



## ICARP: 기회적 에너지 하베스팅 무선 네트워크를 위한 간섭 기반 충전 인지 라우팅 프로토콜

### ICARP: Interference-based Charging Aware Routing Protocol for Opportunistic Energy Harvesting Wireless Networks

김현태 · 나인호<sup>†</sup>  
Hyun-Tae Kim and In-Ho Ra<sup>†</sup>

군산대학교 컴퓨터정보통신공학부  
School of Computer, Information and Communication Engineering, Kunsan National University

#### 요약

최근의 에너지 하베스팅(energy harvesting) 무선 네트워크에 대한 연구는 제한된 에너지 자원 문제를 해결하여 효율적으로 네트워크 수명을 연장할 수 있는 기법 개발에 집중되고 있다. 에너지 하베스팅을 통해 획득할 수 있는 에너지의 양과 효율을 향상시키기 위해서는 여러 가지 에너지 하베스팅 특성을 종합적으로 고려하여 에너지 획득과 데이터 전송을 병행하는 네트워크 구조를 설계하는 매우 중요하다. 본 논문에서는 수신측에서 간섭 정보와 충전 시간을 고려하여 네트워크 내의 에너지 하베스팅 용량을 최대화하면서 종단간 지연 시간을 최소화할 수 있는 간섭 기반의 충전 인지 라우팅 프로토콜(ICARP)을 제안한다. 이를 위해 기회적 에너지 하베스팅 무선 네트워크에서 종단간 지연시간을 최소화할 수 있도록 충전 시간을 패킷 전달의 지연 성분을 적용한 새로운 간섭 기반 충전 인지 라우팅 기법(routing metric)과 ICARP를 설계하였다. 본 논문에서 제시한 라우팅 기법을 통한 전달 지연시간의 단축은 패킷손실이나 재전송으로 인한 에너지 소비량을 줄이는 효과를 얻을 수 있다. 시뮬레이션을 이용한 성능평가를 통하여 제안된 기법이 기존의 라우팅 기법보다 패킷전달율과 종단간 지연시간 측면에서 성능이 향상됨을 보였다.

키워드: 에너지 하베스팅, 애드혹 라우팅, 간섭 인지, 무선 전력, 라우팅 기준, 최적화

#### Abstract

Recent researches on radio frequency energy harvesting networks(RF-EHNs) with limited energy resource like battery have been focusing on the development of a new scheme that can effectively extend the whole lifetime of a network to semipermanent. In order for considerable increase both in the amount of energy obtained from radio frequency energy harvesting and its charging effectiveness, it is very important to design a network that supports energy harvesting and data transfer simultaneously with the full consideration of various characteristics affecting the performance of a RF-EHN. In this paper, we propose an interference-based charging aware routing protocol(ICARP) that utilizes interference information and charging time to maximize the amount of energy harvesting and to minimize the end-to-end delay from a source to the given destination node. To accomplish the research objectives, this paper gives a design of ICARP adopting new network metrics such as interference information and charging time to minimize end-to-end delay in energy harvesting wireless networks. The proposed method enables a RF-EHN to reduce the number of packet losses and retransmissions significantly for better energy consumption. Finally, simulation results show that the network performance in the aspects of packet transmission rate and end-to-end delay has enhanced with the comparison of existing routing protocols.

Key Words: Energy Harvesting, Ad hoc Routing, Interference awareness, Wireless power, Routing metric, Optimization

Received: Jan. 24, 2017  
Revised: Feb. 9, 2017  
Accepted: Feb. 15, 2017  
<sup>†</sup>Corresponding authors  
ihra@kunsan.ac.kr

본 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1A2B4013002).  
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.

## 1. 서론

에너지 하베스팅 기술은 제한된 에너지 자원을 사용하는 무선 네트워크의 수명을 효과적으로 연장시킬 수 있는 대안으로 주목받고 있다[1]. 무선 네트워크에서 무선 장치는 정보를 처리하거나 전송하기 위해 RF 신호로부터 에너지를 수확하는 기술이 발전됨에 따라 무선 센서 네트워크, 무선 메시 네트워크 등과 같은 여러 형태의 무선 네트워크에 에너지 하베스팅 기법을 다양한 방식으로 적용하는 사례가 증가하고 있다[2]. 특히 에너지 자원이 한정된 무선 네트워크에서 종단간 다중-홉 전송을 효율적으로 수행하기 위한 방안으로 무선 충전을 결합한 라우팅에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 무선 네트워크의 노드들은 제한된 에너지를 가지므로 RF 에너지를 지능적으로

수확하고 처리량을 높일 수 있도록 동작시킬 필요가 있으며, 다중-홉 무선 네트워크에서의 전송 성능을 극대화하기 위해서는 반드시 간섭 문제가 해결되어야 한다. 다중-홉 RF-EHN (Radio Frequency Energy Harvesting Network)에서는 이용 가능한 에너지 자원 (energy source)과의 거리에 따라 각각의 노드가 획득할 수 있는 RF 에너지 수확량이 서로 다르기 때문에 라우팅 기법을 설계할 때에는 에너지 충전율, 링크 품질, 채널수, 홉수 등과 같은 다양한 요소들을 고려한 새로운 라우팅 기준(routing metric)의 적용이 요구된다.

최근 무선 라우팅 기법에 관한 연구들 중에서 논문 [4]에서는 무선 센서 네트워크에서 각 노드의 최대 충전 시간을 최소화시킬 수 있는 경로를 선정하는 라우팅 기준을 제안한 바 있으나 정보 전송 채널과 동일한 주파수로 RF 충전을 함으로써 발생하는 간섭 문제를 고려하지 않고 있다. 논문[5]에 따르면 간섭은 다중-홉 무선 네트워크의 전체 에너지 용량에 상당한 영향을 미친다고 알려져 있다. 따라서 다중-홉 정보 전송을 위한 라우팅 방식에서는 간섭을 회피하면서 네트워크 에너지 용량을 높일 수 있는 전송 경로를 결정하는 것이 매우 중요하며, 이를 위해서는 각 링크에서 발생하는 잠재적 간섭 정보를 고려한 라우팅 기법이 요구된다. 다중-홉 무선 네트워크 환경에서 간섭은 흐름내 간섭(intra-flow interference)과 흐름간 간섭(inter-flow interference)으로 분류된다. 이에 따라 효과적인 라우팅을 수행하기 위해서는 패킷 손실률이 낮고 데이터 전송률이 높으며, 간섭 수준이 낮고 에너지 수확률(energy harvesting rate)이 높은 링크들로 구성된 전송경로를 결정하는 것이 매우 중요하다.

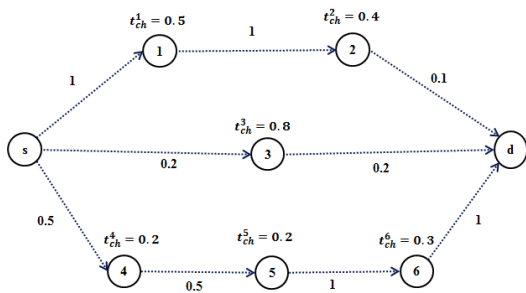


그림 1. 충전시간이 경로선정에 미치는 영향  
Fig. 1. The impact of charging delay on path selection.

본 논문의 연구 배경은 무선 네트워크의 수명을 연장하기 위해 무선 노드들이 주위 환경으로부터 기회적으로 에너지를 수확하는 시간이 종단간 지연시간을 증가시킬 수 있는 요인이 될 수 있다는 사실에 기인한다.

충전 지연(charging delay)이 라우팅 과정에 미치는 영향은 그림 1과 같이 설명할 수 있다. 그림 1에서 노드를 연결하는 어떤 링크에 표시된 숫자는 송신노드가 패킷전송을 성공하기 위해 전송을

시도한 평균횟수를 의미한다. 각 노드의  $t_{ch}$ 는 에너지를 수확하기 위한 평균 충전 시간이다. 이 경우에 노드는 충전 시간만큼 데이터 패킷을 지연 전달한다. 그림 1에서 발신노드(s)에서 목적노드(d)로의 전송경로는 세 개의 후보 경로가 존재한다. 첫 번째 경로( $\Psi_1$ )는 (s, 1, 2, d)이고 두 번째 경로( $\Psi_2$ )는 (s, 3, d)이고 마지막으로 세 번째 경로( $\Psi_3$ )는 (s, 4, 5, 6, d)이다. 이러한 후보 경로들에 대하여 ETT(expected transmission time) 기반 라우팅 기법[6]에 따라 각 후보경로에 대한 추정 종단간 지연시간(end to end delay)은 각각  $d_1 = 2.4, d_2 = 0.8, d_3 = 2.8$ 가 되어 종단간 최소 지연시간 값을 갖는  $\Psi_2$ 가 최적의 경로로 선정된다. 그러나 경로 선정 과정에서 충전 지연 요소를 고려하면 세 개의 후보 경로의 지연시간은 각각  $d_1 = 7.1, d_2 = 5.8, d_3 = 4.1$ 이 되어  $\Psi_3$ 가 최적의 전송경로로 선정되어야 한다.

앞에서 설명한 바와 같이 에너지 하베스팅 무선 네트워크에서 충전 지연시간을 고려하지 않고 경로를 결정한다면 종단간 지연시간이 높은 경로가 선정되는 문제가 발생한다. 따라서 에너지 하베스팅 무선 네트워크에서는 네트워크 처리량을 최대한 유지하면서 종단간 지연시간이 최소화될 수 있도록 각 노드의 충전시간 또는 충전율(charging time/rate)을 고려한 새로운 라우팅 기준(routing metric)과 이것에 의거한 라우팅 기법이 필요하다. 기본적으로 무선 전송은 브로드캐스팅 특성으로 인하여 링크들 간의 간섭으로 인한 ETT가 증가되어 종단간 지연시간이 증가한다. 이러한 무선 링크 간섭 문제는 SINR을 이용하여 각 링크의 간섭비를 측정함으로써 간섭량이 높은 경로를 회피하는 방법으로 해결될 수 있다. 본 논문에서는 충전으로 인한 지연성분과 네트워크의 간섭성분으로 인한 지연시간을 동시에 고려한 새로운 라우팅 기준과 라우팅 프로토콜을 제안한다. 제안된 기법에서는 에너지 충전시간을 보장하면서 간섭으로 인한 전송 지연시간을 최소화하여 네트워크의 전체 처리량을 극대화할 수 있도록 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련연구에 대하여 살펴보고, 3장에서는 에너지 하베스팅 네트워크 구조 및 간섭 모델과 제안된 라우팅 기준을 설명한다. 4장에서는 제안된 간섭 기반 충전 인지 라우팅 기법을 기술하고 5장에서는 제안된 기법에 대한 성능을 평가한다. 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

## 2. 관련 연구

최근의 무선 주파수 에너지 하베스팅 네트워크(RF-EHN)에서는 무선 노드의 활성상태를 지속적으로 유지하기 위해 외부 환경으로부터 전력을 수확하여 네트워크의 수명을 반영구화하여 한정된 내부 에너지 제약을 극복하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 단일-홉으로 구성된 에너지 하베스팅 네트워크에서의 무선

전송과는 달리 다중-홉 무선전송방식에서는 효율적인 라우팅 기법을 통한 종단간 통신 최적화를 보장하여야 한다. 이에 따라 에너지 하베스팅 라우팅에 관한 연구는 네트워크 수명 연장, 처리량 최대화 및 에너지 하베스팅 최적화를 목표로 하고 있다.

지금까지 다중-홉 RF-EHNS에서 주변 환경으로부터 수확된 에너지를 활용하여 네트워크 처리량을 최대화하고 네트워크 수명을 연장하기 위한 다양한 라우팅 기법들이 제시된 바 있다. 논문 [4]에서는 최대 충전 시간을 최소화 하도록 센서 노드의 충전 시간을 최적화하는 라우팅 기준이 적용된 개선된 AODV 프로토콜을 제시하였다. 논문 [7]에서는 다중-홉 무선 네트워크에서 종단간 처리량을 최대화하기 위해 통계적 최적화 기법을 활용한 라우팅 기법과 전송 스케줄링 기법 개발에 관한 이슈들을 소개하고 있다. 논문 [8]에서는 발신노드에서 목적노드로 데이터 전달하는 중계 노드가 일부 RF 수신신호를 에너지로 전환하여 충전하면서 데이터 중계역할을 수행할 수 있는 AF 중계 네트워크(amplify and forward relaying network) 기법에 대해 연구하였으며, 아웃지 확률(outage probability)과 에르고딕 용량(ergodic capacity)을 분석하기 위해 지연제한적(delay-limited) 전송과 지연허용적(delay-tolerant) 전송 기법을 제시하여 네트워크 처리량에 대한 한계를 측정할 수 있도록 하였다.

무선 통신에서 간섭문제는 가장 기본적이면서도 쉽게 해결하기 어려운 문제로 알려져 있다. 이와 관련된 연구로 논문 [9]에서는 간섭 조정(IA: interference alignment) 기술을 통한 간섭관리 기법을 제하고 있으며, 논문 [10]에서는 게임이론을 기반으로 한 분할요인(splitting factors) 최적화 방안을 제시하여 간섭원(interfering source)으로 부터의 간섭영향을 최소화하는 방안을 제시한 바 있으나 충전시간에 따른 전송지연 문제에 대해서는 고려하지 않고 있다.

### 3. 에너지 하베스팅 네트워크 구조 및 간섭 모델

#### 3.1 에너지 하베스팅 무선 네트워크 기반구조

그림 2와 같이 RF-EHN에는 무선 노드들이 어떤 영역에 임의로 배치되어 있고 에너지 자원(energy source) 지닌 전력 송신기(energy transfer node)는  $T_i$ 로 나타낸다. 각 전력 송신기들은 일정한 커버리지 영역(coverage region) 내에 있는 무선노드( $v_i$ )들에게 에너지를 전달한다. 그림 2에 표시된 흐름  $f_1$ 은 원거리에 있는 발신 노드( $v_7$ )가 생성한 데이터를 BS(base station)까지 다중-홉 방식으로 전달하는 트래픽 흐름을 의미하며, 동일 네트워크 안에 다수의 흐름들이 존재한다고 가정한다. 발신노드 또는 중간노드는 제한된 에너지를 지닌 노드로서 부족한 에너지를 충전하기 위해 전력 송신기 또는 이웃 무선노드로부터 수신되는 신호로부터 에너지를

수확할 수 있다. 수신 노드는 에너지 수확 모드(energy harvesting mode)와 정보 수신 모드(Information decoding mode)를 지니며 간섭 기반의 시간 스위칭 수신모델(time switching receiver model)을 사용한다고 가정한다[11].

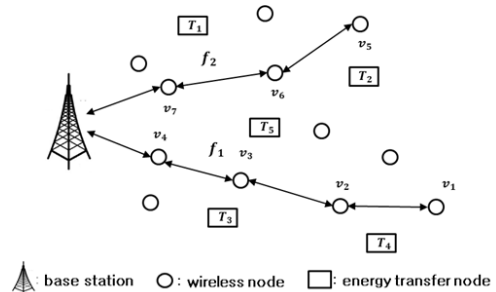


그림 2. 에너지 하베스팅 무선 네트워크 기반구조  
Fig. 2. Network architecture for energy harvesting wireless networks

#### 3.2 네트워크 및 간섭 모델

다중-홉 무선 네트워크에 임의 배치된 노드들은 이동성이 없는 정적 특성을 지니고 있다.  $V$ 를 노드들의 집합이라 하고  $L$ 을 링크들의 집합이라고 할 때, 네트워크 모델은  $G=(V, L)$ 로 정의한다. 집합  $L$ 에 속한 링크  $l_{ij}$ 는 최소 데이터 전송률로 데이터 신호를 노드  $i$ 에서 노드  $j$ 로 전송하는 링크를 의미한다.  $r_{ij}$ 는 간섭이 존재하지 않을 때 각 링크에 특정된 데이터 전송률이다. 집합  $F$ 는 네트워크에 존재하는 흐름들( $f_k$ )의 집합이다. 각 흐름은 발신노드와 목적노드의 쌍이다. 즉,  $F = \{f_k(s_k, d_k) : s_k, d_k \in V\}$ 이고 흐름  $f_k$ 를 통해 발신노드  $s_k$ 에서 목적노드  $d_k$ 로 트래픽 정보를 전달한다.

다중-홉 무선 네트워크 환경에서 다수의 흐름들이 존재하는 경우에는 흐름내 간섭(intra-flow interference)과 흐름간 간섭(inter-flow interference)으로 인하여 성능 저하 문제가 발생한다. 본 논문에서는 이러한 간섭량을 계산하기 위해 논문[5]에서 제시한 물리적 간섭모델(SINR)을 이용하며, 수신 노드의 SINR 값이 임계값보다 보다 크다면 두 노드 간의 전송이 성공한 것으로 판단한다.

주파수 간섭 영향으로 인한 실제의 유효 데이터 전송률(effective data rate)은 다음과 같다. 먼저 동시에 신호를 전송하는 노드들의 집합을  $S = \{v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_k}\}$ 라고 할 때, 어떤 링크  $l_{ij}$ 의 유효 데이터 전송률은 수식(1)과 같이 계산된다.  $f$ 는 비감소 함수이고  $SINR(i, j, S)$ 은 집합  $S$ 에 포함된 노드들 중에서 링크  $l_{ij}$ 의 수신노드에 대한 SINR이다.

$$r_{ij}(S) = f(SINR(i, j, S)) \tag{1}$$

다중-홉 무선 라우팅을 위해 흐름내 및 흐름간 간섭으로 인한

영향을 측정하기 위해 논문 [6]에서 제시한 간섭비(interference ratio)를 본 논문에서 제시한 라우팅 기준에 포함시킨다. 양방향 통신(DATA/ACK)을 위한 링크  $l_{ij} = (i, j)$ 를 구성하는 노드  $j$ 의 간섭비는 수식 (2)와 같으며, 링크  $l_{ij}$ 에 대한 최종 간섭비는 수식 (3)과 같이 구한다.

$$IR_{l_{ij}}(j) = \frac{SINR_{l_{ij}}(j)}{SNR_{l_{ij}}(j)} \quad (2)$$

$$IR_{l_{ij}} = \min\{IR_{l_{ij}}(i), IR_{l_{ij}}(j)\} \quad (3)$$

### 3.3 간섭 기반 충전 인지 라우팅 메트릭

전력송신기들은 네트워크의 시작 단계(initialization phase)에서 특정 시간 동안에 네트워크 전체로 전력을 방사한다. 각 무선 노드  $j$ 는 충전시간  $t_{ch}^j$  동안 에너지를 수확하고 저장한다. 그 이후, 발신노드에서 데이터가 생성되면 목적노드로 데이터를 전송하기 위해 경로탐색과정(route discovery process)을 시작한다. 발신노드와 중간 노드들은 목적노드를 탐색하기 위해 튜플 정보  $\langle t_{ch}^{sum}(p), IA(p) \rangle$ 를 포함한 *RREQ*패킷을 전송한다. 수식 (4)에서 후보 경로  $p$ 에 대해 각 노드  $j$ 의 충전시간  $t_{ch}^j$ 을 이용하여 누적 충전시간  $t_{ch}^{sum}$ 을 계산한다. 수식 (5)를 이용하여 후보 경로  $p$ 를 구성하는 각 링크의 간섭비 누계로 전송 지연을 계산한다.  $IA_{l_{ij}}$ 는 링크  $l_{ij}$ 의 간섭으로 인한 추정된 전송 지연 시간 성분으로  $IA_{l_{ij}} = ETT_{l_{ij}}/IR_{l_{ij}}$ 와 같이 계산된다. 만약  $IR_{l_{ij}} \rightarrow 1$ 이면 간섭량이 거의 존재하지 않고  $IR_{l_{ij}} \rightarrow 0$ 이면 간섭량이 매우 높을 것을 의미한다.

$$t_{ch}^{sum}(p) = t_{ch}^{sum}(p) + t_{ch}^j \quad (4)$$

$$IA(p) = IA(p) + IA_{l_{ij}}(p) \quad (5)$$

발신노드가 전송한 *RREQ* 패킷이 서로 다른 경로들( $p_m, m = 1, 2, \dots$ )을 통하여 목적노드에 도착하면 여러 후보 경로들 중에 하나의 경로를 최종 전송경로 결정한다. 흐름  $f_k$ 의 중단간 경로 설정 기준(interference based charging awareness: ICA)은  $m$ 개의 후보 경로들에 대해 수식 (6)과 같이 계산된다.

$$ICA(p) = \sum_{l_{ij} \in L_p} IA_{l_{ij}}(p) + t_{ch}^{sum} \quad (6)$$

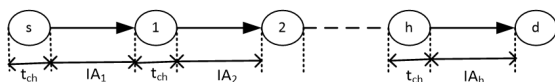


그림 3. H-홉 경로의 ICA 추정 모델  
Fig. 3. Model of estimating ICA for H-hop routes

그림3은  $h$ 홉으로 구성된 어떤 경로에 대한 지연성분을 나타내고 있다. 어떤 후보 경로에 대한 중단간 지연시간의 추정은 수식 (7)

로부터 계산된다. 첫 번째 항은 후보 경로  $p$ 를 구성하는 링크들의  $IA_{l_{ij}}$ 의 합으로 링크에서 발생된 간섭으로 인한 추정된 전송시간( $cIA(p)$ )을 의미한다. 두 번째 항은 경로  $p$ 를 구성하는 각 노드  $v_k$ 의 충전시간( $t_{ch}^k$ )에 대한 누적 충전시간( $cCT(p)$ )을 의미한다. 다중의 후보경로들 중에서  $wICA(p)$ 이 최소가 되는 경로가 최종 경로( $\Psi$ )로 선정된다. 즉,  $\Psi = \min[wICA(p), \forall p]$ . 여기서  $\alpha$ 는  $0 \leq \alpha \leq 1$ 로 충전지연과 간섭지연 각 성분에 대한 가중치이다. 따라서 수식 (7)은 간섭지연성분과 충전지연성분으로 발생되는 중단간 지연시간이 최소가 되도록 최종 경로를 결정하는 새로운 라우팅 기준이 된다.

$$wICA(p) = \alpha * cIA(p) + (1 - \alpha)cCT(p), \quad \forall p \quad (7)$$

## 4. 간섭 기반 충전 인지 라우팅 프로토콜

본 논문에서 제안하는 간섭 기반 충전 인지 라우팅 프로토콜 (Interference based charging aware routing protocol: ICARP)은 간섭지연성분과 충전지연성분을 고려한 새로운 라우팅 기준을 설계하여 중단간 지연시간을 최소화하고 네트워크 처리량을 높일 뿐만 아니라 네트워크 수명을 연장할 수 있는 라우팅 기법이다.

라우팅 프로토콜의 작동 절차는 다음과 같다. 먼저 네트워크 운영을 시작하기 전에 초기 단계(initialization phase)에서 전력 송신기( $T$ )들이 사전에 정의된 일정 시간 동안 전력을 송신하며, 각 무선노드는 주어진 충전시간 동안 필요한 만큼의 에너지를 저장한다. 또한 각 노드는 이웃 노드를 탐색하기 위해 주기적으로 *HELLO* 패킷을 브로드캐스팅하고 *ETT*정보의 측정하여 간섭비 ( $IR$ )를 계산한다. 발신노드에서 데이터가 생성되면 목적노드로 데이터를 전송하기 위해 경로탐색과정(route discovery process)이 시작된다. 발신 노드와 중간 노드들은 목적 노드를 탐색하기 위해 튜플정보  $\langle t_{ch}^{sum}(p), IA(p) \rangle$ 를 포함한 *RREQ*패킷을 전송한다. 각 노드는 충전시간  $t_{ch}^k$ 에 대해  $t_{ch}^{sum}(p)$ 를 집계하여 누적충전시간을 주기적으로 갱신한다. 발신노드에서 전송된 *RREQ* 패킷은 서로 다른 경로( $p_m$ )를 통하여BS에 도착한다. BS는 일정한 경로 탐색 시간 ( $T_{setup}$ )동안 *RREQ* 패킷들을 수집하고 여러 후보경로들 중에서  $wICA(p)$ 의 값이 최소가 되는 경로를 최종 경로( $\Psi$ )로 결정하고, 최적경로( $\Psi$ )를 포함한 *RREQ*패킷을 발신노드로 전달한다.

## 5. 시뮬레이션 및 성능평가

5장에서는 ns-3 시뮬레이터[12]를 사용하여 제안된 라우팅 프로토콜(ICARP)의 성능평가 방법과 결과에 대해 기술한다.



시뮬레이션을 위한 주요 변수의 설정은 표 1과 같다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터  
Table 1. Simulation Parameters

Parameter	Value
Test area	500m × 500m
Number of nodes	81
Placement (topology)	9 × 9 grid
Radio range	100 m
Node separation	70 m
Transmission bandwidth	1 Mbps
Traffic type	CBR, UDP
Data rate	20 kbps
Number of sources	Variable 2-12
Packet size	512 bytes
Sink	Single sink node at the center
Routing protocol	AODV, proposed ICAR
Simulation time	100 sec
MAC/PHY	IEEE 802.11b
Transmitter current	87 mA
Receiver current	98.5 mA
Initial Energy	100J

성능 평가를 위한 시뮬레이션에서는 500m x 500m의 네트워크 영역에 81개의 무선 노드들이 그리드(grid) 형태로 배치된다고 가정한다. 발신노드는 그리드 외곽에 있는 임의의 노드로 선정되고 싱크 노드는 중앙에 있는 노드로 고정한다. 발신 노드는 CBR/UDP 트래픽을 20 kbps로 싱크 노드에 전송한다. 데이터 패킷의 크기는 512 bytes 이다. 시뮬레이션 시간은 100초 동안 수행한다. 각 노드는 초기 에너지를 100J로 하고 하베스팅율은 평균이 2.25mW로 [0, 4.5] mW 범위의 균일분포를 따른다.

시뮬레이션을 통하여 제안된 기법의 성능평가를 위하여 평균 패킷 전송률(packet delivery ratio)과 평균 종단간 지연시간(average end to end delay)을 평가기준으로 사용하여 제안된 ICAR 기법과 AODV기법의 성능을 비교한다. 평균 패킷 전송률은 전체 발신노드에서 싱크노드로 전송되는 패킷의 비율을 의미한다. 평균 종단간 지연시간은 각 발신노드에서 싱크노드로 패킷을 전달하는 필요한 평균 시간이다.

그림 4는 흐름 수의 증가에 따른 패킷 전송률(Packet Delivery Ratio: PDR)을 측정된 결과를 보인 것으로서 제안된 ICAR 기법이 AODV보다 트래픽 성공률이 평균 7% 정도 향상됨을 알 수 있다. 패킷 전송율은 흐름의 수의 증가로 네트워크에서 발생하는 트래픽 양이 급증하여 혼잡상황이 악화되지만 AODV보다는 제안된 ICAR 이 높게 나타난다.

그림 5는 흐름 수의 증가에 따른 종단간 평균 지연시간을 측정된 결과를 나타낸 것이다. AODV 기법과 ICAR 기법은 흐름 수가 적을 때에는 비슷한 결과를 나타내지만 제안된 기법을 사용하면 흐름

수가 증가하는 경우에도 지연시간 증가폭이 크게 상승하지 않는 것을 알 수 있으며, 평균 14% 정도 감소됨을 보이고 있다. 즉, ICAR 기법을 사용하면 간섭과 충전으로 인한 지연 성분을 고려하여 라우팅 과정에서 전송 경로를 선정하기 때문에 종단간 지연시간의 증가폭을 줄일 수 있다는 것을 의미한다.

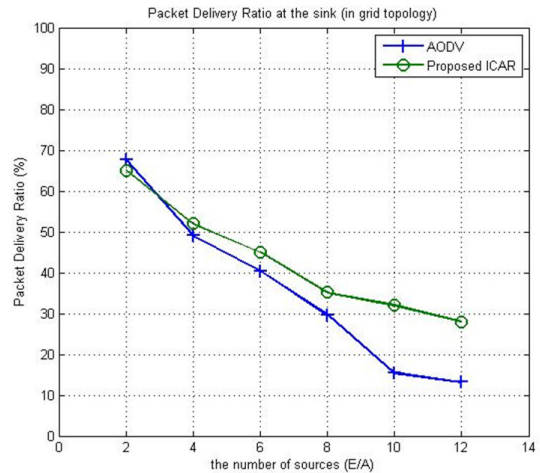


그림 4. 흐름 수 증가에 따른 평균 패킷전송률  
Fig. 4. Average packet delivery ratio

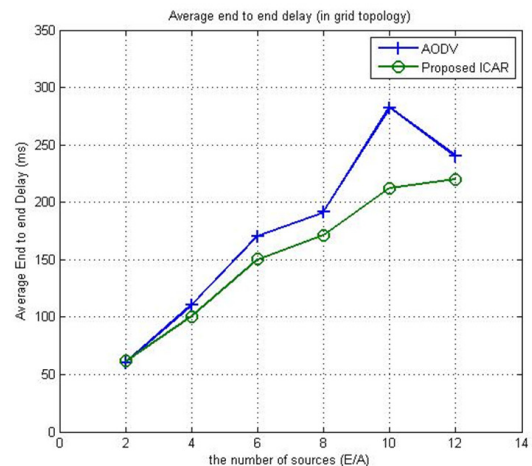


그림 5. 흐름 수 증가에 따른 평균 종단간 지연시간  
Fig. 5. Average end-to-end delay

## 6. 결론

본 논문에서는 에너지 하베스팅 다중홉 무선 네트워크에서 간섭정보를 기반으로 하여 종단간 지연시간을 최소화함과 동시에 간섭을 회피하여 처리량을 극대화할 수 있도록 최적의 경로를 결정하는 라우팅 기법을 제안하였다. 제안된 기법에서는 전송 링크의 혼잡으로 인한 간섭지연과 무선 노드에서 에너지 수확으로

인한 충전지연시간을 기반으로 한 새로운 간섭 기반 충전 인지 라우팅 기준을 적용하였다. 또한, 시뮬레이션을 통해 제안된 라우팅 프로토콜을 사용하면 종단간 지연시간을 단축함으로써 패킷 전송율을 향상시키고 이로 인하여 에너지 소비량을 절감하는 효과를 얻을 수 있음을 보였다. 향후에는 다중-홉 무선 네트워크에서 송신 전력에 따른 에너지 수확 최적화 및 다중채널 할당에 의한 전송을 극대화 방법에 대해 연구하고자 한다.

### References

[1] H. J. Visser and R. J. M. Vullers, "RF Energy Harvesting and Transport for Wireless Sensor Network Applications: Principles and Requirements," *Proceedings of IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1410-1412, Jun. 2013

[2] A. B. Altayeva and Y. I. Cho, "Comparison of Radio Wave Propagation Models for Mobile Networks," *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, vol. 15, no. 3, pp. 192-199, Sept. 2015

[3] H. Nishimoto, Y. Kawahara, and T. Asami, "Prototype Implementation of Ambient RF Energy Harvesting Wireless Sensor Networks," *Proceedings of IEEE Sensors*, Nov. 2010

[4] R. Doost, K. R. Chowdhury, and D. Di Felice, "Routing and Link Layer Protocol Design for sensor Networks with Wireless Energy Transfer," *Proceedings of IEEE INFOCOM-Mini Conference*, pp. 150-154, Apr. 2013

[5] G. Gupta and P. R. Kumar, "The Capacity of Wireless Networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 2, 2000

[6] A. P. Subramanian, M. M. Buddhikot, S. Miller, "Interference Aware Routing in Multi-Radio Wireless Mesh Networks," *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop Wireless Mesh Networks*, Sept. 2006

[7] S. Sarkar, M.H.R. Khouzani, and K. Kar, "Optimal Routing and Scheduling in Multihop Wireless Renewable Energy Networks," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 58, no. 7, pp. 1792-1798, July 2013

[8] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durani, R. A. Kennedy, "Relaying Protocol for Wireless Energy harvesting and Information Processing," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 7, pp. 3622-3636, July 2013.

[9] N. Zhao, F. R. Yu, and V. C. M. Leung, "Wireless Energy

Harvesting in Interference Alignment Networks," *IEEE Communications Magazine*, pp. 72-78, June 2015

[10] H. Chen, Y. Li, Y. Jiang, Y. Ma, and B. Vucetic, "Distributed Power Splitting for SWIPT in Relay Interference Channels using Game Theory," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, pp. 410-420, Jan. 2015

[11] I. Krikidis, "Simultaneous Information and Energy Transfer in Large-Scale Networks with/ without Relaying," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 2, no. 3, pp. 900-912, Mar. 2014

[12] "The ns-3 network simulator," Available: <http://www.nsnam.org/>

### 저자소개



#### 김현태(Hyun-Tae Kim)

1996년 : 군산대학교 정보통신공학과 공학사  
 1998년 : 군산대학교 정보통신공학과 공학석사  
 2006년 : 군산대학교 정보통신공학과 공학박사  
 2008년 : 전북대학교 박사후과정  
 2009년~현재 : 군산대학교 연구원

관심분야 : Wireless Communication and Networking System, Optimization Theory, Smart Grid  
 Phone : +82-63-469-4795  
 E-mail : camelk@kunsan.ac.kr



#### 나인호(In-Ho Ra)

1988년 : 울산대학교 전자계산학과 공학사  
 1991년 : 중앙대학교 전자계산학과 공학석사  
 1995년 : 중앙대학교 전자계산학과 공학박사  
 1995년~현재 : 군산대학교  
 컴퓨터정보통신공학부 교수

관심분야 : Wireless Ad hoc & Sensor Network, Telematics System, Ubiquitous Computing, PS-LTE  
 Phone : +82-63-469-4697  
 E-mail : ihra@kunsan.ac.kr