

솔라셀 작동 모드와 센서 MAC 프로토콜의 Active 및 Sleep 모드를 고려한 전력 생산 및 공급 제어

준회원 이 승 용*, 학생회원 이 웅*, 종신회원 오 훈*

A Solar Cell based Power Production and Supply Complying with the Active and Sleep Modes of Sensor MAC Protocols

Seung-yong Lee* Associate Member, Woong Lee* Student Member, Hoon Oh** Lifelong Member

요 약

솔라셀의 동작 상태와 센서 MAC 프로토콜의 Active 및 Sleep 동작 모드를 고려하여 충전배터리와 센서통신장치의 입력 전원을 제어하는 회로를 설계한다. 솔라셀과 재충전 배터리를 단순 조합하는 센서통신장치는 햇빛이 없는 시간이 장기간 지속될 때 배터리 소모가 많아서 작동을 멈추게 된다. 일반적으로 센서 MAC 프로토콜은 전력 소모를 줄이기 위하여 짧은 Active모드와 전력 소모가 거의 없는 긴 Sleep모드를 반복한다. 이러한 특성을 고려하여, 햇빛이 충분하고 Sleep모드이면 배터리를 충전하고 햇빛이 불충분하고 Active모드이면 배터리 전력을 사용하도록 설계함으로써 배터리 지속 시간을 크게 향상시켰다. 또한, 센서통신장치는 솔라셀의 출력전력값의 크기에 따라서 솔라셀과 배터리 사이에서 입력 전원을 스위칭 하도록 하였다. 스위칭 도중에 일시적 전원 차단으로 인한 마이크로프로세서의 리셋을 방지하기 위하여 커패시터를 사용하였다. 또한, 커패시터는 Sleep모드에서 전원을 공급한다. 실험을 통하여 본 센서통신장치가 장기간의 햇빛이 없는 경우에도 안정적으로 작동한다는 것을 입증하였다.

Key Words : 센서네트워크, 에너지 생산, MAC 프로토콜, 솔라셀, 센서노드

ABSTRACT

We design a control circuit that can switch input power between a rechargeable battery and a sensor communication device (mote) depending on the operating state of a solar cell as well as the active and sleep mode of a sensor MAC protocol. A mote that simply combines a solarcell and a rechargeable battery may die if there is not sunlight long. A battery is recharged if sunlight is sufficient and a device is in a sleep mode, and it supplies power if sunlight is low and the mote is in an active mode. A mote can switch its input power between solar cell and battery depending on the output level of a solar cell. During this switching, a mote may lose its state information due to the reset of a microprocessor by the transient power-off. A capacitor is used to cope with this phenomenon and also supplies power to a mote during a sleep mode. Experimental results show that the solar cell based mote operates in a very stable manner against the lack of sunlight long.

I. 서 론

USN(Ubiquitous Sensor Networks)의 기술발전으

로 인하여 군사, 과학, 공공사업, 산업현장 등에 해당 기술의 적용이 점점 확대되고 있다. 하지만 센서 통신장치의 전력 공급이 제한적이기 때문에 USN을

※ 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2011-0004606)

* 울산대학교 UbiCom 연구실(hoonoh@ulsan.ac.kr) (° : 교신저자)

논문번호 : KICS2011-11-548, 접수일자 : 2011년 11월 26일, 최종논문접수일자 : 2012년 5월 18일

실용화하는데 어려움이 있다. 산업현장에서 센서통신장치가 건물 외부나 규모가 큰 기계 및 장비의 상부에 설치되는 경우에 배터리 교체, 배선 작업 등 많은 어려움이 따른다. 에너지 문제를 극복하기 위하여 물리계층, MAC 계층, 네트워크 계층에서 다양한 기초연구가 진행되고 있으나 근본적으로 한계가 있다^[1]. 본 논문에서는 센서통신장치의 전력 생산 (Harvesting) 및 관리 문제를 논의한다.

전력 생산을 위해서 솔라셀 및 압전기와 같은 다양한 소자들이 출시되고 있으며, 솔라셀을 USN에 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 적은 햇빛으로 작동하는 솔라셀은 낮은 전력으로 작동 가능한 센서통신장치에 적합성이 높다고 할 수 있다.

이러한 연구로는 솔라셀과 재충전 배터리만을 사용하여 전력을 생산하는 모델^[2,3], 솔라셀과 커패시터를 사용하는 모델^[4-6], 솔라셀, PVDF, 재충전 배터리, 커패시터를 사용하는 모델^[7]이 있다. 또한, 에너지를 생산 기법뿐만 아니라 에너지의 효율적 관리 모델도 있다^[8]. [7]번 논문은 PVDF와 솔라셀을 동시에 사용함으로써 응용성을 높였으나, 가격이 상승하고, 햇빛이 전혀 없는 장소를 제외하고는 이점이 없다. [4]번과 [5]번 논문은 커패시터만을 사용하였기 때문에 흐린 날이나 밤에는 센서통신장치가 동작을 멈추게 된다. 또한 커패시터의 충전상태에 따라서 센서통신장치의 동작주기가 결정되는 단점이 있다. 더 큰 문제는, 통신프로토콜을 설계할 때 Active모드와 Sleep모드를 반복하도록 설계 하는데, 프로토콜의 설계가 H/W 동작 특성에 제한을 받게 된다는 것이다. [2]번 논문은 재충전 배터리와 센서통신장치를 병렬로 연결함으로써 센서통신장치를 안정성을 높이고자 하였으나, 높은 전류를 필요로 하게 된다.

본 논문에서는 솔라셀의 전력 생산량과 센서 MAC 프로토콜의 동작모드에 따라서 전원을 스위칭하고 전력소모를 제어할 수 있는 전력생산 및 제어회로를 설계한다. 센서 MAC프로토콜은 전력 소모를 줄이기 위하여 데이터수신, 시간동기화, 데이터 전송 등을 수행하는 짧은 Active모드와 전력 소모를 거의 하지 않는 비교적 긴 Sleep모드를 반복한다^[11]. 이러한 통신모드의 변화에 따라서 센서통신장치의 작동상태가 제어된다. 햇빛이 강하고 Active 모드 동안에는 솔라셀이 센서통신장치에 작동전력을 공급하고 병렬로 커패시터를 충전한다. 반면에 햇빛이 강하고 Sleep모드 동안에는 솔라셀이 재충전 배터리에 충전 전력을 공급하고, 충전된 커패시터가

센서통신장치에 작동전력을 공급한다. 흐린 날이나 밤에는 재충전 배터리가 센서통신장치에 전력을 공급한다. 이러한 입력전원 스위칭으로 인하여 발생할 수 있는 센서통신장치의 리셋을 방지하기 위하여 커패시터를 사용하였다.

본 방식의 특징은 (1) 솔라셀의 전력생산량과 센서 MAC프로토콜의 동작모드를 고려하여 전력제어 회로가 작동하며, (2) 커패시터를 사용하여 전력공급원을 스위칭 하는 동안에 마이크로프로세서 리셋을 방지할 수 있고 (3) 전력생산이 없는 상황에서도 재충전 배터리를 사용하여 센서통신장치를 작동시킬 수 있다. 또한, (4) 센서 MAC프로토콜의 Active모드와 Sleep모드를 활용함으로써 햇빛이 없는 상태가 10일 이상의 장기간 지속될 경우에도 센서통신장치가 작동 할 수 있도록 설계하였다.

검증을 위하여 소규모 센서네트워크 테스트베드를 구성하고 각 센서통신장치에 전력생산 및 제어 회로를 적용하여 실험하고 결과를 제시하였다. 실험 결과, 싱크 노드에 가까운 센서통신장치가 더 많은 패킷을 처리하기 때문에 더 많은 전력을 소모하며, 패킷 전송량을 늘리면 그 차이가 더 커진다는 것을 보였다. 그 이유는 송수신에 의한 전력 소모보다는 Active 시간이 늘어나기 때문이라는 것을 알 수 있었다. 또한, 4시간 정도의 충전으로 3일 동안 재충전 배터리를 사용할 수 있음을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 전력 생산 및 제어 회로의 시스템 모델을 설명하고, 3장에서는 전력 생산 및 제어회로에 대하여 자세하게 설명한다. 4장에서는 소규모 네트워크 테스트베드를 구축하여 실험을 하고 실험 결과를 논의한다. 마지막으로 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 배경

2.1. 센서네트워크 모델

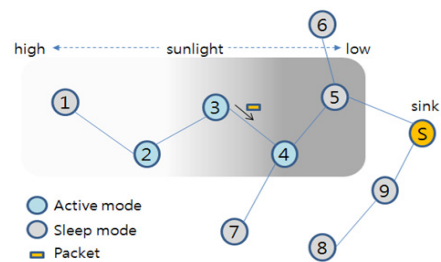


그림 1. 센서노드 모델 및 동작 환경
Fig. 1. Sensor Network Model.

본 논문에서 고려하는 센서네트워크는 하나의 서버(싱크노드)와 다수의 센서통신장치(센서노드)로 구성된다. 센서노드의 통신거리는 전력소모를 줄이기 위하여 제한적이고, 따라서 멀티홉 통신을 한다. 그림 1에서처럼 센서 네트워크는 자연스럽게 싱크노드를 루트노드로 하는 트리를 형성하게 된다. 각 센서노드는 주기적으로 데이터를 생성하고 경로를 따라서 싱크노드에 전달한다. 싱크노드는 상용전원을 사용하지만 센서노드는 배터리를 사용하기 때문에 전력이 소진되면 소멸된다.

센서 MAC 프로토콜은 Sleep 모드와 짧은 Active 모드를 반복하며, 송수신할 데이터가 많은 경우에는 Active모드를 연장할 수 있다고 가정한다^[10,11]. 센서MAC프로토콜의 통신모드에 따라서, 센서노드는 Sleep모드에서는 센서노드의 상태정보를 유지하기 위한 최소한의 전력을 요구하며, Active모드에서는 정상적인 전력을 사용한다.

2.2. 센서통신장치 전력제어 요구 분석

하루 동안에 특정 센서노드에 공급되는 조도량은 시간(오전, 오후), 설치장소, 날씨에 따라서 다르다. 어떤 센서노드 조도량이 충분하고, 어떤 노드는 조도량이 불충분하고, 어떤 노드는 조도량이 애매하여 솔라셀의 생산전력만으로는 센서노드를 구동하기 어렵다. 센서 노드의 동작 상태에 따라서 어떤 노드는 높은 동작전력을 요구하는 Active모드 상태에 있고, 어떤 노드는 최소한의 전력을 사용하는 Sleep모드 상태에 있을 수 있다. 따라서 조도량과 센서노드의 동작 상태에 따라서 센서노드에 전력을 공급하는 입력전원이 달라져야 한다.

그림 1에서, 노드 1과 2는 조도량이 충분하지만, 노드 1은 Sleep 상태이기 때문에 낮은 전력을 요구한다. 이 경우에 솔라셀 생산전력으로 배터리를 충전할 수 있다. Sleep모드 동안에 요구되는 낮은 전력을 공급하기 위하여 커패시터를 이용할 수 있다. 노드 2의 경우에는 Active 상태에 있고 햇빛의 양이 충분하기 때문에 솔라셀에서 센서노드에 전력을 공급하는 동시에 커패시터를 충전하여 다음 Sleep모드 동안에 사용할 수 있을 것이다. Active 상태인 노드 4와 Sleep 상태인 노드 5는 조도량이 불충분하기 때문에 재충전 배터리를 이용하여 전력을 공급할 수 있다. 반면에 노드 3과 같이 Active모드 상태에 있고 조도량이 계속 변하는 경우에는 솔라셀 전원과 재충전 배터리 전원을 상황에 따라 스위칭하면서 사용할 수 있다. 이와 같이, 조도량과 센서

MAC프로토콜의 동작모드에 따라서 효과적으로 솔라셀을 이용하기 위해서는 솔라셀, 재충전 배터리, 커패시터와 같은 소자가 필요하고, 이를 상황에 따라 제어할 수 있는 제어회로가 요구된다.

2.3. 기존연구 및 해결방안

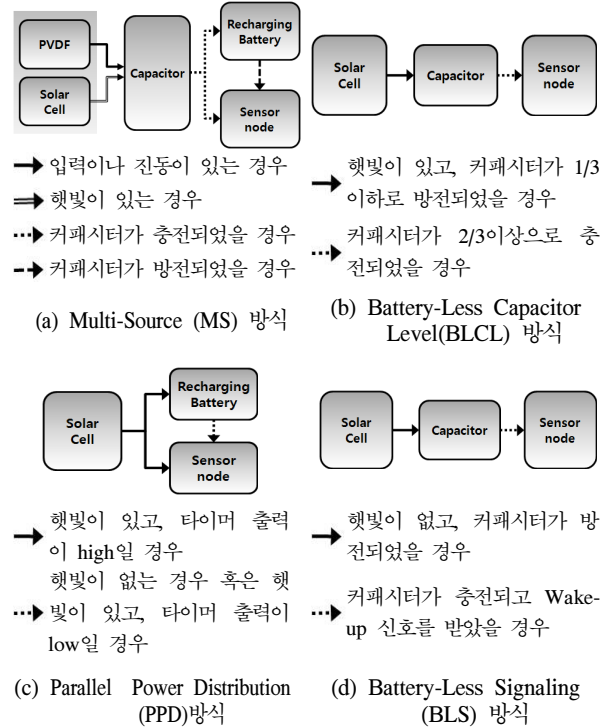


그림 2. 기존 방식
Fig. 2. Previous methods.

그림 2-(a)의 MS 방식에서는 PVDF(진동)와 솔라셀을 동시에 사용하여 설치 환경에 따라서 안정적으로 전력을 생산하도록 하였다. PVDF와 솔라셀에서 생산된 전력이 커패시터를 충전하고, 충전된 커패시터가 센서통신장치 및 재충전 배터리에 전력을 공급한다. 커패시터가 방전된 상태에서는 출력이 차단되고 재충전 배터리가 센서통신장치에 작동전력을 공급한다. 이 방식에서는 전력 공급원을 복수로 함으로써 센서통신장치에 비교적 안정적으로 전력을 공급할 수 있다. 하지만 두 개의 전력 공급원을 사용함에도 불구하고 생산량에 비해서 충전 효율이 떨어지며, 센서통신장치의 제작가격이 증가한다.

그림 2-(b)의 BLCL 방식에서는 커패시터만으로 센서통신장치에 작동전력을 공급한다. 커패시터가 2/3이상 충전될 경우, 센서통신장치로 전력을 공급한다. 커패시터가 1/3이하로 방전될 경우, 센서통신장치는 Sleep모드로 전환되고, 이와 동시에 커패시터는 충전 된다. 이 방식은 재충전 배터리를 사용하지

지 않기 때문에 비용이 절감된다. 하지만, 센서통신 장치가 커패시터 충전 상황에 종속적으로 Active 혹은 Sleep모드로 전환되고, 솔라셀 전력을 사용할 수 없는 흐린 날이나 밤 시간 동안에는 센서통신장치를 작동시킬 수 없다. 가장 큰 문제점은, 센서 MAC프로토콜의 Active 및 Sleep 상태에 따라서 센서통신장치를 작동시킬 수 없다.

그림 2 - (c)의 PPD 방식에서는 재충전 배터리와 센서통신장치를 병렬로 연결함으로써 안정적으로 센서통신장치에 작동전력을 공급한다. 타이머의 출력이 High일 경우 솔라셀에서 생산된 전력이 재충전 배터리에 충전을 하고, 이와 동시에 센서통신장치에 작동전력을 공급한다. 반면에 타이머의 출력이 Low 일 경우 솔라셀의 전력 공급은 중단되고, 센서통신 장치의 작동전력은 재충전 배터리가 공급한다. 이와 같은 과정을 매우 빠르게 반복한다. 센서통신장치에 안정적인 동작전력을 공급하고, 높은 충전효율을 가질 수 있으나 센서통신장치와 재충전 배터리에 병렬로 전력을 공급하기 위해서는 높은 전력생산이 요구된다. 또한 재충전 배터리의 빈번한 충·방전으로 인하여 재충전 배터리의 성능이 저하될 수 있다. 특징적인 것은 Maximum Power Point Tracking (MPPT) 메커니즘을 사용하여 솔라셀의 최대전력 생성구간을 인지하고 충전효율을 높이기 위하여 이 구간을 이용하였다.

그림 2-(d)의 BLS 방식에서는 커패시터가 충분히 충전된 상태에서 자신의 ID를 가진 RF wakeup signal을 수신할 경우 센서통신장치에 작동전력을 공급하게 된다. 그러나 솔라셀 전력을 사용할 수 없는 흐린 날이나 밤 시간 동안에는 센서통신장치가 동작할 수 없다. 또한 커패시터가 충분히 충전되지 않은 상태에서 자신의 ID를 가진 wakeup signal을 수신 할 경우, 센서통신장치는 작동될 수 없다. 따라서 일반적으로 Active 및 Sleep 반복 주기를 갖는 센서 MAC 프로토콜의 전력제어 특성에 따라서 제어될 수 없는 단점이 있다.

본 논문에서는 솔라셀이 장시간 전력을 생산할 수 없는 경우에도 안정적으로 센서통신장치를 동작시키고, MAC 프로토콜이 센서통신장치의 모드 (Active/Sleep)를 제어할 수 있도록 PHCC (Power Harvesting and Control Circuit) 모듈을 설계하였다. 이를 위하여 재충전 배터리를 사용하였으며, 릴레이 회로를 사용하여 MAC 프로토콜로부터 신호를 받아서 Active 혹은 Sleep 모드로 스위칭을 할 수 있도록 하였다. 또한, 센서통신장치가 Sleep모드 상태

에 들어갈 때 안정적인 전력을 공급하고 입력전원을 스위칭 하는 동안에도 마이크로프로세서가 리셋되는 것을 방지하기 위해서 커패시터를 사용하였다.

III. 전력생산제어 회로(PHCC)

3.1. 전력제어 회로

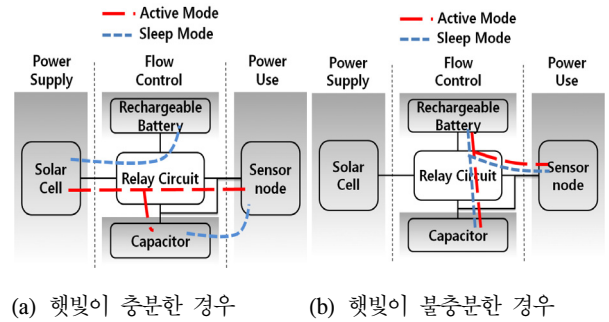


그림 3. PHCC의 블록다이어그램
Fig. 3. Block Diagram of PHCC.

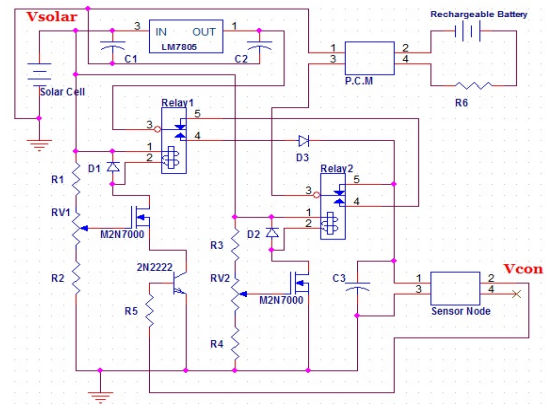


그림 4. PHCC
Fig. 4. PHCC.

표 1. 회로 용어 정의
Table 1. Circuit terms.

용어	설명
Vsolar	솔라셀의 출력전압
Vcon	센서통신장치의 출력전압으로 트랜지스터 2N2222의 제어시그널로 사용
base output	릴레이 스위치가 원래 위치에 연결되어 있을 때 릴레이의 출력 (예, 연결 3-5)
switching output	릴레이의 스위치가 스위칭 된 상태에서 릴레이의 출력(예, 연결 3 - 4)
PCM	과충전, 과방전 방지 소자

PHCC는 그림 3과 같이 전력공급부, 흐름제어부,

전력소모부로 구성된다. 전력공급부는 햇빛이 충분할 경우 재충전 배터리, 커패시터, 센서노드에 전력을 공급한다. 흐름 제어부는 솔라셀의 출력전력과 센서통신장치의 상태(Sleep/Active) 신호에 따라서 전류의 흐름을 결정짓는다. 전력소모부는 센서통신장치가 Active모드 일 경우 High 신호를, Sleep모드 일 경우 Low 신호를 전력제어부의 릴레이로 보내 흐름제어부가 적절하게 전력공급원을 스위칭할 수 있도록 한다. 그림 4는 PHCC의 상세회로이며, 동작방식은 다음과 같다.

1) 햇빛이 있고, 센서통신장치가 Active모드 일 경우

Vsolar는 높은 전압을 출력하고, Vcon은 high 신호를 출력하게 된다. Vsolar의 높은 전압으로 인하여 Relay2는 switching output으로 연결되고, Vcon의 high 신호로 인하여 Relay1도 switching output으로 연결된다. Vsolar는 레귤레이터 LM7805와 Relay1을 거쳐서 센서통신장치에 공급되고, 동시에 커패시터 C3을 충전 시킨다.

2) 햇빛이 있고, 센서통신장치가 Sleep모드 일 경우

Vsolar는 높은 전압, Vcon은 low신호를 출력하게 된다. Vsolar의 높은 전압으로 인하여 Relay2는 switching output으로 연결되고, Vcon의 low로 인하여 Relay1은 base output으로 연결된다. Vsolar는 레귤레이터 LM7805, Relay1, Relay2, 그리고 PCM을 거쳐서 Rechargeable Battery를 충전 시킨다. 이때 Active모드 동안 충전되었던 커패시터 C3이 센서통신장치의 작동전력을 공급한다.

3) 날씨가 흐리거나 밤 시간인 경우

Vsolar의 낮은 전압으로 인하여 Realy1과 Relay2는 base output으로 연결되고, Rechargeable Battery가 PCM과 Relay2의 base output을 거쳐 센서통신장치에 작동전력을 공급한다.

3.2. Sleep/Active모드 제어

센서통신장치는 이웃 센서통신장치와 시간을 동기화한다. 센서통신장치는 설정된 Active 시간에서 깨어나고 동일한 시간에 깨어난 이웃 센서통신장치로 데이터를 송신 하고 다음 Sleep 시작 시간에서 Sleep 모드로 전환된다.

본 회로는 MSP430f1611(MCU)과 CC2420을 포함하는 TelosB를 사용하였다. Sleep모드로 전환하는 경우에 전력소모가 많은 CC2420을 먼저 Sleep모드

로 전환하고 MCU를 Sleep모드로 전환한다. MCU Sleep 모드 중에서 LPM0 (CPU 및 MCLK Disabled, ACLK 및 SMCLK Active)를 사용하였으며, 전력소모는 75uA, wake-up으로 전환되는 시간은 최소 6us이하로 측정되었다. MCU가 Sleep모드로 전환되는 경우에 외부 연결 컴포넌트(ROM, 센서)의 전원은 OFF가 된다. Active모드 상태로 전환은 Sleep모드와는 역순의 절차를 거친다.

3.3. 솔라셀 및 재충전 배터리

솔라셀은 직류전압을 출력하며, 흐린 날이나 밤에는 센서통신장치를 작동시킬 수 없다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 재충전 배터리를 사용하였다. 사용한 솔라셀과 재충전 배터리에 대한 상세한 정보는 표 2에 나타내었다.

Active 모드와 Sleep 모드를 고려하는 경우에 초당 평균 소비전류 (ACS)는 다음과 같이 계산된다.

$$ACS = w_1 * 20mA + w_2 * 0.2mA \quad (1)$$

Active모드 시에 평균 소비전류는 20mA, Sleep모드 시 평균 소비전류는 0.2mA 측정되었다. w_1 은 전체시간에 대한 Active시간 비율, w_2 는 Sleep시간 비율을 나타낸다. $w_1 = 0.1$, $w_2 = 0.9$ 로 설정할 경우 ACS = 2.18mA가 된다.

750mAh의 전류량을 가진 배터리를 사용하는 경우를 보자. 총 전류량을 ACS를 나눌 경우 약 344시간이 되고, 햇빛 없이 14일 정도 센서통신장치를 동작시킬 수 있다.

표 2. 사용한 솔라셀과 재충전 배터리
Table 2. Using solar cells and rechargeable battery.

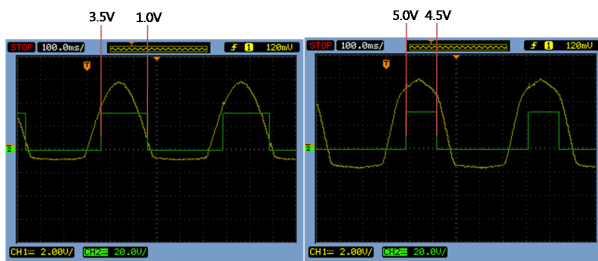
	솔라셀	재충전 배터리	
사이즈	75mm * 75mm	종류	Li+
전압	6V	전압	3.7V
전류	100mA	용량	750mA

3.4. 릴레이

그림 3의 블록도와 같이 입력전원을 스위칭 하기 위하여 릴레이를 사용하였다. 회로에 사용된 5V 동작 릴레이의 일반적인 특성은 양단 전압의 차이가 3.5V일 때 switching output, 1V가 되면 다시 base output으로 스위칭 된다. 하지만, 솔라셀의 경우 출력전압이 4.5V 이하가 되면 센서통신장치를 구동할 만큼의 전력이 생성되지 않기 때문에 5V 릴레이를 그대로 사용할 수 없다. 따라서 MOSFET를 사용하

여 릴레이의 양단전압의 차이가 5V가 되면 switching output, 4.5V가 되면 base output으로 스위칭 하도록 설계하였다.

그림 5-(a)와 그림 5-(b)는 공급전압의 변화에 대한 원래 릴레이의 동작 패턴과 MOSFET을 적용한 변경된 릴레이의 동작패턴에 대한 실험 결과를 보여준다. 곡선 파형그래프는 릴레이에 공급되는 전압을 나타내고, 펄스 그래프는 입력전압에 따른 릴레이의 상태를 나타내며, low는 base output, high는 switching output으로 연결된 상태를 의미한다.



(a) 공급전압에 대한 원래의 Relay 동작 패턴 (b) 공급전압에 대한 수정된 Relay 동작 패턴

그림 5. MOSFET를 사용한 Relay 동작 패턴의 수정
Fig. 5. The operating pattern of the modified relay applying MOSFET.

3.5. Capacitor

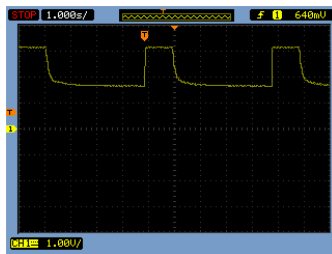


그림 6. 모드전환에 따른 커패시터 충·방전 파형
Fig. 6. The wave form of capacitor charge and discharge according to the mode change.

캐패시터는 Sleep모드에서 센서통신장치에 작동 전력을 공급하고, 릴레이가 센서통신장치의 전력공급원을 스위칭 할 때 전원공급의 끊김을 방지한다. 캐패시터는 Active모드 시간 동안에 레귤레이터를 거쳐 나오는 전압으로 급속 충전되고, Sleep모드 시간 동안에 센서통신장치에 전원을 공급하면서 방전된다. Active모드 동안에 충전 양은 Sleep모드 동안에 전력을 공급할 만큼 충분해야 한다. 그림 6은 모드전환에 따른 커패시터 충·방전 파형을 보여준다.

IV. 평 가

4.1. 평가모델

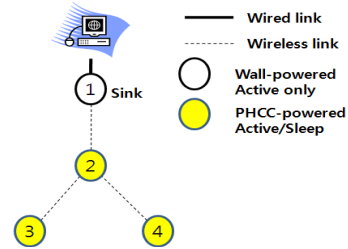


그림 7. 네트워크 테스트베드 구성
Fig. 7. Network testbed configuration.

센서통신장치는 전력 소모를 줄이기 위하여 낮은 Duty Cycle (DC)을 사용하고, 송·수신 부하에 따라 일시적으로 Active 시간을 늘리는 여러 가지 MAC 프로토콜이 제안되었다^[10,11].

$$DC = (\text{Active 시간}) / (\text{Active 시간} + \text{Sleep 시간})$$

DC가 낮을수록 Active 시간이 짧고 Sleep시간이 길어지기 때문에 충전 시간이 늘어난다. DC에 따른 전류소모량과 충전량을 분석 및 측정하였으며, 햇빛이 없는 상황에서 배터리로 센서통신장치를 동작시킬 수 있는 시간을 측정하였다. 또한, 센서 노드의 위치와 전력 소모량의 관계를 측정 및 평가하였다.

4.2. DC에 따른 전류 소모량

DC에 따라 소모되는 전류를 분석하기 위하여 센서노드의 Wakeup 주기를 5000ms, DC를 0.1, 0.5, 1.0으로 두고 전류 소모량을 분석하였다. DC의 변화에 따른 전류 소모량을 수식 (1)을 사용하여 계산하였으며, 그 결과를 표 3에 정리하였다. DC가 높을수록 소모되는 전류가 높은 것을 알 수 있다.

전력소모량을 알기 위하여 전류소모량을 측정하는 것이 맞으나 쉽지 않다. 하지만, 전류 소모에 비례하여 전압이 낮아지기 때문에 전압 값을 측정하면 전력소모량을 간접적으로 알 수 있다.

표 3. DC에 따른 전류 소모량 분석
Table 3. The analysis of current consumption amount according to DC values.

DC	0.1	0.5	1.0
ACS (mA)	2.18	10.1	20.0
전류소모량(mAh) = ACS/시간 * 24시간	52.3	242	480

본 실험에서는 충전 없이 전력소모량을 측정하였

다. 그림 7의 토폴로지에서 노드 2, 3, 4를 그늘진 곳에 설치하였으며, DC 값을 1.0, 0.1, 0.5로 각각 설정하였다. 각 노드는 5초당 하나의 패킷을 싱크노드로 전송하였으며, 전송성공률은 95% 이상이었다.

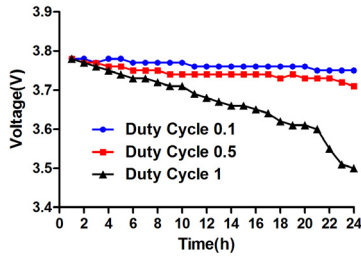


그림 8. DC에 따른 배터리 소모량
Fig. 8. Battery consumption amount according to DC value.

그림 8은 서로 다른 DC값을 가진 노드에 대하여 24시간 동안 전압의 감소량을 시간 단위로 측정된 전압의 변화량을 보여준다. 모든 재충전 배터리는 초기에 최대 충전용량(3.78V)까지 충전하였다. 전반적으로 시간이 흐름에 따라서 재충전 배터리의 용량이 감소하는 것을 보여준다. 특히, DC = 1.0 인 경우에는 충전량의 감소 속도가 급격히 빨라지기 때문에 DC를 줄이는 것이 매우 효과적이라는 것을 알 수 있다. 따라서, 센서통신 프로토콜이 센서통신 장치를 Active 및 Sleep모드로 적절하게 제어할 수 있도록 하는 것이 전력소모를 줄이는데 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

4.3. 노드 위치에 따른 노드별 전력 소모량

싱크노드에 근접할수록 많은 데이터를 처리 (수신 및 송신)해야 하기 때문에 DC가 커져야 한다. 이러한 특성이 재충전배터리 전력 소모량에 미치는 영향을 평가하기 위하여 초당 전송량을 변화시키고 전송량과 노드 위치에 따라서 DC값을 조정하면서 재충전 배터리 전력소모량의 차이를 평가하였다.

평가를 위하여 그림 7의 토폴로지에서 노드 2, 3, 4를 그늘진 곳에 설치하였다. 노드 2는 노드 3과 노드 4로부터 패킷을 받아서 3개의 패킷을 전송해야 하기 때문에 Active모드 시간을 더 크게 설정하였다. 노드 3과 노드 4가 순차적으로 패킷을 전송하고 노드 2는 수신한 패킷과 자신의 패킷을 연속적으로 전송하도록 하였다. 노드 간 시간 싱크 및 스케줄 교환은 1000ms의 Wakeup 주기마다 50ms 동안 수행하도록 하였다.

4.3.1. 패킷 생성 개수 - 1패킷/초

표 4. 실험에 사용된 주요 파라미터 값
Table 4. Key parameter values used in the experiment.

노드	노드 2	노드 3	노드 4
DC 값	0.11	0.07	0.07

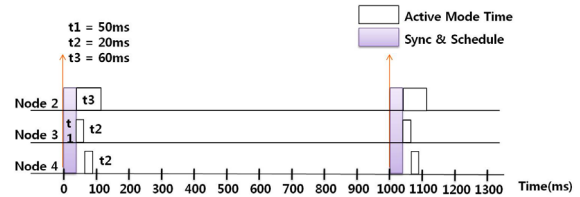


그림 9. 사용된 전송 스케줄
Fig. 9. Transmission schedule.

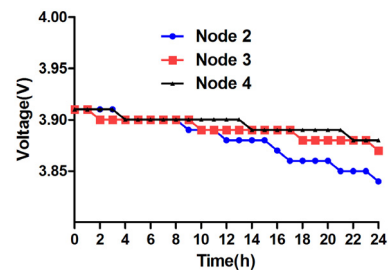


그림 10. 노드위치에 따른 노드별 전력소모량
Fig. 10. current assumption amount of each node according to the location of a node.

표 4에 주어진 노드별 DC값에 해당하는 전송시간을 고려하여, 시간 싱크 및 스케줄 전송시간, 그리고 각 노드의 Active 및 Sleep모드 시간을 시간 차트로 그림 9에 나타내었다.

그림 10은 그림 7의 토폴로지에서 그림 9에 제시된 시간 스케줄에 따라서 24시간을 실행하였을 때 각 노드에 대한 전압 변화량을 보여준다. 전체적으로 완만한 감소 커브를 보여주고 있다. 노드 2는 한 사이클 동안에 두 개의 패킷을 자식 노드로부터 수신하고 자신의 패킷을 포함하여 세 개의 패킷을 전송한다. 따라서, 노드 3과 노드 4에 비해서 훨씬 더 많은 송수신 메시지를 처리하기 때문에 전력 감소가 다소 크긴 하지만, 패킷 생성 개수가 적고 Active 시간이 작기 때문에 전력 소모의 차이가 크지 않다는 것을 알 수 있다.

4.3.2. 패킷 생성 개수 - 5패킷/초

표 5. 실험에 사용된 주요 파라미터 값
Table 5. Key parameter values used in the experiment.

노드	노드 2	노드 3	노드 4
DC 값	0.11	0.07	0.07

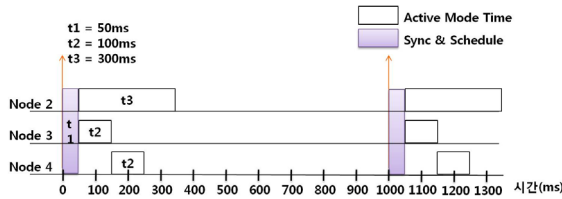


그림 11. 사용된 전송 스케줄
Fig. 11. Transmission schedule.

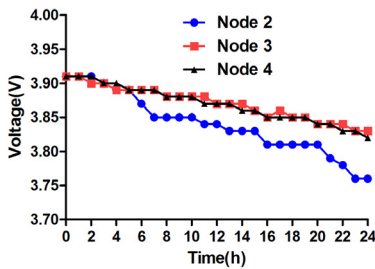


그림 12. 노드 위치에 따른 노드별 전력 소모량
Fig. 12. current assumption amount of each node according to the location of a node.

각 노드의 부하를 높이기 위하여 노드 당 패킷 생성 개수를 5배로 늘려서 실험하였다. 이 경우에 표 5와 그림 11에 주어진 것과 같이 DC값과 Active모드 시간은 당연히 커지고 그림 12와 같이 전압 소모량의 증가 속도가 커진다는 것을 알 수 있다. 노드 2의 경우에 10개의 패킷을 수신하고 15개의 패킷을 송신해야 하기 때문에 다른 두 노드에 비해서 Active 시간도 많이 늘어나고 송·수신 부하도 크기 때문에 커버의 기울기가 더 가파르게 감소한다는 것을 알 수 있다.

4.4. DC의 변화에 따른 배터리 충전량

재충전 배터리 충전은 DC, 햇빛이 있는 시간, 그리고 조도량(lux)에 큰 영향을 받는다. 햇빛이 4시간 동안만 있다고 가정하고 실험을 진행하였다. 그림 7의 토폴로지를 사용하였으며, 실험환경은 표 6과 같다.

그림 13은 조도가 충분할 때 DC의 변화에 따른 재충전 배터리의 전압 변화량을 보여준다. 조도량이 실험을 수행한 4시간 동안 거의 일정하게 유지되었다는 것을 알 수 있으며, DC=0.5에 비해서 DC=0.1일 때 전압이 훨씬 빨리 충전된다는 것을 보여준다. DC가 줄면 Sleep모드 시간이 늘어나고 충전시간이 비례해서 늘어나기 때문에 당연한 결과이다.

표 6. 실험에 사용된 주요 파라미터 값
Table 6. Key parameter values used in the experiment

노드	2	3	4
햇빛 양	충분	불충분	충분
DC	0.1	1.0	0.5

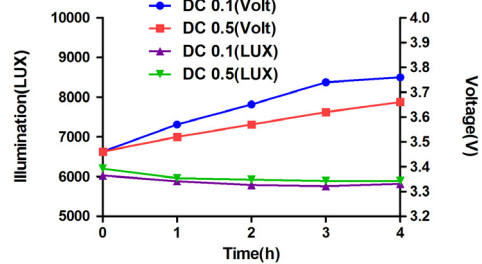


그림 13. DC = 0.1와 DC = 0.5의 조도량에 따른 배터리 충전량
Fig. 13. Charging amount of a battery according to various luminous intensities with DC = 0.1 or DC = 0.5.

4시간 충전된 배터리가 충전하기 전의 원래 배터리 용량으로 복귀하기까지 걸리는 시간을 측정하여 그림 14에 나타내었다. DC = 0.5의 경우에 12시간, DC = 0.1인 경우에 70시간이 걸렸다. Active모드 시간이 1/5임에도 불구하고 지속시간이 5배 이상이었다. 이는 충전량이 더 많았기 때문이다.

만일 재충전 배터리를 완충한 상태에서 전압이 선형적으로 감소한다고 가정할 때 센서통신장치의 유효 동작전압까지 방전되는데 걸리는 시간은 다음 2차 방정식으로 계산할 수 있다.

$$y = V - ax \tag{2}$$

여기서 y = 현재 전압, x = 시간, a = 단위 시간당 전압 감소량, V = 초기 전압이다. 그림 14로부터 선형적으로 감소한다고 가정하면 기울기 a 는 대략 $a = 0.004286V/h$ 이다. 완전 충전되는 경우에 $V = 3.9V$, 유효동작전압을 $2.5V$ 로 하면, $x = 326.65h$ 이고, 약 13.6일이 된다. 즉 햇빛이 없는 상태에서도 10일 이상 사용할 수 있다는 것을 유추할 수 있다.

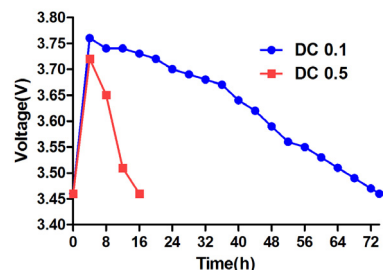


그림 14. 충전된 배터리 소모량
Fig. 14. Voltage charging and consumption amount according to the progress of time.

4.5. 전력 충전 및 소모량의 관계 분석

그림 14의 결과를 입증하기 위하여, 4시간 동안 충전되는 배터리 양과 DC 값에 따라서 12시간 동안 방전되는 배터리 양 혹은 70시간 동안 방전되는 배터리 양을 비교 분석해 본다.

4.5.1. 전류소모량

표 7. 방전시간 동안 총 전류소모량
Table 7. Total current consumption for discharging period.

DC	0.1	0.5
총 방전시간 (h)	70	12
총 전류소모량(mAh) = 총 방전시간 * ACS / 시간	152.6	121.0

* 패킷 송.수신으로 인한 추가 전류소모량은 무시함

표 3의 ACS를 이용하여 70시간 동안에 전류소모량을 구하면 표 7과 같다.

4.5.2. 전류충전량

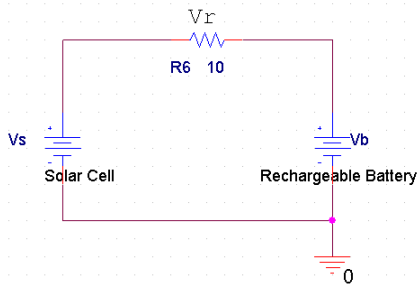


그림 15. PHCC 회로 등가모델
Fig. 15. Equivalent model of PHCC circuit.

PHCC 회로는 그림 15와 같은 등가회로가 된다. 여기서, Vs는 생산전압, Vr은 소비전압, Vb는 충전 전압이 되고, 키르히호프의 법칙에 의하여 $V_s = V_r + V_b$ 가 성립한다. $V_r = R_6 * CC(t)$ 를 대입하면, 시간 t에서 충전전류 CC(t)는 다음과 같다.

$$CC(t) = \frac{(V_s - V_b(t))}{R_6} \quad (3)$$

Vb는 시간의 경과에 따라서 매분마다 측정된 값이며, 그림 13에 도시되어 있다. R6는 실제 회로에서 사용된 값으로 10Ω이다.

평균 전류충전량 ACC (Average Current Charge)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$ACC = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T CC(t) dt \quad (4)$$

식 (3)을 이용하여 CC(t)를 구하고, 식 (4)를 이용하여 ACC를 구한 값은 표 8에 나타내었다. 최대 솔라셀 전압은 4.2V (실제 회로에서 4.2V 이상은 PCM 회로에서 차단)이며, 약간 적은 4.1V, 4.0V에 대하여 동일한 방법으로 계산하였다.

표 8. 매시간 마다 Vs의 변화에 따른 ACC
Table. 8. ACC according to variation of Vs every on hour.

	시간	Vs = 4.2V		Vs = 4.1V		Vs = 4.0V	
		DC		DC		DC	
		0.1	0.5	0.1	0.5	0.1	0.5
ACC	1	60.45	35.44	51.45	30.44	42.45	25.44
	2	52.75	32.9	43.75	27.9	34.75	22.9
	3	45.12	30.7	36.12	25.7	27.12	20.7
	4	40.06	28.59	31.68	23.59	22.68	18.59
총 충전 전류량(mAh)	198.38	127.63	163.0	107.65	127.0	87.64	

4.5.3. 전류충전량과 전류소모량 비교

Vs가 4.2인 경우에 4시간 동안의 충전전류량은 DC = 0.1일 경우에 198.38mAh 이고, DC = 0.5인 경우에 127.63mAh가 된다. 태양빛이 조금 적은 경우의 공급전압 즉, 4.1V를 적용하면 DC = 0.1인 경우에 총 충전전류량은 163.0mAh가 된다. 이 경우에는 표 7의 70시간 전류소모량 (= 152.6mAh)이 거의 비슷함을 알 수 있다.

결론적으로, 4시간 충전과 70시간 방전의 관계가 분석을 통하여 근접하게 입증되었다.

V. 결론

Active 및 Sleep 동작모드를 반복하는 센서통신 프로토콜의 특성을 이용하여 솔라셀 기반의 전력 생산 및 제어회로 (PHCC)를 설계하였다. 회로의 신뢰성과 유효성을 검증하기 위하여 소규모 네트워크를 구성하여 충전의 효율성 및 재충전 배터리의 지속성을 실험하고 그 결과를 제시하였다. 실험결과, DC가 충전효율과 배터리의 지속성에 크게 영향을 끼치고, 싱크노드에 가까운 노드가 더 많은 전력을 소비한다는 것을 알 수 있었다. 특히, DC = 0.1일 때, 완전 충전을 하면 햇빛이 없는 10일 이상 센서 통신장치를 가동할 수 있다는 것을 검증하였다.

References

[1] Ok. Byung-Uk, Lee. Han-Sun, Song. Byung - Hun, "A Study on the Energy Measurement using charge/discharge characteristics of

Lithium-ion in Wireless Sensor Network," *The Korean Institute of Information Scientists and Engineers Conference*, pp.169-173, Oct. 2008.

[2] P.T.V. Bhuvanewari, R. Balakumar, V. Vaidehi, "Solar Energy Harvesting For Wireless Sensor Networks," *Computational Intelligence, Communication Systems and Networks 2009*, CICSYN'09, pp.57-61, Jul. 2009.

[3] V. Raghunathan, A. Kansal, J.Hsu, J. Friedman, M.B. Srivastava, "Design Considerations for Solar Energy Harvesting Wireless Embedded Systems," *Information Processing in Sensor Networks(IPSAN '05)*, Proc. Fourth Int'l Symp, pp. 457 - 462, Apr. 2005.

[4] P. Diaz, T. Olivares, "Demo Abstract: ATON, A battery-less power supply with dynamic duty cycle for wireless sensor networks," *IEEE INFOCOM 2009*, April, 2009.

[5] Kang. Sung-Muk, Park. Kyung-Jin, Park. Jun-Seok, "Power Management Circuit for solar cell Powered Wireless sensor Nodes," *The Korean Institute of Electrical Engineers Conference*, pp. 1925-1926, Jul. 2009.

[6] D. Brunelli, C. Thiele Moser, "Design of a Solar-Harvesting Circuit for Batteryless Embedded Systems," *IEEE Circuits and Systems I: Regular Papers*, Vol. 56, No.11, pp. 2519-2528, Nov. 2009.

[7] Kim.Yun-Woong, Park. Hee-Jeong, Roh. Hyung-Hwan, "Design and Implementation of Self-Charging Module for USN sensor node," *The Institute of Electronic Engineers of Korea*, pp. 1274-1276, Jun. 2010.

[8] Noh. Dong-Kun, Yoon. Ik-Joon, "Efficient Energy Management for a Solar Energy Harvesting Sensor System," *The Korean Institute of Information Scientists and Engineers*, Journal of KiSS : Computing Practices, Vol. 15, No.7, pp.478-488, Jul. 2009.

[9] Jeon. Ji-Ho, Lee. Duck-Hwan, Park. JoonHo, "Design of an Energy System for On-Chip Solar Energy Harvesting," *Journal of the institute of electronics engineers of Korea*, SC(System and Control), Vol.48, No.7,

pp.15-21, Sep. 2011.

[10] J. Polastre, J. Hill, D. Culler, "Versatile low power media access for wireless sensor networks," *ACM SenSys 2004*, pp. 95 - 107, Nov. 2004.

[11] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," *IEEE INFOCOM 2002*, pp. 1567-1576, Jun. 2002.

[12] Sudevalayam. Sujesha, Kulkarni. Purushottam, "Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications," *IEEE Communication Society, Communications Surveys & Tutorials*, Vol.13, No.4, pp. 443 - 461, Nov. 2011.

이 승 용 (Seung-yong Lee)

준회원



2010년 울산대학교 컴퓨터 정보통신공학부 졸업
2010년 3월~현재 울산대학교 컴퓨터정보통신공학부 석사과정
<관심분야> 스마트그리드, 임베디드시스템

이 웅 (Woong Lee)

학생회원



2006년 3월~현재 울산대학교 컴퓨터정보통신공학부 학사과정
<관심분야> 스마트그리드, 임베디드시스템

오 훈 (Hoon Oh)

중신회원



1981년 성균관대학교 전자공학 학사
1993년 텍사스A&M대학교 전산학 석사
1995년 텍사스A&M대학교 전산학 박사
1996년 삼성전자 중앙연구소 수석연구원

2005년~현재 울산대학교 컴퓨터정보통신공학부 부교수

<관심분야> 실시간 시스템, 임베디드 시스템, 상황인지컴퓨팅, 이동 애드 혹 및 센서 네트워크 프로토콜