

# 다중 홉 RF 에너지 하베스팅 네트워크에서 지연에 민감한 데이터 전송을 위한 간섭 인지 기반 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜

## Energy-Efficient Routing Protocol based on Interference Awareness for Transmission of Delay-Sensitive Data in Multi-Hop RF Energy Harvesting Networks

김현태, 나인호  
군산대학교 컴퓨터정보통신공학부

Hyun-Tae Kim(camelk@kunsan.ac.kr), In-Ho Ra(ihra@kunsan.ac.kr)

### 요약

최근 무선 통신 기술의 혁신적인 발전에 따라 에너지 하베스팅을 통해 네트워크 수명을 영구적으로 연장하기 위한 네트워크 자원 최적화, QoS 보장 전송 기법, 에너지 지능적 라우팅 등의 연구가 활발히 진행되고 있다. 잘 알려진 바와 같이 다중-홉 RF 에너지 하베스팅 무선 네트워크에서는 수확되는 에너지양의 불확실성 때문에 종단간 네트워크 전송 지연 시간을 보장하기 어려운 문제가 발생한다. 본 논문에서는 다중 홉 에너지 하베스팅 무선 네트워크에서 종단간 지연 시간을 최소화하기 위하여 상호채널 간섭(co-channel interference)으로 인한 지연, 에너지 하베스팅 시간으로 인한 지연 그리고 중계 노드에서의 큐잉 지연을 종합적으로 고려한 간섭 인지 기반의 에너지 효율적인 라우팅 메트릭과 프로토콜을 제안한다. 제안된 기법은 부하 불균형을 유발하는 패킷 혼잡을 회피하고 에너지 고갈로 인한 노드의 대기 시간을 줄이며 링크 간의 간섭으로 지연시간이 증가되지 않도록 함으로써 종단간 처리량을 최대화한다. 마지막으로 ns-3 시뮬레이터를 이용하여 처리율, 종단간 지연시간, 에너지 소비량 등의 측면에서 제안된 기법의 성능을 측정하여 기존에 제안된 기법보다 성능이 우수함을 증명한다.

■ 중심어 : | 에너지 하베스팅 | 상호 채널 간섭 | 큐잉 지연 | 라우팅 메트릭 | 다중홉 중계 |

### Abstract

With innovative advances in wireless communication technology, many researches for extending network lifetime in maximum by using energy harvesting have been actively performed on the area of network resource optimization, QoS-guaranteed transmission, energy-intelligent routing and etc. As known well, it is very hard to guarantee end-to-end network delay due to uncertainty of the amount of harvested energy in multi-hop RF(radio frequency) energy harvesting wireless networks. To minimize end-to-end delay in multi-hop RF energy harvesting networks, this paper proposes an energy efficient routing metric based on interference aware and protocol which takes account of various delays caused by co-channel interference, energy harvesting time and queuing in a relay node. The proposed method maximizes end-to-end throughput by performing avoidance of packet congestion causing load unbalance, reduction of waiting time due to exhaustion of energy and restraint of delay time from co-channel interference. Finally simulation results using ns-3 simulator show that the proposed method outperforms existing methods in respect of throughput, end-to-end delay and energy consumption.

■ keyword : | Energy Harvesting | Co-channel Interference | Queuing Delay | Routing Metric | Multihop Relaying |

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

접수일자 : 2018년 02월 28일

심사완료일 : 2018년 03월 13일

수정일자 : 2018년 03월 13일

교신저자 : 나인호, e-mail : ihra@kunsan.ac.kr

## I. 서론

최근 무선 통신 기술의 급속한 발전에 힘입어 무선 장치들의 수명을 연장시킬 수 있는 에너지 하베스팅 기술은 차세대 기술로 주목받고 있으며, 무선 에드 혹 및 센서 네트워크, 건물 관리 네트워크, M2M 통신, 스마트 그리드, 5G D2D 통신 등의 다양한 분야에서 에너지 제약적인 통신 네트워크의 수명 연장뿐만 아니라 처리율을 향상시킬 수 있는 유망한 기술로 집중적인 연구가 이루어지고 있다[1][2].

에너지 하베스팅 기술은 무선 장치가 주변 RF(radio-frequency) 신호로부터 에너지를 수확하고 자신의 배터리에 저장하며, 수확된 에너지는 데이터를 전송하는데 사용된다. 최근에는 RF 신호 이외에도 태양, 지열, 화학, 전자기파 등과 같은 다양한 에너지원(energy source)을 대상으로 에너지 하베스팅 기술이 확대되고 있지만 무선 네트워크에 에너지 자급자족(energy self-sufficiency) 뿐만 아니라 영구적 운영을 제공할 수 있는 RF 에너지 하베스팅 네트워크(RF energy harvesting network: RF-EHN)에 대해 더 많은 연구가 진행되고 있다[3]. 특히, RF-EHN 응용은 화석 에너지의 사용을 줄여 탄소저감 효과를 유발하고 무선 환경에서 배터리를 지속적 충전함으로써 높은 가용성과 이동성을 제공할 수 있다는 장점이 있다. 이에 따라 도외 지역, 콘크리트 구조물 내부, 인체 내부, 위험지역 등과 같이 통신 장애 지역에서의 활용도가 높아지게 된다.

지난 수 년 동안 RF-EHN에 대해 수행된 연구는 주로 다양한 제약조건하에서 에너지 하베스팅 통신 시스템의 성능 최적화에 역점을 두고 수행되어 왔다[4-6]. 그 중에서도 특히 에너지 도착률, 에너지 수확량, 데이터 도착률, 수신된 패킷 데이터량 등에 대한 추정된 정보를 기반으로 한 자원 최적화 할당 기법에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 그러나 실제 무선 전송 환경에서는 에너지 또는 데이터 패킷이 확률적 특성에 따라 불규칙적으로 도착한다. 따라서 기존에 제안된 기법들은 불완전한 채널 특성을 충분히 고려하지 못하여 에너지 하베스팅을 통한 지속적 에너지 공급을 보장할 수 없다. 이에 따라 전송에 필요한 에너지가 충분히 수확될

때까지 많은 데이터 패킷들이 데이터 큐에 대기하여야 하는데, 이로 인하여 큐잉지연이 증가되는 문제가 발생한다.

다중 홉 무선 네트워크를 위해 제안된 기존의 라우팅 기법들은 주로 채널 경쟁을 낮춰 데이터 전송 효율성을 극대화하기 위한 간섭 인지 기법과 부하균형(load balancing)을 위해 사용되는 라우팅 메트릭 기반의 최적 전송경로 선정 기법으로 분류할 수 있다[7][8]. 그 외에도 다중-라디오 다중-채널 방식으로 상호채널 간섭(co-channel interference)으로 인해 네트워크 용량(network capacity)을 충분히 사용하지 못하는 한계점을 극복하기 위해 제안된 라우팅 기법들이 있다[9-11]. 여기서 다중-라디오 다중-채널 방식은 라우팅 기법이 채널 할당 전략과 결합되어 있어 계산 복잡도가 높으며, 채널 스위칭 시간이 추가로 소요되기 때문에 에너지 소비가 증가할 뿐만 아니라 중단간 지연시간도 증가되는 문제점을 지니고 있다.

본 논문에서는 에너지 하베스팅 무선 네트워크에서 불확실성을 갖는 에너지 수확률 자체가 데이터 큐잉 및 전송지연에 미치는 영향과 채널 간섭에 의해 발생하는 패킷 전송지연 시간을 정량적으로 분석한다. 또한, 분석 결과를 토대로 에너지 수확률과 데이터 도착률 간의 불일치에 의한 큐잉 지연 성분과 간섭 강도에 따른 전송 지연 성분을 종합적으로 측정하는 간섭 인지 기반 에너지 효율적인 라우팅 메트릭(energy efficient interference awareness based routing metric: EEIA)을 설계하고 이것을 기반으로 한 새로운 라우팅 프로토콜을 제안한다. 즉 제안된 EEIA 라우팅 메트릭을 이용하여 에너지 수확률과 간섭 수준에 입각한 최적의 라우팅 경로를 선정하도록 하여 혼잡을 회피할 뿐만 아니라 중단간 지연시간을 단축시킬 수 있도록 한다.

[그림 1]은 제안된 라우팅 프로토콜을 적용하기 위해 베이스 스테이션(BS), 무선 노드, 에너지 전달 노드로 구성된 네트워크 구조를 나타낸 것이다. 발신지 노드  $S$ 는 목적지 노드  $D$ 로 데이터를 전달할 때 경로( $f_i$ , ( $i=1,2,3$ ))들 중에 하나를 선정하여 전송할 수 있다. 여기서 라우팅 메트릭이 무엇인지에 따라 전송경로가 다르게 결정된다. 예를 들어 네트워크에 혼잡이 발생하

지 않은 경우에는 홉 수(hop count)가 라우팅 메트릭이 되며, 결국 홉 수가 가장 짧은  $f_3$ 가 라우팅 경로로 선정된다. 그러나 라우팅 메트릭이 노드의 에너지 수준이라면 BS에 가장 근접하여 에너지 수확 기회가 가장 높아지는  $f_1$ 으로 결정된다. 네트워크 혼잡이 발생한 경우라면 각 경로를 구성하는 링크의 간섭 수준에 따라 결정되기 때문에  $f_1$ 이나  $f_3$ 가 아닐 수도 있다. 따라서 제안된 라우팅 프로토콜은 다수의 전송 경로 후보들 중에 종단간 지연시간이 가장 짧으면서 네트워크 용량을 극대화할 수 있는 경로를 선정하도록 한다.

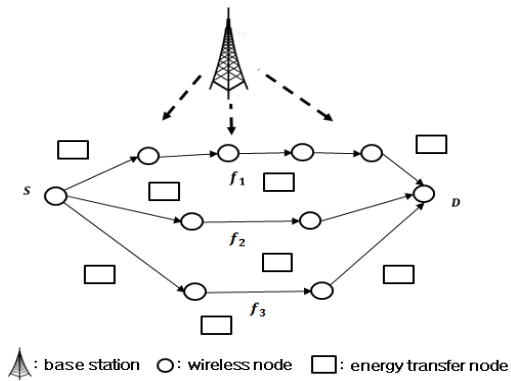


그림 1. 다중 홉 RF-EHN 구조

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구를 기술하고, 3장에서는 시스템 모델과 라우팅 메트릭을 제시한다. 4장에서는 네트워크 간섭 모델과 간섭 인지 기반 에너지 효율적 라우팅 기법을 기술한다. 5장에서는 제안된 기법에 대한 성능평가를 설명하고 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

## II. 관련 연구

에너지 제약적인 무선 네트워크에서 에너지 효율성 문제는 매우 중요하다. 이에 따라 최근에는 RF 신호를 이용한 에너지 수확 기법을 개발하여 에너지 제약적인 협조 중계 네트워크 분야에 활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 논문 [12]는 다수의 발신자-목적지

쌍들이 존재할 때 이것들 간의 간섭 채널을 고려한 최적의 SWIPT(simultaneous wireless information and power transfer) 기법을 제시한 바 있다. 이 논문에서는 게임이론을 사용하여 중계 노드들이 PS비(power-splitting ratio)에 대한 프로파일을 유도하도록 하였으며, 모든 링크의 sum-rate를 통해 네트워크의 전체 성능을 결정하도록 하는 기준을 제시하였다. 논문 [13]은 간섭신호를 고려한 중계 프로토콜을 제안하였으며, 지연에 민감한 전송 모드에서 아웃티지 확률과 처리율에 대한 상충관계를 분석하고 그 분석 결과를 통해 에너지 수확율과 전송률에 대한 성능분석을 수행하였다.

무선 통신 네트워크에서 라우팅 프로토콜을 통해 종단간 전송 경로를 결정할 때에는 라우팅 메트릭의 역할이 매우 중요하다. 논문 [14]는 다중 홉 무선 네트워크의 간섭문제를 해결하기 위한 방안으로 링크 충돌 그래프를 이용하여 간섭을 회피할 수 있는 최대 독립 집합(clique) 생성 기법과 최적의 전송 시간을 산출할 수 있는 당파(clique) 기반의 전송 기법을 제시하였다. 그러나 이 기법은 전체 네트워크 링크에 대한 최신의 상태 정보를 정확히 유지해야 하는 어려움이 있으며, 네트워크 상태가 역동적으로 변하는 실제 상황에서는 빈번한 당파 재구성에 따른 계산 비용 및 복잡성 증가라는 문제가 발생한다.

논문 [11]에서는 다중-라디오 무선 메시 네트워크에서 큐잉 지연을 고려한 부하 균형(load balancing), 종단간 지연시간 최소화를 위한 WEED(weighted end to end delay) 라우팅 메트릭 및 라우팅 프로토콜을 제시하고 다중-라디오 다중-채널 환경에서 흐름간 및 흐름내 간섭과 공간/채널 다이버시티가 미치는 영향을 분석하였다. 그러나 여기에서 제시된 다중 라디오 채널 할당 기법은 복잡도가 매우 높아 실제 구현이 어렵고 무선 네트워크 환경에서의 에너지 소비 최소화를 고려하지 않고 있기 때문에 에너지 제약적인 네트워크의 수명을 크게 단축시키는 문제가 있다.

논문 [15]는 다중 홉 무선 네트워크에서 종단간 지연 시간을 예측하는 ECFD(expect cooperative forwarding delay) 라우팅 메트릭 및 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 이 기법은 중계 노드를 통한 협조적 전송 방식

을 사용할 때 큐잉 지연과 백오프 지연을 고려한 전송 경로를 결정하여 종단간 지연시간을 최소화하는데 초점을 두고 있다. 그러나 이 기법은 상호 채널 간섭으로 발생된 간섭 지연을 고려하지 않고 있을 뿐만 아니라 에너지 하베스팅 기술도 적용하지 않고 있다.

논문 [16]은 무선 센서 네트워크에서 에너지 하베스팅 기술을 적용하여 네트워크 수명을 연장할 수 있도록 하는 충전 인지 기반의 라우팅 알고리즘을 제안하였다. 이 기법에서는 충전시간과 전송시간 간의 상충조건에 대해 처리량의 최대화와 네트워크 수명의 극대화를 모두 만족시키는 최적화 프레임워크를 제시하였다. 그러나 네트워크 혼잡이 증가되거나 채널간섭이 발생하는 환경에서는 충전 시간의 임의성 때문에 종단간 지연이 증가되는 문제가 발생한다.

지금까지 언급한 바와 같이 기존에 제시된 기법들이 지닌 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 에너지 하베스팅 무선 네트워크에서 지연에 민감한 데이터를 효율적으로 전송하기 위한 요구되는 종단간 지연 시간 최소화를 위하여 상호 채널 간섭, 큐잉 지연, 에너지 수확 등을 종합적으로 고려한 새로운 라우팅 매트릭과 라우팅 기법을 제안한다.

### III. 시스템 모델

본 장에서는 단일 및 다중 홉 에너지 하베스팅 통신 시나리오들에 대하여 기술한다.

#### 1. 단일 홉 에너지 하베스팅 통신 시나리오

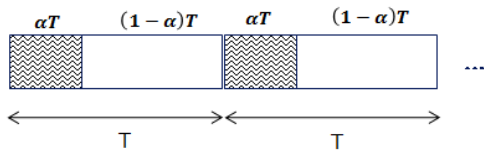


그림 2. Harvest-then-transmit 프로토콜

[그림 2]는 송신 노드와 수신 노드가 에너지 수확과 데이터 전송을 위해 전송 블록 주기( $T$ ) 단위로 통신하

는 harvest-then-transmit 프로토콜을 나타낸 것이다 [17]. 여기서 전송 블록 주기는 채널 상태를 일정하게 유지하는 시간 슬롯의 개수이다. 송신 노드는 고정된 전력원이 없으며 주변 RF 신호로부터 기회적으로 에너지를 수확하고 배타적으로 데이터를 전송한다.  $[0, \alpha T]$  구간에서는 에너지를 수확하고 저장하는 수확 모드 (energy harvesting mode: EH mode)로 동작하고  $[\alpha T, T]$  구간에서는 데이터 패킷을 전송하는 데이터 전송 모드(data transmission mode: DT mode)로 동작한다.

송신 노드가 에너지 큐의 저장된 에너지 패킷 수에 해당하는 데이터 패킷을 한 번에 전송한다고 가정할 때 첫 번째 슬롯에서  $t_i = \alpha T_i$  슬롯 시간 동안 수식 (1)과 같이  $R$  [bits/sec/Hz]의 속도로 데이터를 전송할 수 있다[18].

$$R = (1 - \alpha) \log_2 \left( 1 - \frac{\lambda_e \alpha h}{(1 - \alpha) N} \right) \quad (1)$$

$\lambda_e$ 는 에너지 수확률(energy harvesting rate, [J/s]) 또는 에너지 도착률(energy arrival rate)을 나타내고  $h$ 는 채널 이득이며,  $N$ 은 잡음전력을 나타낸다. 에너지 수확비( $\alpha$ )는  $0 \leq \alpha \leq 1$ 의 범위를 가진다. 만약  $\alpha = 0$ 이면 전체  $T$  동안 데이터를 전송하고 반면에  $\alpha = 1$ 이면 에너지만을 수확한다.

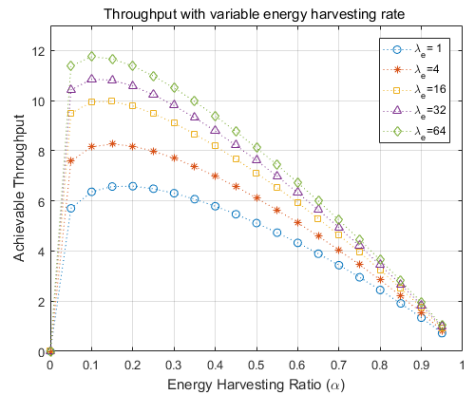


그림 3. 에너지 수확비 변동에 대한 평균 데이터 처리율

[그림 3]은 RF-EHN에서 에너지 수확률이 일정하지 않을 때 에너지 수확비에 대한 데이터 처리율을 나타낸 것이다. 여기서 알 수 있듯이 에너지 수확률이 증가하면 에너지 수확 구간이 감소되어 데이터 패킷의 패킷 전송 기회가 높아지며, 반대로 에너지 수확률이 감소되면 에너지 수확 구간은 증가됨에 따라 패킷 전송 기회가 낮아진다. 특히 에너지 수확 구간이 증가하면 데이터 전송 기회가 감소되어 데이터 큐에서 대기 중인 패킷의 전송 서비스 시간이 증가된다. 이처럼 단일-홉 전송의 경우에 에너지 수확비의 증가는 전송 경로의 종단간 지연시간(end to end delay)을 증가시키는 원인이 된다. 본 논문에서는 단일 큐잉 모델로부터 지연 시간 분석하고 이를 바탕으로 종단간 경로의 패킷 전달 시간을 예측하도록 확장한다.

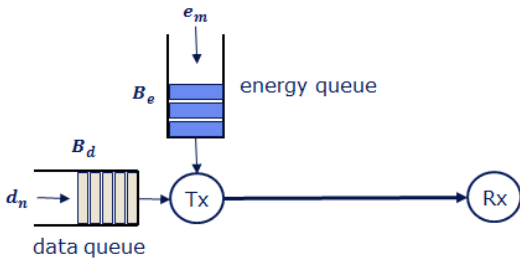


그림 4. 단일 홉 전송 분석을 단일 큐잉 모델

[그림 4]는 단일 홉 전송에서 패킷 지연 분석을 위한 단일 큐잉 지연 모델을 나타낸 것이다[19]. 송·수신 노드 간의 링크( $s$ )의 패킷 지연 시간( $D_s$ : 서비스 시간)은 패킷 전송 확률이 불확실한 채널 접근성을 갖기 때문에 확률적 특성을 따른다고 가정한다. 또한, 데이터 큐(data queue)는 최대  $B_d$  크기의 데이터 패킷을 저장할 수 있고 에너지 큐(energy queue)는 최대  $B_e$  크기의 에너지 패킷을 저장할 수 있다고 가정한다. 데이터 큐나 에너지 큐가 full 상태일 때 데이터 패킷이나 에너지 패킷이 도착하면 두 패킷 모두 손실된다. 데이터 큐에 도착한 패킷이 즉시 전송될 수 있는 조건은 에너지 큐에 최소 하나의 에너지 패킷이 저장되어 있거나, 대기 중인 데이터 패킷들이 모두 전송되어 해당 패킷이 전송

기회를 얻는 경우에 국한된다. 이와 같은 두 가지 경우가 아니라면 도착된 데이터 패킷은 에너지 패킷이 할당될 때까지 대기상태에 존재한다. 데이터 패킷의 지연 시간은 데이터 패킷이 데이터 큐에 도착해서 에너지 패킷을 할당받아 전송을 완료하는 시간이다. 즉  $D_s = D_q + D_t$ . 여기서  $D_q$ 은 데이터 큐에 대기하는 큐잉 지연 시간(queueing delay)이고  $D_t$ 는 데이터 패킷이 통신 채널을 통해 전송되어 수신 노드에서 도착이 완료되는 시간(transmission delay)이다.

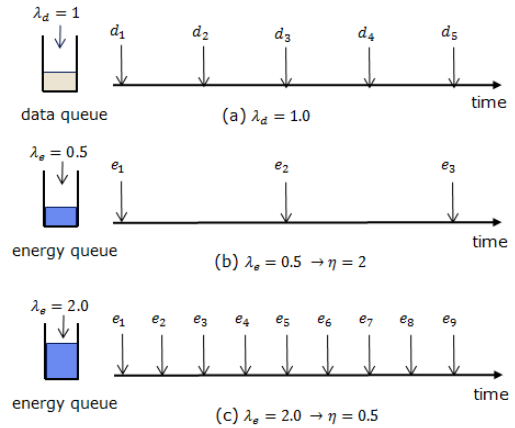


그림 5. 에너지 및 데이터 패킷 도착 큐잉 지연 분석 사례

[그림 5]는 데이터 패킷 도착률( $\lambda_d$ )과 에너지 패킷 도착률( $\lambda_e$ )의 차이가 패킷 지연 시간에 미치는 영향을 보여준다. 데이터 패킷 도착률과 에너지 패킷 도착률 간의 차이를 에너지 효율비(energy efficiency ratio: $\eta$ )로 정의한다. 즉  $\eta = \lambda_d / \lambda_e$ .  $d_n$ 는  $n$ 번째 데이터 패킷의 도착을 나타내고  $e_m$ 는  $m$ 번째 에너지 패킷의 도착을 나타낸다. 데이터 패킷이  $\lambda_d = 1$ 의 속도로 데이터 큐에 도착한다고 할 때, [그림 5](b)는 에너지 패킷이  $\lambda_e = 0.5$ 의 속도로 도착하여 에너지 효율비가  $\eta = 2$ 가 되고 [그림 5](c)는 에너지 패킷이  $\lambda_e = 2$ 의 속도로 도착하여  $\eta = 0.5$ 가 된다는 것을 보여준다. [그림 5](c)와 같이  $\eta > 1$ 면 큐잉 지연 시간이  $\eta$ 의 배수로 증가한다. 이와 반대로  $\eta < 1$ 이면 큐잉 지연 시간은 증가되지

않지만 패킷 전송 기회가 줄어들게 되어 결과적으로 패킷 전송 지연이 증가된다. [그림 6]은 단일 큐잉 모델에서 에너지 효율비를 기반으로 한 단일 홉 패킷 지연 시간을 계산하는 알고리즘이다.

A method of packet delay estimation based on $\eta$ for point-to-point link in single queuing model
Input: - $\lambda_e, \lambda_d, B_d, B_e, \alpha$ - $Q$ : data queue level - $T$ : transmission block period - $L$ : packet size - $R$ : transmission rate Output: - $D_s$ : a single hop packet delay time
$D_t = L/R$ ; FOR $T$ duration (transmission block time) IF $\lambda_d > \lambda_e$ THEN $D_q = D_q = \eta(Q+1)\alpha T$ ; IF $D_q == \text{full}$ THEN Increase $\alpha$ for preventing buffer overflow ENDIF ELSE IF $\lambda_d \leq \lambda_e$ THEN $D_q = (Q+1)\alpha T$ IF $D_q == \text{full}$ THEN decrease $\alpha$ for raising transmission probability ENDIF ENDIF $D_s = D_q + D_t$ ENDFOR

그림 6. 단일 홉 패킷 지연 시간 추정 기법

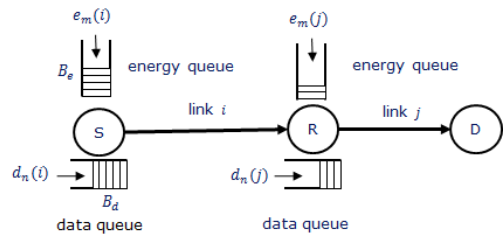
패킷 지연 시간 추정 기법은 단일 큐잉 모델에서 에너지 수확률이 확률적 특성을 가질 때 링크  $s$ 에서 발생되는 패킷 지연 시간을 추정하는 알고리즘이다. 이때, 데이터 패킷은 에너지 수확의 결과로 에너지 패킷이 에너지 큐에 도착할 때까지 데이터 큐에서 대기하여야 하는 전송지연이 발생한다. 이러한 큐잉 지연 시간을 에너지 효율성 인지 큐잉 지연 시간(energy efficiency aware queuing delay:  $ED_q$ )으로 정의한다.

## 2. 다중 홉 에너지 하베스팅 통신 네트워크 시나리오

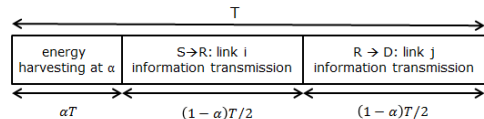
다중 홉 에너지 하베스팅 무선 네트워크는 네트워크 확장성과 에너지 효율성을 향상시키기 위해 협조적 중

계 기법과 에너지 하베스팅 기법을 활용하고 있다 [20][21]. 본 절에서는 협조적 중계 기법에서 사용하는 최적의 수확비( $\alpha$ )와 처리율( $\Phi$ )에 관해 기술하고 에너지 효율비( $\eta$ )가 종단간 지연 시간(패킷 지연 시간)에 미치는 영향에 대하여 설명한다.

[그림 7]은 발신지 노드와 목적지 노드 사이에 중계 노드가 존재하는 경우, 협조적 중계 과정을 설명하기 위하여 2-홉 큐잉 모델과 TS 중계 프로토콜(time switching relaying protocol)을 보인 것이다. [그림 7](a)에서 보인 것과 같이 발신지 노드와 중계 노드는 각각 에너지 큐와 데이터 큐에 도착하는 에너지 패킷과 데이터 패킷을 저장하고 전송한다. 링크  $i$ 와 링크  $j$ 에 대한 데이터 패킷 도착률과 에너지 패킷 도착률이 각각  $e_m(i) \neq e_m(j), d_n(i) \neq d_n(j)$  이라면 각각의 큐 수준은 이와 마찬가지로  $B_d(i) \neq B_d(j)$ 과  $B_e(i) \neq B_e(j)$ 로 정의될 수 있다.



(a) 에너지 하베스팅 인지 협조적 중계 과정



(b) 시간 스위칭 중계 프로토콜

그림 7. 에너지 하베스팅 기반 협조적 중계 기법

[그림 7](b)는 TSR 프로토콜의 슬롯 구조를 나타낸 것이다. 첫 번째 단계에서는 중계 노드가  $\alpha T$  시간 동안 에너지를 수확한다. 두 번째 단계에서는 중계 노드가  $(1-\alpha)T/2$  시간 동안 발신지 노드로부터 전송된 데이터를 수신하고 마지막으로 세 번째 단계에서는 중계 노드가  $(1-\alpha)T/2$  시간 동안 목적지 노드로 데이터

패킷을 전송한다. 각 노드는 시간슬롯 단위로 EH 모드와 DT 모드로 운영된다. 에너지 수확비( $\alpha$ )는 에너지 수확량을 결정하는 중요한 인자로 네트워크 성능에 영향을 미친다. 링크  $i$ 의 처리율 최대화를 위한 최적해  $\alpha^*$ 는 수식 (2)로부터 구할 수 있다. 수식 (3)은 아웃티지 확률과 단일-홉 처리율인 수식 (1)로부터 종단간 처리율( $\Phi$ )을 계산한다[4]. 여기서  $P_{out}$ 은 아웃티지 확률(outage probability)이고  $R$ 은 최대 처리율이다.

$$\alpha^* = \underset{\alpha}{\operatorname{argmax}} \left\{ \frac{(1-\alpha)(1-P_{out})}{2} \right\} \quad (2)$$

$$\Phi = \frac{R(1-\alpha^*)(1-P_{out})}{2} \quad (3)$$

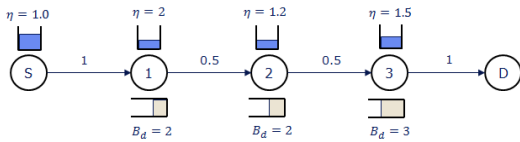


그림 8. 에너지 수확비 인지 종단간 지연 시간 분석

[그림 8]은 에너지 수확이 종단간 지연시간에 미치는 영향을 분석하기 위한 사례이다. 예를 들어 각 링크의 대역폭이 11Mbps이고 패킷의 크기가 1100bytes라고 할 때, 각 링크에서 패킷의 전송 지연 시간( $D_t$ )는 0.8 ms가 된다. 링크에 표시된 숫자는 ETX(expected transmission count)로서 전송 실패 확률을 나타낸다. 여기서 에너지가 수확되지 않은 경우에는 종단간 지연 시간(end to end delay:  $D_{EE}$ )는  $0.8+4.8+4.8+3.2=13.2$  ms이다. 에너지가 수확된 경우에 종단간 지연 시간은  $0.8+9.6+5.76+4.8=20.96$ ms가 된다. 에너지 수확에 의해 발생하는 지연시간은 그렇지 않은 경우보다 약 1.6배 증가한다. 본 논문에서는 에너지 수확으로 인해 발생하는 지연 시간을 고려한 새로운 라우팅 메트릭을 제안하고 이것을 이용하여 종단간 지연시간을 최소화하도록 한다.

### 3. 간섭 인지 기반 에너지 효율적인 라우팅 메트릭

기존 다중-홉 무선 네트워크에서 발신지 노드와 목

적지 노드간의 전송 경로는 기본적으로 각 홉의 패킷 전송 시간( $D_t$ )이 가장 짧은 링크들로 구성된 경로가 선정된다.

다중-홉 무선 통신환경에서 발생하는 상호 채널 간섭 문제는 전파 환경의 불확실성과 역동성으로 인해 아직도 만족할 만큼 충분히 해결되지 못하고 있다[7]. 본 절에서는 지연시간에 민감한 데이터 전송을 위해 지연 시간을 최소화하고 네트워크 용량을 최대화하는 최적에 근접한 새로운 종단간 라우팅 메트릭을 제안한다.

단일 홉 시나리오에서 설명한 바와 같이 단일 링크  $i$ 의 데이터 패킷 지연 시간(packet delay time:  $D_i$ )은 수식 (4)와 같이 전송 지연 시간( $D_t$ )과 큐잉 지연 시간( $D_q$ )으로 구성된다.

$$D_i = D_q + D_t \quad (4)$$

링크  $i$ 를 노드  $n_i$ 와 노드  $n_{i+1}$ 간의 링크로 정의할 때,  $D_t$ 는 송신 노드가 패킷을 수신 노드에 전달하기 위한 MAC 계층의 패킷 서비스 시간으로써 서비스 시작 시점부터 성공적인 전송의 완료시점 또는 재전송 한계 초과로 패킷이 폐기되는 시점의 간의 시간구간이다.  $n_i$  노드에 새로운 패킷이 도착한 시점에서 데이터 큐에  $Q_i$ 개의 패킷이 대기 중이면 패킷 서비스 시간은 수식 (5)와 같이 계산된다.

$$D_i = (Q_i + 1)D_t \quad (5)$$

여기서  $D_t = ETX_i \times S/B_i$ 는  $ETT$ [22][23]와 같다.  $ETX$ 는 성공적인 패킷 전송을 위한 전송 횟수의 기댓값이고  $S$ 는 패킷 크기,  $B_i$ 는 링크  $i$ 의 대역폭이다. 도착 패킷이 큐에서 대기하는 시간은  $D_q = Q_i^* D_t$ 로 계산된다. 따라서 종단간 라우팅 경로가  $H$  개의 홉으로 구성된다면 종단간 지연 시간( $D_{EE}$ )은 수식 (6)과 같다.

$$D_{EE} = \sum_{i=1}^H D_i \quad (6)$$

수식 (6)은 상호채널간섭(co-channel interference)을 고려하지 않고 hop-by-hop 방식으로 데이터 패킷을 전

달할 때 발생하는 중단간 지연 시간의 계산에 사용된다. 이것은 중단간 라우팅 메트릭의 일종이다. 채널 간섭을 고려할 때, 어떤 링크가 데이터를 전송할 경우 인접한 링크는 MAC 프로토콜에 의해 전송이 중단(freezing)된다. 이와 같은 전송 중단은 흐름내 전송(intra-flow transmission)과 흐름간 전송(inter-flow transmission)을 발생시킨다.

다중 홉 전송 시나리오에서 상호 채널 간섭 문제로 네트워크 링크들 간에 간섭이 발생된다면 네트워크 성능이 급격히 저하된다. 논문 [24]에서는 수식 (7)과 같이 물리적 간섭 모델 기반의 간섭비(interference ratio:  $IR$ )를 정의하고 있다. 물리적 간섭 모델은 수신 노드의  $SINR$ 이 임계치( $\Gamma$ )보다 클 때 패킷 전송이 성공한 것으로 판단한다.

$$IR_i = \frac{SINR_i}{SNR_i} \quad (7)$$

수식 (8)은 링크  $i$ 의 전송 지연 시간( $D_i$ )에 간섭비를 가중치로 적용하여 간섭이 패킷 지연 시간에 미치는 영향을 반영한다.  $IR_i$ 이 1이면 해당 링크에 간섭이 발생되지 않아  $D_i$ 가 패킷 전송 시간이 되고  $IR_i$ 이 0이면 상호 채널 간섭에 의해 채널차단(channel freezing) 현상이 발생되어 데이터 전송이 불가능하다.

$$IA_i = D_i / IR_i \quad (8)$$

앞서 제시된 바와 같이 수식 (5)는 데이터 큐에 대기 중인 패킷을 고려한 링크  $i$ 에 대한 큐잉 지연 성분을 나타내고 수식 (8)은 채널간섭을 고려한 간섭 지연 성분을 나타낸다. 수식 (9)는 큐잉 지연 성분과 간섭 지연 성분을 모두 포함한 링크  $i$ 의 패킷 지연 시간을 나타낸다.

$$\begin{aligned} D_i &= (Q+1)IA_i \\ D_i &= D_q + IA_i \end{aligned} \quad (9)$$

에너지 하베스팅 기술을 사용할 경우, 각 노드에서의 에너지 도착은 임의적 형태를 따르기 때문에 데이터 패킷에 대한 전송이 지연되는 문제가 존재한다. 에너지

충전이 큐잉 지연에 미치는 영향에 대한 지표로서 에너지 효율비( $\eta$ )를 사용할 경우, 만약 링크  $i$ 의 노드  $n_i$ 가  $\eta > 1$ 라면 즉, 에너지 패킷의 도착률( $\lambda_e$ )이 데이터 패킷의 도착률( $\lambda_d$ )보다 낮으면 대기 중인 데이터 패킷은 에너지 패킷이 도착할 때까지 전송이 지연된다.

에너지 효율비를 고려한 큐잉 지연 시간( $ED_i$ )은 에너지 효율비( $\eta$ )를 에너지 충전에 필요한 지연 성분을 나타내는 가중치로 사용하고  $ED_i = \eta^* D_q$ 로 표현된다. 수식 (10)은 간섭 지연 성분과 에너지 충전 지연 성분을 포함한 패킷 지연 시간을 나타낸다.

$$D_i = ED_i + IA_i \quad (10)$$

결과적으로 에너지 효율적인 간섭 인지 중단간 라우팅 메트릭(EEIA routing metric)은 전송 경로를 구성하는 링크들의 에너지 효율비 인지 큐잉 지연과 간섭 인지 전송 지연시간의 합을 가중 이동 평균으로 계산될 수 있다. 수식 (11)은  $H$  홉을 갖는 전송경로( $p$ )에 대한 중단간 라우팅 메트릭이고,  $\beta$ 는  $0 \leq \beta \leq 1$  범위의 상수이다.

$$EEIA(p) = (1-\beta) \sum_{i=1}^H ED_i + \beta \max_i (IA_i) \quad (11)$$

## VI. 간섭 인지 기반 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜

### 1. 네트워크 간섭 모델과 라우팅 메트릭

에너지 하베스팅 다중 홉 무선 네트워크에서 무선 노드들은 네트워크 영역에 정적으로 배치되어 있다고 가정한다. 네트워크 노드 집합을  $V$ 라고 하고 링크 집합을  $L$ 이라고 할 때  $G=(V,L)$ 은 주어진 네트워크를 정의한다. 집합  $L$ 의 원소 링크  $l_i$ 는 송신 노드( $u_i$ )에서 수신 노드( $v_i$ )로 최소 데이터 전송률로 데이터를 전송하는 링크를 의미한다.  $r_i$ 는 간섭이 없는 경우 해당 링크에 대한 데이터 전송률을 의미하며,  $r_i = W_b R_i$ 로 계산된다.  $W_b$ 는 링크의 대역폭이고  $R_i$ 는 처리율



(bps/Hz)이다. 집합  $F$ 는 네트워크에 존재하는 흐름들 ( $f_k$ )의 집합을 나타낸다. 각 흐름은 발신지 노드와 목적지 노드의 쌍으로 구성된다. 즉,  $F = \{f_k(s_k, t_k) : s_k, t_k \in V\}$  이다. 흐름  $f_k$ 는 발신지 노드  $s_k$ 에서 목적지 노드  $t_k$ 로 데이터 패킷을 전송할 전송 경로를 결정한다. 각 흐름에 대한 중단간 처리율은 집합  $F$ 에 포함된 각 흐름들에 대하여  $R(F)$  벡터로 표현하며, 각 흐름( $f_k$ )의 처리율은  $R[f_k]$ 로 표현한다. 네트워크 간섭 모델은 상호 채널 간섭을 흐름내 간섭(intra-flow interference)과 흐름간 간섭(inter-flow interference)을 측정하는 수치적인 모델로 물리적 간섭모델 ( $SINR \geq I$ )을 이용한다[25].

이와 같은 네트워크 간섭 모델에서는 다중 홉 전송을 위한 라우팅 경로를 확립하기 전에 각 전력 송신 노드는 일정 시간 동안에 네트워크 영역에 전력을 방사한다. 임의의 에너지 하베스팅 무선 노드( $j$ )는 방사된 RF 신호로부터  $\tau_j = \alpha T = 1/\lambda_e$  시간동안 에너지를 수확한다. 데이터 패킷을 생성한 발신지 노드( $s_k$ )는 라우팅 경로 탐색을 위해 목적지 노드( $t_k$ )로 RREQ 패킷을 생성하고 브로드캐스트 한다. 각 노드들은 자신의 충전 시간과 간섭량을 포함하는 튜플 정보  $\langle ED_j(\psi_k), IA_j(\psi_k) \rangle$ 를 생성한다. 발신지 노드가 경로 탐색을 시작하면 RREQ 패킷을 수신한 중간 노드들은 자신의 튜플 정보를 포함시켜 목적지 노드로 RREQ를 다시 브로드캐스트한다. 후보 경로  $\psi_k$ 에 포함된 각 노드는 누적 큐잉 지연시간을 수식 (11)로 계산한다. 또한 후보 경로  $\psi_k$ 는 각 링크 중에 최대 간섭을 수식 (12)로부터 결정한다.

$$EH(\psi_k) = EH(\psi_k) + \alpha\eta(Q+1)T \quad (11)$$

$$= EH(\psi_k) + \tau_j \times ED(\psi_k)$$

$$IA(\psi_k) = \max(IA(\psi_k), IA_j(\psi_k)) \quad (12)$$

목적지 노드는 수신된 각 RREQ 패킷들에 포함된 튜플 정보를 통해 수식 (13)을 계산하고 전송 경로( $\Psi$ )는 수식 (14)에 의해 결정된다.  $HC(\psi_k)$ 는 후보 경로의 홉 수(hop count)를 나타낸다. 목적지 노드는 전송 경로 정

보( $\Psi$ )를 포함한 RREP 패킷을 발신지 노드로 전달하여 라우팅 경로를 확립한다.

$$EEIA(\psi_k) = \frac{[\beta IA(\psi_k) + (1 - \beta)EH(\psi_k)]}{HC(\psi_k)}, \forall k \quad (13)$$

$$\Psi = \min\{EEIA(\psi_k), \forall k\} \quad (14)$$

제안된 EEIA 기반의 중단간 라우팅 메트릭에서 전송 지연 성분으로는 패킷 손실률( $p_i$ )에 따른 재전송 지연과 채널 간섭에 의한 지연을 포함하고, 큐잉 지연 성분으로는 데이터 큐에서 발생하는 지연과 에너지 효율비에 의한 지연을 포함한다.

## 2. EEIA 기반 라우팅 프로토콜

제안된 EEIA 기반 라우팅 프로토콜은 초기화 단계, 경로 발견 단계, 경로 관리 단계로 구성된다. 초기화 단계에서는 일정 시간 동안 에너지를 수확하고 수확 에너지를 이용하여 이웃 노드에 관한 정보를 수집한다. 이웃 노드에 관한 정보를 수집하기 위해 각 노드들은 HELLO 패킷을 브로드캐스트하여 이웃 노드들에 대한 링크 정보를 생성한다. 또한 HELLO 패킷은 이웃 노드들에 대한 링크의 ETX와 간섭수준을 측정하는데 이용된다.

경로 발견 단계는 데이터 패킷을 생성한 발신지 노드가 목적지 노드로 패킷을 전송하는 경로를 확립하는 과정이다. 발신지 노드는 RREQ ID와 큐잉 지연, 간섭 지연 등에 관한 정보를 포함한 RREQ 패킷을 브로드캐스트 한다. RREQ 패킷을 수신한 중간 노드는 RREQ ID를 확인하고 발신지 노드에 관한 정보가 자신의 라우팅 테이블 엔트리에 없다면 등록하고 자신의 튜플 정보를 포함한 RREQ 패킷을 목적지 방향으로 브로드캐스트 한다. 이와 같은 동작은 목적지 노드가 발견될 때까지 계속 수행된다. 목적지 노드에서는 수신된 RREQ 패킷들 통해 EEIA 라우팅 메트릭에 의해 최종 전송 경로( $\Psi$ )를 선정하고, 이 정보를 RREP 패킷으로 발신지 노드에 전달한다.

경로 관리 단계는 각 노드가 이웃 노드 정보를 관리

하고 전송 경로에 참여하고 있음을 알리기 위해 HELLO 메시지를 주기적으로 브로드캐스트한다. 만약 해당 경로에 포함된 어떤 노드의 HELLO 메시지를 다른 활성 노드들에게 알려지지 않으면 해당 노드에 대한 링크는 파손된 것으로 판단하고 활성 노드들은 RERR 패킷을 브로드캐스트하고 이웃 노드에 관한 정보를 갱신한다.

EEIA based Routing Protocol
Input: - $G = \{V, L\}$ - $F = \{f_k = (s_k, t_k) : s_k, t_k \in V, k \in L, s_k \neq t_k\}$ Output: - a best path ( $\Psi$ )
Phase 1: initialization phase ETs broadcast power over the network during $T_{setup}$ . $v_j$ harvests power from RF signal and estimates $\tau_j$ . $v_j$ broadcasts HELLO packet for discovering its neighbor nodes  Phase 2: route discovery phase IF source node( $s_k$ ) and relay node( $r_j$ ) have data to send they broadcast RREQ with $\langle EH(\psi), IA(\psi) \rangle$ toward $t_k$ IF $r_j$ receives RREQ packet updates $EH(\psi_k) = EH(\psi_k) + \alpha\eta(Q+1)T$ updates $IA(\psi_k) = \max(IA(\psi_k), IA_j(\psi_k))$ updates $\langle EH_k(\psi), IA_k(\psi) \rangle$ and rebroadcast RREQ with it IF destination node( $t_k$ ) receives RREQ packet from $s_k$ $t_k$ estimates $EEIA(\psi_k), \forall k$ with RREQs. $\Psi = \min\{EEIA(\psi_k), \forall k\}$ $t_k$ sends RREP packet with $\Psi$ back to the source node $s_k$ node start transferring data to $t_k$ node  Phase 3: route maintenance phase Nodes in the active route broadcast HELLO message to neighboring nodes They update $(\tau_j, p_{loss}, \eta)$ and notify link breakage status to neighboring nodes

그림 9. EEIA 기반 라우팅 알고리즘

## V. 시뮬레이션 및 성능 평가

본 장에서는 다중 홉 RF-EHN에서 EEIA 기반 라우팅 프로토콜의 성능 평가를 수행한다. 제안된 라우팅 프로토콜의 성능 평가를 위해 AODV[26], OLSR[27]과 같은 기존 라우팅 기법들과의 성능 비교를 수행하고 제안된 기법의 우수성을 검증한다.

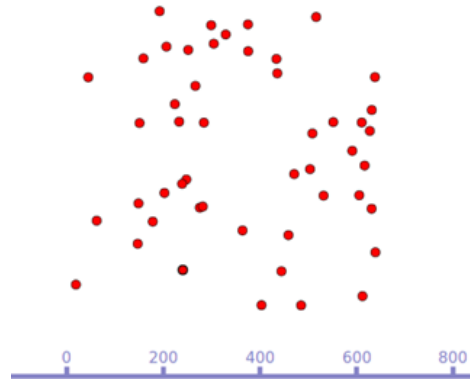


그림 10. 시뮬레이션 토폴로지

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Values
Simulation area	640m x 640m
Number of nodes	49
Placement	random placement
Radio range	100m
Transmission bandwidth	1Mbps
Transmission rate	512 kbps
Number of flows	variable 2-12
Traffic type	UDP
Propagation loss model	Friss propagation loss model
Propagation delay model	constant speed model
Packet size	1024 bytes
Routing protocol	AODV, OLSR, Proposed EEIA
Simulation time	250 sec
Scenario replications	20
Transmitter current	17.4 mA
Receiver current	19.7 mA
Circuit voltage	3.3 V
Initial energy	5 J

### 1. 시뮬레이션 환경

시뮬레이션 시나리오는 [그림 10]과 같이 640m x 640m 시뮬레이션 영역에 49개의 노드가 임의로 배치된 랜덤 토폴로지를 가정한다. 네트워크 시뮬레이션을 수행하기 위한 ns-3를 사용한다[28]. ns-3 시뮬레이터에서 사용된 시뮬레이션 파라미터는 [표 1]과 같다. 각 노드의 전송 범위는 100m로 설정한다. 성능 평가를 위해 흐름의 개수가 2개에서 12개로 단계적으로 증가시켰을 때 기존의 라우팅 기법들과 성능 평가 기준을 비교한다.

## 2. 성능 평가 기준

제안된 라우팅 프로토콜의 성능 평가를 위해 다음과 같은 평가 기준을 사용한다.

평균 처리율 (average throughput): 목적지 노드에서 수신된 패킷들의 비트 수를 첫 번째 패킷과 마지막 패킷의 도착 시간 차이로 나눈 것으로 정의한다.

평균 패킷 전달비(average packet delivery ratio: average PDR): 목적지 노드에 의해 수신된 패킷의 수와 발신지 노드에서 전송된 패킷의 수의 비율로 정의한다.

평균 종단간 지연시간(average end to end delay): 발신지 노드가 데이터 패킷을 전송한 시점부터 목적지 노드에 도착한 시점 간의 차이로 정의한다.

총 에너지 소비량(total consumed energy): 데이터 전달에 포함된 노드들에 의해 소비된 총 에너지로 정의한다.

## 3. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 절에서는 네 가지의 성능 평가 기준에 따라 한 시뮬레이션 결과를 분석한다.

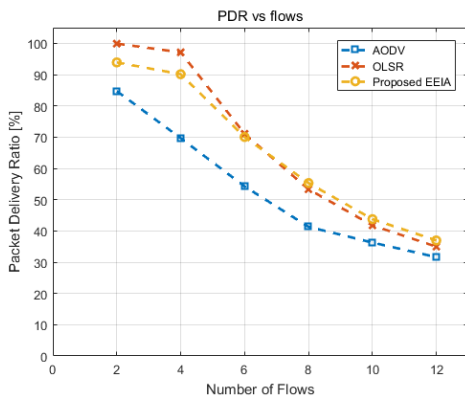


그림 11. 흐름 수 증가에 따른 평균 패킷 전달비

[그림 11]은 흐름 수 증가에 따른 패킷 전달비(PDR)를 측정된 결과, 제안된 기법은 AODV 기법과 비교할 때 패킷 전달 성공률이 평균적으로 24% 높고 OLSR 기법과는 비슷한 수준을 보인다. 그러나 제안된 기법이 OLSR 기법과 비교해서 평균 PDR은 비슷하지만 제안

된 기법의 PDR 편차가 OLSR 기법보다 3% 정도 낮게 나타난다. 이것은 제안된 기법에서는 트래픽 증가에 따른 성능저하가 낮다는 사실을 의미한다. 즉, 제안된 기법에서는 간섭에 의한 지연과 에너지 수확으로 인한 큐잉 지연을 모두 고려하였기 때문에 패킷 충돌과 버퍼 오버플로우로 인한 패킷 손실을 감소시켜 패킷 전달율을 향상시킬 수 있다.

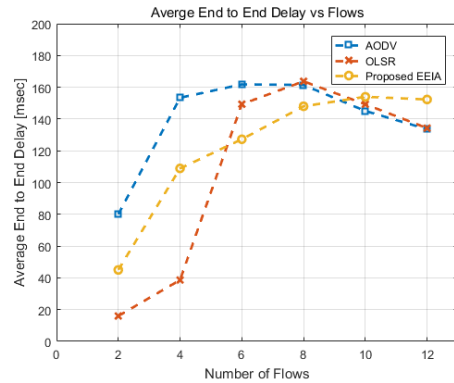


그림 12. 흐름 수 증가에 따른 평균 종단간 지연시간

[그림 12]는 흐름 수의 증가에 따른 평균 종단간 지연 시간을 보여준다. AODV 기법과 OLSR 기법의 전체 흐름을 볼 때, 평균 지연시간이 각각 139 ms와 108ms 인 반면 제안된 EEIA 기법에서는 122 ms로 나타난다. 제안된 기법에서는 AODV에 비해 17ms 정도 종단간 지연 시간이 단축되지만 OLSR 기법보다는 14ms 정도 증가된다. 그러나 각 기법의 전체 편차는 AODV가 31ms, OLSR이 64ms, EEIA이 17ms로 나타남으로써 제안된 기법이 흐름 수 증가에 따른 종단간 지연시간의 안전성이 상대적으로 높아 네트워크 확장성이 우수함을 확인할 수 있다. 흐름 수가 각각 10개와 12개인 경우 기존의 기법들은 에너지 소비량이 높아 네트워크에 참여하는 노드 수가 감소되어 전체 네트워크 성능을 저하 되는 문제가 발생한다.

[그림 13]은 흐름 수 증가에 따른 평균 처리율을 측정 한 결과를 보여준다. 제안된 기법의 평균 처리율은 AODV보다 7%가 높고 OLSR보다 3%가 높은 결과를 보인다. 즉, 제안된 기법에서는 트래픽 증가에 따른 간

섭의 영향을 고려하기 때문에 기존의 라우팅 기법들에 비해 상대적으로 처리율이 향상된다. 네트워크 흐름 수가 적을 때에는 제안된 기법과 비교해서 OLSR 기법이 일시적으로 높은 처리율을 보이지만 네트워크 흐름이 증가할수록 제안된 기법의 처리율이 안정적으로 증가 되는 것을 알 수 있다.

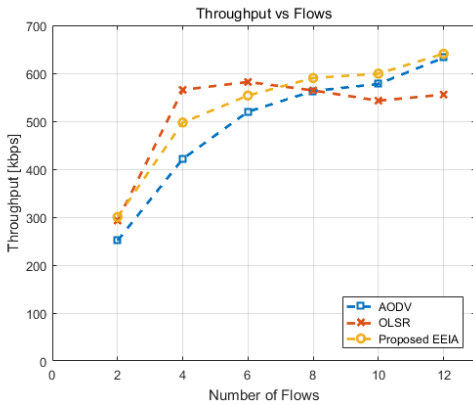


그림 13. 흐름 수 증가에 따른 평균 처리율

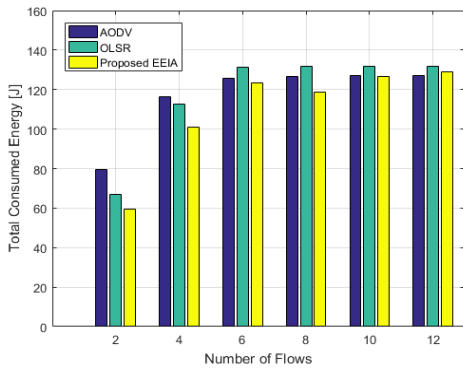


그림 14. 흐름 수 증가에 따른 총 에너지 소비량

[그림 14]는 흐름 수 증가에 따른 전체 노드들에 의해 소비된 총 에너지 소비량을 보여준다. 흐름 수가 증가하면 전송 패킷의 수의 증가하고 에너지 소비도 증가된다. 제안된 기법은 간섭과 혼잡을 회피하는 전송경로를 선정함으로써 네트워크 전체의 에너지 소비량을 절감하고 네트워크 수명을 연장할 뿐만 아니라 종단간 지연 시간을 단축시킨다.

## VI. 결론

본 논문에서는 다중 홉 RF 에너지 하베스팅 무선 네트워크에서 종단간 지연시간을 최소화하기 위하여 상호채널간섭으로 인한 지연과 에너지 수확으로 인한 큐잉 지연을 모두 고려한 간섭 인지 기반 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 특히, 제안된 기법에서는 지연에 민감한 데이터 전송을 위해 에너지 하베스팅으로 인한 지연 시간을 최소화하는 전송 경로를 선택할 수 있도록 하였으며, 상호채널간섭으로 발생하는 지연을 회피함으로써 네트워크 처리량에 대한 안정성을 향상시켜 부하균형이 유지될 수 있도록 하였다. 또한, ns-3 시뮬레이터를 통해 제안된 기법의 성능 평가를 수행하였으며, 기존의 라우팅 기법들에 비해 지연시간이 평균 36% 단축되고 처리율은 평균 50% 이상 향상됨을 보였다.

향후에는 제안된 큐잉 모델을 기반으로 부정확한 채널 상태를 갖는 지능적인 마코프 체인 모델을 설계하고 지연시간이 제약된 응용에서 QoS를 보장하는 전송 스케줄링 기법과 라우팅 기법에 대한 연구를 수행할 계획이다. 또한 네트워크 견고성이 요구되는 공공 재난 안전망에서 에너지 하베스팅 기반의 분산형 통신 최적화 프레임워크에 대한 연구를 수행하고자 한다.

## 참고 문헌

- [1] S. Ulukus, A. Yener, E. Erkip, O. Simeone, M. Zorzi, P. Grover, and K. Huang, "Energy Harvesting Wireless Communications: A Review of Recent Advances," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.33, No.3, pp.360-381, Mar. 2015.
- [2] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless Networks with RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.17, No.2, pp.757-789, Second quarter 2015.
- [3] S. Sudevalayam and P. Kulkarni, "Energy Har-

- vesting Sensor Nodes: Survey and Implications,” IEEE Communications Surveys & Tutorial, Vol.13, No.3, pp.443-461, Third quarter 2011.
- [4] H. Ju and R. Zhang, “Throughput Maximization in Wireless Powered Communication Networks,” IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol.13, No.1, pp.418-428, Jan. 2014.
- [5] Q. Yao, A. Huang, H. Shan, T. Q. S. Quek, and W. Wang, “Delay-aware Wireless Powered Communication Networks—energy Balancing and Optimization,” IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol.15, No.8, pp.5272-5286, Aug. 2016.
- [6] D. Niyato, P. wang, Y. W. Leong, and T. H. Pink, “Qos-aware Data Transmission and Wireless Energy Transfer: Performance Modeling and Optimization,” Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE WCNC’14), pp.2100-3105, Apr. 2014.
- [7] S. Kwon and N. B. Shroff, “Energy-efficient Interference-based Routing for Multi-hop Wireless Networks,” Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), Apr. 2006.
- [8] J. S. Kim, S. H. Chung, and H. S. Choi, “An Interference Aware Routing Scheme based on Channel Load for Multi-radio Multi-channel Wireless Mesh Networks,” International Journal of Computer and Communication Engineering, Vol.2, No.2, pp.272-276, May 2013.
- [9] S. S. Ikki and S. Aissa, “Multihop Wireless Relaying Systems in the Presence of Cochannel Interferences: Performance Analysis and Design Optimization,” IEEE Transactions Vehicular Technology, Vol.61, No.2, pp.566-573b, Feb. 2012.
- [10] S. Lee, L. Liu, and R. Zhang, “Collaborative Wireless Energy and Information Transfer in Interference Channel,” IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol.14, No.1, pp.545-557, Jan. 2015.
- [11] H. Li, Y. Cheng, C. Zhou, and W. Zhuang, “Routing Metric for Minimizing End to End Delay in Multi-radio Multi-channel Wireless Networks,” IEEE Transactions on Parallel and Distribution Systems, Vol.24, No.11, pp.2293-2303, Nov. 2013.
- [12] 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, No.1, pp.410-420, Jan. 2015.
- [13] L. Elmorshedy, C. Leung, and S. A. Mousavifar, “RF Energy Harvesting in DF Relay Networks in the Presence of an Interfering Signal,” Proceedings of IEEE International Conference on Communications, May. 2016.
- [14] H. Zhai and Y. Fang, “Impact of Routing Metrics on Path Capacity in Multirate and Multi-hop wireless Ad Hoc Network,” Proceedings of 14th IEEE International Conference on Network Protocols, pp.86-95, Nov. 2007.
- [15] B. Sen, L. Libman, X. Zin, and S. Jha, “An End to End Delay Metric for Multi-rate Wireless Mesh Networks with Cooperative Retransmission,” Proceedings of IEEE 13th Conference on Local Computer Networks (LCN), pp.296-299, Oct. 2013.
- [16] R. Doost, K. R. Chowdhury, and M. D. Felice, “Routing and Link Layer Protocol Design for Sensor Networks with Wireless Energy Transfer,” Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference, Dec. 2010.

- [17] S. Luo, L. Zhang, and T. J. Lim, "Optimal Save-then-transmit Protocol for Energy Harvesting Wireless Transmitters," *IEEE Transaction on Wireless Communications*, Vol.12, No.3, pp.1196-1207, Mar. 2013.
- [18] S. Yin, E. Zhang, J. Li, L. Yin, and S. Li, "Throughput Optimization for Self-powered Wireless Communications with Variable Energy Harvesting Rate," *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp.830-835, Apr. 2013.
- [19] A. Tandon and M. Motani, "Has Green Arrived? Delay Analysis for Energy Harvesting Communication Systems," *Proceedings of the Eleventh Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON)*, pp.582-590, June. 2014.
- [20] S. Atapattu, H. Jiang, J. Evans, and C. Tellambura, "Time-switching Energy Harvesting in Relay Networks," *Proceedings of IEEE International Conference on Communication (ICC)*, pp.5416-5421, Jun. 2015.
- [21] L. Limorshedy, C. Leung, and S. A. Mousavifa, "RF Energy Harvesting in DF Relay Networks in the Presence of an Interfering Signal," *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Jul. 2016.
- [22] D. S. J. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A High-throughput Path Metric for Multi-hop Wireless Routing," *Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.134-146, Sept. 2003.
- [23] R. Draves, J. Padhy, and B. Zill, "Routing in Multi-radio, Multi-hop Wireless Mesh Networks," *Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.114-128. Oct. 2004.
- [24] A. P. Subramanian, M. M. Buddhikot, and S. Miller, "Interference Aware Routing in Multi-radio Wireless Mesh Networks," *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks*, pp.55-63, Sept. 2006.
- [25] P. Santi, R. Maheshwari, G. Resta, S. Das, and D. M. Blough, "Wireless Link Scheduling under a Graded SINR Interference Model," *Proceedings of the 2nd ACM international Workshop on Foundations of Wireless Ad hoc and Sensor Networking and Computing*, pp.3-22, May 2009.
- [26] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, *Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV) Routing, RFC 3561*, Technical Report, Nokia Research Center, University of California University of Cincinnati, 2003.
- [27] T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)," *RFC 3626 (Experimental)*, 2003.
- [28] The ns-3 Network Simulator, <http://www.nsnm.org/>.

## 저 자 소 개

### 김 현 태(Hyun-Tae Kim)

정회원



- 1996년 2월 : 군산대학교 정보통신공학과(공학사)
- 1998년 6월 : 군산대학교 정보통신공학과(공학석사)
- 2006년 2월 : 군산대학교 정보통신공학과(공학박사)

- 2007년 1월 ~ 2008년 2월 : 전북대학교 박사후과정
- 2009년 3월 ~ 2010년 2월 : 군산대학교 연구교수
- 2010년 3월 ~ 현재 : 군산대학교 연구원

<관심분야> : 무선 통신 및 네트워크 시스템, 최적화 이론, 사이버 물리 시스템(CPS)

나 인 호(In-Ho Ra)

정회원



- 1988년 2월 : 울산대학교 전자계산학과 공학사(공학사)
  - 1991년 2월 : 중앙대학교 전자계산학과(공학석사)
  - 1995년 8월 : 중앙대학교 전자계산학과(공학박사)
  - 1995년 9월 ~ 현재 : 군산대학교 컴퓨터정보통신공학부 교수
- <관심분야> : 무선 센서 및 에드혹 네트워크, 텔레메트릭스 시스템, 유비쿼터스 컴퓨팅, PS-LTE