

태양 에너지 기반 무선 센서 네트워크 시뮬레이터

이준민 · 강민재 · 노동건*

Solar Energy Harvesting Wireless Sensor Network Simulator

Jun Min Yi · Min Jae Kang · Dong Kun Noh*

Department of Electronic Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

요 약

최근 무선 센서 네트워크(Wireless sensor network, WSN)의 제한된 수명을 근본적으로 해결하기 위하여 에너지 수집형 노드를 사용한 WSN 연구가 진행되고 있다. 하지만, 이러한 연구를 원활히 지원하기 위한 에너지 수집형 WSN 시뮬레이터는 거의 없는 상태이다. 에너지 수집형 WSN을 위한 시뮬레이터들은 기존의 배터리 기반 WSN 시뮬레이터의 에너지 모델과는 달리, 에너지 수집 모델과 소비 모델이 결합된 새로운 에너지 모델을 필요로 한다. 아울러 새로운 프로토콜 제안 시, 제안된 프로토콜의 성능과 비교할 수 있는 대표적인 에너지 수집형 WSN을 위한 라우팅 및 MAC 프로토콜들이 포함되어 있어야 한다. 본 논문에서는 다양한 환경 에너지 중 가장 널리 사용되는 태양 에너지 기반의 센서 노드 및 네트워크를 지원하는 시뮬레이터를 설계하고 구현하였다. 제안하는 시뮬레이터는 날씨 및 계절 등의 외부환경과 솔라셀 및 에너지 저장 장치 등의 내부 환경 특성을 고려하여 설계된 에너지 수집 모듈이 구현 되어있고, 태양 에너지 기반 무선 센서 네트워크를 위한 대표적인 라우팅 및 MAC 프로토콜 기법들이 구현 되어 있다. 아울러 사용자 친화형 GUI를 제공하여 손쉬운 사용이 가능하다.

ABSTRACT

Most existing simulators for wireless sensor networks(WSNs) are modeling battery-based sensors and providing MAC and routing protocols designed for battery-based WSNs. However, recently, as energy harvesting sensor systems have been studied more extensively, there is an increasing need for appropriate simulators, but few related studies have employed such simulators. Unlike existing simulators, simulators for energy harvesting WSNs require a new energy model that is integrated with the energy-harvesting model, rechargeable battery model, and energy-consuming model. Additionally, it should enable the applications of the well-known MAC and routing protocols designed for energy-harvesting WSNs, as well as a user-friendly interface for convenience. In this work, we design and implement a user-friendly simulator for solar energy-harvesting WSNs.

키워드 : 무선 센서 네트워크, 시뮬레이터, 태양 에너지, 에너지 수집

Key word : Wireless sensor network, Simulator, Solar energy, Energy Harvesting

접수일자 : 2014. 12. 10 심사완료일자 : 2015. 01. 02 게재확정일자 : 2015. 01. 16

* **Corresponding Author** Dong Kun Noh(E-mail:dnoh@ssu.ac.kr, Tel:+82-2-820-0636)

Department of Electronic Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.2.477>

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

배터리 기반 센서 네트워크의 에너지 한계를 극복하고, 센서 노드/네트워크의 자율성과 영속성을 최대한 만족시키고자, 최근에 주변 에너지들을 자율적으로 수집하는 센서 시스템/네트워크가 관심을 받고 있다. 에너지 수집형 무선 센서 네트워크의 연구를 진행할 때 실제 네트워크를 구현한 후 실험한다면 비용, 시간, 디버깅 등 여러 가지 어려움이 존재하므로, 시뮬레이션을 통한 성능 검증은 먼저 수행해야 하는데, 에너지 수집형(Energy harvesting) 무선 센서 네트워크를 위한 시뮬레이터는 거의 없는 상태이다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 에너지 수집형 무선 센서 네트워크를 다양한 레벨에서 쉽게 분석하기 위한 효율적인 시뮬레이터를 제안한다. 제안하는 시뮬레이터는 여러 에너지 자원 중 특별히 태양 에너지를 고려하여 설계되었다. 태양 에너지 수집이 고려된 본 시뮬레이터의 특징은 다음과 같다. 첫째, 태양에너지의 일사량과 태양 전지판(Solar panel)의 크기 및 종류별 특성을 반영하여 구현되었으므로, 시뮬레이션하고 싶은 환경에 맞는 조건을 다양하게 설정할 수 있다. 둘째, 에너지 저장 장치의 종류별 특성을 반영하여 설계되었으므로, 저장 장치별 특성을 분석하는 시뮬레이션이 가능하다. 셋째, 시뮬레이터 구현을 객체지향적(Object-oriented)으로 구현하여 새로운 모듈의 추가와 수정을 쉽게 할 수 있다. 넷째, 사용자가 쉽게 사용할 수 있는 사용자 친화형 GUI를 제공한다. 다섯째, 태양 에너지를 활용한 다양한 Routing Protocol, MAC Protocol을 기본적으로 제공하여, 새로운 프로토콜 제안 시에 비교 분석이 용이하다. 마지막으로, 시뮬레이션의 결과로 네트워크 레벨 분석 및 노드 레벨의 분석을 동시에 가능케 하여, 자세한 성능 분석을 용이하게 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 관련 연구의 설명으로서 에너지 수집형 센서 시스템을 설명하고, 아울러 기존의 배터리 기반 WSN 시뮬레이터의 종류와 특징에 대해 설명한다. 3장과 4장을 통해, 제안한 시뮬레이터 구조 및 에너지 수집 모듈, 사용자 인터페이스에 대해 기술한다. 5장에서는 본 시뮬레이터를 이용하여 태양 에너지 기반 라우팅 프로토콜의 성능 분석을 수행했으며, 마지막으로 6장에서 결론을 기술한다.

II. 관련 연구

2.1. 에너지 수집형 센서 시스템

제한된 에너지 문제의 근본적인 해결을 위해 에너지 수집형 센서 노드가 최근 활발히 연구되고 있다[1]. 에너지 수집형 센서 노드들은 주변의 다양한 친환경 에너지를 수집하여, 재충전 배터리에 저장하고 이를 소비하며 동작한다. 친환경 에너지 종류로는 태양, 바람, 혈압, 호흡, 발걸음 그리고 실내 환경에서의 진동 등이 있고, 이들은 다양한 특성을 가진다. 아울러, 이들 에너지를 저장하는 재충전 배터리의 종류는 SLA, NiCd, NiMH, Li-ion, Li-polymer, Super-Capacitor 등 다양하며, 이들 각각은 [2]에 나타난 바와 같이 에너지 변환 효율, 완전충·방전 횟수, 자기방전, 메모리 효과(Memory effect) 등 각각 다른 특성을 가지고 있다.

이러한 다양한 에너지 원과 재충전 배터리를 사용하는 에너지 수집형 센서 노드는 에너지 수집을 통한 영구적인 사용, 기존 시스템에 비해 저렴한 유지 보수 비용, 높은 QoS, 다양한 센서 형태 등의 특징으로 인하여, 기존 배터리 기반 센서 노드보다 광범위한 분야에서 사용이 가능하다. 또한, 에너지 수집형 센서 노드는 다양한 에너지 자원과 저장 장치를 사용하고 있어, 적용 상황에 따라 다양한 모양과 크기 변형이 가능하다.

2.2. 배터리 기반 무선 센서 네트워크 시뮬레이터

에너지 수집형 센서의 개발로 인해, 시스템 및 네트워크, 데이터 분야 등 많은 분야에서 새로운 기법에 대한 연구들이 많이 연구되고 있는데, 지금까지는 이러한 연구를 위하여 기존의 배터리 기반 WSN 용으로 구현된 시뮬레이터들[3]을 수정하여 사용하였다. 이 중 가장 많이 사용되고 있는 TOSSIM[4], AVRORA[5], 그리고 SENS[6] 시뮬레이터의 특징을 아래에 기술하였다.

- **TOSSIM**: UC 버클리 Tiny OS 프로젝트 팀에서 개발한 도구로 MicaZ 센서 플랫폼을 지원하며, OS에서 CPU에 내리는 명령 하나까지 에뮬레이션이 가능하여 정밀한 분석이 가능하다. 하지만 컴파일 단계에서 코드의 인터럽트 특성과 세밀한 시간조절(Fine grained timing)이 불가능하여, ATEMU[7]와 같은 시뮬레이터보다 부정확하다는 단점이 있다. 또한, Tiny OS의 응용 프로그램에서만 동작한다.

- **AVRORA**: UCLA에서 Java를 사용하여 개발된 시

물레이터로서, AVR 마이크로 컨트롤러용으로 작성된 프로그램에 대한 시뮬레이션 및 분석 도구이다. 각각의 센서 및 프로그램 분석, 실험, 프로파일링 등 세부적인 분석이 가능하나, GUI를 제공하지 않으며, 통신 레벨 시뮬레이션을 지원하지 않아 네트워크 수준의 시뮬레이션이 불가능하다.

- SENS: SENS는 네트워크 통신 및 어플리케이션, 물리적 환경 요소를 반영한 교차 레벨 시뮬레이터(Cross level Simulator)이다. 각 모듈은 실시간 환경에서 얻은 정보를 기초로 사용하고, 전력 사용 분석을 지원한다. 하지만, MAC 프로토콜을 정확하게 시뮬레이션 하지 못하며, 센서 및 액츄에이터(Actuator)로부터 얻는 물리적 현상은 소리 현상에 대해서만 지원하는 제약이 있다.

이들 시뮬레이터들은 모두 배터리 기반의 에너지 모델만 지원하는데, 배터리 기반 에너지 모델은 에너지 소비 모델만 존재하고, 수집 모델은 존재하지 않는다. 또한, 다양한 저장 장치들의 특성을 전혀 고려하고 있지 않아, 수집되는 에너지와 잔존 에너지를 모두 고려해야 하는 에너지 수집형 시스템의 성능 분석에는 사용이 부적합하다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 태양 에너지 기반 무선 센서 네트워크 전용 시뮬레이터를 설계하고 구현하였다.

III. 에너지 모델

에너지 수집형 센서 노드는 노드 주변의 다양한 친환경 에너지를 자원으로 활용한다. 본 논문에서는 친환경 에너지 중에서 제어는 불가능하나 주기적으로 수집이 가능하고, 충분한 에너지 밀도를 가지고 있으며, 높은 변환 효율을 보이는 태양 에너지를 선택하였다. 태양 에너지 수집형 센서 노드의 에너지 모듈은 [그림 1]과 같이 태양 전지판(Solar Cell 또는 Solar Panel)을 이용하여 에너지를 수집하고, 수집된 에너지를 센서 노드의 재충전 가능 배터리에 저장 후 사용하는 방식으로 동작한다.

본 논문에서는 이러한 센서 노드를 보다 정확히 시뮬레이션하기 위해 소프트웨어 적으로 에너지 모듈을 구현하였는데, 이를 에너지 관리자라 부른다. 이 에너지 관리자는 계절과 날씨에 따른 태양의 일사량, 패널 크기와 종류에 따른 수집 특성, 수집되는 에너지를 저장하는 저장 장치의 종류별 특성을 반영하여 설계되었다.

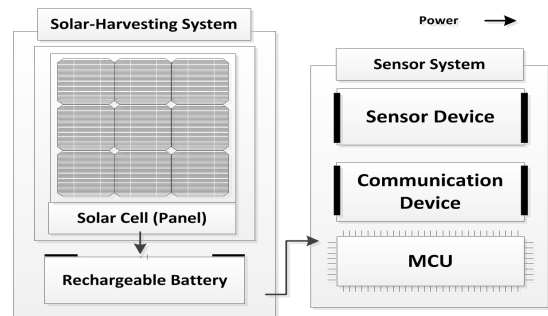


그림 1. 센서 노드의 에너지 수집 구조
Fig. 1 Harvesting system architecture

3.1. 에너지 수집 모델

제안하는 시뮬레이터에서 가장 핵심적인 요소는 태양 에너지 수집이다. 실제 노드에서 수집하는 에너지양을 시뮬레이션하기 위해 태양 에너지 수집형 센서 노드에서 사용하는 패널과 재충전 배터리들의 특성을 반영하였다. 사용하는 패널과 배터리의 종류에 따라 수집되는 에너지양이 다양하게 변화한다.

또한 날씨별, 계절별 태양 에너지의 수집량을 반영하기 위해, TI사의 EZ430-RF2500-SEH (5.9×5.7cm² 크기의 Thin firm panel)를 이용해 실제 1년간 태양 에너지의 시간별 일사량을 측정하여 데이터베이스(Database)화 하였다. 일사량은 10년 주기로 변화는 특성[8]을 가지고 있기 때문에 측정된 데이터는 향후 10년간 유효한 데이터이다.

시뮬레이션에서 필요한 에너지 수집양 예측은 실제 측정된 데이터를 기반으로 태양 에너지 수집양을 예측한다. 예측은 다음과 같은 식(1)으로 이루어진다.

$$H_{t_1}^{t_2} = \int_{t_1}^{t_2} P_{size}^{ratio} \times P_{efficiency}^{ratio} \times B_{efficiency}^{ratio} \times D_t dt \quad (1)$$

수집양($H_{t_1}^{t_2}$)은 실제 측정값(D_t)에 각 특성들의 가중치를 곱한 값이다. 각 특성들은 태양 전지판의 크기 비율, 태양 전지판의 종류별 특성, 배터리 종류별 특성으로 (2)~(4)와 같다.

$$P_{size}^{ratio} = \frac{P_{size}^{input}}{P_{size}^{base}} \quad (2)$$

$$P_{efficiency}^{ratio} = \frac{P_{efficiency}^{input}}{P_{efficiency}^{base}} \subseteq \{P_{single}, P_{poly}, P_{thin}, P_{compounds}\} \quad (3)$$

$$B_{efficiency}^{ratio} = \frac{B_{efficiency}^{input}}{B_{efficiency}^{base}} \subseteq \{B_{SLA}, B_{NiCd}, B_{NiMH}, B_{Liion}, B_{Lipolymer}\} \quad (4)$$

(2)는 기준 일사량 측정에 사용한 태양 전지판 크기 (P_{size}^{base}) 대비 시뮬레이션에 사용된 태양 전지판의 크기 (P_{size}^{input})이고, (3)은 기준 일사량 측정에 사용한 태양 전지판의 에너지 전환 효율($P_{efficiency}^{base}$) 대비 시뮬레이션에 사용된 태양 전지판의 에너지 전환 효율($P_{efficiency}^{input}$)을 나타낸다. $P_{single}, P_{poly}, P_{thin}, P_{compounds}$ 는 패널의 종류로 단결정질, 다결정질, 비결정질(박막형), 화합물 비결정질을 뜻한다. (4)는 기준 일사량 측정에 사용한 배터리의 에너지 전환 효율($B_{efficiency}^{base}$) 대비 시뮬레이션에 사용된 배터리의 에너지 전환 효율($B_{efficiency}^{input}$)이며, $B_{SLA}, B_{NiCd}, B_{NiMH}, B_{Liion}, B_{Lipolymer}$ 은 재충전 배터리의 종류를 의미한다.

3.2. 에너지 소비 모델

에너지 소비 모델은 송신, 수신, 시스템, 배터리에서 각각 사용된 에너지로 예측한다. 시간 t_1, t_2 사이에 소모되는 에너지 예측은 다음과 같은 식(5)으로 이루어진다.

$$C_{t1}^{t2} = (C_{RX} + C_{TX} + C_{system} + C_{battery}^{t1}) \times (t_1 - t_2) \quad (5)$$

식(5)의 각 항목의 값은 아래 수식과 같이 계산된다.

$$C_{RX} = k1 \times \beta \quad (6)$$

$$C_{TX} = k2 \times (\alpha_1 + \alpha_2 d^p) \quad (7)$$

$$C_{system} = PW \times DC \quad (8)$$

$$C_{battery}^t = E_{residual}^t \times S_{discharge} \quad (9)$$

식(6)의 C_{RX} 는 수신에 사용된 총 에너지로써, 초당 수신되는 비트 k_1 에 비트 당 소모되는 에너지 β 를 곱해

계산된다. 식(7)에서 표현된 C_{TX} 는 송신에 사용된 총 에너지로써, 초당 전송되는 비트 k_2 에 비트 당 소모되는 에너지 α_1 와 증폭기(Amplifier)의 에너지 $\alpha_2 d^p$ (α_2 는 비트 당 증폭기에서 소모되는 에너지, d 는 전송 거리, p 는 환경에 따른 2~4의 값)를 곱해 계산된다. 식(8)의 C_{system} 은 데이터 송신과 수신을 제외하고, 시스템 자체에서 사용하는 에너지 소모 속도를 뜻하며, 전력(PW)에 Duty Cycle(DC)을 곱한 값이다. 식(9)의 $C_{battery}^t$ 는 배터리 에너지의 자연 감소량으로서, t 시점의 잔존 에너지($E_{residual}^t$) 량에 배터리의 자기방전 수치($S_{discharge}$)를 곱한 값으로 계산된다.

3.3. 잔존 에너지 모델

잔존 에너지 모델은 전술한 에너지 수집 모델과 에너지 소비 모델의 작동을 결정하는 모델이다. 잔존 에너지 모델의 식은 (10)과 같다.

$$E_{residual}^t = E_{(init)} + H_0^t - C_0^t \quad (10)$$

시간 t 에서 노드의 잔존 에너지양($E_{residual}^t$)은 배터리의 초기 에너지양($E_{(init)}$)과 t 시점까지의 수집 에너지양(H_0^t)의 합에 소비 에너지양(C_0^t)을 제외한 값이다. 따라서, 센서 노드는 잔존 에너지양에 따라 3가지 모드로 동작하게 된다. 잔존 에너지가 0인 경우($E_{residual}^t = 0$), 노드의 에너지가 없는 경우를 의미하므로 노드가 수면(sleep)상태로 전이하여 에너지 소비 활동이 멈추게 된다. 배터리 기반의 시스템에서는 이런 경우 노드의 수명이 다하게 되어 대체(replacement) 등의 유지보수가 필요하지만, 에너지 수집형 시스템에서는 수면상태로 전이한 후에 추후 에너지 수집이 이루어지면 다시 활성화된다. 이와 반대로, 노드의 잔존 에너지가 배터리의 용량과 같을 경우($E_{residual}^t = B_{capacity}$) 에너지를 수집하여도 저장할 공간이 없으므로 에너지 수집 모델의 동작이 멈추게 된다. 그 이외의 상태($0 < E_{residual}^t < B_{capacity}$)에서는 에너지 수집 모델과 에너지 소비 모델의 동작이 동시에 이루어지는 일반적인 상태가 된다. 아울러 재충전 배터리의 종류에 따른 특성을 반영하기 위해, t 시점에서 완전 충·방전 횟수가 선택된 배터리 타입의 충·방전 한계 횟수를 넘어가면 재충전 배터리의 성능을 보장 할

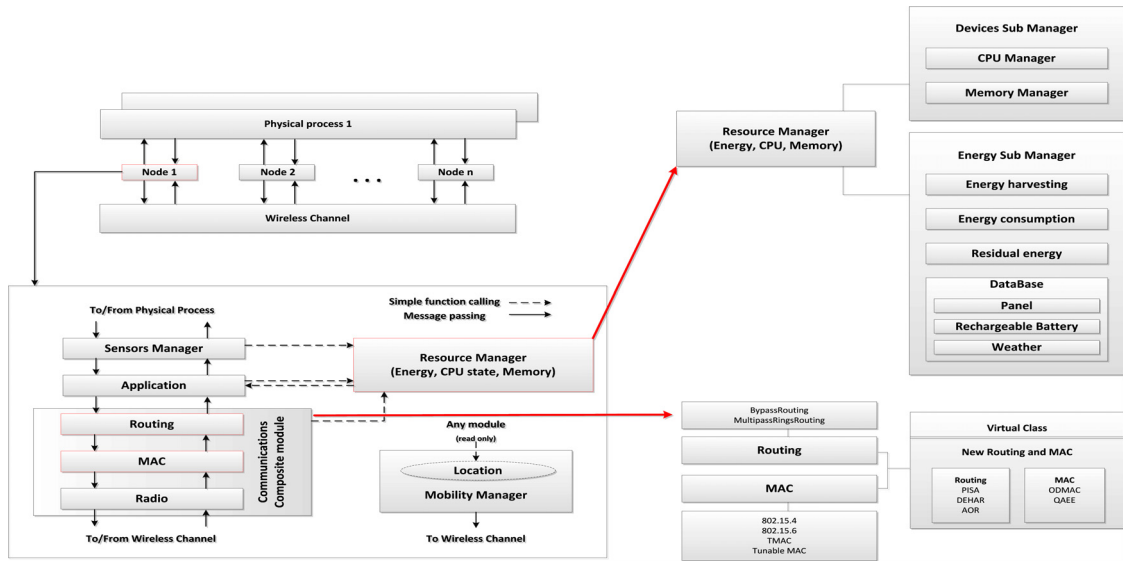


그림 2. 시뮬레이터 전체 구조 및 Harvesting 추가 모듈
Fig. 2 Structure of simulator and energy harvesting module

수 없으므로, $E_{residual}^t$ 의 값을 0으로 유지하도록 하였다.

IV. 시뮬레이터 구조 및 구현

제안하는 시뮬레이터는 기존 센서 시뮬레이터인 Castalia[9]를 기반으로 구현하였다. Castalia는 Sensor Manager, Resource Manager, Mobility Manager, Communications Composite Module, 그리고 Application 부분으로 구성 되어 있으며, 전체 구조는 [그림 2]의 왼쪽 부분과 같다[9].

4.1. 모듈 구조

제안하는 시뮬레이터는 [그림 2]의 오른쪽 부분과 같이, 기존의 Resource Manager 부분을 Devices sub Manager와 Energy Sub Manager로 구분하고, 에너지 수집 모듈을 Energy Sub Manager에 추가하였다. Energy Sub Manager는 앞서 기술한 에너지 수집 모델, 에너지 소비 모델, 잔존 에너지 모델과 Database로 구성 된다. Database는 실측값을 기반으로 패널 종류별 에너지 전환율 및 저장 장치의 종류별 특성, 계절과 날씨 정보에 따른 수집에너지 양 등의 정보를 가지고 있어, 실

제와 유사한 환경에서의 시뮬레이션을 가능케 하였다. 또한 Communication Composite Module은 라우팅 및 MAC 프로토콜들을 지원하는 모듈로서, 본 시뮬레이터에서는 태양에너지 기반 WSN을 위해 제안된 주요 라우팅 및 MAC 프로토콜을 구현하여 제공하고 있다. 제공하고 있는 프로토콜은 아래와 같다.

- **Routing protocol:** PISA(Priority-based Path Selection Algorithm)[10], DEHAR(Distributed Energy Harvesting Aware Routing)[11], AOR(Adaptive Opportunistic Routing)[12]
- **MAC protocol:** ODMAC(On-Demand MAC)[13], QAEE(QoS Aware Energy-Efficient) [14] MAC

4.2. 사용자 인터페이스

효율적인 사용자 인터페이스 설계 시 요구사항은 다음과 같다. 처음 사용할 시 사용 방법이 직관적(Intuitiveness)이어야 하며 그것이 여러 부분에 걸쳐 일관적(Consistency)이어야 학습의 효율을 높일 수 있다. 아울러 학습 후 효율적(Effectiveness)으로 사용할 수 있어야 한다[15]. 제안된 시뮬레이터는 이러한 점을 고려하여 그래픽 사용자 인터페이스(Graphical User Interface, GUI)를 제공하고 있다. 그래픽 사용자 인터

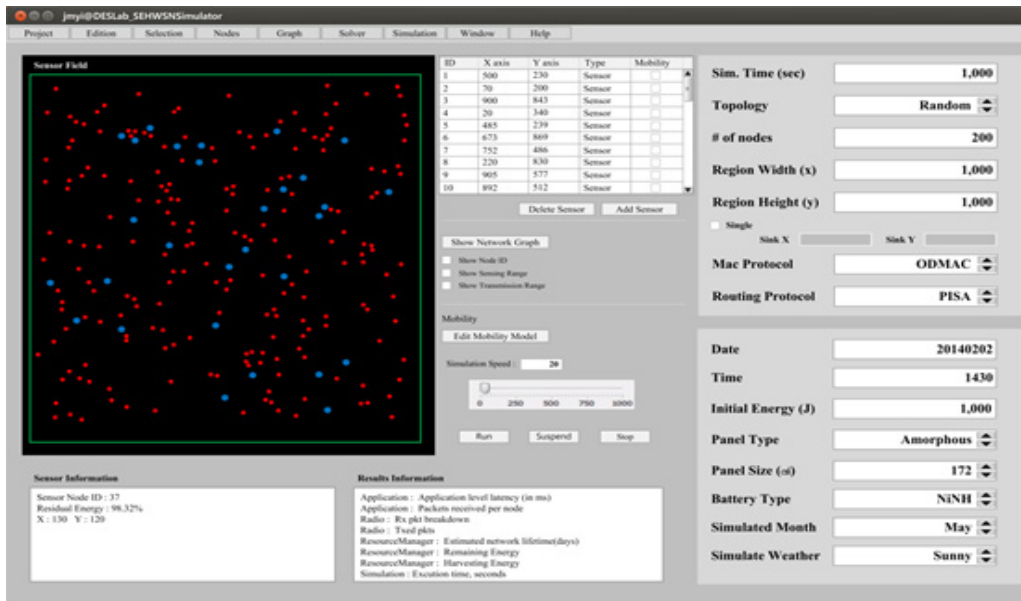


그림 3. 시뮬레이터 GUI 구조
Fig. 3 GUI structure of simulator

페이스는 명령 줄 인터페이스(Command Line Interface)에 비해 직관적인 장점이 있으며, 이전 시뮬레이션 명령 기억, 시뮬레이션 세트(Set) 저장 기능, 자동완성 기능 등을 통해 효율적인 실험을 가능하게 한다.

[그림 3]은 본 시뮬레이터의 GUI이며, GUI 사용법은 다음과 같다. 우측의 표시된 메뉴 기반 윈도우는 기본적인 시뮬레이션 환경 설정 부분으로 시뮬레이션 시간, 노드 배치 타입, 노드의 수, 센서 필드의 크기를 설정할 수 있다. 또한 라우팅과 MAC 프로토콜도 선택할 수 있으며, 태양 에너지의 수집 조건을 간편하게 설정할 수 있다. 설정하는 방법은 직접 입력하거나, 선택 방식이 있고, 설정 내용은 태양 에너지 수집에 영향을 미치는 계절, 날씨, 태양 전지판의 크기 및 종류, 저장 장치의 종류 등이 있다.

설정을 완료 한 후, 좌측에 나타난 노드 배치 윈도우를 통해 센서 노드들의 토폴로지와 라우팅 경로, 전송 범위 등을 알 수 있고, 가운데 위치한 센서 노드 설정 창을 이용하여 노드들의 위치 및 타입(sink/sensor), 추가 생성 및 삭제를 간편하게 할 수 있다.

이 외 네트워크(clock drift, 송수신 파워 등) 설정, 시뮬레이션 결과, 트레이스 출력 방식 등 시뮬레이션 분

석과 관련된 세부적인 설정은 맨 위 상단 메뉴를 사용하여 설정 할 수 있다.

V. 응용 프로그램 시뮬레이션

제안한 시뮬레이터의 동작을 검증하기 위해 에너지 관련 부분을 제외한 나머지 조건은 동일한 상태에서 배터리 기반 WSN을 위한 시뮬레이터의 결과와 비교하여 보고, 아울러 제안한 시뮬레이터의 에너지 관련 결과를 분석하여 보았다.

시뮬레이션은 총 172800 초 동안 진행 되었으며, 25m × 25m의 사각형 영역에 싱크 노드를 중앙에 위치시키고, 나머지 12개의 노드는 랜덤 배치한 토폴로지를 사용하였다. 각각의 노드는 -15dBm의 송신 파워로 10 초에 한번 씩 센싱을 하며, GPRS 라우팅과 CSMA/CA의 기반의 TunableMAC 프로토콜을 사용하여 싱크 노드에게 sensory data를 전달한다. 자세한 환경 설정은 [표 1]과 같고, 평균적으로 하루 동안 수집되는 에너지의 양이 하루 동안 소비되는 에너지의 양에 비해 약 10% 정도 많도록 노드의 duty cycle을 설정하여, 원치

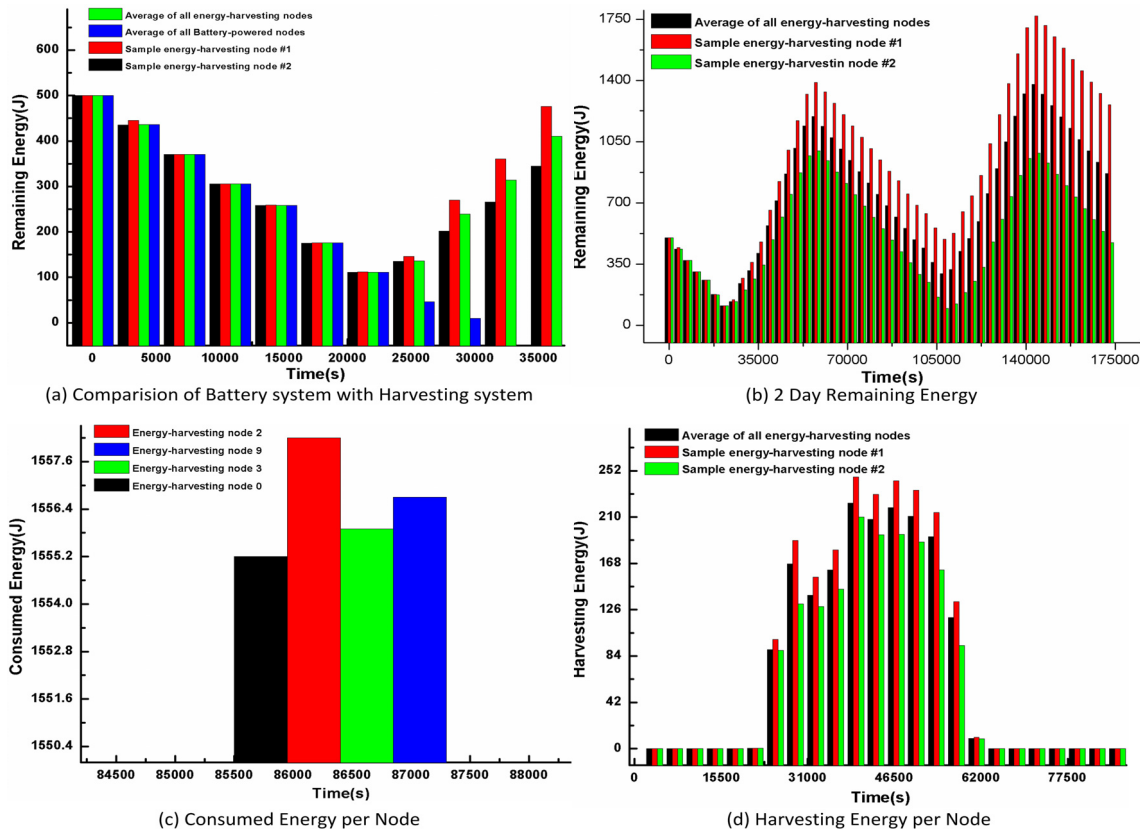


그림 4. Simulation 에너지 결과
Fig. 4 Simulation energy result

않는 blackout time이 없도록 조정하였다.

시뮬레이션 결과, 각 노드에서 하루 동안 소비하는 평균 에너지는 약 $352mAh$ 이고, 하루 동안 수집 되는 평균 에너지는 약 $394mAh$ 으로 측정된 것을 확인하였다. 초기 배터리의 에너지 잔량이 $113mAh(500J)$ 이기 때문에, [그림 4-a] 에서처럼 기존 배터리 기반의 시스템은 초기 에너지양 만큼의 에너지 자원을 6시간~7시간 만에 소모하여 네트워크 동작을 멈추게 되지만, 에너지 수집형 시스템은 하루를 주기로 에너지 양의 변화가 발생하여, 노드의 영속적인 동작이 가능한 것을 알 수 있다. [그림 4-b]는 특정 노드가 0시(자정)에 시작하여 이후 2일간 동작한 잔존 에너지의 변화량을 보여주는데, 낮 시간의 에너지 수집 활동을 통해 밤과 새벽시간에 시스템 활동이 가능하며, 2일째 자정의 잔여 에너지량은 첫째날 자정의 에너지양보다 많은 것을 알 수 있는

데, 이는 duty-cycle을 조정하여 노드가 blackout 하는 것을 막도록 하기 위함이다. 또한 [그림 4-c]는 각 노드에서 소모한 에너지의 양을 나타낸다. 싱크 노드와 가까우면서 node 8, node 12, node 7로부터 패킷을 전달받아 relay해야 하는 node 6과 node 3, node 9, node 11로부터 패킷을 전달 받아 relay 해야 하는 node 2가 가장 많은 패킷을 전송하고 있으므로 에너지 소모가 가장 많고, relay 해야 하는 이웃 노드가 1개씩 존재하는 node 12, node 9, node 4, node 5번이 그 다음으로 많은 에너지를 사용하는 것을 알 수 있다. 마지막으로 [그림 4-d]는 각 노드에서 하루 동안 수집된 에너지의 양의 평균 변화와 sample 노드들의 수집된 에너지양의 변화를 보여주고 있는데, 구름, 그늘, 먼지 등으로 인해 실제 환경에서 발생할 수 있는 노드별 에너지 수집량의 차이를 반영하여 의도적으로 약간의 편차를 준 것을 확인 할 수 있다.

표 1. 시뮬레이션 환경

Table. 1 Simulation Environment

Parameter	Value
Simulation Time	172800(s)
Field Size	25 by 25(m)
Node	13
Topology	Random(Sink-Center)
Racket Rate	0.1
TX Power	-15dBm(3~6)
Routing	GPSR
MAC	TunableMAC(CSMA/CA)
Weather	Sunny
Season	Fall
Solar Cell	Thin
Cell Size	32 by 21(cm)
Rechargeable Battery	NiMH
Battery Capacity	2500(mAh)
Initial Energy	113(mAh)

VI. 결 론

태양 에너지 기반 무선 센서 네트워크는 기존 배터리 기반의 무선 센서 네트워크에서 발생하는 제한된 에너지 문제를 근본적으로 해결시켜주고 있다. 하지만, 기존에 연구된 대부분의 시뮬레이터들은 배터리 기반 시스템이 주요 타겟이었고, 에너지 수집형 시스템을 전혀 고려하고 있지 않다. 하지만, 본 연구에서는 태양 에너지의 기반 무선 센서 네트워크 시뮬레이션을 하기 위해 태양 에너지 수집 모듈을 구현 하였고, 태양 에너지 수집 모듈은 패널의 크기와 종류, 저장 장치의 종류와 크기, 계절, 날씨 정보를 반영하고 있다. 이를 통해 태양 에너지 기반 라우팅과 MAC 프로토콜들의 사용이 가능해 졌으며, 새로운 프로토콜 연구에도 사용 할 수 있다. 제안한 태양 에너지 수집 모듈은 SEH 노드로 실제 측정된 데이터를 DataBase화 하였으며, 노드별 일사량 노이즈 조절이 가능하다. 더불어 사용자 친화형 GUI 제공으로 사용자 들이 쉽게 시뮬레이션을 할 수 있다.

본 연구는 기존 무선 센서 네트워크의 제한된 에너지 문제를 극복한 에너지 수집형 무선 센서 네트워크 시뮬레이션을 할 수 있으며, 태양 에너지 기반 무선 센서 네트워크 분야의 특성 및 성능 향상을 위한 연구 도구로 활용 가능하다.

감사의 글

이 연구는 2012년도 숭실대학교 교내연구비 지원에 의한 연구임

REFERENCES

- [1] S. Sudevalayam and P. Kulkarni, "Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications," *IEEE Communications Surveys and Tutorials* vol. 13, no. 3, pp. 443-461, Third Quarter 2011.
- [2] J. Taneja, J. Jeong, and D. Culler, "Design, Modeling, and Capacity Planning for Micro-solar Power Sensor Networks," in *Proceeding of the 7th Annual IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, St. Louis: MO, pp. 407 - 418, 2008.
- [3] B. Musznicki, P. Zwiezkyowski, "Survey of Simulators for Wireless Sensor Networks," *International Journal of Grid and Distributed Computing*, vol. 5, no. 3, pp. 23-50, Sep. 2012.
- [4] P. Levis, N. Lee, M. Welsh, D. E. Culler, "Tossim: Accurate and scalable simulation of entire tinyos applications," in *Proceedings of the 1st Annual ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Los Angeles: CA, pp. 126-137 2003.
- [5] B. Titzer, D. K. Lee, J. Palsberg, "Avrora: Scalable sensor network simulation with precise timing," in *Proceedings of the 4th Annual ACM and IEEE International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, Los Angeles: CA, pp. 477-482, 2005.
- [6] S. Sundresh, W. Y. Kim, G. Agha, "SENS: A Sensor, Environment and Network Simulator," in *Proceedings 37th Annual IEEE Simulation Symposium*, San diego: CA, pp. 221-228, 2004.
- [7] J. Polley, D. Blazakis, J. McGee, D. Rusk, J. S. Baras, "ATEMU: A Fine-Grained Sensor Network Simulator," in *Proceedings of SECON'04, 1st Annual IEEE International Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, Santa Clara: CA, pp. 145-152, 2004.
- [8] Korea Meteorological Administration, "Weather Resources Analysis Report for the Optimal Utilization of Solar Energy," Publication of the registration number : 11-1360000-

- 000425-01, Dec. 2008.
- [9] The Castalia simulator for Wireless Sensor Networks [Internet], Available: <http://castalia.npc.nicta.com.au>.
- [10] D. G. Noh, D. E. Lee, and H. S. Shin, "QoS-Aware Geographic Routing for Solar-Powered Wireless Sensor Networks," *The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers Transactions on Communications*, vol. 90-B no. 12 pp. 3373-3382, Dec. 2007.
- [11] M. K. Jakobsen, J. Madsen, M. R. Hansen, "DEHAR : a Distributed Energy Harvesting Aware Routing Algorithm for Ad-hoc Multi-hop Wireless Sensor Networks", in *Proceedings of the 11st Annual IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, Montreal: QC, pp. 1-9, 2010.
- [12] Z. A. Eu, H. P. Tan, "Adaptive opportunistic routing protocol for energy harvesting wireless sensor networks", in *Proceedings of the 47th Annual IEEE International Conference on Communications*, Ottawa: OO, pp. 318-322, 2012.
- [13] X. Fafoutis, N. Dragoni, "ODMAC: An On-Demand MAC Protocol for Energy Harvesting - Wireless Sensor Networks", in *Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks*, Miami: FL, pp. 49-56, 2011.
- [14] S. C. Kim, J. H. Jeon, H. J. Park, "QoS Aware Energy-Efficient (QAEE) MAC Protocol for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks", in *Proceedings of the 6th International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology*, DaeJeon, pp41-48, 2012.
- [15] S. Krug, *Don't Make Me Think! A Common Sense Approach to Web Usability*, 3rd ed. San Francisco, CA: New Riders, 2004.



이준민(Jun Min Yi)

2012년 배재대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
 2012년 9월 ~ 현재 송실대학교 전자공학과 석사과정
 ※ 관심분야 : Cyber Physical System, Embedded System, Wireless Sensor Network



강민재(Min Jae Kang)

2011년 배재대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
 2012년 9월 ~ 현재 송실대학교 전자공학과 석박사통합과정
 ※ 관심분야 : Sensor Network, Embedded System



노동건(Dong Kun Noh)

2000년 서울대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
 2002년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)
 2007년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
 2007년 ~ 2010년 Dept. of CS in UIUC 박사후 연구원
 2012년 ~ 현재 송실대학교 정보통신전자공학부 조교수
 ※ 관심분야 : Embedded System, Mobile Computing, Ubiquitous Sensor Network