

ULP 자기유지 센서노드 시스템의 시뮬레이션

정회원 김 윤 호*, 성 영 략*, 오 하 령*, 박 준 석*

Simulation of ULP Self-Sustaining Sensor Node System

Yun-ho Kim*, Yeong-rak Seong*, Ha-ryoung Oh*, Jun-seok Park* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 에너지 수확 센서 네트워크 시스템을 DEVS 형식론을 이용해서 시뮬레이션하고 모델링한다. 이 시스템은 주전원이나 배터리를 사용하는 싱크(마스터(master)) 노드와 에너지 수확 소자로부터 전원을 공급 받는 센서(slave) 노드로 구성 된다. 시뮬레이션을 위해 (i) 슬레이브 노드에서 에너지 수확하고 저장하는 회로의 동작을 연속적인 구간들로 분할한 후에 각 구간을 이산적인 상태로 표현하고, (ii) 마스터 노드와 슬레이브 노드의 컴포넌트들의 동작의 관계를 면밀하게 분석하여, (iii) 분석된 결과를 DEVS 형식론을 이용하여 모델링하고 시뮬레이션 한다.

Key Words : Energy harvesting, Sensor node system, Discrete event, Simulation, Self-Sustaining

ABSTRACT

In this paper, an energy harvesting sensor network system is modeled and simulated by using the DEVS (Discrete Event System Specification) formalism. The system is composed of a sink (master) node, which is battery or mains powered, and a set of sensor (slave) nodes, each of which harvests ambient energy and converts it into electrical energy. For simulation, (i) the behavior of energy harvesting and storing circuits of the slave node is partitioned into a set of piecewise continuous segments and then each segment is represented as a discrete state; (ii) the interaction among the master node and components of the slave node is investigated precisely; and (iii) the investigated result is modeled and simulated by using the DEVS formalism.

I. 서 론

센서 네트워크(sensor network)는 물리공간의 상태인 빛, 소리, 온도, 움직임 같은 물리적 데이터를 센서노드에서 감지하고 측정하여 중앙의 싱크노드로 전달하는, 센서노드들로 구성되는 네트워크이다^[1]. 센서노드는 무선 환경에서 동작하는 특성 때문에 전원으로 배터리를 사용하는 것이 일반적인데, 배터리는 수명이 유한하기 때문에 센서노드의 수명도 배터리의 수명에 종속적일 수밖에 없다. 뿐만 아니

라 최근 환경오염 문제가 이슈가 되면서 배터리의 사용을 지양하는 추세이다. 이러한 이유로 배터리를 대체하는 기술에 대한 많은 연구가 진행되고 있는데, 그중에 최근 각광받는 기술로 에너지 수확(energy harvesting)기법이 있다.

에너지 수확 기법이란 사람이나 동물의 생체 에너지나 운동 에너지 등과 주변 환경에 산재해 있는 빛, 열, 진동 등과 같은 자연 에너지 등으로 부터 다양한 시스템을 구동시킬 전력을 얻을 수 있는 신 재생 에너지 기술로 외부의 에너지원이 존재하는

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신 연구진흥원의 IT산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음 [2008-F-050-02, 자기유지 WBAN/USN-용 u-Scavenging 기술개발]

* 본 연구는 지식경제부의 산업원천기술개발사업(과제번호 10033869) 일환으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

* 국민대학교 전자과 컴퓨터공학 실험실 (unonet@nate.com, yeong@kookmin.ac.kr)

논문번호 : #KICS2009-10-526, 접수일자 : 2009년 12월 11일, 최종논문접수일자 : 2009년 12월 11일

한 반영구적으로 에너지를 획득할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 현재의 에너지 수확 기법으로 획득 가능한 에너지는 수십 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 에서 수 mW/cm^2 로 매우 적다^[2]. 태양광을 이용할 경우 이보다 더 높은 에너지를 획득할 수도 있지만 실내조명(600 LUX)의 환경에서는 수십 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 에서 수 mW/cm^2 정도의 에너지밖에 획득하지 못한다. 이런 한계를 극복하기 위해서는 센서노드가 더 오랜 시간동안 에너지를 획득하도록 하거나 획득한 에너지를 좀 더 효율적으로 사용할 수 있어야 하기 때문에 이를 위한 다양한 연구가 이루어지고 있다.

최근에 무선 센서네트워크의 전원으로 에너지 수확기법을 사용하는 시스템에 대한 여러 연구들이 진행되었다.^{[3]-[5]} 이 중에서 특히 에너지 획득 기술 중 하나인 태양전지를 이용한 대표적인 센서네트워크 프로젝트인 Helimote^[5]에서는 효율적인 전체 센서 네트워크의 에너지 관리 기술을 제시하였다.

본 논문에서는 기존의 센서노드의 소비전력을 줄이는 방법론적 연구와는 다른 관점에서 센서노드의 에너지 소비 자체를 다른 에너지원으로 대체하거나 동작 외 시간에는 전력 소모 자체를 없도록 하기 위해 제안된 기술을 살펴본다. 그리고 이 기술을 이용하여 구현한 시스템인 “WBAN/USN을 위한 자기유지(Self-Sustaining) 센서노드 시스템”^[6]에 대해 알아보고, 앞서 제안된 시스템의 다양한 환경에서의 동작 특성을 평가해 보기 위해서 이 시스템을 모델링하고 시뮬레이션 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 자기유지 센서노드 시스템에 대해서 자세히 알아보고, 3장에서는 이 시스템을 시뮬레이션 하기 위하여 DEVS 형식론^[7]으로 시스템의 각 모듈들을 모델링한 후 시뮬레이션 하여 제안된 시스템의 성능을 검증한다. 마지막으로, 4장에서 결론을 맺는다.

II. ULP 자기유지 센서노드 시스템

센서네트워크 시스템에서 에너지 수확기법을 사용하는 경우 한 번에 수확 가능한 에너지의 양은 cm^2 당 수십 μW ~수 Wm 로 매우 적다. 센서네트워크 시스템에서 획득되는 에너지는 곧 센서노드의 동작에 대한 제약이 된다. 이를 극복하기 위한 방안으로 수확된 에너지를 효율적으로 사용할 수 있는 기술들이 적용된 WBAN/USN을 위한 자기유지 센서노드 시스템^[6]이 제안되었다.

이 시스템은 초저전력으로 동작하는 에너지 수확

센서노드 시스템으로 본 논문에서는 ULP(Ultra Low Power) 자기유지 센서노드 시스템이라고 표현한다. ULP 자기유지 센서노드 시스템은 그림 1과 같은 싱크노드와 그림 2와 같은 센서노드들로 구성되며 센서노드의 소비 전력을 최소화하기 위해 새롭게 제안된 세 가지 기술을 사용한다.

첫 번째 기술은 특정 센서노드만을 선별적으로 동작시켜 센서노드의 에너지 낭비를 줄이는 기술이다. 이 기술은 웨이크업(wakeup) 모듈 내에 구현되어 있다. 일반적인 센서네트워크 환경에서 싱크노드가 요청신호를 보내면 다수의 센서노드들이 거의 동시에 그 신호를 수신하여 동작한다. 그러므로 센서노드들의 응답 신호들끼리 충돌이 발생할 가능성이 커지며 이것은 에너지가 낭비로 귀결된다. ULP 환경에서는 에너지가 낭비되는 것을 반드시 막아야 한다. [6]에서 제안된 시스템에서는 싱크노드가 동작시킬 특정 센서노드의 ID를 포함 요청신호를 발생시키고, 센서노드의 웨이크업 모듈은 자신의 ID와 일치하는 요청신호를 수신했을 때에만 센서노드를 동작시켜 불필요한 동작으로 인한 에너지의 낭비를 줄인다.

두 번째 기술은 싱크노드의 요청신호에서 에너지

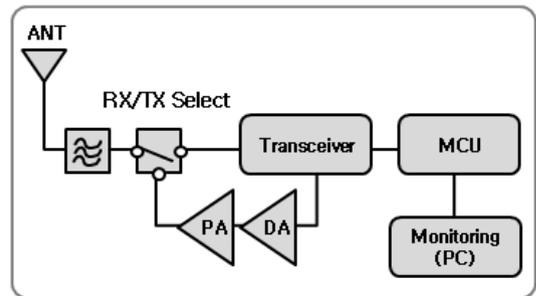


그림 1. ULP 자기유지 센서노드 시스템의 싱크 노드 구성 모듈별 블록도

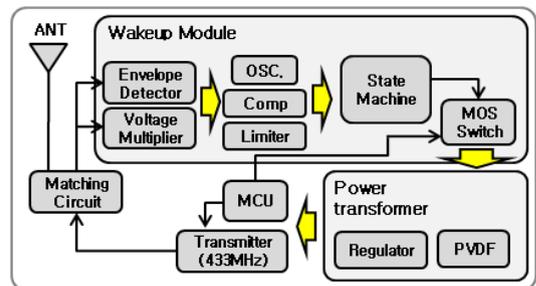


그림 2. ULP 자기유지 센서노드 시스템의 센서 노드 구성 모듈별 블록도

를 추출하여 센서노드의 송신 모듈의 에너지원으로 이용하는 기술이다. 이 기술은 RFID 시스템에서 Tag가 RFID 리더의 RF신호를 이용해서 동작하는 것처럼 싱크노드의 요청 신호로부터 에너지를 추출하여 웨이크업 모듈에 에너지를 공급하도록 한다. 즉, 웨이크업 모듈은 RF 신호에서 추출한 에너지로 동작하기 때문에 센서노드에서 수확한 에너지를 전혀 소비하지 않는다. 결론적으로 [6]에서 제안된 시스템에서는 이 기술과 앞서 언급한 선택적 웨이크업 기술을 결합하여, 자신의 ID를 포함하고 있는 요청신호를 수신한 센서노드만 동작하게 된다. 때문에 요청된 센서노드 외의 다른 센서노드들은 동작하지 않을 뿐만 아니라 수확된 에너지를 전혀 소비하지 않는 상태를 유지할 수 있다.

세 번째 기술은 자가 전원 차단(self power off) 기술이다. [6]의 센서노드는 자가 전원 차단 회로를 포함하고 있어 센서노드의 동작을 마치면 센서노드로 공급되는 전원을 차단한다. 전원의 차단은 MCU가 자가 전원 차단 회로를 동작 시키는 방법으로 구현된다. 즉 MCU는 전원이 인가되면 센서 데이터의 수집이나 송신 모듈을 통한 데이터의 전달과 같은 정해진 작업을 수행한 후에 마지막으로 자가 전원 차단 회로를 동작시켜 전체 센서노드를 오프시킨다. MCU가 전원을 차단시켜도 필요시에는 웨이크업 모듈이 각 장치로 전원을 공급하도록 제어하기 때문에 다시 전원이 공급되는 시점에서 MCU는 주어진 역할을 수행할 수 있다. 결과적으로 센서노드가 동작하지 않는 동안에는 에너지 수확 기술을 이용해서 획득한 전력의 소비가 없는 상태를 유지할 수 있다.

III. ULP 자기유지 센서노드 시스템의 시뮬레이션

일반적으로 센서네트워크 시스템을 시뮬레이션할 때 이산사건시스템(discrete event system)으로 모델링할 수 있다. 이산사건 시스템이란 상태의 변화가 발생하는 시점은 랜덤(random)하지만 변할 수 있는 상태의 값의 종류는 셀 수 있는(countable) 시스템이다. 센서네트워크 시스템의 센서들은 송신, 수신, 센싱, 휴식 등의 몇 가지 상태를 가지며, 상태의 변화는 랜덤하게 발생하기 때문에 이산사건시스템으로 모델링할 수 있다.

하지만 ULP 자기유지 센서노드 시스템을 이산사건시스템으로 모델링하기에는 다소 무리가 있다. 왜냐하면, 시스템을 구성하는 요소들 중에서 가장 중

요한 기능을 하는 에너지 수확 및 저장 소자는 기본적으로 연속시스템(continuous system)으로 표현되기 때문이다. 연속시스템이란 상태의 변화가 연속적으로 발생하고 상태의 값이 정수가 아닌 실수로 나타나는 시스템을 말한다. 에너지 수확 및 저장 소자의 경우 시간이 경과함에 따라 저장 소자에 충전되는 전압의 레벨은 실수로 표현되기 때문에 연속시스템에 해당한다고 할 수 있다. 이러한 이유로 ULP 자기유지 센서노드 시스템을 모델링하기 위해서는 연속시스템과 이산사건시스템이 혼재한 시스템을 모델링하여야 한다.

일반적으로 연속시스템과 이산사건시스템이 혼재한 시스템을 모델링해야 하는 경우 세 가지 방식으로 문제를 해결할 수 있다^[8]. 첫째는 이산사건시스템을 연속시스템으로 모델링하는 것이다. 그러나 이 방식은 모델링이 너무 복잡해지고, 시뮬레이션 시에 매우 긴 시간이 소요되는 단점이 있다. 두 번째로 두 가지 방식을 혼합하는 하이브리드(hybrid) 모델링 방식이 있다. 이 방식은 첫 번째 방식보다는 덜 하지만 여전히 모델링이 복잡하고, 시뮬레이션 시간이 길어지는 단점이 있다. 마지막 세 번째 방식으로 이산사건시스템의 모델링 틀에서 연속시스템을 표현하는 것이다. 이 방식은 대상이 되는 연속시스템의 동작 특성과 이것을 얼마나 정밀하게 모델링할 것이냐는 목표한 정확도에 따라 모델링 및 시뮬레이션의 복잡도가 결정된다. 본 논문에서는 이산사건시스템을 모델링하는 방법론 중의 하나인 DEVS 형식론의 틀 안에서 제안된 시스템^[6]을 모델링 한다.

3.1 DEVS 형식론

DEVS(Discrete Event System Specification)는 Zeigler교수가 고안한 집합이론에 기반 한 형식론(formalism)으로 복잡한 이산사건 시스템을 계층적이고 모듈화 한 방법으로 기술하기에 적합한 언어이다^[7]. DEVS형식론은 사건(event)의 발생에 따라서 상태가 변하는 관점에서 시스템의 동적인 변화를 기술하는 방법론으로 크게 두 모델로 구성되는데 하나는 원소(atomic) 모델이고 다른 하나는 결합(coupled) 모델 이다. 원소 모델은 입력 사건이 발생함에 따른 상태의 천이와 시간 진행에 따른 내부 상태의 천이(이때 출력을 발생시킴)를 기술하며 원소 모델의 정의는 다음과 같다^[7].

$$AM = \langle X, Y, S, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, ta \rangle$$

X : 입력 사건 집합

Y : 출력 사건 집합
S : 상태 집합
 $\delta_{int} : S \rightarrow S$: 내부 천이 함수
 $\delta_{ext} : Q \times X \rightarrow S$: 외부 천이 함수
 $Q = \{(s,e) \mid s \in S \text{ and } 0 \leq e \leq ta(s)\}$
 $\lambda : S \rightarrow Y$: 출력 함수
 $ta : S \rightarrow Real$: 시간 진행 함수
 (Time Advanced Function)

결합 모델은 DEVS 모델을 연결하여 커다란 시스템을 만들고, 또 그 시스템이 더 큰 시스템의 모듈로 사용될 수 있도록 하는 기능을 제공한다. 따라서 DEVS 형식론을 사용할 경우 모듈화(modular)를 통하여 모델을 계층적으로 개발 할 수 있는 장점이 있다. 결합 모델의 정의는 다음과 같다⁷⁾.

CM = <X, Y, M, EIC, EOC, IC, SELECT>
X : 입력 사건 집합
Y : 출력 사건 집합
M : DEVS 구성요소 집합
EIC : 외부 입력 연결 관계
 $EIC \subseteq CM.IN \times M.IN$
EOC : 외부 출력 연결 관계
 $EOC \subseteq M.OUT \times CM.OUT$
IC : 내부 연결 관계
 $IC \subseteq M.OUT \times M.IN$
SELECT : M의 부분집합 $\rightarrow M$
 여러 구성요소 모델들

3.2 에너지 수확 소자 및 저장 소자의 모델링

본 절에서는 연속시스템으로 표현되는 에너지 수확 및 저장 소자를 이산사건시스템을 기술하는 방법론인 DEVS 형식론으로 모델링한다. 연속시스템과 이산사건시스템의 가장 큰 차이는 연속시스템은 연속적인 시간상에서 상태의 변화가 발생하는데 반해 이산사건 시스템은 랜덤 한 시간에서 상태의 변화가 발생한다. 연속적으로 상태가 변화한다고 하더라도 미래의 상태 변화를 예측할 수 있는 범위 내에서는 이산적인 상태변화로 단순화시켜, 연속시스템을 이산사건시스템으로 모델링 할 수 있다. 때문에 ULP 자기유지 센서노드 시스템 역시 연속시스템 이지만 각 모듈들을 이산사건시스템으로 모델링 가능하다. 본 논문에서 사용된 모델링 방법을 보다 쉽게 설명하기 위하여, 에너지 수확 및 저장 소자가 모델링되는 과정을 예로 들어 설명하겠다.

에너지 수확 소자 및 저장 소자는 외부의 에너지를 획득하고 획득한 에너지를 모아두는 역할을 하기 때문에 두 모듈을 합쳐서 획득한 에너지를 저장할 수 있는 하나의 모델로 표현할 수 있다. 본 논문에서는 에너지 수확 소자 및 저장 소자를 하나의 POWER 모델로 모델링 하였다.

POWER 모델은 입력(수확 에너지) 값과 출력(소비 에너지) 값에 따라 저장하고 있는 값(충전 에너지)이 연속적으로 변하는 연속시스템으로 나타낼 수 있다. 그림 3은 에너지 저장 소자의 충전 레벨이 입력 값과 출력 값에 따라서 연속적으로 값이 변하는 상태를 보여준다.

그림 3의 시스템은 상태변수가 시간적으로 모든 시점에서 연속적으로 변화하는 연속 시스템이다. 구간별로 상태에 따른 변화를 살펴보면 다음과 같다.

- 1) $T_0 \sim T_1$: 입력 값이 작지만 출력 값이 없어 완만하게 충전되는 상태
- 2) $T_1 \sim T_2$: 입력 값이 증가하여 충전 속도가 커진 상태
- 3) $T_2 \sim T_3$: 입력 값이 있고, 출력 값도 있어서 천천히 충전 값이 줄어드는 상태
- 4) $T_3 \sim T_4$: 출력 값은 있지만 입력 값이 없어서 급격히 충전 값이 줄어드는 상태

그림 3에서 나타난 것처럼 시스템의 외부로부터의 입력의 변화와 외부로의 출력의 변화에 의해 에너지 수확 및 저장 소자의 상태는 변화한다. 그리고 그런 입출력의 변화가 발생하기 전까지는 상태의 변화를 손쉽게 예측할 수 있다. 예를 들어 $T_0 \sim T_1$ 시간 구간의 어떠한 시점 T_a 에서의 상태 값은 $T_0 \sim T_a$ 시간 구간의 임의의 시점에서는 예상할 수 있고, $T_1 \sim T_2$ 시간 구간의 시점 T_b 에서의 상태 값도 $T_1 \sim T_b$ 시간 구간에서는 예상할 수 있다. 이와 같이

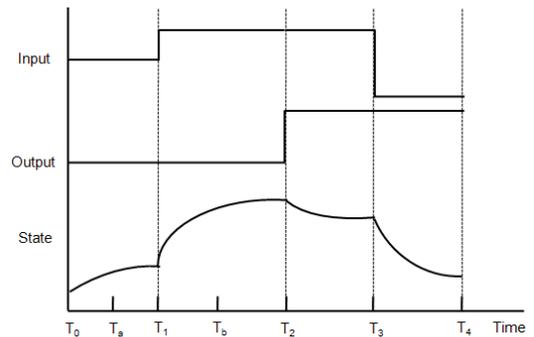


그림 3. 에너지 저장 소자에서 입력과 출력에 따른 상태의 변화

상태의 변화 추이가 변하는 시점들로 시간 구간을 분할(partition)하고, 각 구간이 시작될 때 마다 에너지 수확 및 저장 소자의 이산사건시스템을 모델링 방법론의 틀 안에서 계산할 수 있다.

DEVS 형식론 상에서 시스템의 상태 변화는 외부사건(external event)과 내부사건(internal event)에 의해서 발생된다. 외부사건은 입력이 들어오거나 변화가 생길 때 발생하고, 내부사건이 발생하면 출력이 발생할 수 있다. 그러므로 앞서 언급한 상태의 변화 추이가 변경되는 시점에는 외부사건이나 내부사건이 발생한다. 이때마다 이산사건시스템 모델을 변경하는 방식으로 에너지 수확 및 저장 소자를 이산사건시스템으로 변경할 수 있다.

그림 4는 에너지 수확 및 저장 소자를 DEVS 형식론으로 모델링한 예이다. 제시된 예에서는 에너지 수확 소자를 통해서 충전되는 에너지의 양은 시간의 길이에 의해 결정되는 것으로 가정하였다. 마찬가지로 외부로 전원을 공급할 때 소모되는 에너지의 양도 시간의 길이에 의해 결정되는 것으로 가정하였다. 예를 들어 $[T_i, T_j]$ 시간 구간 동안 수확되는 에너지의 양은 $f(T_j - T_i)$ 이고, 외부로 전원을 공급할 때 소모되는 에너지의 양은 $g(T_j - T_i)$ 이다. 그리고 외부사건 **wakeup**과 **shutdown**은 에너지 저장소자가 외부로 전원을 공급하는 것을 시작하는 것과 종료하는 것을 나타낸다. 외부사건 처리 함수 $\delta_{ext}(s, e, x)$ 에서는 외부사건이 발생할 때마다 이전 사건이 발생 T_i 과의 시간차 e 로 수확되는 에너지 $f(e)$ 를 계산하고, 외부로 전원을 공급할 때

- $X = \{ wakeup, shutdown \}$
- $Y = \{ enable, disable \}$
- $S = \{ phase, level \}$
 - phase = { STANDBY, STARTUP, SUPPLY, SHUTDOWN }
 - level = R
- $\delta_{ext}(s, e, x)$
 - $\delta_{ext}(STANDBY, 1, e, wakeup) = (STARTUP, 1 + f(e))$ if (level >= threshold)
 - $= (STARTUP, 1 + f(e) - \Delta)$ otherwise
 - $\delta_{ext}(SUPPLY, 1, e, shutdown) = (STANDBY, 1 + f(e) - g(e))$
- $\delta_{int}(s)$
 - $\delta_{int}(STANDBY, 1) = (SUPPLY, 1 + f(ta(STANDBY)))$
 - $\delta_{int}(SUPPLY, 1) = (STANDBY, 1 + f(ta(STANDBY)) - g(ta(STANDBY)))$
 - $\delta_{int}(SHUTDOWN, 1) = (STANDBY, 1 + f(ta(STANDBY)) - g(ta(STANDBY)))$
- $\lambda(s)$
 - $\lambda(STARTUP) = enable$
 - $\lambda(SUPPLY) = disable$
 - $\lambda(SHUTDOWN) = enable$
- $ta(s)$
 - $ta(STANDBY) = \infty$
 - $ta(STARTUP) = 0$
 - $ta(SUPPLY) = remain\ life\ time$
 - $ta(SHUTDOWN) = 0$

그림 4. 에너지 저장 소자의 출력 전압의 DEVS 모델링 예 - POWER 모델

(SUPPLY 혹은 SHUTDOWN 상태)에는 $g(e)$ 만큼 전력을 소모하는 것으로 모델링 되어 있다. 또한 내부사건 처리함수 $\delta_{int}(s)$ 도 유사한 방법으로 저장된 에너지의 양을 계산하고 있다.

3.3 ULP 자기유지 센서노드 시스템 모델링

그림 3은 본 논문에서 모델링하고자 하는 ULP 자기유지 센서노드 시스템의 동작을 그림으로 나타낸 것이다. 시스템은 크게 싱크노드의 역할을 하는 마스터(master) 노드와 센서노드의 역할을 하는 슬레이브(slave) 노드들로 구성된다.

그림 6은 그림 5의 ULP 자기유지 센서노드 시스템의 모듈간의 정상 동작 시나리오를 나타낸 그림이다. 각 모듈별 수행기능을 살펴보면 마스터 노드는 슬레이브 노드로 데이터 요청신호를 보내고 센서노드로부터 센싱 데이터를 응답받는다. Wakeup 모듈은 요청신호에 포함된 ID를 판별해서 자신의 ID와 일치할 경우 파워모듈로 wakeup 메시지를 보내서 전원을 공급 하도록 한다. 에너지 수확 모듈은 환경에너지로부터 획득 에너지를 보관하는 역할과 슬레이브 노드에 전력을 공급하는 역할을 수행하는

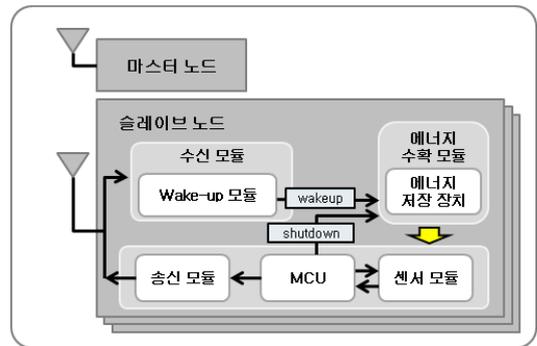


그림 5. ULP 자기유지 센서노드 시스템의 구성 모듈간의 관계

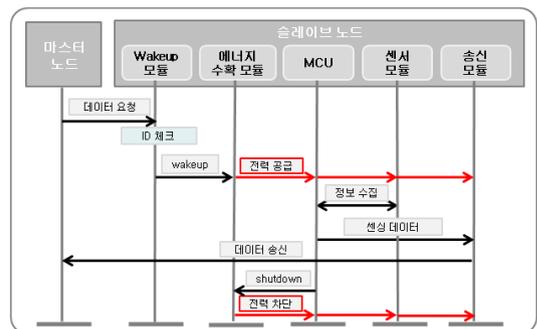


그림 6. ULP 자기유지 센서노드 시스템의 정상 동작 시나리오

데, 평소에는 에너지를 충전하고 있다가 Wakeup 모듈로부터 wakeup 메시지를 받으면 MCU, 센서모듈, 송신모듈로 전력을 공급하고, MCU로부터 shutdown 메시지를 받으면 전력 공급을 중단한다. MCU는 전력이 공급되면 센서모듈로부터 센싱 데이터를 수집하고, 송신모듈을 통해서 마스터 노드로 데이터를 전송한다. 송신모듈이 데이터 전송을 마치면 MCU는 파워모듈로 shutdown 메시지를 보내서 MCU, 센서모듈, 송신모듈의 전원공급을 중단하도록 한다. 센서모듈은 MCU로 센싱 데이터를 전달하고, 송신모듈은 MCU로부터 전달 받은 데이터를 마스터 노드로 전송하는 역할을 한다.

그림 7은 그림 6의 동작 시나리오를 기반으로 ULP 자기유지 센서노드 시스템을 DEVS 형식론으로 모델링한 전체 시스템 모델이다. 전체 시스템은 MASTER와 SLAVE 모델로 구성된다. 각각은 마스터 노드와 슬레이브 노드에 대응된다. 그림 상으로는 하나의 MASTER와 하나의 SLAVE만 존재하지만 필요에 따라 MASTER와 SLAVE가 여러 개 존재할 수도 있다. SLAVE는 다시 WAKEUP, POWER, DEVICE로 나뉜다. WAKEUP 모듈은 Wakeup 모듈을 모델링한 것이고, POWER 모듈은 에너지 수확 모듈을 모델링한 것이다. 마지막으로 DEVICE 모듈은 슬레이브 노드의 나머지 부분들을 모델링한 것으로 다시 MCU, TRANSMITTER, SENSOR 모듈로 나뉜다. 각각은 MCU, 송신모듈, 센서모듈에 대응된다.

그림 8은 전체 시스템을 모델링한 SYSTEM 모델이다. SYSTEM 모델은 MASTER 원소 모델과 SLAVE 결합 모델로 구성된다.

그림 9는 슬레이브 노드를 모델링한 SLAVE 결합 모델이다.

그림 10은 슬레이브 노드의 MCU, 센서 모듈, 송신 모듈을 모델링한 DEVICE 결합 모델이다. 그리고 만약 현재는 원소 모델로 모델링된 부분들도

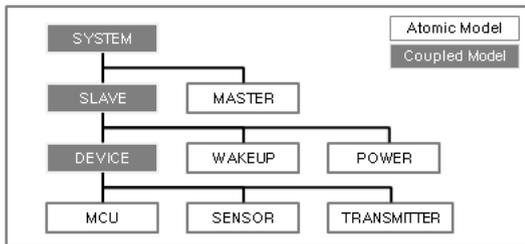


그림 7. 전체 시스템 모델의 계층도

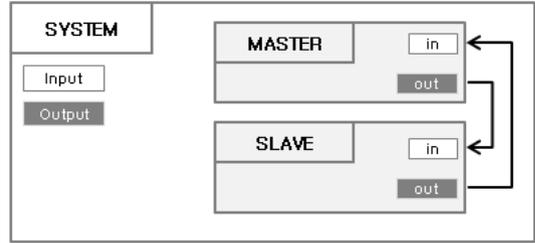


그림 8. SYSTEM 결합 모델 블록도

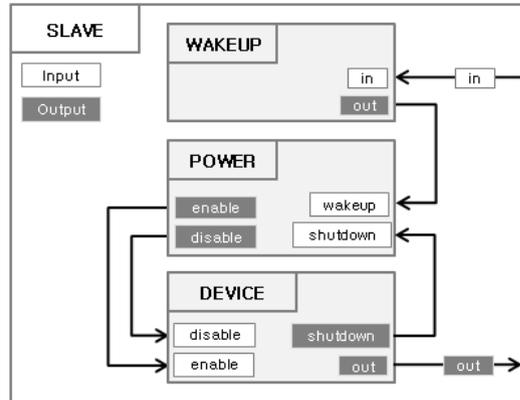


그림 9. SLAVE 결합 모델 블록도

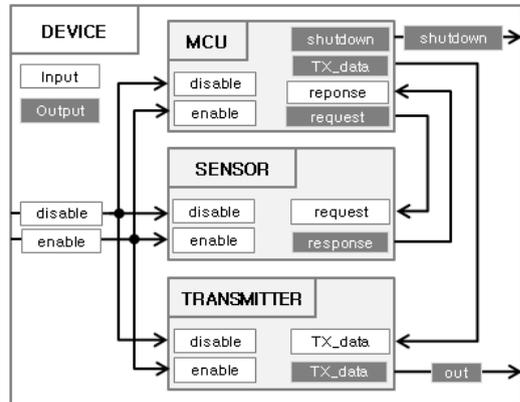


그림 10. DEVICE 결합 모델 블록도

필요에 따라 더 작은 구성 요소로 나누어 각 구성 요소는 원소모델로, 보다 구체적으로 나뉜 원소모델은 결합모델로 모델링 될 수 있다. 예를 들어 현재 POWER 모듈은 에너지 수확 소자와 저장 소자의 역할을 합쳐서 하나의 원소 모델로 구성되어 있지만, 추후 필요에 따라 POWER 모듈을 결합 모델로 하고 그 내부에 에너지 수확 소자와 저장 소자를 원소 모델로 모델링 할 수 있다.

3.4 시뮬레이션 및 결과

본 절에서는 DEVS 형식론으로 모델링한 모델들을 DEVSim++로 추상화하여 시뮬레이션 한다. DEVSim++^[9]는 DEVS 형식론을 일반인들에게 잘 알려진 프로그래밍언어인 C++ 언어로 구현한 것이다. DEVSim++는 사용자들에게 손쉬운 코딩과 빠른 시뮬레이션 속도를 제공한다.

앞 절에서 모델링한 모델들과 시스템의 동작 시나리오를 바탕으로 시뮬레이션 하기에 앞서 시뮬레이션 모델들이 가지는 파라미터 값들을 실제 구현된 ULP 자기유지 센서노드 시스템^[7]의 모듈들을 측정된 값으로 설정하였다. POWER 모델은 에너지 획득소자에 의해 에너지 저장소자인 슈퍼캐패시터가 충전될 때 6.7mV/s의 전압 상승률을 보인다. 그리고 슈퍼캐패시터는 최대로 충전되었을 때 12V의 전압 레벨을 가진다. 저장 소자에 충전되는 에너지양을 전압 레벨로 표시한 이유는 실제 구현된 시스템에서 레귤레이터에 공급되는 전압이 5V이하가 되면 시스템에 전원이 공급되지 않기 때문이다. 또한 각 모듈별로 동작을 시키고 슈퍼캐패시터의 전압 감소 레벨을 측정하면 실제 환경과 유사한 파라미터 값을 시뮬레이션 모델에 적용할 수 있다. 표 1은 각 모듈별로 동작시켰을 때 측정된 파라미터 값이다.

그림 11은 노드간의 통신 주기를 증가 시킬 때 하루 동안 성공한 통신 횟수의 변화를 측정하기 위하여 시뮬레이션 한 결과 이다. 그리고, 에너지 획득 소자의 충전 시 전압 상승 레벨로 구분한 6.7mV/s, 13.3mV/s, 20mV/s의 경우를 비교해 보았다. 먼저 6.7mV/s의 에너지 저장소자의 경우 통신 주기가 0.5초 이하 일 경우에는 통신이 불가능하고

표 1. 시뮬레이션 모델별로 적용한 측정값

Model	State	Value
POWER	충전 가능한 최대 전압 레벨	12V
	동작 가능한 최소 전압 레벨	5V
	충전 시 전압 Level 증가율	6.7mV/s
MCU	전압 Level 감소 값	0.2V
	동작 시간	53ms
SENSOR	전압 Level 감소 값	0.01V
	동작 시간	11ms
TRANSMITTER	전압 Level 감소 값	1.8V
	동작 시간	3ms

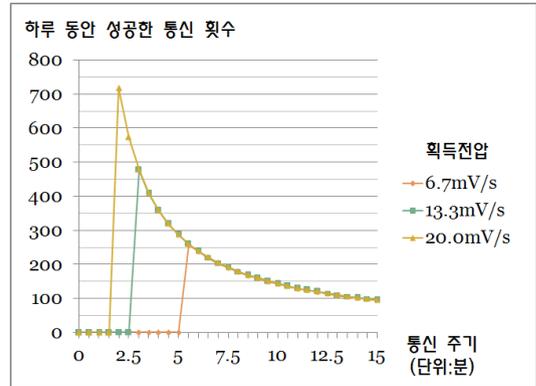


그림 11. 통신주기별 하루 동안 성공한 통신 횟수

통신이 되는 시점부터 통신 주기가 증가할수록 하루 통신 가능 횟수는 줄어드는 것을 볼 수 있다. 전압 상승 레벨이 큰 에너지 저장 소자의 경우에는 더 짧은 통신 주기에서 더 많은 통신 성공률을 보인다. 결과적으로 에너지 소자의 충전 효율에 따라 적절한 통신주기를 설정해주면 더 많은 통신을 할 수 있지만 너무 짧게 줄 경우에는 아예 통신이 불가능할 수도 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 백-오프(back-off) 시간을 설정하여 통신 실패 시에 대기 시간을 일정 수준 단위로 증가하도록 하였다. 그림 12는 시뮬레이션 결과 이다.

그림 12는 13.3mV/s의 전압 상승률을 가지는 에너지 저장 소자에서 통신 실패 시 백-오프 시간을 1000ms, 500ms, 100ms의 단위로 증가 시키도록 하고 통신 주기를 증가시킬 때 하루 동안 성공한 통신 횟수를 측정하기 위해 시뮬레이션 한 결과 이다. 백-오프 시간을 설정하면 하루 동안 통신 가능한 횟수가 증가하기 때문에 백-오프 시간을 설정하

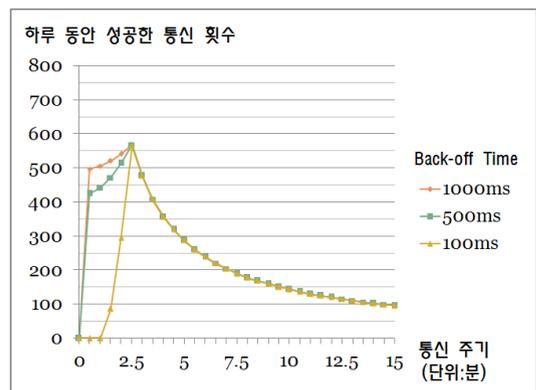


그림 12. 통신주기별 하루 동안 성공한 통신 횟수

는 것이 더 효율적인 것을 알 수 있다. 백-오프 시간의 경우는 싱크노드의 어플리케이션에서 센서 노드와의 통신 주기를 정할 때 손쉽게 구현할 수 있을 것이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 센서네트워크 시스템에서 배터리 대신 에너지 수확 기술을 이용할 경우 발생할 수 있는 문제점을 극복하기 위해 제안된 ULP 자기유지 센서노드 시스템에 대해서 살펴보았다. 그리고 이 시스템을 DEVS 형식론으로 모델링하여 시뮬레이션 하여 시스템을 검증하고 그 성능을 평가해 보았다. 시뮬레이션 결과 제안된 ULP 자기유지 센서노드 시스템의 에너지 획득 소자에 따른 효과적인 통신 가능 주기를 알아볼 수 있었다. 그러나 일정 주기보다 빨라지면 통신은 불가능한 문제가 발생하였고 이를 해결하기위한 방안으로 통신 실패 시에 적절한 백-오프 기간을 가지도록 하였다.

끝으로 제안된 시스템에서는 송신 전력이 부족한 경우에도 MCU와 센서가 동작해서 전력을 허비해 버리는 문제가 있다. 센서 정보를 모아두었다가 한번에 보내는 방법을 사용하거나 모든 동작이 완료될 수 있는 전압 레벨에서만 동작하도록 시스템을 구현 한다면 기존 시스템보다 좀 더 효율적으로 에너지 관리가 가능할 것이다. 그러므로 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] 유준재, 윤명현, 이민구, 강정훈, “센서 네트워크 및 어플리케이션 기술 동향”, *대한전자공학회, 전자공학회지 제32권 제7호*, pp.18~31, 2005. 7.

[2] Stefan von der Mark, Georg Boeck, “Ultra low power wakeup detector for sensor networks”, *Digital Object Identifier 10.1109 / IMOC.2007.44043942007* Page(s):865-868, Oct. 29 2007-Nov. 1.

[3] Winston K.G. Seah, Zhi Ang Eu and Hwee-Pink Tan, “Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting (WSN-HEAP) - Survey and Challenges”, *Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology, Wireless VITAE*

2009.

[4] Arms, S.W. Galbreath, J.H. Townsend, C.P. Churchill, D.L. “Energy harvesting wireless sensors and networked timing synchronization for aircraft structural health monitoring”, *Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology, 2009. Wireless VITAE 2009.*

[5] Kansal, A., Hsu, J., Zahedi, S., and Srivastava, M. B. “Power management in energy harvesting sensor networks.”, *ACM Trans. Embedd. Comput. Syst.* 6, 4, Article 32 (September 2007), 38 pages.

[6] 황지훈 외, “WBAN/USN을 위한 자기유지 센서노드 시스템 구현”, *한국 RFID/USN 협회, 제 4 회 RFID/USN 연구논문공모전*, 2008. 10.

[7] B. P. Zeigler, “Multifaceted Modelling and Discrete Event Simulation”, *Academic Press (1984).*, 1984.

[8] 성영락, 김운호, “에너지 수확 기능을 갖는 센서네트워크의 이산사건시스템 모델링”, *국민대학교 공학논총 제 31집*, 2008. 3.

[9] T.-G. Kim, *DEVSIM++ User's Manual : C++ Based Simulation with Hierarchical Modular DEVS Model*, *Computer Engineering Lab., Dept. of Electrical Engineering, KAIST*, 1994.

김 운 호 (Yun-Ho Kim)

정회원

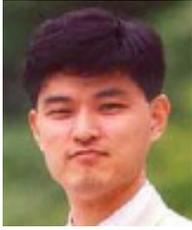


2005년 8월 국민대학교 전자공학과 졸업
 2008년 8월 국민대학교 전자공학과 석사
 2008년 9월~현재 국민대학교 전자공학과 박사과정

<관심분야> 전자공학, 센서네트워크 분야

성 영 락 (Yeong-Rak Seong)

정회원



1989년 2월 한양대학교 전자 공학과
1991년 2월 한국 과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
1995년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사

현재 국민대학교 전자정보 통신공학부 교수
<관심분야> RFID, 실시간 처리, 이산사건 시스템 모델링 및 시뮬레이션

박 준 석 (Jun-Seok Park)

정회원



1987년 국민대학교 전자 공학과 석사
1993년 국민대학교 전자 공학과 석사
1996년 국민대학교 전자 공학과 박사
1997년~1998년 Dept. of EE, UC-LA(PostDoctoralFellow)

현재 국민대학교 전자정보 통신공학부 부교수
<관심분야> Mobile RFIC, RFID Active Tag, Wireless LAN

오 하 령 (Ha-Ryoung Oh)

정회원



1983년 서울대학교 전기 공학과 졸업
1988년 한국 과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
1992년 한국 과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
현재 국민대학교 전자정보 통신공학부 교수

<관심분야> RFID/USN, Embedded System, 실시간 처리, ASIC 설계