

◆특집◆ 스마트 홈의 기술 동향

무선 센서 네트워크를 위한 태양전지
모델링 및 성능분석

John Paul Torregoza*, 황원주**

Photovoltaic Cell Modeling and Performance Analysis
for Wireless Sensor Networks

John Paul Torregoza* and Won-Joo Hwang**

Key Words : Photovoltaic Cell (태양전지), Power Control (전력제어), Wireless Sensor Network (무선 센서 네트워크)

1. 서론

무선센서네트워크는 무선통신기술을 기반으로
센서들끼리 자율적인 무선 네트워크를 구성하고 사
물 및 환경에 관련된 대용량 센싱 데이터들을 전
송, 취합, 저장, 분석하여 사용자의 현재 상황에 맞
는 정보를 적절히 제공해줄 수 있는 기술 및 첨단
지능형 서비스를 통칭한다. 무선센서네트워크는 무
선으로 인한 편리성 자율성이 장점이며, 스마트홈
뿐만 아니라 U-City 등 다양한 분야로의 그 응용과
가능성의 범위를 급속히 넓혀가고 있다.

현재 무선센서네트워크 내의 수많은 센서들은
전원으로 건전지와 같은 일회성 전지를 사용하고
하는 것이 현실적으로 불가능하므로 리튬이온전지

있으나, 전력을 소진할 때마다 센서의 전지를 교체
와 같이 충전 가능한 전지를 사용하는 것이 대안으
로 고려되고 있다.

특히 헬스케어, 군사분야 및 환경감시 등과 같
이 지속적이고 신뢰성 있게 정보를 수집해야하는
경우에는 일회성 센서보다는 충전 가능한 영구적인
센서가 적합하다. 태양에너지는 별도의 비용 없이
지속적으로 공급 가능하므로 실외용 무선센서응용
에 있어서 주요한 충전 전지의 에너지원으로 부각
되고 있다.

본 논문에서는 태양에너지의 조사상태, 즉 시시
각각 변해가는 기상상태에 따라 발전량 및 동작점
이 변동하기 때문에 특정조건하에서의 분석이 어려
운 태양전지를 사용하는 무선센서를 위한 태양전지
모델을 제안하고자 한다. 제안된 태양전지모델링을
통하여 스마트홈 및 U-City에서 핵심 통신기반인
무선센서네트워크에서의 저전력 통신프로토콜 및
제어시스템을 설계하는데 이론적 기초를 제공할 수
있을 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 에너
지 효율적인 전지 모델에 관한 기존 연구들을 살펴
보고, 3장에서는 태양 에너지의 충전을 고려한 전
지 모델링에 대해 설명한다. 그리고 4장에서는 시

* 인제대학교 정보통신공학과
Tel. 055-520-3847, Fax. 055-322-6275
Email jp_kulit@yahoo.com

무선센서네트워크, 통신망 최적화 분야에 관심을 두고 연구활동
을 하고 있다.

** 인제대학교 정보통신공학과

Email ichwang@inje.ac.kr

홈네트워크, 무선센서네트워크, 통신망 최적화 분야에 관심을 두
고 연구활동을 하고 있다.

물레이션 결과를 제시하며, 마지막으로 5장에서는 결론과 향후 과제로 마무리한다.

2. 관련연구

무선센서네트워크에 있어서 저전력(Low power) 전송은 주요 연구 주제 중 하나이며, 지금까지 저전력 전송을 위한 다양한 MAC 프로토콜과 라우팅 프로토콜들이 연구되어 왔다. 그러나 이들 연구에서는 저전력 전송을 통하여 제한된 전력으로 센서를 얼마나 오래 유지시킬 수 있을 것인가에 초점을 맞추고 있다. 즉, 이들 연구에서는 센서의 전원으로서는 일회성 전지만을 가정하고 온도, 용량, 방전 특성 등의 여러 인자들을 고려한 표준 배터리들에 대한 몇 가지 모델이 제안되었다. Rao 등은 모델의 특성에 따라 표준 전지 모델을 4가지로 분류하였으며 유희 상태나 방전 상태 동안의 전지의 기본 동작 방식을 제시하였다.^{1,2} 표준 전지 모델에서 가장 많이 고려되는 전지의 특성에는 전하복구작용(Charge recovery effect), 방전 특성, 전송 비용 등이 있다.^{3,6} 먼저 전하복구작용을 통한 전원 모델은 실험을 통한 측정치나 확률적 수식을 이용해 모델링될 수 있다. 다음으로 방전 특성을 통한 전원 모델은 제조사에서 제공된 전지의 방전 특성을 기반으로 하여 확률적 수식을 이용해 모델링하였다.^{3,4} 마지막으로 전송 비용을 고려한 전원 모델은 저전력 전송을 달성하기 위해 이를 센서 네트워크의 라우팅 프로토콜에 적용한 것^{5,6}과 클러스터링 방식에 적용한 것^{7,8}으로 나누어진다.

최근 들어 충전 전지를 사용하는 응용이 등장하고, 관련 기술이 발전됨에 따라 충전 가능한 에너지 자원에 대한 설계와 이론들이 연구되고 있다. Jiang은 무선 센서에 적용할 수 있는 태양 에너지를 전원으로 사용하고 초고용량 커패시터와 Li+, NiCad, NiMH 등의 충전 전지를 탑재한 Prometheus를 구현하였고, 에너지 효율을 고려한 충전 알고리즘을 사용하여 센서 수명 연장을 달성하였다.⁹

3. 태양전지 모델링

3.1 태양전지의 특성

이 절에서는 태양전지의 특성에 가장 큰 영향을 미치는 태양에너지에 대해 살펴본다.

태양에너지는 주변 환경에 따라 큰 영향을 받으며

태양 전지를 모델링하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 모델링을 간소화하기 위해 태양 에너지와 온도의 상관관계는 무시하고, 태양 에너지와 시간의 상관관계에만 초점을 맞추었다. 태양전지에 공급되는 태양 에너지량은 식 (1)과 같이 정의될 수 있다.⁹

$$I(z) = I_0 e^{c(\sec z)^S} \quad (1)$$

단, $I(z)$ 는 태양 에너지량 (단위: kW/m²)이고, I_0 는 외기권의 태양 에너지량으로 1.353 kW/m²이다. 그리고 z 는 천정거리(Zenith Distance)이고, c 와 S 는 실험으로 얻어지는 상수로서, 각각 0.357와 0.678의 값을 가진다.

일정한 전압 하에서 태양 에너지량이 증가하면 전지에 공급되는 전류량도 증가한다.¹⁰ 따라서 식 (1)를 통해 태양 에너지량을 계산하면 전지에 충전되는 전류량을 알 수 있다. 식 (1)에서 나머지 인자들은 고정된 값을 가지므로 태양전지의 에너지량을 결정하는 것은 천정거리이다. 논문¹⁰에서는 천정거리 z 를 식 (2)와 같이 설명한다.

$$\cos z = \sin \lambda \sin \delta + \cos \lambda \cos \delta \cos t \quad (2)$$

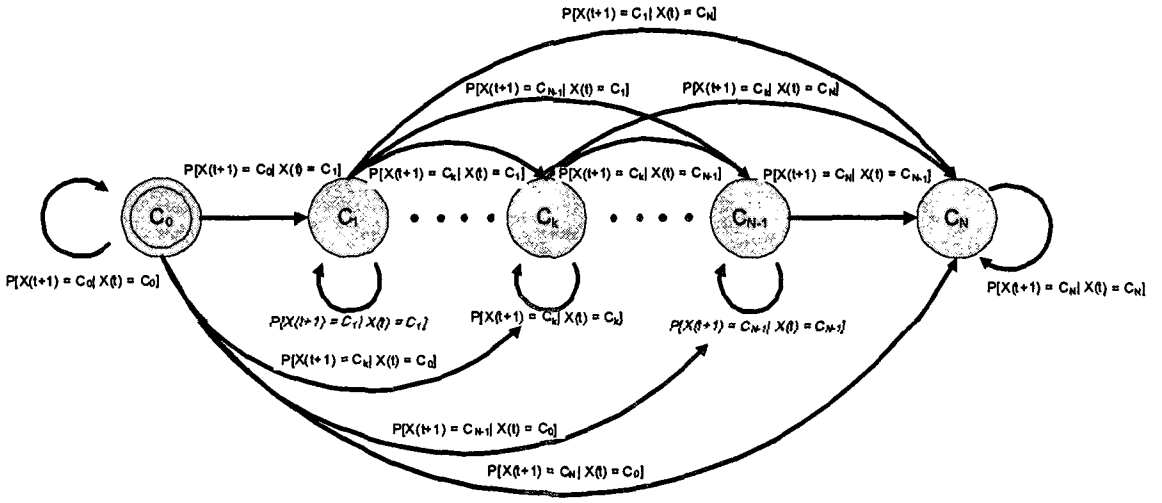
$$t = (360/24)T \quad (3)$$

단, λ 는 관찰자가 위치한 위도(Latitude)이고, δ 는 태양의 적위(Declination)이며, t 는 하루 중의 시간대를 정의한 시각(Hour angle)이다. 식 (2)에서 보는 바와 같이 적위를 알기 위해서는 시각을 정의해야 하는데, 태양이 가장 높은 위치에 있는 정오부터 소요된 시간을 T 라고 했을 때, 시각 t 는 식 (3)와 같이 정의된다. 식 (1), (2), (3)을 사용하면 태양 에너지량을 계산할 수 있다.

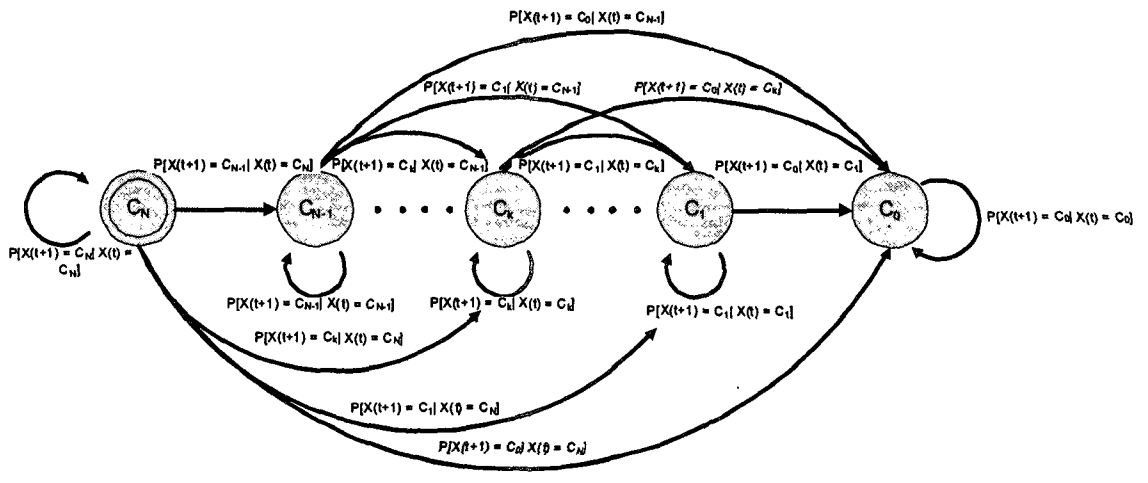
3.2 태양전지 모델링

이 절에서는 태양전지의 충전 또는 방전에 의한 전하량의 변화를 마코프체인을 이용하여 Fig. 1과 같이 제시하고 있다.

먼저, Fig. 1에서 $C_0, C_1, \dots, C_k, \dots, C_{N-1}, C_N$ 는 전지의 전하 상태를 나타낸다(단, $0 \leq k \leq N$). 즉, C_0 는 완전히 방전된 상태를 의미하고, C_N 은 전지가 완전히 충전된 상태를 의미한다. 따라서 C_N 상태에서 전지는 방전되거나 현재 상태 유지로만 천이가 가능하다. 반면 C_0 상태는 전지의 태양 에너지가 충전되거나 현재 상태 유지로만 천이가 가능하다.



(a)



(b)

Fig. 1(a) Markov chain model of photovoltaic cell: charging
 (b) Markov chain model of photovoltaic cell: discharging

그리고 전지가 시간 t 에서 q 의 전하를 충전하고 있다고 할 때, 다음 시간 $(t+1)$ 에서 얼마나 많은 전하가 충전 가능한지를 밝히기 위해 상태전이확률 $P[n]$ 을 정의하였다. $P[n]$ 은 시간 $(t+1)$ 에서 현재의 전하량 q 에 n 개의 전하가 더 충전될 확률이다. 예를 들면, $P[-1]$ 은 다음 시간 $(t+1)$ 에서 전하 1개가 방전되었음을 의미한다.

어느 한 시점에 태양전지는 방전(Discharge), 복구(Recovery), 휴지(Idle) 중 한 상태에 있으며, 이들 세 상태는 시간이나 계절에 따라 충전되는 효율이 달라진다. 즉, 상태전이확률 $P[n]$ 은 세 가지 상태의 다양한 조합을 통해 결정될 수 있다. 예를 들어, $P[-1]$ 은 전하 1개가 방전된 후, 낮에는 방전이 되지 않을 경우와 전하 2개가 방전된 후, 낮에 전하 1개

가 충전된 경우도 여기에 해당된다. 이것을 일반화하면,

$$P[n] = \sum_{d=1}^{\infty} P[\text{discharge} = d | \text{solar} = x] + \sum_{r=1}^{\infty} P[\text{recover} = r | \text{solar} = y]$$

단, $x=n+d, y=n-r, x \geq 0, y \geq 0$ 이다. 방전과 복구는 동시에 발생하지 않으므로 서로 독립이다. 첫 번째 항은 전지가 전하를 d 개 방전되는 동안 전하 x 개를 충전할 확률을 의미하고, 두 번째 항은 전지가 전하를 r 개 복구하는 동안 전하 y 개를 충전할 확률을 의미한다. 특히 $r=0$ 일 때를 전지는 휴지상태에 있는 것을 의미한다.

센서 노드의 duty cycle일 확률은 $P_{\text{discharge}}$ 인데, duty cycle동안은 전지가 방전된다. duty cycle의 정의에 의해 센서 노드가 휴지상태인 확률은 $1-P_{\text{discharge}}$ 이 된다. 휴지상태에서 전하의 농도가 일정하지 않다면 복구되는데, 이를 표현하면 식 (4)과 같다. 또한 휴지상태에서 전하의 농도가 일정하다면 그대로 유지되는데, 이를 확률식으로 표현하면 식 (5)과 같다.

$$P_{\text{recovery}}[n] = (1 - P_{\text{discharge}})P_R \quad (4)$$

$$P_{\text{no_activity}}[n] = (1 - P_{\text{discharge}})(1 - P_R) \quad (5)$$

단, 전하 복구가 발생할 확률 P_R 은 아래와 같다.

$$P_R \begin{cases} e^{k(N - \frac{q}{N})} & \text{for } q \neq N \\ 0 & \text{for } q = N \text{ or } 0 \end{cases}$$

단, q 는 전지의 방전량을 의미하며, $N-q/N$ 은 전지에 남아있는 전하량을 의미한다. k 는 전지에 의존하는 상수이다.

4. 성능평가

본 모델의 검증을 위해 시간에 따른 전지 용량의 변화를 MATLAB을 사용하여 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션에 있어서 태양 에너지의 충전, 복구, 방전 작용을 고려하였으며, 각 시나리오별로 몇 가지 사항을 가정하였다. 첫째, 계절에 따른 태양광의 세기는 무시하였다. 둘째, 태양광의 세기는 시간

에 따라서만 변한다. 이것을 반영하기 위해 시간에 따라 랜덤하게 태양광의 세기를 결정하였다.

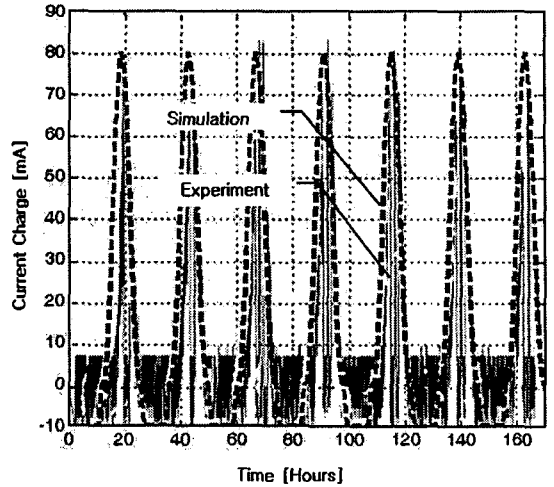


Fig. 2 Photovoltaic cell charging model

Fig. 2는 매 시간대별 태양전지의 현재 전하량을 보여 주고 있다. 본 태양전지 시뮬레이션에는 실측을 통한 결과값¹¹과 시뮬레이션을 통한 결과값 간의 정확도를 평가하기 위하여 동일한 천정거리 (z)를 가지도록 식 (2)의 λ 와 δ 를 다음과 같이 설정하였다: $\lambda=45, \delta=23.5$. 실선은 실측 결과값을 점선은 시뮬레이션에 의한 결과값을 보여주며, 이로부터 시뮬레이션 결과값과 실측 결과값이 거의 동일하게 나오는 것을 알 수 있다. 음수값의 전류는 데이터 전송 등으로 인해 방전되는 것을 의미한다.

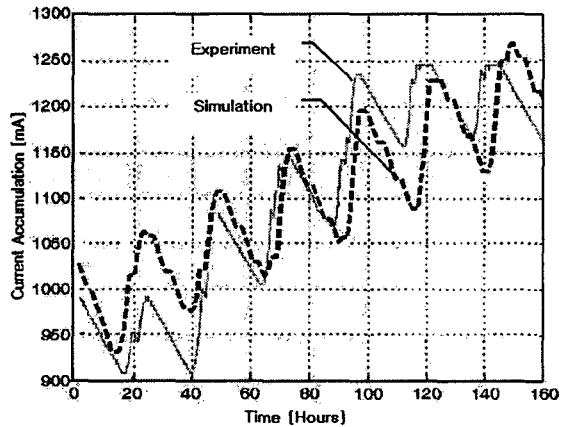


Fig. 3 Charging accumulation

Fig. 3은 시간에 따른 축전된 전하량을 보여주

고 있다. 실선은 실측 결과값을 점선은 시뮬레이션에 의한 결과값을 보여주며, 마찬가지로 시뮬레이션 결과값과 실측 결과값이 거의 동일하게 나오는 것을 알 수 있다. 본 시뮬레이션에서는¹¹과 동일하게 각 센서는 20%의 duty cycle을 가지도록 설정했다. 실측 결과값에서 보이는 약간의 급격한 변동은 부하 전류가 갑자기 변함으로서 발생하는 것이다.

이러한 가정 하에 수행되는 시뮬레이션의 일반적인 흐름은 다음과 같은 단계로 진행된다. 여기 서 0단계는 시뮬레이션의 초기 상태이다.

1. 시나리오에 따라 상수와 변수를 설정한다.
2. 방전이 발생하면 다음 이벤트가 발생하기까지의 시간 간격과 그 범위를 랜덤한 값으로 설정한다.
3. 2단계에서 설정된 시간 간격에 따라 태양전지로 흡수되는 태양 에너지의 양을 결정한다. 그리고 이를 통해 획득되는 전하량을 계산하고, 이 양에 따라 증가치를 조정한다.
4. 방전되는 전하의 개수에 대해 랜덤한 확률값을 얻는다. 이에 따라 특정 방전 이벤트가 발생할 때 방전되는 전류량을 결정하고, 증가량을 조정한다.
5. 다음으로 휴지 상태 동안 복구가 일어날 확률값을 얻고, 이에 따라 증가치를 조정한다. 복구 이벤트는 태양 에너지 충전(3단계)과는 달리 각 Idle 상태에서 한번만 발생된다.
6. 조정된 증가치에 따라 현재의 전하량을 변경한다.
7. 전하량이 0이 될 때까지 과정을 반복한다.

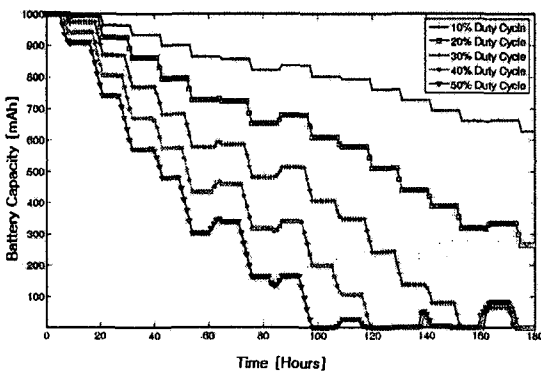


Fig. 4 Battery capacity variation with duty cycle

Fig. 4는 충전된 태양전지의 duty cycle별 시간에 따른 전지용량 변화를 보여주며, 사용된 파라메타는 다음과 같다: 최대 전지용량=1,000mAh, 방전전류=35mA, 충전전류=50mA. 이 결과로부터 충전된 태양전지가 duty cycle에 따라 얼마나 오랫동안 사용될 수 있는가를 알 수 있을 뿐만 아니라, 응용에 따라 필요한 전지의 용량을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크를 위한 태양 전지 모델을 제시하였다. 이를 위해 태양 에너지와 태양 전지의 특성을 분석하였고, 이를 기반으로 태양전지의 충전모델과 축적되는 전하량 그리고 duty cycle별 전지용량의 변화를 시뮬레이션하였다. 이 모델은 태양전지에 대한 수학적 모델로서, 태양전지에서 충전, 복구, 방전되는 전하량을 예측하고 분석함으로써 태양전지의 수명을 예측하기 위해 사용될 수 있다.

후기

본 논문은 지역산업기술개발사업 (중점기술개발사업)의 지원을 받아 연구되었습니다. (과제명: 지능형 홈에서의 위치기반 서비스 기술 개발, 총 개발기간: 2004. 12. 1~2008. 9. 30)

참고문헌

1. Rao, V., Singhal, G., Kumar, A. and Navet, N., "Battery Model for Embedded Systems," 18th International Conference on VLSI Design, pp. 105-110, 2005.
2. Rao, R., Vrudhula, S. and Rakhmatov, D. N., "Battery Modeling for Energy Aware System Design," IEEE Computer Society, Vol. 36, Issue 12, pp. 77-87, 2003.
3. Panigrahi, T. D., Panigrahi, D., Chiasserini, C., Dey, S., Rao, R., Raghunathan, A. and Lahiri, K., "Battery Life Estimation of Mobile Embedded Systems," 14th International Conference on VLSI Design, pp. 57-63, 2001.
4. Chiasserini, C. F. and Rao, R. R., "Energy Efficient Battery Management," 19th Annual Joint

- Conference of the IEEE Computer and Communications INFOCOM, IEEE Proceedings of Societies, Vol. 2, pp. 396-403, 2000.
5. Chopra, K., Dasika, S., Srinivasan, R. and Vrudhula, S., "A framework for Battery-Aware Sensor Management," Proceedings of the Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition, Vol. 2, pp. 962-967, 2004.
 6. Ma, C., Yang, Y. and Zhang, Z., "Constructing Battery-aware Virtual Backbones in Sensor Networks," International Conference on Parallel Processing, pp. 203-210, 2005.
 7. Bandyopadhyay, S. and Coyle, E. J., "An Energy Efficient Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks," INFOCOM, Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. IEEE, Vol. 3, pp. 1713-1723, 2003.
 8. Gupta, G. and Younis, M., "Fault-Tolerant Clustering of Wireless Sensor Networks," IEEE Wireless Communications and Networking, Vol. 3, pp. 1579-1584, 2003.
 9. Jiang, X., Polastre, J. and Culler, D., "Perpetual environmentally powered sensor networks," 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, pp. 463-468, 2005.
 10. Meinel, A. B. and Meinel, M. P., "Applied Solar Energy: An Introduction," Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1976.
 11. Rahugnathan, V., Kansal, A., Hsu, J., Friedman, J. and Srivastava, M., "Design considerations for Solar Energy Harvesting Wireless Embedded Systems," Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks, 2005.