communication networks, Wireless powered multi-hop transmission, Wireless energy harvesting, End-to-end rate maximization, Optimization

Received 11 October 2022, Revised 18 October 2022, Accepted 24 October 2022

\* Corresponding Author Hyun-Ho Choi(E-mail:hhchoi@hknu.ac.kr, Tel:+82-31-670-5297)

Professor, School of ICT, Robotics & Mechanical Engineering, Hankyong National University, Anseong, 17579 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2022.26.11.1679>

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

무선 센서 네트워크 환경에서 센서 노드들은 주로 배터리로 구동되므로 배터리 소비를 줄이면서 생존시간을 극대화하는 통신 기술을 필요로 한다. 이와 발맞추어 최근 발전되고 있는 무선전력 전송(wireless power transfer) 기술은 radio frequency (RF)를 이용하여 무선으로 에너지를 전송하고 충전할 수 있어 무선 노드들은 전원 연결이나 배터리 교체 없이 에너지를 얻을 수 있다 [1].

초기에는 주로 1-홉 또는 2-홉 전송 토폴로지에서의 무선전력 기반 통신 프로토콜의 연구가 수행되었다. 1-홉 네트워크에서는 에너지 효율 및 전송 속도를 높이기 위한 목적으로 점대점 토폴로지를 갖는 단일 안테나 시스템을 고려하였다 [2]. 이후 같은 연구가 다중 안테나 시스템으로 확장되어 진행되었다 [3]. 수신자 수에 따라 단일 사용자와 다중 사용자로 나뉘어 연구가 수행되었고, 다수의 수신기가 하나의 하이브리드 접속점(hybrid access point)으로부터 정보 및 에너지를 수신하는 방송 및 멀티캐스트 구조로 확장되었다 [4]. 또한, 제안된 무선전력 전송 프로토콜은 소스 노드에서 발생한 데이터가 중계 노드를 거쳐 목적지로 전달되는 2-홉 협력 네트워크에 적용되었다 [5]. 중계 노드는 소스로부터 정보를 수신하면서 동시에 에너지를 하베스팅 한 후 하베스팅한 에너지를 이용하여 정보 또는 에너지를 목적지로 전달한다. 중계기가 하나만 존재하는 환경[6]과 여러 개의 중계기를 공유하는 환경[7]에서 중계기에서의 정보와 에너지 사이의 균형을 조절하여 전송률을 최대화하는 자원 할당 문제를 다루었다.

무선전력 전송 기술은 최근 멀티홉 무선 네트워크에 적용되기 시작하였다. 에너지 제약이 존재하는 멀티홉 네트워크 환경에서 무선전력 전송을 통한 전송 홉 수 최대화 기법이 연구되었다 [8]. 또한, 노드간 에너지 및 데이터 동시 전송이 가능할 때 네트워크의 에너지 소비를 줄이고 생존시간을 증대하기 위한 에너지 인지 기반 라우팅 프로토콜을 제안되었다 [9]. 아울러 무선 멀티 홉 통신에서 멀티홉 노드간 협력적인 무선 에너지 공유를 통해 생존시간을 최대화하는 연구가 수행되었다 [10].

미래 IoT 환경에서는 단말들이 멀티홉으로 연결되어 상호 작용을 하면서 네트워크의 응용 서비스를 제공하기 때문에 멀티홉 환경에서의 에너지 효율적인 하베스팅 및 전송 기법이 필요하다. 특히 멀티홉 토폴로지에서

는 한 단말의 에너지 부족으로 인하여 종단간 전송률이 제한되거나, 한 노드의 에너지 소진 시에는 네트워크 전체가 단절될 수 있어 멀티홉 네트워크의 성능은 각 노드의 에너지 상태나 소모량에 더욱 민감하다 [10].

본 연구에서는 무선전력을 공급하는 파워 비콘(power beacon, PB)이 존재하는 무선 센서 네트워크를 고려한다. 고려하는 무선 센서 네트워크는 센서 노드의 에너지 소비를 줄이기 위하여 목적지까지 직접 전송 대신 멀티홉 전송을 사용한다. 파워 비콘은 네트워크 내에 무선으로 에너지를 방송하고 이를 수신하는 센서 노드들은 에너지를 하베스팅하여 센싱, 프로세싱 및 데이터 전송에 사용한다. 이때 무선전력을 공급하는 파워 비콘과의 거리에 따라 센서 노드들은 서로 다른 에너지량을 하베스팅하게 되며, 멀티홉으로 연결된 노드간의 거리에 따라 노드들은 서로 다른 에너지량을 소모하게 된다. 이와 같은 멀티홉 전송 환경에서 소스에서 목적지까지의 종단간 전송률은 연결된 링크들 중 가장 낮은 전송률을 갖는 링크에 의해 제한되기 때문에 이를 고려한 무선 자원 할당이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 무선전력 통신 네트워크에서 소스에서 목적지 노드까지 종단간 데이터 전송률을 최대화하기 위한 최적의 멀티홉 전송 방식을 제안한다. 에너지 하베스팅을 하면서 멀티홉 전송을 위한 프레임 구조를 제시하고, 노드간 서로 다른 에너지 수확량과 링크 품질을 고려하여 종단간 전송률을 최대화하는 각 노드의 전송 시간을 수학적 분석을 통하여 결정한다. 아울러, 고려하는 무선전력기반 멀티홉 전송의 시스템 모델링을 통하여 최적화 문제를 도출하고, 이 최적화 문제가 convex 함을 보임으로써 전역 최적해가 존재함을 증명한다. 이를 통하여 최적화 문제를 계산 가능한 형태로 변형하여 손쉽게 최적해를 찾는다. 도출한 최적 멀티홉 방식은 모든 링크의 전송률이 같아지도록 노드별 전송 시간을 최적으로 할당함으로써 종단간 전송률을 최대화한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 고려하는 무선전력 통신 네트워크에서 멀티홉 전송을 위한 시스템 모델을 제시한다. III장에서는 고려하는 최적화 문제를 제안하고 수학적 분석을 통하여 최적해를 구하는 방법을 제안한다. IV장에서는 다양한 멀티홉 전송 환경에 따라 제안 방식의 성능을 보여준다. 마지막으로 V장에서 본 논문에 대한 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

그림 1은 고려하는 무선전력 통신 네트워크에서 소스에서 목적지까지 노드간 멀티홉 전송을 수행할 때의 시스템 모델을 보여준다. 고려하는 네트워크는 하나의 파워 비콘과  $N$ -홉으로 연결된  $N+1$ 개의 노드로 구성된다. 모든 멀티홉 노드들은 내재한 에너지원 없이 파워 비콘으로부터 송신되는 무선 에너지를 하베스팅하여 송수신에 사용한다. 즉, 각 노드는 송수신하지 않을 때는 파워 비콘이 방출하는 에너지 신호를 하베스팅하여 에너지를 축적하고, 다음 노드에게 데이터를 송신하거나 이전 노드로부터 데이터를 수신할 때 이 에너지를 이용한다. 여기에서  $g_i$ 는 파워 비콘에서 노드  $i$ 로의 채널 파워 이득을 나타내며,  $h_i$ 는 노드  $i$ 에서 다음 노드  $i+1$ 로의 채널 파워 이득을 나타낸다. 이들 채널 이득은 한 프레임 내에서는 변하지 않는다고 가정한다 [10].

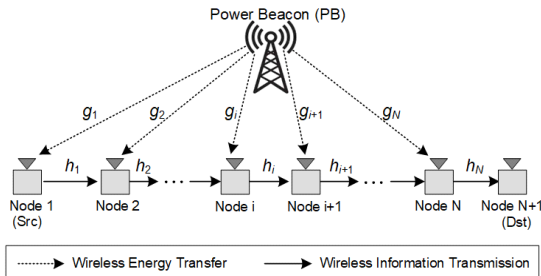


Fig. 1 System model of multi-hop communication in wireless powered communication networks

그림 2는 무선전력 통신 네트워크에서 에너지 하베스팅 기반 멀티홉 전송 프레임 구조를 보여준다. 길이  $T$ 를 갖는 프레임은  $N$ -홉 전송을 위하여  $N$ 개의 슬롯으로 나누어져 있는 TDMA 방식으로 노드  $i$ 는  $i$ 번째 슬롯을 사용하여 데이터를 전송한다. 분석의 용이성을 위하여 프레임 길이를  $T=1$ 로 정규화하고, 노드  $i$ 에게 할당되는 슬롯 길이를  $t_i$ 로 나타낸다. 따라서 전체 프레임 길이가 1보다 작도록  $t_i$ 는 다음과 같은 제약 조건을 갖는다.

$$\sum_{i=1}^N t_i \leq 1, t_i \geq 0 \quad (1)$$

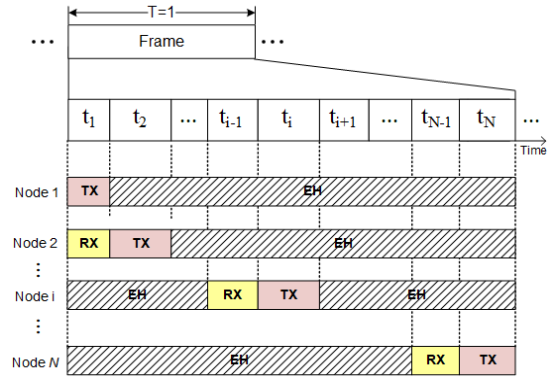


Fig. 2 Frame structure for energy harvesting (EH)-based multi-hop transmission

고려하는 멀티홉 전송에서는 소스 노드 1에서 목적지 노드  $N+1$ 까지 각 노드는 순서대로 복호-후-전달 (decode-and-forward) 방식을 사용한다. 즉, 노드  $i$ 는  $t_{i-1}$  시간 동안 노드  $i-1$ 로부터 데이터를 수신하고,  $t_i$  시간 동안 노드  $i+1$ 에게 데이터를 송신한다. 이 송수신 시간을 제외한 나머지 시간 동안 노드  $i$ 는 파워 비콘으로부터 에너지를 하베스팅 한다.

노드  $i$ 가 파워 비콘으로부터 수신하는 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y_i^p = \sqrt{g_i} x_p + z_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (2)$$

여기에서  $z_i$ 는 노드  $i$ 에서 잡음을 나타내며,  $CN(0, \sigma^2)$ 의 분포를 따른다. 또한, 파워 비콘의 송신 파워  $P_s$  대비 잡음의 파워가 매우 작기 때문에 잡음 신호로부터의 에너지 하베스팅은 무시된다. 따라서 한 프레임 동안 노드  $i$ 가 하베스팅하는 에너지는 다음과 같다.

$$E_i = \zeta_i P g_i (1 - t_i - t_{i-1}), \quad i = 1, \dots, N, t_0 = 0 \quad (3)$$

여기에서  $P$ 는 파워 비콘의 송신 파워이며  $\zeta_i$ 는 하베스팅 효율을 나타낸다.

노드  $i$ 는 이 에너지를 다음번 데이터 송수신에 사용하는데, 데이터를 전송하는  $t_i$  시간 동안 사용되는 송신 파워는 다음과 같다.

$$P_i = \frac{\eta_i E_i}{t_i}, \quad i = 1, \dots, N \quad (4)$$

여기에서  $0 < \eta_i < 1$ 는 하베스팅 한 전체 에너지 중 송

신에 사용되는 에너지의 비율이다. 또한, 노드  $i+1$ 이 노드  $i$ 로부터 수신하는 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y_{i+1}^S = \sqrt{h_i} x_i + \underbrace{\sqrt{g_{i+1}} x_P}_{\text{self-cancellation}} + z_{i+1} \quad (5)$$

$$= \sqrt{h_i} x_i + z_{i+1}, \quad i = 1, \dots, N$$

여기에서 파워 비콘으로부터 받는 신호  $\sqrt{g_{i+1}} x_P$ 는 데이터 정보를 포함하지 않는 전력 전송에만 이용되는 신호로써, 파워 비콘이 사전에 서로 정의된 신호를 송출함으로써 수신 노드에서는 이 신호를 self-interference cancellation 기법을 이용하여 제거할 수 있다 [11]. 이처럼 파워 비콘 신호를 제거할 수 있다는 가정하에 노드  $i$ 에서 노드  $i+1$ 로의 전송률은 다음과 같이 계산된다.

$$R_i(\mathbf{t}) = t_i \log_2 \left( 1 + \frac{h_i P_i}{\Gamma \sigma^2} \right) \quad (6)$$

$$= t_i \log_2 \left( 1 + \frac{h_i \zeta_i P g_i (1-t_i-t_{i-1})}{\Gamma \sigma^2 t_i} \right)$$

$$= t_i \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_i (1-t_i-t_{i-1})}{t_i} \right)$$

여기에서 벡터  $\mathbf{t} = [t_1 \ t_2 \ \dots \ t_N]$ 이며,  $\Gamma$ 는 signal-to-noise (SNR) gap,  $\sigma^2$ 은 잡신호 파워를 나타낸다. 또한, 파라미터  $\gamma_i$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma_i = \frac{\zeta_i g_i h_i P}{\Gamma \sigma^2} \quad (7)$$

### III. 최적 멀티홉 전송 방식

멀티홉 전송에서 종단간 전송률은 전송률이 가장 낮은 링크에 의해 제한되므로 다음과 같이 결정된다.

$$R_{e2e} = \min R_i(\mathbf{t}), \quad i = 1, \dots, N \quad (8)$$

따라서 종단간 전송률을 최대화하는 최적화 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$\max_{\mathbf{t}} R_{e2e} = \max_{\mathbf{t}} \min R_i(\mathbf{t}), \quad (9)$$

$$s.t. \sum_{i=1}^N t_i \leq 1, \quad t_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, N$$

식 (6)의 최적화 문제를 풀기 위하여 다음과 같은 epigraph 형식으로 변경한다 [12].

$$\max_{\mathbf{t}, \theta} \theta \quad (10)$$

$$s.t. \quad R_i(\mathbf{t}) \geq \theta, \quad i = 1, \dots, N, \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^N t_i \leq 1, \quad (12)$$

$$t_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, N. \quad (13)$$

이 문제에서 목적함수 식 (10)과 제약 조건식 (12)와 (13)은 벡터  $\mathbf{t}$ 와  $\theta$ 에 대하여 선형이기 때문에 convexity 증명을 위하여 조건식 (12)를 만족시키는 점들의 집합이 convex 인지를 확인하면 된다. 이를 위하여  $\mathbf{t}$ 에 대한  $R_i(\mathbf{t})$ 의 Hessian 행렬을 구하면 다음과 같다.

$$\nabla^2 R_i(\mathbf{t}) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{(i-2) \times (i-2)} & \mathbf{0}_{(i-2) \times 2} & \mathbf{0}_{(N-i) \times (N-i)} \\ \mathbf{0}_{2 \times (i-2)} & \nabla^2 \hat{R}_i(\mathbf{t}) & \mathbf{0}_{2 \times (N-i)} \\ \mathbf{0}_{(N-i) \times (i-2)} & \mathbf{0}_{(N-i) \times 2} & \mathbf{0}_{(N-i) \times (N-i)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기에서  $\nabla^2 \hat{R}_i(\mathbf{t})$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\nabla^2 \hat{R}_i(\mathbf{t}) = \begin{bmatrix} \frac{-t_i \gamma_i^2}{(t_i + \gamma_i (1-t_i-t_{i-1}))^2} & \frac{-\gamma_i^2 (1-t_i)}{(t_i + \gamma_i (1-t_i-t_{i-1}))^2} \\ \frac{-\gamma_i^2 (1-t_i)}{(t_i + \gamma_i (1-t_i-t_{i-1}))^2} & \frac{-\gamma_i^2 (1-t_{i-1})}{(t_i + \gamma_i (1-t_i-t_{i-1}))^2} \end{bmatrix}$$

$$= \frac{-\gamma_i^2}{(t_i + \gamma_i (1-t_i-t_{i-1}))^2} \begin{bmatrix} t_i & 1-t_{i-1} \\ 1-t_{i-1} & \frac{1}{t_i} (1-t_{i-1})^2 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{-\gamma_i^2}{(t_i + \gamma_i (1-t_i-t_{i-1}))^2} \begin{bmatrix} \sqrt{t_i} & \\ & \frac{1-t_{i-1}}{\sqrt{t_i}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{t_i} \\ \frac{1-t_{i-1}}{\sqrt{t_i}} \end{bmatrix}^T$$

$$\leq 0 \quad (15)$$

여기에서 마지막 부등호는 구성 요소별(component-wise) 부등호를 나타내며  $\nabla^2 \hat{R}_i(\mathbf{t})$ 가 이차형식(quadratic form)으로 표현되므로 0보다 작음을 알 수 있다. 따라서 Hessian 행렬  $\nabla^2 R_i(\mathbf{t})$ 는 negative semi-definite이 되어 최적화 식 (10)의 feasible set은 convex임이 증명된다.

또한,  $R_i(\mathbf{t}) \geq \theta$ ,  $\sum_{i=1}^N t_i \leq 1$ ,  $\mathbf{t} > 0$ 을 만족하는  $\mathbf{t}$ 와  $\theta$ 가 존재하므로 식 (10)은 Slater 조건을 만족시킨다 [12]. 따라서 식 (6)과 (10) 사이에 strong duality가 보장되어, 문제의 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 조건이 global optimality를 달성하는 필요충분조건이 된다. 먼저, 식 (10)의 Lagrangian은 다음과 같이 기술된다.

$$\mathcal{L}(\mathbf{t}, \theta) = \theta + \sum_{i=1}^N \lambda_i (R_i(\mathbf{t}) - \theta) + \mu \left( \sum_{j=1}^N t_j + \alpha - 1 \right) - \kappa \alpha \quad (16)$$

여기에서  $\alpha$ 는 부등식 (12)를 등식으로 변환하기 위해 더해지는 non-negative slack 변수이며,  $\lambda_i, \kappa \geq 0, \forall i$ ,  $\mu$ 는 등식과 부등식 조건들과 연관된 dual 변수들이다. 따라서 KKT 조건들은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} = 1 - \sum_{i=1}^N \lambda_i = 0, \quad (17)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial t_i} = \frac{1}{\ln 2} \left[ \lambda_i \ln \left( 1 - \gamma_i + \gamma_i \frac{1 - t_{i-1}}{t_i} \right) - \frac{\lambda_i \gamma_i (1 - t_{i-1})}{t_i + \gamma_i (1 - t_i - t_{i-1})} - \frac{\lambda_{i+1} \gamma_{i+1} (1 - t_i)}{t_{i+1} + \gamma_{i+1} (1 - t_{i+1} - t_i)} \right] = 0, \quad \forall i, \quad (18)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \alpha} = \mu - \kappa = 0, \quad (19)$$

$$\sum_{j=1}^N t_j + \alpha = 1, \quad (20)$$

$$\lambda_i (R_i(\mathbf{t}) - \theta) = 0, \quad \forall i, \quad \kappa \alpha = 0, \quad (21)$$

$$R_i(\mathbf{t}) - \theta \geq 0, \quad \forall i, \quad \alpha, \kappa \geq 0, \quad \lambda_i \geq 0, \quad \forall i. \quad (22)$$

식 (6)의  $R_i(\mathbf{t})$ 는 전체 영역에서  $t_i$ 에 대해 단조 증가 함수가 아니다. 하지만 KKT 조건식 (18)로부터  $t_i$ 에 관한  $R_i(\mathbf{t})$ 의 편미분 값은 최적 위치에서 음수가 아님을 알 수 있다. 따라서 최적의 시간 할당  $\mathbf{t}^*$ 는 모든 노드에 게 동일한 최적 전송률을 제공할 때를 의미한다. 즉,  $\sum_{j=1}^N t_j + \alpha = 1$ 의 조건에서  $R_i(\mathbf{t}) = \theta, \forall i$ 가 성립한다. 따라서, KKT 조건을 다음과 같이 간단히 정리할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1, \quad \sum_{j=1}^N t_j + \alpha = 1, \quad \kappa \alpha = 0, \quad (23)$$

$$\lambda_i \ln \left( 1 - \gamma_i + \gamma_i \frac{1 - t_{i-1}}{t_i} \right) - \frac{\lambda_i \gamma_i (1 - t_{i-1})}{t_i + \gamma_i (1 - t_i - t_{i-1})} - \frac{\lambda_{i+1} \gamma_{i+1} (1 - t_i)}{t_{i+1} + \gamma_{i+1} (1 - t_{i+1} - t_i)} = 0, \quad \forall i, \quad (24)$$

$$t_i \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_i (1 - t_i - t_{i-1})}{t_i} \right) = \theta, \quad \forall i. \quad (25)$$

따라서 식 (10)의 전역 최적해  $\mathbf{t}^*$ 와  $\theta^*$ 는  $\alpha, \kappa \geq 0, \lambda_i \geq 0, \forall i$ 의 조건으로 비선형 식 (23)-(25)를 Newton method 등을 이용하여 구할 수 있다 [12].

#### IV. 실험 결과 및 고찰

성능 평가를 위하여 그림 3과 같은 선형 멀티홉 토폴로지를 고려하였다. 소스 노드의 위치를 원점으로 잡고  $N$ 개의 노드가 1~5 m 범위에서 랜덤한 간격으로 분포한다. 파워 비콘의 위치는  $(x, y)$  좌표에 위치하며, 디폴트 값으로  $x=0, y=5$  m를 고려한다. 관련 시스템 파라미터로  $P=46$  dBm,  $\zeta_i=0.8, \eta_i=0.9, I=9.8$  dB,  $\sigma^2=-160$  dBm/Hz, noise figure는 9 dB, 채널 대역폭은 1 MHz를 사용하였다 [8]-[10]. 채널 파워 이득은  $g_i = h_i = G d_i^{-n}$ 으로 결정되며, 여기에서  $G$ 은 1 m에서의 파워 감쇄 기준으로 -30 dB로 주어지며,  $d_i$ 는 노드간 거리,  $n$ 은 pathloss exponent 값으로 3으로 설정하였다 [13].

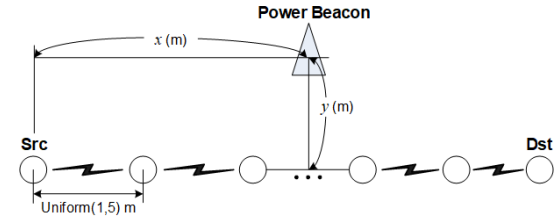


Fig. 3 Experiment setup

또한, 제안 방안의 성능을 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통하여 검증하였고, 성능 비교를 위하여 모든 노드의 시간 슬롯을 동일하게 할당하는 equal allocation 방식과 채널 파라미터  $\gamma_i$ 에 비례하여 할당하는 proportional allocation 방식을 고려하였다.

그림 4는 홉 수( $N$ )에 따른 종단간 전송률을 보여준다. 종단간 전송률이 각 링크 전송률의 최소값으로 결정되기 때문에 홉 수가 증가할수록 모든 방식의 전송률이 감소하게 된다. 하지만 제안 방안은 기존의 모든 노드에 게 동일한 슬롯 길이를 할당하는 방식(equal allocation)과 채널 파라미터에 비례하여 할당하는 방식(proportional allocation) 대비 우수한 성능을 보여준다. 이는 제안 방식이 모든 링크 전송률을 동일하게 맞추도록 슬롯 길이

를 결정하여 종단간 전송률을 극대화시키기 때문이다. Equal allocation 방식이 proportional allocation 방식보다 성능이 좋은 이유는 파라미터  $\gamma_i$  값이 큰 노드일수록 에너지 하베스팅량이 많고 링크 품질이 좋기 때문에  $\gamma_i$  값이 작은 노드보다 더 짧은 시간 슬롯을 할당해야 하지만 오히려 반대로 더 긴 시간 슬롯을 할당했기 때문이다. 이를 통해 제안 방안과 같이 에너지양이 많고 링크가 좋은 노드가 그렇지 않은 노드를 배려하여 더 적은 자원을 할당해야 멀티홉 전송에서는 종단간 전송률을 높일 수 있음을 확인할 수 있다. 아울러 수학적 분석을 통해 도출한 성능은 시뮬레이션 결과와 잘 일치하고 있으며 이를 통해 수학적 분석에 오류가 없음을 확인할 수 있다.

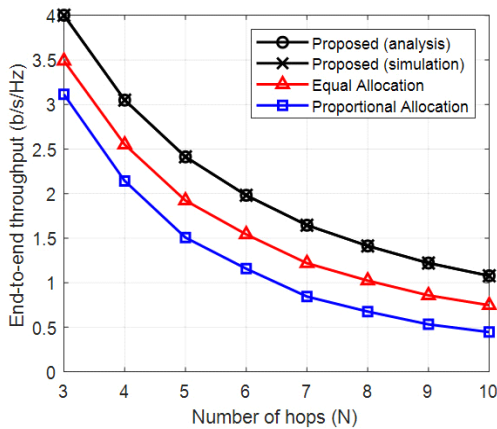


Fig. 4 End-to-end throughput vs. number of hops (N)

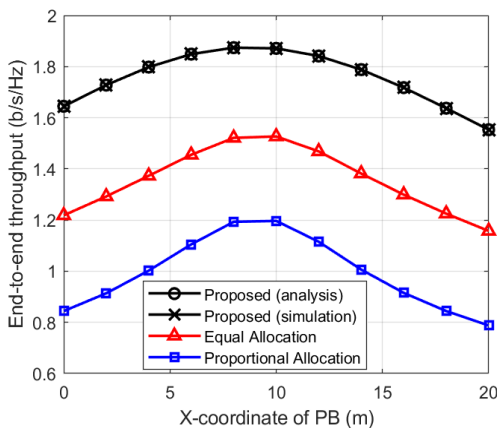


Fig. 5 End-to-end throughput vs. x-coordinate of PB

그림 5는 PB의  $x$  좌표의 변화에 따른 종단간 전송률을 보여준다. PB가 멀티홉 링크의 중간에 위치할 때 종단간 전송률이 가장 높아지는 것을 볼 수 있다. 이는 PB가 전체 노드의 중간 위치에 있을 때 노드에게 가장 공평하면서 많은 에너지를 제공할 수 있기 때문이다. 이를 통해 멀티홉 종단간 전송률을 최대화시키기 위해서는 PB의 위치가 매우 중요하다는 것을 알 수 있다. 아울러, 그림 4의 결과에서와 마찬가지로 제안 방안은 다른 기존 방식들보다 PB의 위치에 상관없이 우수한 성능을 보인다.

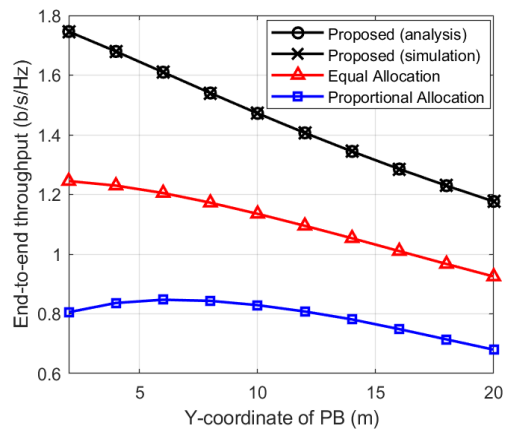


Fig. 6 End-to-end throughput vs. y-coordinate of PB

그림 6은 PB의  $y$  좌표의 변화에 따른 종단간 전송률을 보여준다. PB의  $y$  좌표가 커질수록 PB와 노드 간의 거리가 멀어지므로 에너지 공급량이 줄어들어 전체적으로 종단간 전송률이 감소한다. 하지만 이 경우에도 제안 방안은 PB의  $y$  좌표에 따라 각 노드에게 최적 시간 슬롯을 할당함으로써 다른 기존 방식 대비 높은 종단간 전송률을 보여준다.

## V. 결론

본 논문에서는 무선전력 통신 네트워크에서 종단간 전송률을 최대화하는 멀티홉 전송 방식을 제안하였다. 에너지 하베스팅 기반 멀티홉 전송을 위한 프레임 구조를 제시하고, 노드간 서로 다른 에너지 수확량과 링크 품질을 고려하여 종단간 전송률을 최대화하는 각 노드

의 전송 시간을 수학적 분석을 통하여 도출하였다. 모의 실험 결과 제안한 멀티홉 자원 할당 방식은 모든 링크의 전송률이 같아지도록 노드별 전송 시간을 할당하고 최소 링크 전송률을 최대화시킴으로써 기존 자원 할당 방식 대비 중단간 전송률을 크게 향상시켰다. 추후에는 수행한 분석결과를 바탕으로 현실적인 환경에서 최적 성능을 달성하면서 채널 정보 획득 오버헤드를 줄이는 분산 프로토콜을 제안할 계획이다.

### ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by a research grant from Hankyong National University in the year of 2022).

### REFERENCES

- [ 1 ] A. Costanzo, D. Masotti, G. Paolini, and D. Schreurs, "Evolution of SWIPT for the IoT World: Near- and Far-Field Solutions for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 22, no. 12, pp. 48-59, Dec. 2021.
- [ 2 ] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, "Wireless Information and Power Transfer: Architecture Design and Rate-Energy Tradeoff," *IEEE Transaction on Communications*, vol. 61, no. 11, pp. 4754-4767, Nov. 2013.
- [ 3 ] Q. Shi, L. Liu, W. Xu, and R. Zhang, "Joint transmit beamforming and receive power splitting for MISO SWIPT systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 6, pp. 3269-3280, Jun. 2014.
- [ 4 ] Z. Zong, H. Feng, F. R. Yu, N. Zhao, T. Yang, and B. Hu, "Optimal Transceiver Design for SWIPT in K-user MIMO Interference Channels," *IEEE Transaction on Wireless Communications*, vol. 15, no. 1, pp. 430-445, Jan. 2016.
- [ 5 ] A. Sirojuddin and W. J. Huang, "Sum-Rate Maximization in Two-Way MIMO Cooperative Networks With an Energy Harvesting Relay," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 3664-3677, Jun. 2022.
- [ 6 ] N. Ashraf, S. A. Sheikh, S. A. Khan, I. Shaye, and M. Jalal, "Simultaneous Wireless Information and Power Transfer With Cooperative Relaying for Next-Generation Wireless Networks: A Review," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 71482-71504, May 2021.
- [ 7 ] C. H. Lin and K. H. Liu, "Relay Selection for Energy-Harvesting Relays With Finite Data Buffer and Energy Storage," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 14, pp. 11249-11259, Jul. 2021.
- [ 8 ] E. Chen, M. Xia, D. B. da Costa, and S. Aissa, "Multi-Hop Cooperative Relaying with Energy Harvesting From Cochannel Interferences," *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 5, pp. 1199-1202, May 2017.
- [ 9 ] S. He, K. Xie, W. Chen, D. Zhang, and J. Wen, "Energy-Aware Routing for SWIPT in Multi-Hop Energy-Constrained Wireless Network," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 17996-18008, Mar. 2018.
- [ 10 ] H. H. Choi, "Lifetime Maximization with Cooperative Wireless Energy Sharing in Wireless Multi-Hop Communications," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 24, no. 11, pp. 1550-1553, Nov. 2020.
- [ 11 ] C. Motz, T. Paireder, H. Pretl, and M. Huemer, "A Survey on Self-Interference Cancellation in Mobile LTE-A/5G FDD Transceivers," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 68, no. 3, pp. 823-829, Mar. 2021.
- [ 12 ] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, Cambridge University Press, UK, 2004.
- [ 13 ] H. H. Choi, "Resource Allocation for Maximizing End-to-End Throughput in Wireless Powered Multihop Networks," *Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 44, no. 12, pp. 2219-2222, Dec. 2019.



### 최현호(Hyun-Ho Choi)

2001년 2월: KAIST 전기및전자공학과 공학사  
 2003년 2월: KAIST 전기및전자공학과 공학석사  
 2007년 2월: KAIST 전기및전자공학과 공학박사  
 2007년 3월 ~ 2011년 2월: 삼성종합기술원 전문연구원  
 2011년 3월 ~ 현재: 한경국립대학교 ICT로봇기계공학부 교수

※ 관심분야: 이동통신 시스템, 매체접속제어, 분산자원관리, 저전력 프로토콜, 무선전력전송