

# 원격 에너지 저장소를 가진 이동 센서 네트워크를 위한 에너지 수확 체계

## Energy Harvesting Framework for Mobile Sensor Networks with Remote Energy Stations

김 성 우\*, 이 종 민, 권 순 각  
(Seong-Woo Kim, Jong Min Lee, and Sun Gak Kwon)

**Abstract:** Energy harvesting from environment can make the energy constrained systems such as sensor networks to sustain their lifetimes. However, environmental energy is highly variable with time, location, and other factors. Unlike the existing solutions, we solved this problem by allowing the sensor nodes with mobilizer to move in search of energy and recharge from remote energy station. In this paper we present and analyze a new harvesting aware framework for mobile sensor networks with remote energy station. The framework consists of energy model, motion control system and data transfer protocol. Among them, the objective of our data transfer protocol is to route a data packet geographically towards the target region and at the same time balance the residual energy and the link connectivity on nodes with energy harvesting. Our results along with simulation can be used for further studies and provide certain guideline for realistic development of such systems.

**Keywords:** energy harvesting, sensor networks, energy aware geographic routing, remote energy station

### I. 서론

무선 센서 네트워크를 구성하는 센서 노드들은 서로 무선 라디오 채널을 통해 통신하며, 제한된 자원을 사용한다[1]. 이런 종류의 네트워크에서는 에너지가 가장 중요한 요소 중 하나인데, 그 이유는 노드들은 배터리로 전원을 공급받으므로 응용 프로그램을 장시간 수행하기 위한 충분한 수명을 가지지 못하기 때문이다. 더구나, 넓게 분포된 센서 노드들의 배터리를 사람이 일일이 교체하는 것은 거의 불가능하다.

네트워크 수명을 확장하는 기존의 방법 중 하나는 노드들이 다중 홉을 통해 데이터를 전송할 때 소모되는 에너지를 절약하기 위해 이동성(mobility)을 이용하는 것이다. 이동 중계기(base station) 또는 데이터 수집기는 센서 영역을 이동하면서 고정 설치된 센서 노드로부터 단일 홉 라디오 링크를 통해 정보를 수집할 수 있다. 이런 방식을 사용하면 네트워크를 보다 지속시킬 수 있는 반면, 자료 전송이 지연될 가능성이 많으므로 밀집한 네트워크에서는 바람직하지 않다. 더구나, 이 방식은 에너지 소모를 원천적으로 막을 수는 없다.

한편, 이런 시스템의 수명을 개선하는 대안으로, 환경 에너지 공급을 고려할 수 있다. 근래, 태양, 모션, 생화학적, 진동 에너지 소스 등으로부터 환경 에너지를 추출하는 다양한 기술들이 개발되고 있다[4,5]. 그러나, 이런 에너지들은 환경의 변화에 따라 상당히 가변적인 수확(harvesting) 조건을 가진다. 예를 들면, 한밤중이나 날씨가 흐릴 때 솔라 셀(solar cell)을 사용할 수 없게 된다. 이러한 시공간적인 제약 조건에서도 전력 관리나 작업 스케줄링을 조정함으로써 지속적인 성능 개선을 이루려는 노력이 있어 왔다[6,7]. 하지만, 이런 노력들은 태양 에너지와 다르거나 원격지에 위치한 에너지 수확 요

소를 활용하지는 않는다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 환경 에너지를 지속적으로 공급할 수 있는 에너지 저장소(energy station)를 활용할 것을 제안한다. 에너지 저장소라 함은 환경 에너지 또는 전기 배터리의 형태로 저장하여 공급할 수 있는 에너지 저수지(reservoir) 또는 우물(well)이라고 생각할 수 있다. 즉, 실내 영역이나 야간에 형광등이나 진동 펌프를 통해 태양 에너지 또는 진동 에너지를 공급하는 것을 예로 들 수 있다. 또한, 이러한 에너지 저장소는 센서 노드에 지속적으로 에너지를 공급할 수 있어야 한다. 에너지 저장소가 이동하면서 에너지를 공급할 수 없는 경우에는 센서 노드가 대신 에너지 저장소로 이동하여 에너지를 수급하여야 한다. 따라서, 이런 네트워크는 이동 가능하고 제어 가능(controllable)하고, 센서 노드가 일단 배치되면 움직이지 못하는 정적인 센서 네트워크와는 다르다. 다행히, 에너지 효율적인 로봇 기술의 발달로 센서 노드에 장착된 값싼 경량 로봇이 자신뿐만 아니라 다른 센서 노드를 재충전하는 것이 가능해졌다[8,9]. 이동 기능을 가지는 이러한 이동 노드는 가까운 에너지 저장소가 어디에 있는지 알기만 하면, 필요할 때 그 저장소로 이동하거나 날아가서 스스로 에너지를 재충전한 다음 본래의 서비스 지역으로 되돌아올 수 있을 것이다(그림 1 참고). 이러한 자기 에너지 재충전 기술은 아직 연구가 더 필요하고 지금까지 자세히 다루어지지 않는 것이다.

본 논문에서는 이러한 에너지 수확 체계를 제안하고 원격 에너지 저장소로부터 에너지를 자가 공급하는 모바일 노드를 가진 센서 네트워크에서의 몇 가지 설계 요소에 대하여 살펴본다. 먼저, 본 수확 인식 시스템 설계의 기반이 되는 시스템 모델, 기본 가정, 에너지 소모 및 수확 모델 등을 살펴본다. 시스템 구조는 에너지 공급 저장소와 이동 가능한 모바일 노드를 활용함으로써 밀집한 모바일 센서 네트워크에서의 네트워크 지속성을 제공하게 된다. 다음으로, 모션 제어, 링크 연결성 문제들에 관하여 종합적으로 분석한다. 그런 다

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 9. 10., 수정: 2009. 10. 5., 채택확정: 2009. 10. 30.

김성우, 이종민, 권순각: 동의대학교 컴퓨터소프트웨어공학과  
(libero@deu.ac.kr/jongmin@deu.ac.kr/skkwon@deu.ac.kr)

※ 이 논문은 2008학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음  
(과제번호 2008AA183).

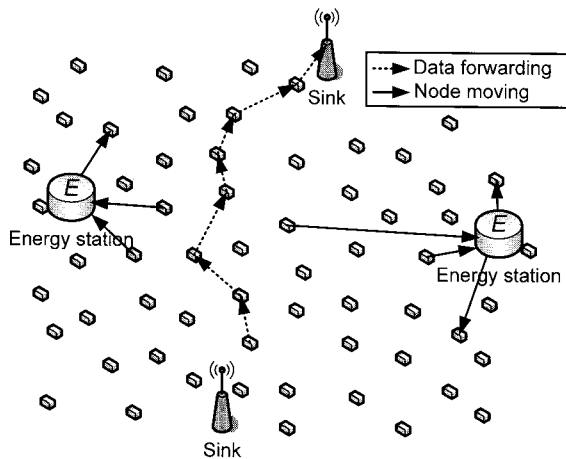


그림 1. 원격 에너지 저장소가 있는 모바일 센서 네트워크 구조.

Fig. 1. Mobile sensor network architecture with remote energy stations.

음, 모바일 노드가 원격 에너지 저장소로부터 에너지를 수확하도록 하는 간단한 모션 제어 알고리즘이 설계된다.

이렇게 설계된 시스템을 기반으로, 본 논문에서는 수확 인식 라우팅 프로토콜과 광고 메시지로 구성된 새로운 자료 전송 프로토콜을 제안한다. 제안하는 수확 인식 프로토콜은 각 노드 및 이웃 노드의 위치, 잔여 에너지 량, 링크 연결성 등의 다양한 정보를 바탕으로 어떤 노드로 자료를 라우팅할지를 결정한다. 정적인 센서 네트워크를 대상으로 하는 종래의 수확 인식 라우팅 알고리즘과는 다르게, 본 알고리즘은 에너지 저장소를 가진 모바일 센서 네트워크에 적합하다. 특히, 본 알고리즘에서는 이웃 노드들이 위치 및 내부 상태에 대한 정보를 얻기 위하여 모바일 노드와 에너지 저장소에 대하여 광고 메시지가 사용된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 관련 연구를 요약한다. 본 논문에서 제안하는 수확 인식 체계는 III 장에서 설명하고, 특히 수확 인식 자료 전송 프로토콜은 IV 장에서 제공한다. V 장에서는 시뮬레이션 결과를 보인다. 마지막으로, VI 장에서 본 논문을 결론짓는다.

## II. 관련 연구

### 1. 이동성 기반의 에너지 절약 기법

센서 네트워크 분야에서 이동성에 기반한 에너지 절약에 관하여 많은 연구가 있어왔다[2,3]. 이런 접근방식은 주로 모바일 장치가 센서 필드 영역을 이동하며 고정된 센서 노드와 단일 홉으로 라디오 통신을 통해 데이터를 수집하는 방식을 선호한다. Somasundara 등은 고정된 위치로 데이터를 전달하기보다는 직접 이동하면서 더욱 짧은 데이터 경로를 수립하는 모바일 싱크(sink)에 대한 가능성을 탐구하였다[3]. 반면, 성긴(sparse) 네트워크에서 생성된 데이터를 이동시키고 수집하기 위하여 데이터 물(mobile ubiquitous LAN extensions)이라는 모바일 데이터 수집기를 활용하는 방식이 제안되었다[4]. 결국, 이러한 전략은 다중 도약 데이터 전달과 이에 따른 과도한 에너지 소모를 피하므로 네트워크를 더 오래 지속시킨다. 반면에, 늦은 데이터 전달에 따르는 지연시간을 감수하여

야 한다. 더구나, 복잡한 수학적 최적화 기법을 사용하여 데이터 수집 경로를 계산하거나 이동과 경로설정을 동시에 고려하여야 하는 부담이 있다.

### 2. 에너지 인식 및 지리적인 라우팅

에너지 인식 및 지리적인 라우팅(energy aware geographic routing) 분야는 지난 수년간 활발히 연구되어 왔다[10-12]. Singh 등은 “maximize time to partition”와 “minimize maximum node cost” 같은 다섯 가지 에너지 인식 기준을 제안하였다 [10]. 이런 기준들은 에너지 효율적인 라우팅을 위해서는 중요하지만, 지역 알고리즘으로 직접 구현하기는 어렵고, 심지어 전역 알고리즘도 NP-complete 로 알려져 있다.

한편 전통적인 지리적 라우팅 방식에서는, 패킷들이 목적지와 가장 많이 접근한 1-홉 떨어진 이웃에게로 국부적으로 전달되어 나아간다. Karp 등은 평면 네트워크 그래프를 유도한 다음 “통신 구멍(communication hole)”을 회피하기 위해 패킷이 평면 그래프의 둘레를 따라가도록 하는 Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR)을 제안하였다[11]. 한편, Geographic and Energy Aware Routing (GEAR) 알고리즘은 패킷이 목표 지역으로 가기 위하여 지리 정보 뿐만 아니라 에너지 인식 정보도 함께 사용하였다[12].

최근의 연구 결과로는 무선 링크들이 상당히 믿을만하지 못하기 때문에 패킷 전송률이 상당히 감소하게 될 수도 있고, 같은 패킷이 반복 재전송되더라도 높은 에너지가 소모된다는 것이다[13]. 따라서, 라우팅을 결정하는 데 있어서, 에너지 및 지리적인 기준들과 더불어 링크 신뢰성도 고려되어야 한다.

### 3. 센서 네트워크에서의 에너지 수확

에너지 수확(energy harvesting)은 지속성이 제한되는 배터리를 전원으로 하는 임베디드 시스템에 대하여 하나의 가능한 해결책으로 점차 각광을 받고 있다. 특히, 배터리를 수동으로 재충전하거나 교체가 불가능한 센서 네트워크 분야에서 배터리 수명을 개선시키는 효과적인 대안이 될 수 있다.

Rahimi 등은 모바일 로봇을 활용한 에너지 수확 방식이 네트워크 수명을 더 증가시킬 수 있다는 것을 보였다[9]. Kansal 등은 센서 네트워크가 에너지 환경을 적응적으로 학습하는 분산 프레임워크와 수확 노드의 스케줄링과 전원 관리를 위한 국부 알고리즘들을 제안하였다[6,7]. 이들 연구에서는 수확을 인식하는 간단한 라우팅 알고리즘이 오직 배터리의 잔여 에너지를 고려한 것과 비교해서 지속 성능을 개선시킬 수 있다는 것을 보여주고 있다.

한편, 다중 홉 무선 센서 네트워크에 대한 분산된 에너지 재충전과 함께 에너지 인식 및 지리적인 라우팅 문제를 다루는 연구들이 수행되었다[14-16]. Lin 등은 노드의 배터리 잔여 에너지, 패킷이 원 소스에서 목적지까지의 경로를 따라 전달되기 위한 에너지 요구조건, 그리고 에너지 재충전 비율을 모두 고려한 비용 기준을 제안하였다[14]. Zeng 등은 환경 에너지 공급을 고려한 효율적인 에너지 인식 및 지리적인 라우팅 알고리즘을 설계하였다[15,16]. 이러한 연구들이 환경 에너지 공급을 고려하지 않는 잔여 에너지 기반이나 지리적 라우팅 프로토콜보다 더욱 에너지 효율적일지라도, 비바람이나 밤과 같은 나쁜 날씨에 따라 환경 에너지가 꾸준히 공급될 수 없는 상황에 대처하지는 못한다.

III. 수확 인식 체계 (Harvesting aware framework)

1. 시스템 모델

본 논문에서는 센서 노드들이 밀집되게 배치된 무선 센서 네트워크를 고려한다. 시스템은 중계기(base station)과 센서 노드의 두 가지 요소로 구성된다.

첫째 요소는 싱크 노드(sink node)로서 센서 노드들로부터 데이터를 수집하거나 에너지 저장소로서 센서 노드로 에너지를 공급하는 고정된 중계기이다. 통신을 위해 각 장치는 이웃 노드에 자신의 위치는 물론 관련 정보를 주기적으로 전송할 수 있어야 한다.

둘째 요소는 다른 노드와 통신하거나 스스로 이동할 수 있는 센서 노드이다. 각 노드의 하드웨어는 적어도 다음 네 가지 요소를 포함하여야 한다.

- 처리장치: 이 장치는 모바일 노드의 두뇌에 해당하며, 보통 8 비트 이상의 마이크로프로세서 기반의 연산 플랫폼을 사용한다.
- 네트워크 접합부: 센서 노드 간 또는 베이스 스테이션 간의 통신을 위해 무선 센서 네트워크를 위한 전형적인 무선 네트워크 구조가 사용된다. 이런 네트워크 구조로는 Bluetooth 또는 IEEE 802.15.4 표준과 같은 무선 개인 영역 네트워크 (WPAN, Wireless Personal Area Network) 기술이 주로 쓰인다.
- 이동 장치: 노드는 바퀴 기반의 모바일 로봇을 구동시키기 위한 모터나 날 수 있는 구동기를 포함하여야 한다. 이런 장치의 도움으로 각 노드는 에너지를 제공할 수 있는 원격 에너지 저장소로 왕복 이동할 수 있게 된다.
- 재충전 가능한 전원 장치: 각 노드는 원격 에너지 저장소로부터 에너지를 수확하기 위하여 에너지를 재충전할 수 있는 배터리 또는 수확 장치를 가져야 한다.

또한, 각 노드는 GPS (Global Positioning System) 장치나 자체 위치 인식 기능을 통하여 자신의 위치, 잔여 에너지, 배터리 용량 등에 대한 정보를 알고 있다고 가정한다. 추가로, 이웃 노드들은 주기적인 광고 메시지를 통하여 이러한 정보들을 서로 교환한다. 이 주제는 다음 장에서 자세히 다룰 것이다.

2. 에너지 소비 및 수확 모델

본 논문에서 이동 노드의 에너지 소비 모델은 라디오 통신 상태와 이동 상태를 고려한다. 라디오 통신 상태는 송신, 수신, 슬립(sleep) 및 끄김(off)를 포함한다. 노드의 이동 상태는 라디오 통신을 끈 상태에서 에너지 재충전을 위해 이동하고 있다는 것을 의미한다. 따라서, 노드의 전체 에너지 소모는 라디오 상태와 이동 상태에 따르는 요소를 모두 합하는 것으로 모델링할 수 있다.

패킷을 보내거나 받는 데 소모되는 에너지가 데이터비트에 비해한다고 가정한다. 또한, 노드를 이동하는 데 소모되는 에너지는 이동 거리에 비례한다고 가정한다. 단위 거리를 이동하는 데 소모되는 힘은 이동 속도에 비례하므로, 노드의 전체 에너지 소모는 다음 식으로 계산될 수 있다.

$$E_{node} = n_t E_t(b) + n_r E_r(b) + t_{sleep} E_{sleep} + d E_{mov}(v) \quad (1)$$

여기서,  $n_t$  는 패킷 전송 횟수,  $E_t(b)$  는 비트 당 전송 에너지,  $n_r$  는 패킷 수신 비트 수,  $E_r(b)$  는 비트 당 수신 에너지,

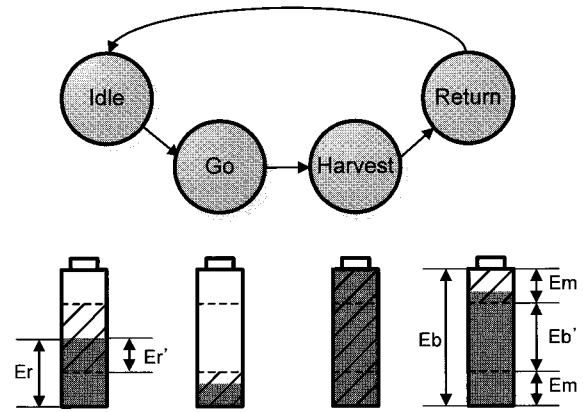


그림 2. 모션 제어 시스템을 위한 운동 상태 및 배터리 상태. Fig. 2. Motion states and battery status for motion control system.

$t_{sleep}$  는 슬립 시간,  $E_{sleep}$  는 슬립 에너지,  $d$  는 이동 거리,  $E_{mov}(v)$  는 속도에 따른 이동 에너지를 나타낸다.

전기 공급 이상, 햇빛이 노출되지 않는 밤 등과 같은 실제 상황에 대처하기 위해, 센서 노드는 진동 모터나 형광등과 같은 원격 에너지 저장소로부터 에너지를 수확하기 위하여 이동하는 능력을 갖출 필요가 있다. 그리고, 노드가 이웃 에너지 저장소에 거의 근접하였을 때에만 에너지를 수확할 수 있다고 가정한다. 더구나 에너지 저장소로부터 수확된 에너지가 재충전 가능한 배터리나 전기화학적인 축전지에 저장될 수 있다고 고려할 때, 노드는 일정한 에너지 수확률을 가지는 것으로 모델화할 수 있다. 하지만, 그러한 개별적인 에너지 저장 장치는 더 이상 환경 에너지를 저장할 수 없는 수용 한계를 지닌다는 것을 고려해야 한다. 예를 들면, 배터리 용량  $E_b$  는 그림 2에서와 같이 각 노드에 대한 용량 한계를 나타낸다.

3. 모션 제어 시스템

모션 제어는 센서 노드가 에너지를 재충전하기 위해 에너지 저장소까지 이동하도록 하기 위한 것이다. 본 논문에서는 다음과 같은 간단한 모션 제어 방식을 제안한다.

모션 제어 프로세스는 두 가지 상태를 가지는데, 하나는 정지(idle) 상태이고, 다른 하나는 이동(moving) 상태이다. 정지 상태일 경우에는 노드는 환경 감지, 데이터 수집과 같은 일반적인 기능을 수행하는 동시에, 모션 제어 프로세스는 주기적으로 두 가지 조건식을 판별한다. 첫째 조건은 노드가 가까운 에너지 저장소로 왕복 이동할 수 있는지를 점검하는 것이다. 이 조건은 다음과 같은 방정식을 통하여 수식화된다.

$$E_b'(i) = E_b(i) - 2E_{mov}(v_i)d(i, S_i) > 0 \quad (2)$$

여기서,  $d(i, S_i)$  는 노드와 에너지 저장소까지의 거리를 나타내며,  $E_b'$  은 전체 배터리 용량에서 에너지 저장소까지 왕복 이동하는 데 소모되는 이동 에너지를 뺀 값이다. 이것은 정지 상태 동안 실제로 소모 가능한 최대 유효 에너지를 나타낸다.

둘째 조건은 노드가 에너지 고갈이 되지 않도록 에너지 저장소로 이동하여야 할 시기를 결정하는 것과 관계된다. 이 조건은 다음 식으로 수식화된다.

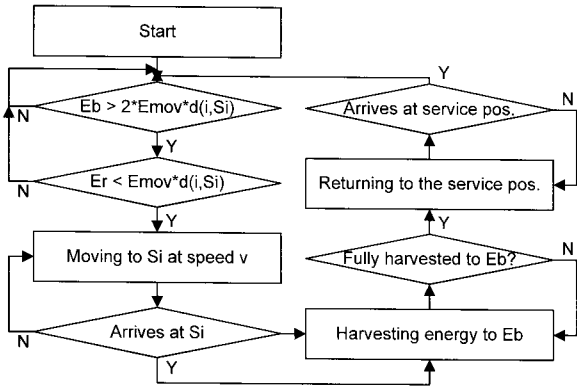


그림 3. 모션 제어 시스템의 소프트웨어 흐름도.  
Fig. 3. Flowchart of the motion control algorithm.

$$E_r'(i) = E_r(i) - E_{mov}(v_i)d(i, S_i) > 0 \quad (3)$$

여기서,  $E_r'$  은 실제로 유효한 잔여 에너지로 정의할 수 있다. 이것은 정지 상태에서 실제로 사용 가능한 잔여 에너지를 의미한다. 유효 잔여 에너지가 충분히 높으면, 노드는 서비스 지역에서 일반적인 동작을 수행하게 된다. 하지만, 유효 잔여 에너지가 0보다 낮으면 노드는 이동 상태로 들어가게 된다. 이동 상태에서 노드는 라디오 통신 기능을 끄고 에너지를 보충하기 위해 즉시 가까운 에너지 저장소로 이동하기 시작한다. 이 때, 제어하기 쉬운 방법으로 노드가 일정한 속도로 움직이도록 한다. 노드가 저장소에 도착하게 되면, 저장소에 부착되어 곧 에너지를 보충하게 된다. 최대 용량까지 완전히 보충하고 난 후, 노드는 원래의 서비스 위치로 되돌아온다. 모바일 노드 상에서 실행되는 알고리즘의 흐름도는 그림 3에 보여진다.

4. 링크 연결성 추정 (Link connectivity estimation)

노드의 라디오 통신 기능은 이동 시에는 꺼지므로, 이동상에서는 어떤 패킷도 이웃으로 전송할 수 없다. 따라서, 라디오 오프(radio off) 시간은 노드의 링크 연결 특성에 가장 큰 영향을 끼친다. 각 노드는 이동 상태에 출입하는 시간을 기록함으로써 라디오 온(radio on) 시간  $T_{on}$  과 오프 시간  $T_{off}$  을 측정할 수 있다. 물론, 이러한 정보는 이동 상태에 출입할 때마다 광고 메시지를 통하여 이웃에게 방송(broadcast)하게 된다.

이동 상태로 들어가고 나오는 시간을 각각  $t_{in}$  과  $t_{out}$  이라고 하자. 그러면, 특정한 시기의  $T_{on}$  과  $T_{off}$  는 다음 식으로 정리된다.

$$\begin{aligned} T_{on}(i) &= t_{in}(i) - t_{out}(i-1), & T_{on}(0) &= C_{Ton} > 0 \\ T_{off}(i) &= t_{out}(i) - t_{in}(i-1), & T_{off}(0) &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

이 수식에서, 노드가 에너지 저장소로 갔다가 올 때마다, 실제 환경에서 측정된 시간은 달라질 수 있으므로 평균 시간을 예측할 필요가 있다.

본 논문에서는 측정을 위해 지수 가중치 이동 평균(EWMA: Exponentially Weighted Moving Average) 함수라는 간단한 예측 알고리즘을 사용하였다[13]. 이 알고리즘을 사용하여 추정된 값은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \hat{T}_{on}(i) &= \gamma \hat{T}_{on}(i-1) + (1-\gamma)T_{on}(i-1), & \hat{T}_{on}(0) &= C_{Ton} > 0 \\ \hat{T}_{off}(i) &= \gamma \hat{T}_{off}(i-1) + (1-\gamma)T_{off}(i-1), & \hat{T}_{off}(0) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$\gamma$  는 1보다 작으므로,  $\hat{T}_{on}$  과  $\hat{T}_{off}$  의 예전 값들에 대한 기여도는 점차 줄어들게 된다. 이것을 EWMA 필터라고 부른다.

$\hat{T}_{j,on}(i)$  과  $\hat{T}_{j,off}(i)$  을 노드  $j$  에 대한 현재 추정치라고 할 때, 라디오 통신 장치가 켜지는 라디오 온(radio-on) 시간은 다음 식으로 정규화된다.

$$\tau_j(i) = \frac{\hat{T}_{j,on}(i)}{\hat{T}_{j,on}(i) + \hat{T}_{j,off}(i)} \quad (6)$$

정규화된 라디오 온 시간은 노드의 링크 연결성과 밀접한 관련이 있다. 결국, 이 값은 이웃들 간의 링크 품질(quality)를 추정하는데 쓰일 수 있으며, 다음 장에서 다시 언급할 것이다.

참고 일정한 이동 속도와 수확 시간을 고려할 때,  $T_{off}$  는 이론적으로 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$T_{off} = T_{mov} = T_{harvest} + \frac{2d(node, S)}{v}$$

이 식에서 알 수 있는 것처럼, 노드가 에너지 저장소에 가까울수록, 라디오 오프 시간  $T_{off}$  는 더 적어지므로, 상대적으로 라디오 통신 장치가 켜지는 시간이 더욱 많아진다.

5. 네트워크 배치 고려사항

원격으로 에너지 수확을 하는 센서 노드들의 네트워크 시스템에서, 네트워크가 꾸준히 지속될 수 있도록 에너지 원천이 적절히 배치될 필요가 있다. 배치의 형태는 랜덤하거나, 격자형, 삼각형, 육각형처럼 특정한 모양을 가질 수 있다. 하지만, 형태와 상관없이 에너지 원천은 모바일 노드가 에너지 수확을 위해 가까운 원천으로 이동할 만큼 충분히 밀집되게 배치될 필요가 있다.

모바일 노드가 배터리 용량  $E_b$  와 단위 거리당 이동 에너지  $E_{mov}$  를 가진다고 하자. 그러면, 모바일 노드가 최대 배터리 파워로 왕복 이동할 수 있는 최대 거리를 구할 수 있으며, 다음 식으로 나타난다.

$$d_{max} = \frac{E_b}{2E_{mov}} \quad (7)$$

노드의 라디오 전송 거리가  $d_{prop}$  라고 하자. 인접한 에너지 저장소 간 거리가 너무 멀리 떨어져 있으면, 중간 부근에 있는 노드들은 에너지를 충전할 수 없으므로 결국 에너지를 소진할 것이고 통신이 멈출 것이다. 또한, 각 에너지 소스로부터 에너지를 공급받는 인접한 두 노드는 서로 통신을 하기 위해  $d_{prop}$  의 범위 내에 위치하여야 한다. 따라서, 인접한 에너지 저장소들의 최대 거리  $d_{S2S,max}$  는 노드와 에너지 저장소 간 거리의 두 배에 라디오 전송 거리를 더한 범위 내에 위치하여야만 한다. 이것은 다음 식으로 표현된다.

$$d_{S2S,max} \leq 2d_{max} + d_{prop} \quad (8)$$

한편, 인접한 에너지 저장소 간의 거리  $d_{S2S}$  가 미리 결정

되어 있다면, 위 수식으로부터 유도된 것처럼 노드의 최소 배터리 용량은 에너지 저장소로 왕복 이동할 수 있도록 다음 조건을 만족하여야 한다.

$$E_{b,\min} \geq E_{mov} \cdot (d_{SS} - d_{prop}) \quad (9)$$

**IV. 에너지 수확 기반 데이터 전송 프로토콜**

1. 에너지-인식 및 지리적 라우팅

노드  $i$ 가 목적지가  $R$ 인 패킷을 전달하는 경우를 고려해 보자. 노드  $i$ 는 이러한 패킷을 받으면 패킷이 목적지로 갈 수 있도록 경로를 정하는 동시에, 모든 이웃 노드들  $N_i$  간의 잔여 에너지를 균형을 맞추려고 시도하게 된다.

본 논문에서 제안하는 데이터 전송 프로토콜에서는, 각 노드가 위치, 잔여 에너지, 평균 라디오 온 및 오프 시간 등과 같은 자신의 상태 정보와 1 홉 떨어진 이웃의 상태 정보들을 유지한다. 뿐만 아니라, 각 노드는 가깝게 위치한 에너지 저장소들로부터 주기적으로 보내진 광고 메시지들을 통해 가장 가까운 에너지 저장소의 위치를 알고 있어야 한다.

노드  $i$ 는 다음 식으로 정의된 비용 함수  $C_L(N_i, R)$ 를 최소화하는 이웃에게로 데이터 패킷을 전달한다.

$$C_L(N_i, R) = \frac{1}{\alpha \cdot D_N(N_i, R) + (1 - \alpha) \cdot E_N(N_i)} \quad (10)$$

여기서  $0 < \alpha < 1$ 는 가중치 부분,  $D_N(N_i, R)$ 는  $R$ 을 향한 노드  $i$ 로부터  $N_i$ 까지의 정규화된 진행 거리, 그리고  $E_N$ 는 노드  $N_i$  상의 정규화된 유효 소비 에너지를 나타낸다.

$D_N(N_i, R)$ 는 다음 식으로 정의한다.

$$D_N(N_i, R) = \frac{D(N_i, R)}{\max\{D(N_i, R)\}} \quad (11)$$

여기서,  $D(N_i, R) = [d(i, R) - d(N_i, R)] \cdot \tau_i \cdot \tau_{N_i}$ 으로 표현되고,  $\max\{D(N_i, R)\}$ 는 노드  $i$ 의 전향 데이터 전달 후보들 중 최대  $D(N_i, R)$  값이다. 거리  $d(i, j)$ 는 노드  $i$ 와  $j$  간의 유클리디안 거리이다. 따라서,  $[d(i, R) - d(N_i, R)]$ 는 목적지  $R$ 과의 유효 패킷 전달 거리이다.

$E_N(N_i)$ 는 다음 식으로 정의한다.

$$E_N(N_i) = \frac{E(N_i)}{\max\{E(N_i)\}} \quad (12)$$

여기서,  $E(N_i) = \beta E_b'(N_i) + E_r'(N_i)$ 이고,  $\max\{E(N_i)\}$ 는 노드  $i$ 의 전향 데이터 전달 후보들 중 최대  $E(N_i)$  값이다. 또, 식 (2)와 (3)으로부터 각각  $E_b'(N_i) = E_b(N_i) - 2E_{mov}(v_{N_i})d(N_i, S_{N_i})$ 와  $E_r'(N_i) = E_r(N_i) - E_{mov}(v_{N_i})d(N_i, S_{N_i})$ 을 계산할 수 있다.

추정된 비용 함수를 최소화하는 원리는 다음과 같다. 식 (10)에서 비용을 최소화한다는 것은 분모를 최대화하는 것을 의미한다. 분모 부분은 지리 관련 항목과 에너지 관련 항목을 선형적으로 결합한 것이다. 첫째 항목에서  $D_N(N_i, R)$ 는 하나의 패킷이 목적지를 향해 전달되는 거리를 나타낸다.

식 (11)에서  $\tau_i \cdot \tau_{N_i}$  부분은 종래의 연구에서 정의된 전송 횟수의 기대값 (ETX : Expected Transmission Count)의 역과 비슷하다[17]. 패킷의 전송 실패는 재전송 때문에 노드의 에너지 소모를 증가시키는 역할을 하므로, 식 (11)을 최대화한다는 것은 물리적으로 패킷 전송의 효율을 최대화하고 패킷 당 소모 에너지를 최소화한다는 물리적인 의미를 가진다. 둘째 부분의  $E_N(N_i)$ 는 에너지 사용 가능성의 추정값을 나타낸다. 식 (12)로부터 에너지 사용 가능성은 에너지 수확 효율과 배터리의 유효 잔여 에너지의 선형 결합으로 나타난다. 따라서, 결국 식 (10)을 통하여 패킷 전송 당 전달 거리와 에너지 수확 및 잔여 에너지 사이의 균형을 맞추게 된다.

참고:  $\alpha = 1$ 일 때, 제안하는 라우팅 알고리즘은 종래의 연구 결과에서처럼 지리적인 라우팅 알고리즘과 비슷한 형태가 된다[15]. 또한,  $\alpha = \beta = 0$ 일 때에는 본 알고리즘은 잔여 에너지에 기반한 전통적인 에너지 인식 라우팅 알고리즘과 유사해진다[10].

2. 광고 메시지 (Advertisement messages)

앞서 언급한 것처럼, 각 노드는 광고 또는 헬로(hello) 메시지를 방송함으로써 자신의 정보를 이웃에게 알려줄 필요가 있다. 이런 메시지는 특징에 따라 각각 다른 내용과 전송 범위를 가진다.

자신의 타이머 장치가 주기적으로 격발될 때, 센서 노드는 이동하거나 본래 위치로 돌아오기 시작할 때, 메시지는 1-홉 이웃에게 라우팅을 위해 자신의 위치,  $E_b'$ ,  $E_r'$ ,  $\hat{T}_{on}$ ,  $\hat{T}_{off}$  등을 포함하는 메시지를 보낸다. 또, 데이터 수집을 위해, 싱크 노드는 그 1-홉 이웃에게 자신의 위치 정보를 주기적으로 방송한다. 반면, 에너지 저장소는 에너지 수확을 위해 몇 홉 더 떨어진 노드에게까지 자신의 위치 정보를 전달할 수도 있다. 이 때, 저장소로부터 패킷을 전송하는 홉 수는  $n =$

$$\left\lceil \frac{d_{\max}}{d_{prop}} \right\rceil$$

과 같다.

**V. 시뮬레이션 결과**

1. 시뮬레이션 프로그램 구현

에너지 수확 모델, 모션 제어 시스템, 수확 인식 라우팅 알고리즘 등을 포함하여 본 논문에서 제안하는 에너지 수확 체계는 NS-2 시뮬레이터 코드 [18]로 구현하였다. 시뮬레이션을 위해 개발된 소프트웨어 구성도는 그림 4와 같다. 노드의 이동 에너지 소모와 에너지 수확 기능을 위해 기존의 모바일 노드 모델과 에너지 모델을 확장하였다. 모바일 노드 모델은 노드의 이동을 담당한다. 수확 에너지 모델은 패킷 전송, 아이들(idle), 이동 및 에너지 수확 상태에 따른 에너지 소모와 보충 작업을 담당한다. 센서 노드의 이동성을 시뮬레이션하기 위해 각 모바일 에이전트의 핵심 프로그램에 모션 제어 알고리즘을 추가하였다.

2. 시뮬레이션 환경

모의실험 대상인 센서 네트워크는  $2000 \times 2000m^2$  영역에 배치된  $N$ 개의 모바일 센서 노드들로 구성된다. 노드들은 무작위로 배치되고 모두 똑 같은 배터리 용량, 전송/아이들 전력, 이동 속도를 가진다. 다양한 노드 밀도를 실험하기 위

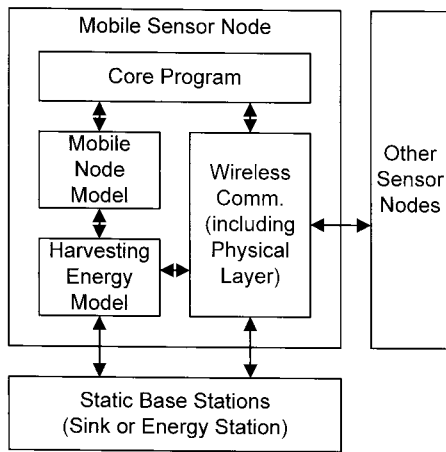


그림 4. 모바일 센서 노드에 대한 소프트웨어 구조.  
Fig. 4. Software architecture for the mobile sensor node.

해  $N = 200, 300, 400, 500$ 로 설정하였는데, 이는 각각 평균적으로 노드 당 거의 10, 15, 20, 25 개의 이웃을 가지는 것과 같다. 최대 전송 범위는 250 미터로 설정하였다. 링크 연결성 추정 알고리즘에서는  $\alpha, \beta, \gamma$  를 0.5, 0.5, 0.9로 각각 설정하였다. 각 노드는 일정한 배터리 용량, 에너지 소모율, 수확율, 이동 속도를 가지고 초기화되었다. 본 실험에서는 4개의 싱크 노드가 각각 (500, 500), (500, 1500), (1500, 500), (1500, 1500)의 위치에 배치되도록 하였다. 싱크 노드를 포함한 에너지 저장소는 각각 500m 거리로 일정하게 떨어져서 격자(grid) 형태의 고정된 위치로 배치되었다. 따라서, 전체 센서 지역 상의 (0, 0) 부터 (2000, 2000) 위치까지 배치된 에너지 저장소의 총 수는 25개이며, 이들은 에너지가 제한되지 않는다. 각 시뮬레이션은 1000초 동안 지속되어 수행된다. 통신 트래픽을 위해, 매 1초 마다 한 패킷이 무작위로 선택된 10개의 원천 노드로부터 4개의 싱크 노드로 보내어진다.

본 논문에서는 제안한 프로토콜의 성능을 평가하기 위해 4가지 측정값을 사용하였다. 평균 잔여 에너지(average residual energy)는 모든 센서 노드들에 대한 잔여 에너지의 평균으로 정의된다. 이 값이 클수록 네트워크 내에 더 많은 에너지가 남아 있게 된다. 추가로, 잔여 에너지의 표준 편차도 계산된다. 성공률은 싱크 노드에서 측정되는 성공률은 패킷이 성공적으로 전다된 비율을 뜻하며, 모든 소스-싱크 짝에 대해 평균값을 취한다. 이 값은 데이터 전달이 얼마나 효과적인지를 반영한다. 종단 간 평균 지연시간(average end-to-end delay)은 소스에서 싱크까지 패킷 당 평균 전달 시간으로 측정한다. 이 측정값은 소스에서 싱크까지 이동한 거리에 대체로 비례한다.

3. 노드 이동성의 영향

먼저 노드가 이동 가능하거나 불가능하지 않거나 할 경우에 대해 제안하는 수확 인식 라우팅 알고리즘의 성능을 비교하여, 네트워크 유지에 대한 노드 이동성의 영향을 평가할 것이다. 노드가 이동하는 모바일 센서 네트워크인 경우에는 총 25개의 에너지 저장소가 사용되는 것을 주의한다.

그림 5는 1000초가 지난 후 400개의 센서 노드에 대한 에너지 분포를 보여준다. 고정된 센서 네트워크는 에너지 수준이 아주 낮은 노드들이 대부분이라는 것을 알 수 있다. 이

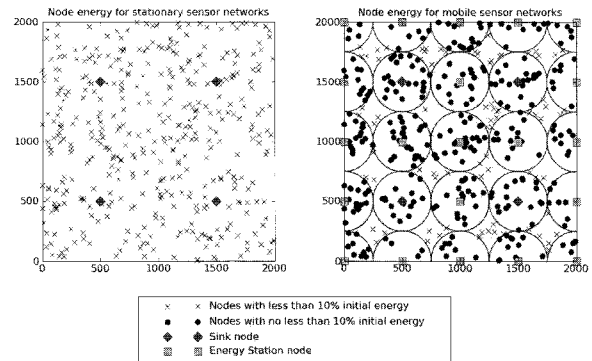


그림 5. 1000초 후의 노드들의 에너지 분포.  
Fig. 5. Node energy distribution after 1000 seconds.

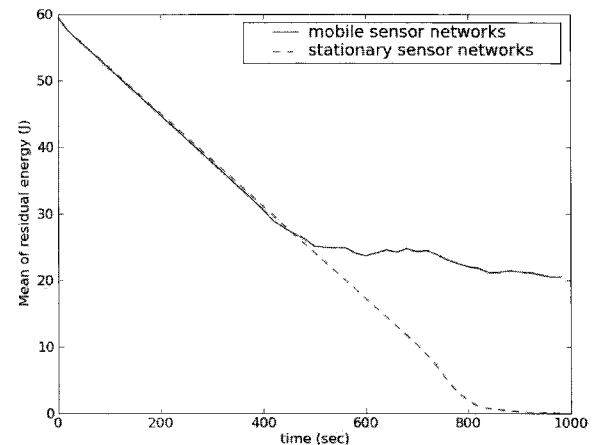


그림 6. 400개의 노드들에 대한 평균 잔여 에너지.  
Fig. 6. Average residual energy for 400 nodes.

경우, 노드들은 에너지를 재충전할 수 없으므로 에너지가 고갈되고 네트워크 성능은 나쁘게 된다. 반면, 모바일 센서 네트워크에서는 가까운 에너지 저장소의 전송 및 도달 범위 안에 있는 노드들은 에너지가 특정한 수준 이하로 떨어질 때마다 에너지를 보충할 수 있게 되고 네트워크는 무한히 지속 가능하게 된다. 그림 6의 시뮬레이션 결과는 고정된 센서 네트워크는 통신 트래픽에 대하여 지속적으로 에너지를 소모하여 고갈될 뿐이지만 모바일 센서 네트워크의 경우 한참 시간이 지난 후 평균 에너지가 특정한 값에 수렴하는 것을 보여준다.

4. 모바일 센서 노드 상에서 다양한 라우팅 알고리즘과의 비교

이제 모바일 센서 네트워크 상에서 제안한 라우팅 알고리즘의 성능을 세부적으로 평가한다. 비교를 위해 세 가지 라우팅 알고리즘이 사용된다. 첫째 “탐욕(greedy)” 라우팅 알고리즘은 에너지에 대한 인식 없이 순수하게 지리적 라우팅 알고리즘을 의미하며, 식 (10)에서 알파를 1로 설정하면 된다. 둘째 “에너지 인식(energy aware)” 라우팅 알고리즘은 노드의 잔여 에너지만을 고려한 라우팅 알고리즘이며, 식 (10)에서 알파와 베타를 0으로 설정함으로써 얻어진다. 마지막 “수확 인식(harvesting aware)” 라우팅 알고리즘은 에너지 수확 및 지리적 항목을 모두 고려한 제안된 알고리즘이다.

그림 7과 8은 라우팅 알고리즘들의 에너지 효율성을 보여

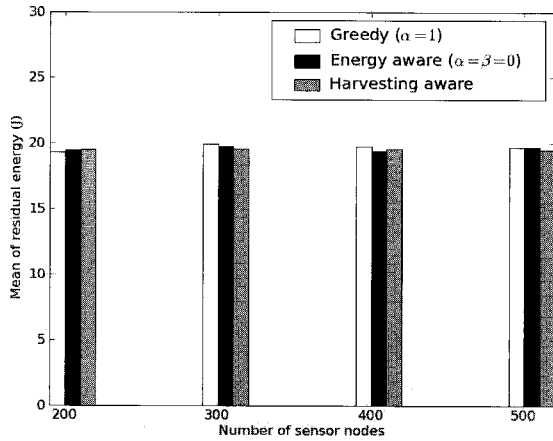


그림 7. 노드 상의 평균 잔여 에너지.  
Fig. 7. Average residual energy on nodes.

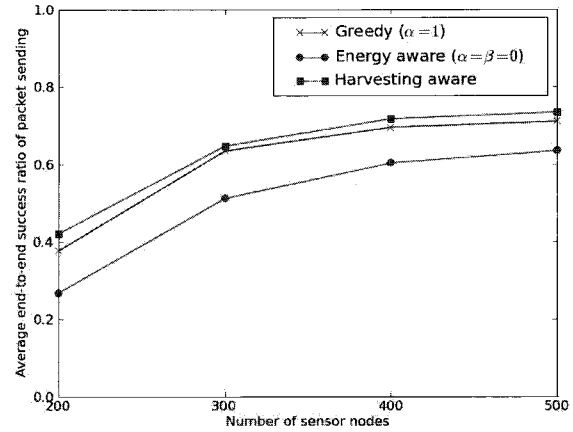


그림 9. 통신 트래픽에 대한 평균 성공률.  
Fig. 9. Average success rate for communication traffic.

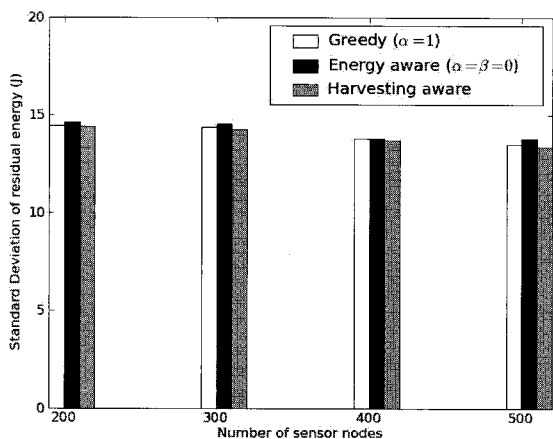


그림 8. 노드 상의 잔여 에너지의 표준 편차.  
Fig. 8. Standard deviation of residual energy.

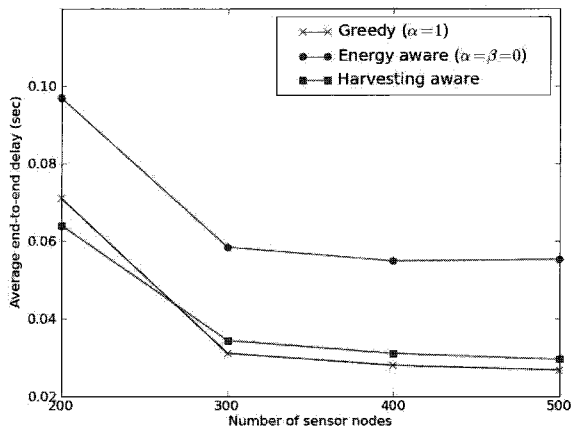


그림 10. 통신 트래픽에 대한 평균 종단 간 지연 시간.  
Fig. 10. Average end-to-end delay for communication traffic.

준다. 흥미롭게도, 라우팅 알고리즘들은 거의 같은 평균 잔여 에너지와 표준 편차를 가진다. 그 이유는, 정상 상태에서 잔여 에너지의 평균 수준은 라우팅 알고리즘의 특성보다는 꾸준히 살아 있는 노드의 수와 네트워크 트래픽 정도에 주로 영향을 받기 때문이다. 덧붙여, 노드가 더 밀집되게 배치될수록 에너지의 표준 편차는 약간 더 적다는 것을 알 수 있다. 네트워크가 더욱 밀집될 때, 소스-싱크 쪽의 통신 가능 경로가 더 증가하며 각 노드는 다음의 통신 전달 노드에 대한 선택 폭이 넓어지므로, 트래픽 부하 균형이 증가하고 노드들 간의 에너지 변동이 감소하게 된다.

그림 9와 10은 네트워크 밀도에 따른 라우팅 프로토콜들의 종단 간 QoS 성능을 보여준다. 그림 9에서 보여준 것처럼, 제안된 알고리즘은 다른 알고리즘들에 비해 더 나은 성공률을 가지는데, 이는 지리적인 정보와 에너지 인식 정보를 모두 적절히 활용하기 때문이다. 순수한 지리적인 프로토콜은 발원지와 목적지 간의 직선 경로를 따라 에너지가 고갈되고 보충하는 노드들을 더 많이 가지게 된다. 반면에, 순수한 에너지 인식 프로토콜에서는 패킷들이 싱크에 도달하기 위해 더욱 긴 홉을 거쳐야 할 가능성이 많다. 또한, 그림에서 노드들이 밀집되어 있을 때 통신 경로가 더 많아지므로 성공률은 증가하는 경향이 있다는 것을 알 수 있다.

그림 10은 제안된 알고리즘의 지연 시간 성능이 “Greedy” 알고리즘과 “Energy aware” 알고리즘 사이에 있다는 것을 보여준다. 더구나, 노드들이 더욱 밀집되어 있을 때 지연 시간이 더 작는데, 이는 밀집된 네트워크에서 노드는 더욱 많은 이웃 노드를 가지므로 소스-싱크 쪽 사이의 통신 경로를 더욱 짧게 할 수 있기 때문이다.

**VI. 결론**

본 논문에서는 에너지 저장소들이 배치된 센서 네트워크에서 모바일 노드의 에너지 수확에 대한 가능성을 살펴보았다. 주된 개념은 에너지가 고갈되기 전에 모바일 노드 스스로 원격 에너지 저장소로 왕복 이동하여 에너지를 수확, 보충하여, 네트워크가 지속적으로 유지하도록 하는 것이다. 본 논문에서 설계한 수확 인식 시스템은 설계 시에 에너지 수확, 링크 연결성, 네트워크 배치 등과 같은 다양한 설계 이슈에 대해서도 상세히 고려하였으며, 에너지 소모 정도에 따라 모바일 노드의 움직임을 제어하도록 하였다. 또한, 통신 트래픽에 대해 지리적인 정보, 에너지 인식, 링크 연결성을 모두 고려한 에너지 인식 및 지리적인 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 제안한 수확 인식 시스템의 네트워크 지속성을 보였을 뿐만 아니라 기존의 데이터 전송

프로토콜에 비해 제안하는 프로토콜의 더욱 향상된 성능을 검증하였다. 추후 연구 과제로는 다양한 에너지 수확 원천에 대한 보다 확장된 분석 연구와 실제 환경에 적용하는 것을 들 수 있다.

**참고문헌**

[1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramanjam, and E. Cyirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, 2002, pp. 102-114.

[2] R. C. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette, "Data MULEs: modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks," *Proc. IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications (SNPA 2003)*, pp. 30-41, May 2003.

[3] A. Somasundara, A. Kansal, D. Jea, D. Estrin, and M. Srivastava, "Controllably mobile infrastructure for low energy embedded networks," *IEEE Trans. On Mobile Computing*, vol. 6, no. 8, August 2006.

[4] J. A. Paradiso and M. Feldmeier, "A compact, wireless, self-powered pushbutton controller," *UbiComp'01*, Atlanta, GA, September 2001.

[5] T. Voigt, H. Ritter, and J. Schiller, "Utilizing solar power in wireless sensor networks," *The 28th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN)*, Bonn/Konigswinter, Germany, October 2003.

[6] A. Kansal and M. B. Srivastava, "An environmental energy harvesting framework for sensor networks," *International Symposium on Low Power Electronics and Design*, pp. 481-486, 2003.

[7] A. Kansal, D. Potter, and M. B. Srivastava, "Performance aware tasking for environmentally powered sensor networks," *Proc. of the Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems*, NY, 2004.

[8] A. LaMarca, D. Koizumi, M. Lease, S. Sigurdsson, G. Borriello, W. Brunette, K. Sikorski, and D. Fox, "PlantCare: an investigation in practical ubiquitous systems," *Intel Research, IRS-TR-02-007*, July 2002.

[9] M. Rahimi, H. Shah, G.S. Sukhatme, J. Heidemann and D. Estrin, "Studying the feasibility of energy harvesting in a mobile sensor network," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2003.

[10] S. Singh, M. Woo, and C. S. Raghavendra, "Power-aware routing in mobile ad hoc networks," *Proc. MOBICOM*, Dallas, Texas, Oct. 1998.

[11] B. Karp and H. T. Kung, "GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for wireless networks," *Proc. MOBICOM*, Boston, Aug. 2000.

[12] Y. Yu, D. Estrin, and R. Govindan, "Geographical and energy-aware routing: a recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks," Technical Report TR-01-0023, UCLA-CSD, May 2001.

[13] A. Woo and D. Culler, "Evaluation of efficient link reliability estimators for low-power wireless networks," Technical Report,

University of California, Berkeley, Apr. 2003.

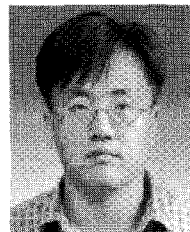
[14] L. Lin, N. B. Shroff, and R. Srikant, "Asymptotically optimal poweraware routing for multihop wireless networks with renewable energy sources," *Proc. INFOCOM*, Miami, Mar. 2005.

[15] K. Zeng, K. Ren, W. Lou, and P. J. Moran, "Energy aware efficient geographic routing in lossy wireless sensor networks with environmental energy supply," *QShine06*, Waterloo Ontario, Canada, Aug. 2006.

[16] K. Zeng, W. Lou, K. Ren, and P. J. Moran, "Energy-efficient geographic routing in environmentally powered wireless sensor networks," *Proc. MILCOM*, Washington DC, Oct. 2006.

[17] D. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, A High-throughput Path Metric for Multi-hop Wireless Routing, *Proc. MOBICOM*, San Diego, California, Sep. 2003.

[18] The network simulator - ns-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.



**김성우**

1991년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(공학사). 1993년 동 대학원 석사. 1999년 동 대학원 박사. 1999년~2002년 한국전자통신연구원 선임연구원. 2008년~2009년 California State University at Fresno 교환 교수. 2002년~현재 동의대학교 컴퓨터소프트웨어공학과 교수. 관심분야는 임베디드 소프트웨어, 센서 네트워크, 지능제어.



**이종민**

1992년 경북대학교 컴퓨터공학과 졸업(공학사). 1994년 한국과학기술원 전산학과 졸업(공학석사). 2000년 동 대학원 전자전산학과 졸업(공학박사). 1997년~2002년 삼성전자 무선사업부 책임연구원. 2005년 University of California at Santa Cruz, Research Associate. 2002년~현재 동의대학교 컴퓨터소프트웨어공학과 교수. 관심분야는 모바일 컴퓨팅, 라우팅, 센서 네트워크.



**권순각**

1990년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1992년 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사. 1998년 동 대학원 박사. 1997년~1998년 한국전자통신연구원 연구원. 1998년~2001년 기술신용보증기금 기술평가센터 팀장. 2003년~2004년 Univ. of Texas at Arlington 교환 교수. 2001년~현재 동의대학교 컴퓨터소프트웨어공학과 교수. 관심분야는 멀티미디어신호처리, 영상통신.