

---

# 사용자 친화형 태양 에너지 기반 센서 네트워크 시뮬레이터 구현을 위한 Castalia 시뮬레이터 분석

이준민 · 강민재 · 노동진

송실대학교

Analysis of the Castalia Simulator to Implement User-friendly Simulator for Solar  
Energy Harvesting WSNs

Jun Min Yi · Min Jae Kang · Dong Kun Noh

Soongsil University

E-mail : {jmyi, mjkgang, dnoh}@ssu.ac.kr

## 요 약

기존의 센서 네트워크 시뮬레이터는 배터리 기반의 센서를 모델링 하고, 이를 기반으로 한 MAC 프로토콜 및 라우팅 프로토콜 등을 제공하고 있다. 최근에 에너지 수집형 센서들이 활발히 연구되면서 이를 위한 시뮬레이터의 필요성이 증가하고 있는데 비해, 해당하는 연구는 미미한 수준이다. 에너지 수집형 센서 시스템을 위한 시뮬레이터들은 기존 시뮬레이터의 에너지 모델과는 달리 에너지 수집 모델과 재충전 가능 배터리 모델, 에너지 소비 모델이 결합된 새로운 에너지 모델을 필요로 한다. 아울러 태양 에너지 기반 센서 네트워크를 위해 제안된 잘 알려진 MAC 및 라우팅 프로토콜들도 기본적으로 제공하여야 하고, 사용자가 쉽게 시뮬레이터를 활용할 수 있도록 사용자 친화형 인터페이스도 제공되어야 한다. 본 연구에서는 기존의 Castalia 시뮬레이터를 분석하여, 이를 기반으로 사용자 친화형 태양 에너지 기반 센서 네트워크 시뮬레이터를 제안한다.

## ABSTRACT

Most of existing simulator for wireless sensor networks (WSNs) models the battery-based sensor and provides the MAC and routing protocols designed for the battery-based WSNs. Recently, however, as the energy harvesting sensor systems are studied widely, the require of the simulator for them is getting increased; but the related work is insignificant. Unlike the existing simulators, the simulator for the energy-harvesting WSNs requires the new energy model which is integrated with the energy-harvesting model, rechargeable battery model and energy-consuming model. Additionally, it should provide the well-known MAC and routing protocols designed for the energy-harvesting WSNs, and also provide the user-friendly interface for the convenient usage. In this work, we analysis the existing Castalia simulator and revise it for the user-friendly simulator for the solar energy harvesting WSNs.

## 키워드

시뮬레이터, 태양 에너지, 센서 시스템, 센서 네트워크, Castalia

## 1. 서 론

현재 무선 센서 네트워크의 제한적인 배터리

문제를 해결하기 위한 방법으로 잔존 에너지의 효율적인 사용, 저전력 시스템 설계 등 다방면으로 제한적인 에너지를 문제를 개선하기 위한 많

은 연구가 진행되고 있다. 또한, 최근 들어 에너지 수집형 센서들도 활발히 연구되고 있다. 하지만 이를 위한 시뮬레이터의 연구는 미미한 수준으로서 에너지 수집형 센서 네트워크 시뮬레이터의 필요성은 날이 증가하고 있다. 그래서 우리는 기존 배터리 기반의 시뮬레이터 중 하나인 Castalia[1]에 태양 에너지 기반 센서 네트워크를 위한 모델들을 추가하기 위해 구현 방안을 연구하였다.

Castalia는 WSNs(Wireless Sensor Networks)와 BAN(Body Area Networks)를 위한 시뮬레이터이다. Castalia는 OMNet++ NED언어로 만들어진 .ned 파일 통해 모듈들의 파라미터, 인터페이스와 가능한 서브 모듈 구조들을 쉽게 정의 할 수 있고, C++ 언어로 구현된 .h과 .cc파일을 통해 모듈의 세부 행동을 정의 한다. 단순한 모듈이라면 C++ 파일과 .ned 파일만 존재하고, 복잡한 모듈이면 서브 모듈을 정의한 서브 디렉터리가 존재한다. 그리고 CSMA 매커니즘을 반영한 Tunable MAC, T-MAC, S-MAC, IEEE 802.15.4 MAC, BAN MAC을 지원하며, BypassRouting, MultipathRingsRouting 모듈을 지원한다. 또한, 새로운 MAC, 라우팅, 노드의 이동성 관리 모듈을 구현하고, 새로운 모듈을 적용할 수 있게 설계된 시뮬레이터이다[2].

현재 대부분 사용하는 센서 노드들의 에너지원은 배터리이다. 사용되고 있는 노드의 에너지원 자체를 교체하여 연구하는 것은 많은 어려움이 있어, 연구적 사용을 목적으로 배터리 기반의 센서 네트워크 시뮬레이터인 Castalia를 수정하였다. 태양 에너지를 추가하기 위해 우리는 실제 eZ430-RF2500-SEH의 태양 전지판을 사용하여 실험하였고, 그 결과 값을 태양 에너지 모듈 구현 자료로 사용하였다.

## II. 관련 연구

무선 센서 네트워크에 에너지 수집에 관한 연구에서 제안된 사용 가능한 에너지원은 태양, 바람, 진동이다. 이 중에서 태양 에너지는 다른 에너지에 비해 에너지의 밀도가 크고, 짧은 시간에 많은 에너지를 얻을 수 있어 에너지원으로 잘 사용된다. 하지만 날씨에 영향을 받아 흐린 날이나 밤에는 에너지 수집이 어렵다. 이러한 문제점이 있지만 W.Raghunathan[3]과 Alippi[4] 등 현재 많은 이들은 센서 네트워크에서 태양 전지판을 이용하여 에너지 수집 모델을 사용하기 위해 연구하고 있다.

센서 네트워크 시뮬레이터들에 에너지 수집 모델이 반영된 시뮬레이터들은 거의 찾기 어렵지만 [5], Antonio Sanchez는 ns-3에 태양 에너지 수집 모델을 추가한 연구[6]도 있다. 하지만 센서 네트워크 시뮬레이터의 종류에 따라 서로 다른 기능들을 제공하고 있어, 대다수의 에너지 수집형 센

서 네트워크 시뮬레이터들의 각 특성들을 고려하여 만족하게 하기에는 미미한 상태이다. 시뮬레이터들의 고유의 특성에 맞추어 에너지 수집 모델을 추가하기 위한 연구는 앞으로 더욱더 요구되고 필요할 것이다.

본 연구에서는 태양 에너지 수집 모델을 구현하기 위한 기초 작업을 하고, 센서 노드가 충전된 에너지양과 남아있는 에너지양을 판단하여 활용하는 것에 초점을 두고 있다.

## III. 에너지 수집형 모델을 추가하기 위한 Castalia 분석

Castalia는 실제 시스템에서 센서 네트워크 시스템을 구축하기 전 시뮬레이션을 통해 일부 통신 패턴을 테스트할 수 있다. 이때 배터리 기반의 시스템이 아닌 에너지 수집형 센서 시스템을 구현하기 위해 Castalia의 전체적인 노드 구조와 내부 노드 구조를 분석하고 우리가 실험한 태양 에너지 수집 모델의 데이터를 접목한다.

### 3.1 노드 구조

각각의 노드들은 서로 직접 연결되어있지 않고 Wireless Channel 모듈을 통해 서로 패킷 통신을 한다. 또한, 각 노드의 모니터링 결과는 Physical process 모듈을 통해 연결되어 있는 설명이 그림 1.이다. 노드 내부 복합 모듈 구조는 다음 그림 2.와 같다.

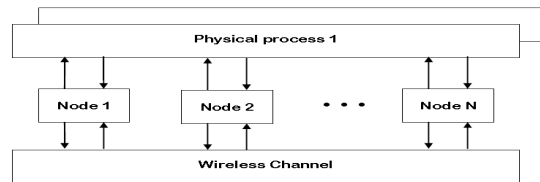


그림 1. 모듈들과의 연결

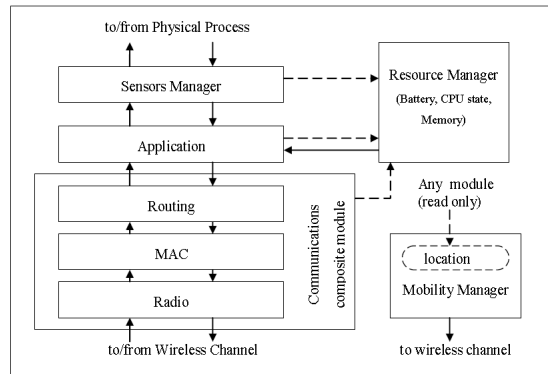


그림 2. 노드 내부 복합 모듈 구조

각 모듈을 연결한 실선 화살표는 메시지 전달을 의미하고 점선 화살표는 간단한 함수 호출을 의미한다. Application 모듈은 보통 사용자가 수정하는 부분으로 시뮬레이션을 위한 새로운 응용 프로그램을 생성할 수 있다. Routing, MAC, Mobility 모듈은 사용자가 수정하여 새로운 프로토콜이나 이동 패턴 등을 변경시킬 수 있다. 각 모듈은 OMNet++ NED언어를 사용하여 구현되어 있고, 모듈의 세부 행동 정의는 .cc파일과 .h파일로 C++언어로 구현되어 있다.

### 3.2 에너지 소모

에너지 소모 계산은 Resource Manager의 .cc파일에서 계산되고 소모된 에너지량은 그림 2.에서 처럼 노드의 다른 모듈들이 Resource Manager를 호출하고 Battery부분에서 계산된 값을 모듈에 메시지로 전달하게 된다.

노드의 초기 에너지는 18,720J로 AA배터리 2개의 용량이며, 기본 설정된 노드의 전력 소모 값은 6mW이다. Resource Manager 모듈에서 에너지 소비 계산은 1,000msec당 계산되고 있고, 현재 시뮬레이터에서 노드의 에너지 소모 계산에 사용된 수치들은 변경 가능하며, 각 노드별로 사용된 소모 에너지를 알 수 있다. 에너지 소비를 계산하는 부분을 그림 3.에서 간략하게 보여주고 있다.

```
ResourceManager::calculateEnergySpent()
{
    ...
    simtime_t timePassed =
    simTime() - timeOfLastCalculation;
    ...
    consumeEnergy(SIMTIME_DBL
    (timePassed * currentNodePower / 1000.0));
    ...
}
ResourceManager::consumeEnergy(double amount)
{
    ...
    remainingEnergy -= amount;
    ...
}
```

그림 3. 에너지 소비 계산 코드

## IV. Castalia에서 에너지 수집형 모델 구현

### 4.1 실제 에너지 수집 모델

에너지 수집형 모델에 필요한 에너지 수집량을 확인하기 위해 우리는 한 달 동안 실험을 하였다.

실험 환경은 TI사의 eZ430-RF2500-SEH의 태양 전지판을 통해 태양 에너지를 수집하고, 에너지량 측정을 위해 Agilent사의 34411A 멀티미터를 사용하였다.

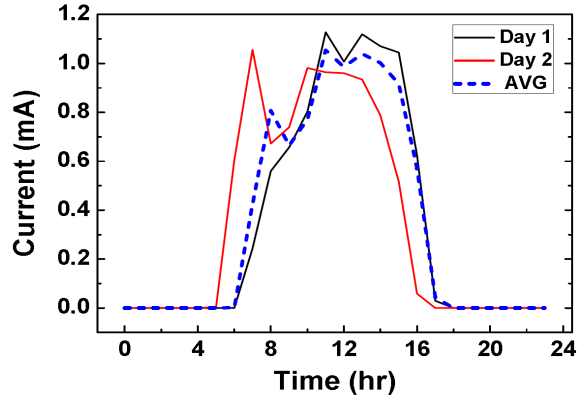


그림 4. 수집된 에너지 양

측정은 1,000msec 간격으로 전류를 측정하여 데이터를 로깅(Logging)한다. 로깅한 데이터를 한 시간 간격으로 나누어 전류의 평균값을 나타내면 그림 4가 된다. 그 결과 하루 동안 수집된 에너지량을 확인할 수 있는데, 그래프에 나타나듯 해가 진 밤에는 에너지 수집이 되지 않고, 일출부터 에너지 수집량은 점점 증가하고 일몰 시간과 가까워질수록 수집되는 에너지의 양은 점점 감소하는 것을 확인할 수 있다. Day 1(6시 ~ 19시까지)에서 수집된 에너지량은 8.417mAh이고, Day 2(6시 ~ 18시까지)에서 수집된 에너지량은 8.868mAh이다. AVG는 DAY들의 평균값으로 수집된 에너지량은 8.642mAh이다.

### 4.2 에너지 수집 모델 구현

우리가 실험한 태양 에너지 수집량을 Castalia Resource Manager에 적용하기 위해서는 시뮬레이션 실행 시 조건으로 시뮬레이션 시작 시간을 입력 한다. 이때 시작 시간이란 프로그램 시작 시간이 아닌 실제 환경에서의 시간을 의미한다. 이 시간 값을 바탕으로 실험한 데이터의 시간당 평균값의 데이터와 시간과 일치 시켜 그 시간에서의 수집되는 에너지를 재충전 가능한 배터리 부분에 에너지를 추가한다. 이때 추가되는 에너지의 값은 수집된 데이터에서 하루 시간대를 일정 구간으로 나누어 구간별 에너지 수집 값의 평균값을 사용한다. 그림 5.는 Castalia에 태양 에너지 수집 모듈을 추가한 전체적인 배터리 모듈의 구조이다. Energy Harvesting 모듈을 추가함으로써 센서 노드들은 배터리 기반의 시스템보다 좀 더 효율적으로 잔존에너지 사용을 해야 한다. 충전되는 에너지양에 비해 에너지 사용량이 많아 전체적인 에너지가 부족해도 시스템의 효율성에 문제가 되고, 에너지 사용량이 적어 더 이상 수집된 에너지를 보관할 수 없게 되어도 문제가 된다. 즉 전체 에너지원의 에너지 용량에 맞춰 에너지가 넘치거나 부족하지 않도록 주의해야한다. 결국 원하는 시점에 많은 작업 또는 적은 작업을 하고

전송 파워 역시 잔존 에너지를 가만해 유동적으로 변화해서 센싱 및 데이터를 송·수신해야 한다.

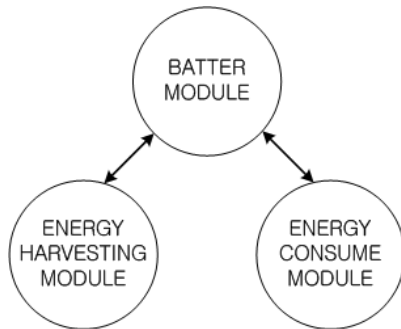


그림 5. 에너지 수집과 소비관계 구조

### V. 결 론

본 연구는 기존 배터리 기반의 센서 네트워크 시뮬레이터 Castalia에 에너지 수집형 모델을 구현하기 위해 코드를 분석하고, 에너지 수집 모델을 추가하기 위해 에너지 수집량을 측정하여 그 결과를 바탕으로 에너지 수집형 모듈 구현을 위한 기초 작업을 하였다. 모듈 구현이 완료하게 되면 이로써 기존의 센서 네트워크 시뮬레이터에서 제한적인 배터리 문제로 시뮬레이션할 수 없었던 부분을 해결하고 무한한 에너지원으로 동작하는 센서에 관한 연구를 시뮬레이션할 수 있다.

### VI. 향후 연구과제

먼저 태양 에너지 기반 에너지 수집형 모듈 구현을 위해 준비한 기초 작업을 실제 Castalia에 접목해 구현을 완료한다. 시뮬레이터의 추가 에너지원으로 선택한 태양 에너지는 다른 에너지에 비해 밀도가 높아 짧은 시간으로 많은 에너지를 얻을 수 있고 끊임없이 주기적으로 공급이 되는 자원이지만, 공급되는 양의 변화가 계절, 날씨에 따라 일조량이 달라지고 정확한 날씨 예측이 어렵다는 단점이 있다. 향후 이러한 점을 고려하여 좀 실제 상황과 유사한 환경 조성을 위해 현재보다 더 세분화되고 다양한 에너지 수집 모델을 구현함으로써 센서 노드들의 수명 연장 및 잔존 에너지에 따라 효율적인 활동을 할 수 있게 해야 한다. 또한 시뮬레이션하기 위한 조건 설정을 여러 파일을 확인하지 않고도 한 파일에서 쉽게 사용할 수 있게 하며, 태양 에너지 기반 센서 네트워크를 위해 제안된 MAC 및 라우팅 프로토콜들을 더 추가하여, 여러 상황과 조건에서도 사용 가능하게 한다.

### 감사의 글

본 논문은 지식경제부 기술혁신사업(산업융합 원천기술개발사업)으로 지원된 연구임. (No. 10039239)

### 참고문헌

- [1] <http://castalia.research.nicta.com.au/index.php/en/>
- [2] A. Boulis, Castalia: A simulator for wireless Sensor Networks and Body Area Networks User's manual Version 3.2, 2011
- [3] Vijay Raghunathan, Aman Kansal, Jason Hsu, Jonathan Friedman, Mani B. Srivastava, "Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems," in Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, Los Angeles, USA, 2005
- [4] Cesare Alippi, Cristian Galperti, "An adaptive system for optimal solar energy harvesting in wireless sensor network nodes," IEEE Trans. on Circuits and Systems Vol. 55-I No. 6 Pg. 1742-1750, 2008
- [5] Geoff V. Merrett, Neil M. White, Nick R. Harris, Bashir M. Al-Hashimi, "Energy-Aware Simulation for Wireless Sensor Networks," Sixth Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON 2009), Rome, Italy, 2009
- [6] Antonio Sanchez, Salvador Climent, Sara Blanc, Juan Vicente Capella Hernandez, Ignacio Piqueras, "WSN with Energy-Harvesting : Modeling and Simulation based on a Practical Architecture using Real Radiation Levels," Proceedings of the 6th ACM workshop on Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks PM2HW2N'11, Miami, Florida, USA, 2011