

태양 에너지 기반 센서 시스템을 위한 효율적인 에너지 관리 기법

(Efficient Energy Management for a Solar Energy
Harvesting Sensor System)

노 동 건[†] 윤 익 준^{**}
(Dong Kun Noh) (Ikjoon Yoon)

요 약 태양 에너지를 이용한 무선 센서 네트워크에서는 공급되는 에너지의 변화가 크고 저장할 수 있는 배터리 용량이 제한적이기 때문에 이에 적응적으로 대처할 필요가 있다. 또한, 이렇게 변화하는 에너지 공급에 대처하기 위해 노드의 동작을 빈번히 변화시키는 것과는 달리, 일정한 수준 이상으로 안정되게 동작하는 것을 필요로 하는 응용이 있을 수 있다. 따라서 태양 에너지 기반 센서 시스템에서 사용 가능한 에너지를 최대한 이용함과 동시에 일정 수준의 에너지를 안정적으로 제공하기 위해서는, 각 노드가 자신이 수집할 수 있는 에너지의 양을 예측하고 이를 효율적으로 할당하는 기법이 필요하다. 본 논문에서는 시간 슬롯 단위의 수집 가능 에너지량에 대한 기댓값 모델을 기반으로, 각 시간 슬롯에 할당되는 에너지의 변화를 최소화함과 동시에, 주기적으로 수집되는 태양 에너지를 최대한 활용하기 위한 효율적인 에너지 할당 기법을 제안한다. 또한 이들의 유효성을 확인하기 위하여 테스트베드 구축하고, 우리의 기법을 평가하였다.

키워드 : 태양 에너지, 센서 시스템, 에너지 할당, 센서 네트워크

Abstract Using solar power in wireless sensor networks (WSNs) requires adaptation to a highly varying energy supply and to a battery constraint. From an application's perspective, however, it is often preferred to operate at a constant quality level as opposed to changing application behavior frequently. Reconciling the varying supply with the fixed demand requires good tools for allocating energy such that average of energy supply is computed and demand is fixed accordingly. In this paper, we propose a probabilistic observation-based model for harvested solar energy. Based on this model, we develop a time-slot-based energy allocation scheme to use the periodically harvested solar energy optimally, while minimizing the variance in energy allocation. We also implement the testbed and demonstrate the efficiency of the approach by using it.

Key words : solar energy, sensor system, energy allocation, sensor network

1. 서 론

무선 센서 네트워크의 노드들은 대부분 배터리로 동작한다. 따라서 최대한 오랜 시간 동안 동작해야하는 센서 네트워크의 응용들에게 배터리의 제한된 에너지는 아주 큰 제약 요소이고, 따라서 이렇게 제한된 양의 에너지를 더욱 효율적으로 사용하기 위하여 많은 기법들이 연구되어왔다. 그러나 최근에는 에너지의 제약 사항을 보다 완화시키는 방법으로서, 환경 에너지를 사용하여 센서 시스템의 배터리를 지속적으로 충전시키는 방식이 부각되고 있다. 즉, 배터리를 수동으로 재충전하거나 교체하는 것은 불가능하거나 실용적이지 않은 경우가 많으므로, 센서 시스템 스스로 주변 환경으로부터 에너지를 수집하는 것이다. 특히, 태양 에너지는 다른 환

· 이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-357-D00206).

† 정 회 원 : Univ. of Illinois at Urbana-Champaign Computer Science
박사후 연구원
dnoh@illinois.edu

** 학 생 회 원 : 서울대학교 전기·컴퓨터공학부
ijyoon@cse.lab.snu.ac.kr

논문접수 : 2009년 4월 14일

심사완료 : 2009년 5월 26일

Copyright©2009 한국정보과학회: 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 컴퓨팅의 실제 및 레터 제15권 제7호(2009.7)

경 에너지에 비해 에너지의 밀도가 크기 때문에 즉, 짧은 시간에 많은 에너지를 얻을 수 있기 때문에 최근 널리 연구되어지고 있는데, 이러한 태양 에너지는 다음과 같은 두 가지 특징이 있다.

- 주기성: 태양은 하루에 한 번씩 뜨고 지기 때문에 날마다 충전과 방전을 반복하게 되고 우리는 이 하루를 수집 주기라고 한다. 공급되는 태양 에너지는 매 수집 주기마다 예상될 수 있다.
- 역동성: 태양 에너지는 환경에 따라 시종일관 변한다. 공통적으로는, 아침부터 증가하기 시작하여 오후부터 감소하고 밤 동안은 거의 0의 상태를 유지한다. 또한 날씨나 계절의 변화에 따라 끊임없이 변화한다.

배터리만을 사용하는 센서 시스템이 에너지 사용을 최소화하는 것을 목표로 둔 데에 반하여, 태양 에너지 기반의 센서 시스템은 주기적으로 수집되는 에너지를 최대한 효율적으로 이용하는 것을 목표로 한다. 다시 말해서, 태양 에너지기반 시스템은 주기적으로 재충전 되므로, 이를 최대한 아껴서 사용하기보다는 수집 에너지량에 적응하여 이를 최적으로 이용하는 것이 목적이다. 좀 더 구체적으로 살펴보면, 태양 에너지 기반 센서 노드에서 에너지를 최적으로 사용하기 위해서는 다음과 같은 요구사항을 만족시켜야 한다.

- 에너지 중립적 동작(energy-neutral operation: ENO) : 수집 주기 동안 수집되는 에너지는 같은 기간 동안 소모되는 에너지보다 작지 않아야 한다. 하루 동안 수집되는 에너지는 날씨나 계절에 따라 변할 수 있기 때문에 노드는 에너지 소모량을 수집되는 에너지에 따라 조절해야 한다.
- 버려지는 태양 에너지의 양 최소화: 태양 에너지는 주기적으로 수집된다. 그런데 배터리의 용량 이상은 수집될 수 없기 때문에, 에너지가 가득 찬 상태에서 추가로 수집되는 에너지는 버려지게 된다. 그러므로 이미 수집된 에너지를 최대한 이용하는 것이, 에너지 소모를 최소화 하는 것 보다 더욱 중요할 수 있다.
- 할당되는 에너지 변화의 최소화: 해가 떠있지 않은 시간 동안에는 에너지가 수집되지 않는다. 그런데 많은 응용들에서 시간의 변화와 관계없이 동일한 비율로 데이터를 수집하기를 요구한다. 그러므로 각 노드는 시간의 변화에 관계없이 일정한 수준으로 동작할 수 있도록 충분한 양의 에너지를 비축해야 한다. 하지만 이는 기존의 적응적으로 에너지를 할당하는 방식들에서는 종종 간과되어 왔다. 본 논문에서는 이를 해결하는 것을 주된 목적으로 한다.

본 논문에서는 위의 요구 사항들을 최대한 만족시켜, 수집된 에너지를 최적으로 이용하는 에너지 할당 알고리즘을 소개한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 다음

장에서 우리는 태양 에너지를 이용한 무선 센서 네트워크에서 현존하는 에너지 할당 기법들을 분석한다. 3장에서는 수집되는 태양 에너지의 기댓값 모델을 제안하고, 4장에서는 이 모델을 기반으로 하여 태양 에너지를 최적으로 사용하는 에너지 할당 알고리즘을 제안한다. 5장에서는 본 기법의 성능 측정을 위한 실험용 테스트베드를 설명하고, 이를 기반으로 수행한 성능 평가를 설명한다. 마지막으로 6장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

Roundry 등은 그들의 연구[1]에서 여러 배터리들과 환경 에너지원들의 에너지 밀도와 그 수명과의 관계를 보여주었는데, 그림 1[1]에 잘 요약되어 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 배터리와는 다르게 환경 에너지들은 아주 오랜 시간 안정적인 에너지를 공급할 수 있으므로, 센서 노드의 지속적인 동작을 보장할 수 있다. 그 중에서도 특히 태양에너지는 높은 에너지 밀도와 낮은 장치 비용으로 많은 관심을 받고 있다. 따라서 최근 몇 년간, 연구자들은 무선 센서 네트워크에 태양 에너지를 적용시키는 것과 관련하여 많은 연구를 수행하였다. Minami [2]는 Solar-Biscuit이라 불리는 배터리를 사용하지 않는 환경 모니터링용 무선 센서 네트워크를 설계했다. Simjee와 Chou[3]는 Everlast라 불리는 슈퍼 커패시터로 동작하는 태양 에너지를 이용한 무선 센서 네트워크 노드를 발표했다. Jay[4]는 무선 센서 네트워크의 마이크로 태양 에너지 수집 서브시스템을 구축하는 구조적인(systematic) 접근 방법을 설명했다. 그러나 앞에서 설명한 대부분의 연구는 하드웨어 구조나 시스템 평가와 같은 노드 수준의 설계에 초점을 둔다.

지금까지의 무선 센서 네트워크에서는 에너지 소모를 최소화 하는 데에 주력해왔다. 많은 연구자들은 에너지를 고려한 라우팅 기법을 제안해왔고[5-7], 이를 위한 방법으로는 분산 시스템에서 배터리의 잔존 에너지량을 결정하는 방법과[8], 다양한 노드들에서 앞으로의 에너지 소모를 예측하는 방법이 있다[9]. 그런데 이 접근 방법들은 여분의 배터리 용량에 기반한 것이고, 에너지들

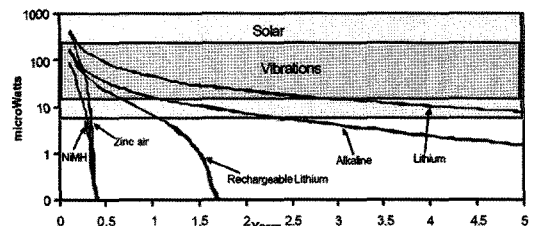


그림 1 여러 가지 파워 소스들의 에너지 밀도와 수명과의 관계[1]

수집하여 배터리를 충전하는 경우는 고려하지 않았다.

초기의 에너지의 수집을 고려한[10,11] 연구자들은 수집된 에너지를 최대한 적절히 이용할 수 있도록 에너지를 할당하는 방법과 이 할당된 에너지를 라우팅에 이용하는 것에 관심을 가지고 있었다. 이는 단순한 접근 방법보다 더 좋은 성과와 긴 수명을 달성할 수 있었지만, 이것들은 단순히 수집된 에너지를 효율적으로 이용하기 위한 발전적 기법이고, 그것들이 최적에 가까운 성능을 낼 수 있다는 것을 보장하지는 않았다.

좀 더 최근에, 몇몇 연구자들은 수집된 에너지를 고려하여 1)듀티 사이클(duty cycle)을 조절함으로써 노드의 성능을 유지하는 기법을 제시했다. Kansal[12]은 듀티 사이클을 조절하기 위한 에너지 수집과 소모에 관한 이론을 제시했다. 한 주기를 같은 길이의 여러 구간들로 나누고, 한 구간 동안 수집될 것으로 예상되는 에너지는 과거의 기록에 의해 계산된다. 초기의 듀티 사이클은 각각의 구간동안 수집될 것으로 예상되는 에너지의 평균에 의해 결정되고, 추후 실제 에너지와 제안된 모델에 의해 예상된 에너지의 차이를 기반으로 재조정된다. 이와 비슷하게, Vigorito[13]는 적응적 제어 이론[14]에 기반 한 알고리즘과 이를 기반으로 듀티 사이클을 조절하는 방법을 제안했다. 그들의 주요한 공헌은 이 문제를 해결하기 위해서 비모델(model-free) 접근 방법을 적용함으로써 다른 환경 에너지에도 적용할 수 있는 기법을 제시했다는 것이다.

또한 최근 들어 태양 에너지의 적절한 사용을 통하여, 수집되는 데이터의 양을 최대화하는 방법이 연구되고 있다. 예를 들어, SolarStore[15]는 배터리의 상태(용량과 남은 에너지)와 저장장치의 상태(용량과 남은 공간)를 고려하여 데이터의 안정성을 동적으로 변화시킨다. 이렇게 에너지의 소비와 데이터 안정성 확보 사이의 이율배반적(trade-off) 관계에서 균형을 맞추으로써 데이터의 손실을 최소화 할 수 있다. 즉, 배터리(혹은 저장장치) 상태에 따라서 노드의 성능을 조절함으로써 데이터 안정성을 높이고 손실되는 데이터의 양을 최소화하는 것이다.

마지막으로, 본 연구는 최근의 연구[16]에 기반을 두고 있는데, 이 연구에서는 수집 에너지의 양을 보다 자세히 모델링하고 각 구간의 시작마다 할당 알고리즘을 실행시킴으로서 에너지 할당의 정확도를 높이는 방법을 제시하고 있다. 하지만 이러한 자세한 모델은 매우 큰 시간적 계산 오버헤드를 야기하고, 또한 에너지를 포함한 많은 시스템 자원의 소비를 유발하기 때문에, 풍부한

자원을 가진 센서 시스템을 그 타겟으로 하고 있다. 이와 다르게 본 연구는 자원 제약이 심한 센서 시스템에서 보다 간단하고 보다 실용적으로 수집 에너지를 할당하는 것에 초점을 두고 있다.

3. 수집되는 에너지량 예측

에너지가 수집되는 주기를 T (태양 에너지의 경우 24시간)라 하고, T 는 동일한 주기 L 을 가지는 시간 슬롯들로 나뉜다고 하자. 앞으로 다루게 될 수집 에너지량 및 할당 에너지량은 이 시간 슬롯을 대상으로 한다. 그러면, 한 주기(T) 내에 있는 전체 슬롯의 개수는 T/L 이고, 이 값을 N 으로 표시한다. 여기서 L 의 길이는 시스템 자원 상태와 응용의 요구사항에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어, 보다 세밀한 에너지 할당을 요하는 응용에서는 L 의 길이가 작을수록 유리하고, 이것을 다루기 위해서는 다소 풍부한 시스템 자원이 요구된다.

수집 주기가 시작(t_0)할 때, 그 주기 내의 각 슬롯에서 수집되어 질 예상 에너지량은 기존에 축적된 정보(historical information)를 기반으로 예측할 수 있다 [12]. 여기서, 축적된 정보를 기반으로 하여 앞으로 수집될 에너지량을 예측하는 기법에 대해 살펴 볼 것이다.

그림 2에서와 같이, 노드는 각 시간 슬롯동안 수집되어질 에너지의 기댓값을 유지하고 있다. 예를 들어, t_0 가 7:00 am이고 L 이 30분일 때, $\bar{E}_{hrv}^0, \bar{E}_{hrv}^1, \dots, \bar{E}_{hrv}^{N-1}$ 는 각각 슬롯 0(7:00 am부터 7:30 am까지), 슬롯 1(7:30 am부터 8:00 am까지), ..., 슬롯 $N-1$ 에서 수집되는 에너지의 기댓값이다. 태양 에너지는 주기적인 성질을 가지고 있기 때문에 이전 수집 주기의 $t_0 + N \cdot L$ (슬롯 $N-1$ 의 끝)은 다음 주기의 t_0 와 같다.

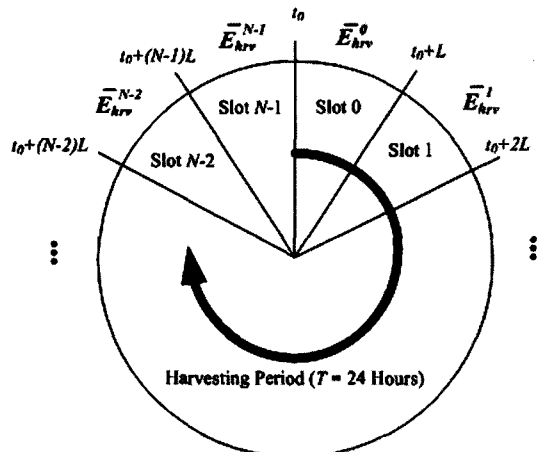


그림 2 각 슬롯에서 수집될 에너지의 기댓값

1) 전체 시간(노드의 동작 시간+노드의 수면 시간)에 대한 노드의 동작 시간 비율

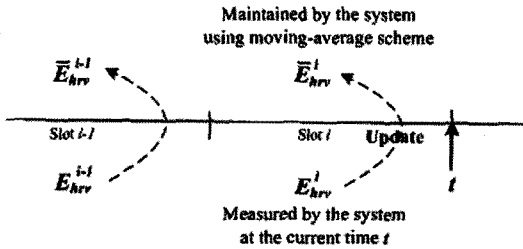


그림 3 이동 평균 기법을 이용하여 유지되는 각 노드의 기본 기댓값

그러면 각 슬롯의 기댓값은 어떻게 유지되는가? 각 슬롯의 기댓값은 같은 기간 동안, 노드가 실제로 수집된 에너지량을 측정함으로써 가능하다. 즉, 그림 3과 같이 각 노드는 계속해서 각 슬롯에서 실제로 수집된 에너지량을 측정하여 기록하고, 이 정보를 이용하여 각 슬롯에서 수집할 수 있는 에너지량의 기댓값 \bar{E}_{hrv}^i 를 유지한다. 그림에서 보듯이 E_{hrv}^i 가 최근에 슬롯 i 에서 실제 수집된 에너지량이라 하면, 슬롯 i 에 수집되는 에너지의 기댓값 \bar{E}_{hrv}^i 은 다음과 같은 이동 평균(moving-average) 알고리즘에 의해 갱신된다.

$$\bar{E}_{hrv}^i = (1-\theta) \cdot \bar{E}_{hrv}^i + \theta \cdot E_{hrv}^i \quad (1)$$

따라서 \bar{E}_{hrv}^i 에는 이전의 모든 주기에서 측정된 E_{hrv}^i 값들을 반영하고 있다. 그러나 시스템의 상태는 과거보다는 현재의 상태에 더욱 의존적이므로, 최근에 측정된 E_{hrv}^i 값의 비중이 보다 높아야 할 것이다. 이를 위해 계수 θ 를 사용하는데, 이는 기존의 표본(측정값)들이 기댓값에 영향을 주는 비율을 조정한다. 식 (1)에서 $0 < \theta < 1$ 를 유지하는데, 이는 더욱 오래된 E_{hrv}^i 의 영향력을 점점 작아지게 하기 위함이다. 편의를 위해 식 (1)에 의해 구해지는 수집된 에너지의 기댓값을 기본 기댓값이라 부르도록 하자.

이 기본 기댓값은 노드의 위치에 의존적이지만, 시간에 따라 일정한 특징을 가지고 있다. 즉, 주기 T 동안 시간에 따른 슬롯들의 기본 기댓값은, 태양 에너지의 특성에 따라 오전의 슬롯들부터 증가하기 시작하여 오후 슬롯들에서 최대가 되고, 이로부터 계속 감소하여 야간의 슬롯에서는 거의 0을 유지한다. 또한, 각 슬롯의 기본 기댓값은 계절과 같은 비교적 큰 시간의 흐름도 반영하여 변화하는데, 예를 들어 여름의 \bar{E}_{hrv}^i 값은 겨울의 것보다 더 큰 값을 유지한다. 따라서 이 기본 기댓값을 사용함으로써 우리는 수집 주기 T 가 시작되는 시점 t_0 에서, 이 주기 내의 각 슬롯에서 수집되는 에너지의 양을 예측할 수 있다.

4. 최적의 에너지 할당

이 장에서는 수집되는 에너지를 최대한 활용하고, 각 시간 슬롯에 할당된 에너지량의 변화를 최소화하는 에너지 할당 알고리즘을 제시한다. 다음의 각 절에서는 (1) 최적의 에너지 할당 문제를 수식화하고, 이를 기반으로 에너지를 최적으로 할당하기 위한 알고리즘을 제시한다. 아울러 (2) 예상 수집 에너지의 오차를 보정하기 위해 고려할 사항을 정리한다.

4.1 최적 에너지 할당 기본 모델

본 논문의 에너지 시스템 모델은 슬라 패널과 센서 시스템 사이에 배터리와 같은 에너지 저장 버퍼가 있는 것을 가정하고 있다. 이 버퍼는 일시적으로 에너지를 저장함으로써 시스템이 수집된 에너지를 더욱 효율적으로 사용하도록 하는 역할을 한다.

앞서 살펴본 것처럼, 에너지가 수집되는 주기를 T (태양 에너지의 경우 24시간)라 하고, T 는 길이 L 의 슬롯들로 나뉜다. 한 주기(T) 내에 있는 전체 슬롯의 개수는 T/L 이고, 이 값을 N 으로 표시한다. 즉 T 는 슬롯 0부터 슬롯 $N-1$ 로 구성되어 있고, 에너지는 이렇게 나뉜 각각의 슬롯에 할당될 것이다. 슬롯 j 동안 수집된 에너지를 E_{hrv}^j 라 하고, 슬롯 j 에 할당된 에너지를 E_{alloc}^j 라 하자. $E_{br}(t)$ 는 t 시간에 배터리에 남아있는 에너지이고 t_0 는 슬롯 0의 시작 시간이라고 하면, t_0 시간으로부터 k 슬롯이 지난 후에 남은 에너지는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$E_{br}(t_0 + kL) = E_{br}(t_0) + \sum_{j=0}^{k-1} E_{hrv}^j - E_{alloc}^j \quad (2)$$

위의 식 (2)를 보면 현재의 배터리의 상태는 이전 슬롯들에서 수집된 에너지와 소모된 에너지에 전적으로 의존하고 있다. 따라서 에너지 할당 문제는 선형 프로그래밍(linear programming) 기법으로 나타낼 수 있다.

이 문제의 선형 프로그래밍은 에너지를 최적으로 할당하기 위하여 1장에서 설명한 요구사항들을 모두 반영해야 한다. 즉 (1) T 기간 동안 수집된 에너지는 ENO(에너지 중립적 동작) 조건을 만족시켜야 함과 동시에 (2) 최대한 많은 태양 에너지를 수집해야 하고, (3) 또한 슬롯들 간에 할당되는 에너지의 변화가 최소화 되어야 한다. 따라서 다음과 같은 선형 프로그래밍 문제를 해결함으로써 각 슬롯에 할당되는 최적의 에너지량을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Find an } N\text{-dimensional vector, } E_{alloc} = \\ & \langle E_{alloc}^0, \dots, E_{alloc}^{N-1} \rangle, \text{ to minimize } \lambda: \\ & \lambda = \text{Var} \{ E_{alloc}^k \}_{0 \leq k < N}. \end{aligned} \quad (3)$$

subject to the constraints :

$$\begin{cases} E_{br}(t_0 + k \cdot L) = E_{br}(t_0) + \sum_{j=0}^{k-1} E_{hrv}^j - E_{alloc}^k, \forall 0 \leq k \leq N, \\ |E_{br}(t_0) - E_{br}(t_0 + N \cdot L)| \leq \epsilon, \\ 0 \leq E_{br}(t_0 + k \cdot L) \leq E_{br}^{max}, \forall 0 \leq k \leq N, \\ 0 \leq E_{alloc}^k \leq E_{br}(t_0 + k \cdot L), \forall 0 \leq k < N, \\ 0 \leq E_{alloc}^k \leq E_{br}^{max}, \forall 0 \leq k < N, \end{cases}$$

위의 수식에서 N 은 T/L 이고, 이는 T 구간 동안의 슬롯의 수를 나타낸다. ϵ 은 허용 가능한 에러 범위이고 E_{alloc}^{max} 는 노드가 한 슬롯동안 소모할 수 있는 에너지의 최대량을 나타낸다.

식 (3)의 두 번째 제한사항은 앞서 1장에서 설명한 ENO 조건(노드가 수집되는 에너지를 최대한 사용하면, 안정적으로 동작하기 위해서 반드시 만족되어야 하는 조건)을 나타내고 있고, 세 번째 제약 사항은 배터리의 제약을 표현하고 있다

위의 수식을 풀려면 각 슬롯(슬롯 0에서 슬롯 $N-1$)에서 수집되어 지는 에너지의 양의 정보가 필요하고, 이를 위해 우리는 3장에서 살펴본 수집 에너지의 기본 기댓값(\bar{E}_{hrv})을 사용할 것이다. 즉, 매 수집 주기(T)의 시작 시점에서 앞으로의 N 개 슬롯 각각에서 수집되어 질 것으로 예상되는 기본 기댓값($\bar{E}_{hrv}^0 \sim \bar{E}_{hrv}^{N-1}$)을 사용하여, 식 (3)을 푼다. 그러면, 식 (3)의 결과로 각 슬롯에 배분되어질 최선의 에너지 할당 값($E_{alloc}^0 \sim E_{alloc}^{N-1}$)을 구할 수 있다. 그림 4는 이러한 기법의 간단한 의사 코드를 보여준다.

Algorithm for Assigning Energy to Each Slot

```

1 // This algorithm is invoked at the start of every harvesting period T.
2 // Get initial amount of energy in the battery.
3  $E_{br}^{init} = \text{getAmountOfEnergyOnBattery}(t_0)$  ;
4 // Get the base expectation of harvested energy on each slot as in Chapter 3.
5  $\text{vector } \bar{E}_{hrv} = \text{getBaseExpectationOfHarvestedEnergy}()$  ;
6 // Solve LP problem of Formula (3)
7  $\text{vector } \text{OptimalAlloc} = \text{solveLP}(E_{br}^{init}, \bar{E}_{hrv}, E_{br}^{max}, \epsilon)$  ;
8  $\text{setNextInvokedTime}(t_0 + T)$  ; // Set the next invoking time of this algorithm
9  $\text{exit}()$  ;
    
```

그림 4 수집 주기(T)가 시작될 때 수행되는 에너지 할당 알고리즘

이러한 우리의 기법은 매 수집 주기(T)마다 단 한 번 런타임(runtime)으로 실행됨으로서 계산 오버헤드가 거의 없고, 또한 기본 기댓값을 위한 계산 및 저장 공간 오버헤드도 매우 적다. 따라서 센서 노드의 성능에 거의 영향을 미치지 않고, 효율적인 에너지 할당을 수행할 수 있다.

4.2 오차의 보정

이상적으로는 수집 주기가 시작(t_0)할 때 식 (3)의 선형 프로그래밍 문제를 해결함으로써 N 개의 모든 슬롯에 할당되는 최적 에너지를 결정할 수 있다. 그런데 사전에 각 슬롯에서 수집되는 에너지(식 (3)에서 E_{hrv}^j)를 정확히 아는 것은 불가능하다. 4.1장에서 살펴본 것처럼 우리는 이를 위해 3장에서 설명한 기본 기댓값을 사용하였다. 그러나 기본 기댓값이 실제 수집되는 에너지의 양을 비슷하게는 예측할 수 있으나, 정확하게 예측할 수는 없다. 따라서 어쩔 수 없이 각 슬롯에서 실제 수집되는 에너지의 양과 기본 기댓값 사이에 오차가 발생하게 되는데, 본 장에서는 이를 예측 오차라 부를 것이다.

각 슬롯의 예측 오차는 각 슬롯이 지난 후에야 알 수 있는데, 예를 들면, 슬롯 0의 예측 오차는 슬롯 0이 지난 시점에서 슬롯 0동안 실제 수집된 에너지의 양을 계산 후에, 이와 기본 기댓값을 비교함으로써 알 수 있을 것이다. 이러한 각 슬롯의 예측 오차는 그 수집 주기 내의 나머지 슬롯들에게 이미 할당된 에너지량에 균등하게 적용된다. 예를 들어, 슬롯 0에서의 예측 오차를 ϵ_0 이라 하면, 슬롯 0을 제외한 그 수집 주기 내의 나머지 $N-1$ 개의 슬롯들(슬롯 1~슬롯 $N-1$)은 원래 자신에게 할당된 에너지($E_{alloc}^1 \sim E_{alloc}^{N-1}$)에서 ϵ_0 를 균등하게 나눈 값, 즉 $\epsilon_0/(N-1)$ 만큼을 더하여서 할당된다. 그림 5는 슬롯 4에 할당되는 예측 오차를 고려한 에너지량을 보여준다. 그림 4의 알고리즘을 수행한 후 슬롯 4는 E_{alloc}^4 만큼의 에너지를 할당 받도록 되어 있다. 그러나 이 값은 앞선 슬롯들(슬롯0~슬롯3)의 예측 오차만큼 수정되어 실제 할당되어야 한다. 슬롯 0의 예측 오차 ϵ_0 은 나머지 $N-1$ 개의 슬롯들에 고루 분배되어야 하고, 마찬가지로 ϵ_1 은 $N-2$ 개의 슬롯들에, ϵ_2 는 $N-3$ 개의 슬롯들에, ϵ_3 은 $N-4$ 개의 슬롯들에 골고루 분배되므로 결국 실제 슬롯 4에 할당되는 에너지의 양은 아래와 같다.

$$E_{ActualAlloc}^4 = E_{alloc}^4 + \frac{\epsilon_0}{N-1} + \frac{\epsilon_1}{N-2} + \frac{\epsilon_2}{N-3} + \frac{\epsilon_3}{N-4} \quad (4)$$

그러나 여기서 간과한 것이 있는데, 바로 이전 수집 주기의 마지막 슬롯에서의 예측 오차를 반영하지 않았다는 것이다. 이전 수집 주기의 마지막 슬롯(슬롯 $N-1$)도 예측 오차 ϵ_{N-1} 를 가지고 있으므로, 그것을 이번 주기에 반영시켜야 한다. 그것은 이번 주기 N 개의 슬롯에 모두 고루 반영되어야 하므로, ϵ_{N-1} 을 이전 수집 주기의 마지막 슬롯(슬롯 $N-1$)에서의 오차라고 하면 ϵ_{N-1}/N 이 이번 수집 주기 내의 모든 슬롯에 반영되어야 한다. 따라서 각 슬롯에 실제 할당되는 에너지의 양은 아래 수식 (5)와 같다.

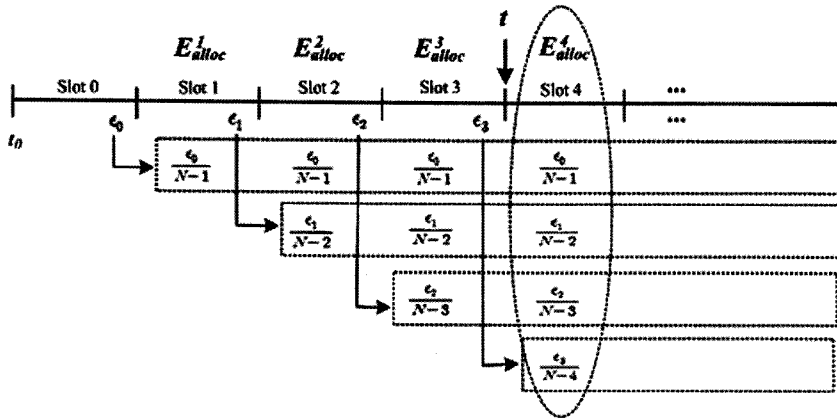


그림 5 이전 슬롯들의 예측 오차를 고려한 슬롯 4의 실제 에너지 할당량

$$E_{actualAlloc}^i = E_{alloc}^i + \sum_{k=0}^{i-1} \frac{\epsilon_{i-k}}{N-i}$$

(단 ϵ_{i-1} 은 이전 수집 주기의 마지막 슬롯

(슬롯 $N-1$)에서의 오차) (5)

앞서 살펴본 바와 같이 각 슬롯의 예측 오차는 그 슬롯이 지난 후에 계산될 수 있으므로, 이전 슬롯들의 예측 오차를 모두 반영하기 위하여 위의 식은 각 슬롯이 시작될 때에 수행된다. 오차의 보정이 매 슬롯이 시작될 때마다 수행되어지긴 하지만, 예측 오차를 계산하기 위한 값들(\bar{E}_{hrv} 와 E_{hrv}^i)은 이미 3장에서 설명한 기본 기댓값을 유지하기 위하여 이미 필요한 값들이고, 수식 (5)의 계산 복잡도는 매우 낮으므로, 그 오버헤드는 매우 적다.

5. 성능 평가

제시한 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 우리는

태양 에너지 기반 무선 센서 네트워크 실내 테스트베드를 구축하였다[15,16]. 본 장에서는 테스트 베드의 설명과 이를 이용한 성능 평가에 대하여 살펴본다.

5.1 실험용 테스트베드

테스트베드 노드는 그림 6과 같이 태양 에너지 수집 시스템과 센서 시스템의 2가지 서브시스템으로 구성되어 있다[16]. 태양 에너지 수집 시스템은 솔라 패널과 배터리 그리고 센서 시스템의 활성화 여부를 결정하는 부하 제어기를 모사하기 위한 에뮬레이터들로 구성되어 있다. 솔라 패널의 충전 전류는 태양열 집열판 에뮬레이터에 의해 결정된다. 이 에뮬레이터는 패널의 지리적 위치(경도, 위도 등)와 시간 정보(날짜, 시간 등)에 따라 솔라 패널에 수집되는 태양 에너지의 양을 결정하는데, 이는 실제 기록된 정보를 기반으로 한 실제 값이다. 이와 병렬적으로, 센서 시스템에서 사용하는 에너지의 양, 즉 에너지의 방전량은 센서 시스템에 장착된 전류 센서로부터 읽을 수 있다. 이렇게 솔라 패널 에뮬레이터와

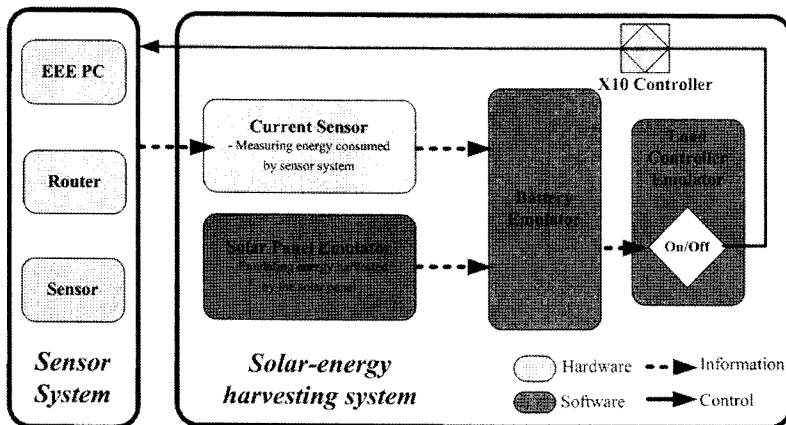


그림 6 테스트 베드의 구성 요소 및 제어 흐름도[16]

전류 센서에 의하여 측정되어진 충전량과 방전량을 기반으로, 배터리 에뮬레이터는 배터리의 잔존 에너지량을 갱신한다. 그림 7(a)는 이러한 태양 에너지 수집시스템의 에뮬레이터를 보여준다.

일반적으로 에너지 수집 시스템에서 부하 제어 장치는 센서 시스템과 배터리 사이에 위치하여, 배터리의 에너지가 일정 수준 이하일 경우 배터리를 과잉 방전으로부터 보호하기 위해 회로를 차단하는 역할을 수행한다. 이 경우 센서 시스템은 배터리로부터 에너지를 받을 수 없기 때문에 수면/꺼짐 상태를 유지하게 된다. 태양 에너지의 수집으로 다시 배터리의 잔존 에너지량이 일정 수준을 넘게 되면 부하 제어기는 배터리와 센서 시스템을 다시 연결하여 센서가 동작하도록 한다. 이러한 부하 제어기를 모사하기 위하여 우리는 X10[17] 모듈을 사용하였다. 각 테스트 베드 노드는 AC전원으로부터 전원을 공급 받지만, 부하 제어기를 모사하기 위하여, 배터리 에뮬레이터의 남은 에너지에 따라 노드에 AC 전원을 공급, 혹은 차단시켜야 한다. 우리는 이 AC 전원의 켜짐/꺼짐 자동화 제어장치로써 일반적으로 스마트홈 기구를 제어하는데 사용되는 X10 모듈을 사용하였는데, 이는 배터리 에뮬레이터와 연동하여 배터리 잔존량을 기반으로 자동으로 노드로 흐르는 AC 전원을 제어(연결/차단)한다. 그림 7(b)는 이러한 X10 모듈의 제어상태를 나타내는 소프트웨어 프로그램을 보여준다. 각 노드의 배터리 에뮬레이터 정보에 따라, 센서 시스템이 켜지거나 꺼진 상태임을 볼 수 있다.

한편, 센서 시스템의 계산 요소로써 우리는 로-엔드(low-end)의 랩탑 컴퓨터(Asus EEE PC)를 사용하였는데, 이는 멀티미디어 센싱을 포함한 여러 종류의 광범위한 응용을 지원하기 위해서 이다. 이 저전력 랩탑 컴퓨터는 보통 상태에서 약 10W를 소모하고 부하가 커지면 15W를 소모한다. 또한 무선 인터페이스로써 에너지

소모가 적고(6W) 안테나를 분리할 수 있는 Linksys WRT54 GL라우터를 사용하였다. 센서는 랩탑에 장착된 내장 캠을 사용하였다.

현재 우리는 태양 에너지 수집 시스템 및 센서 시스템을 모두 구현하여 실외의 테스트베드[15]에서 동작시키고 있다. 그러나 실외 테스트베드의 실험 환경은 똑같이 반복될 수 없기 때문에(똑같은 날씨와 대기 상태는 있을 수 없음), 우리의 알고리즘과 다른 기법들을 공정하게 비교하는 것이 쉽지 않다. 따라서 앞서 설명한 태양 에너지 수집 에뮬레이터를 구현하여 다양한 환경 상태를 반복적으로 적용함으로써, 서로 다른 알고리즘의 성능을 비교 평가하게 된다.

5.2 실험 설정

본 논문에서 제안하는 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여, 솔라 패널 에뮬레이터의 입력 파라미터로써 소속 대학의 위치와 8월 1일부터 8월 15일까지 15일간의 기간을 설정하였고, 에너지 수집 에뮬레이터의 가상 배터리 용량은 30Ah가 되도록 설정했다. 배치된 총 노드의 개수는 10개이다.

추가적으로, 각 노드의 초기 배터리 에너지를 30%~50%사이에서 랜덤 분포로 할당하였다. 슬롯의 길이는 1시간이고 첫 번째 슬롯은 오전 7:00에 시작한다. 마지막으로 우리는 각 슬롯에 할당될 수 있는 최대 에너지(식 (3)에서의 E_{alloc}^{max})를 2Ah로 설정했다. 또한, 각 노드가 수면 상태에 있을 때를 제외하고는 언제나 동영상을 센싱하고 데이터를 기록하였다. 식 (1)에서 각 슬롯에서의 $\bar{E}_{hr,v}$ 를 유지하는데 사용되는 망각 계수 θ 는 0.5로 설정했다.

또한 우리는 성능의 비교 분석을 위해 다음과 같은 여러 가지 에너지 할당 기법을 구현하였다.

- 이상적 기법(Ideal allocation scheme): 수집되는 에너지량을 노드가 미리 알고 있다고 가정하고, 수집 주

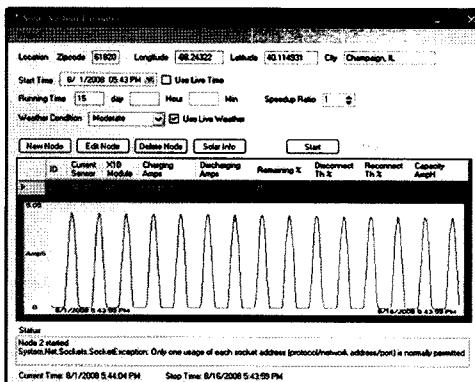


그림 7(a) 솔라 패널 에뮬레이터

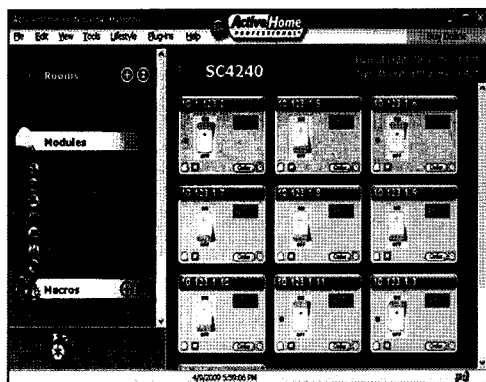


그림 7(b) X10을 사용한 부하 제어기 에뮬레이터

기의 시작 시점에 식 (3)을 계산하는 기법으로써 이상적인 에너지 할당을 도출할 수 있지만, 현실적으로는 불가능하다.

- 그리디 기법(Greedy allocation scheme): 각 슬롯이 시작될 때에, 그 슬롯에 가능한 한 많은 에너지를 할당하는 기법이다.
- 기본 기법(Base allocation scheme): 이 기법은 우리의 기법과 같이 수집주기의 시작점에서 기본 기댓값을 이용하여 식 (3)을 풀지만, 오차 보정을 수행하지 않는다.
- 우리의 기법(Our allocation scheme): 수집 주기의 시작점에서 그림 3의 알고리즘을 수행한 후, 각 슬롯의 시작점에서 식 (5)를 사용하여 오차 보정을 수행한다.

5.3 실험 결과

우리는 15일 동안 모든 10개의 노드에서 에너지 할당과 관련한 주요 값들을 측정하여 표 1에 나타내었다. 우선 평균 듀티 사이클(duty cycle)을 측정하였는데, 이는 전체 시간에 대한 노드 동작 시간의 비율을 나타낸다. 즉, 노드의 평균 듀티 사이클이 50%라면 각 슬롯의 반 동안은 노드가 동작하고 나머지 반은 노드가 수면상태 또는 꺼진 상태로 있다는 뜻이다. 이는 각 에너지 할당 기법이 얼마나 효율적으로 태양 에너지를 사용하는가를 나타내는 지표이다. 앞서 설명한 것처럼, 태양 에너지 기반 센서 노드에서는 에너지 사용의 최소화 목적을 두기 보다는, 주기적으로 수집되는 태양 에너지를 최대한 사용하는 것에 목적을 둔다. 듀티 사이클이 크다는 것은 태양 에너지를 그만큼 효율적으로 수집하고 사용했다는 것을 의미한다. 한 가지 예를 들어, 이번 주기에 배터리가 완전 충전된다고 하면, 저장 공간의 제약으로 수집되는 태양 에너지는 버려질 것이다. 따라서 배터리가 완전 충전되기 전의 슬롯들에게 최대한의 에너지를 할당해야 효율적인 에너지 사용이 될 것이다. 기본 기법은 예상 수집 에너지량의 오차로 인해 효율성의 면에서 그만큼의 손해를 본다. 그러나 우리의 기법은 그 오차를 지속적으로 보정함으로써 이상적인 에너지 할당 값에

가장 근접한 듀티 사이클을 갖는다. 그리디 기법은 저장 에너지를 최대한 많이 다음 슬롯에 할당하므로, 듀티 사이클 값 즉, 에너지 이용률은 기본 기법보다는 좋으나, 각 슬롯의 듀티 사이클 간의 차이가 표에서 보이는 것처럼 너무 크다. 이는 안정적인 노드의 운용을 할 수 없음을 나타낸다. 우리의 기법은 각 슬롯에 할당된 에너지의 편차가 이상적인 기법에 근접할 만큼 작음을 알 수 있다. 노드가 동작하지 않는 슬롯의 비율, 즉 계속해서 수면 상태거나 꺼진 상태로 있는 슬롯의 비율을 살펴보면 그리디 기법이 가장 크고, 우리의 기법이 이상적인 기법에 가장 가까움을 알 수 있는데, 이 또한 우리 기법이 안정적인 에너지 배분을 하고 있음을 보여준다. 마지막으로 한 수집 주기의 초기 배터리 잔량과 그 수집 주기가 끝난 후 배터리 잔량의 차이를 살펴보자. 두 값의 차이가 작을수록(ENO 상태를 유지할수록) 우리는 예상 가능하고 안정적인 시스템 운용을 할 수 있다. 초기 에너지가 매 수집 주기마다 일정하다면 사용자는 일정 수준 이상의 노드 가동률을 보장 받을 수 있기 때문이다. 이 또한 우리의 기법이 이상적인 기법에 가장 근접함을 볼 수 있다.

좀 더 구체적인 성능 비교를 위해 우리는 평균 에너지 수집량에서 조금 벗어나는 비오는 날과 맑은 날에서의 에너지 할당이 어떻게 이루어지는지 살펴보았다. 그림 8은 8월 7일(오전에 비)에 노드 9에서 각각의 에너지 할당 기법에 의해 슬롯에 할당된 에너지를 보여준다. 노드 9의 초기 배터리 잔량은 50%, 즉 15Ah이다. 단순 기법은 에너지를 초기 슬롯들에서는 고르게 분포시키지만, 에너지 수집에 대한 잘못된 추측(이날은 평균 이하의 에너지를 수집하게 됨)때문에 각 슬롯에 할당된 에너지의 합은 실제 수집된 에너지보다 훨씬 많다. 따라서 그림 9에서와 같이, 슬롯 22부터는 배터리의 잔량이 거의 없으므로, 슬롯 22부터는 에너지 할당을 받을 수 없다. 아울러, 마지막 슬롯의 남은 에너지는 첫 번째 슬롯의 에너지보다 훨씬 적다. 이것은 노드가 ENO 상태를 위반한 것을 의미하고, 따라서 이 노드는 안정적으로 동작할 수 없음을 의미한다. 그리디 기법은 할당된 에너

표 1 여러 가지 기법들의 에너지 할당과 관련한 주요 관찰 값들의 비교

Schemes	Ideal allocation scheme	Greedy allocation scheme	Base allocation scheme	Our allocation scheme
Average duty cycle on each slot	66.14	59.12	51.45	62.15
Variation of the duty cycle on each slot during a day	0.04	0.877	0.363	0.13
Non-working slot (%)	0	31.4	11.2	2.7
Eresidual(Initial) - Eresidual(End)(Ah)	0	13.1	7.2	0.84

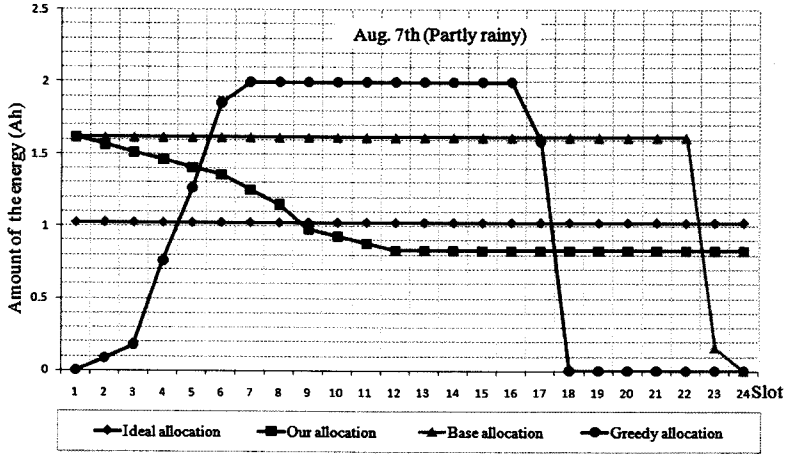


그림 8 여러 가지 기법에 의해 8월 7일(오전에 비) 노드 9에 할당된 에너지량

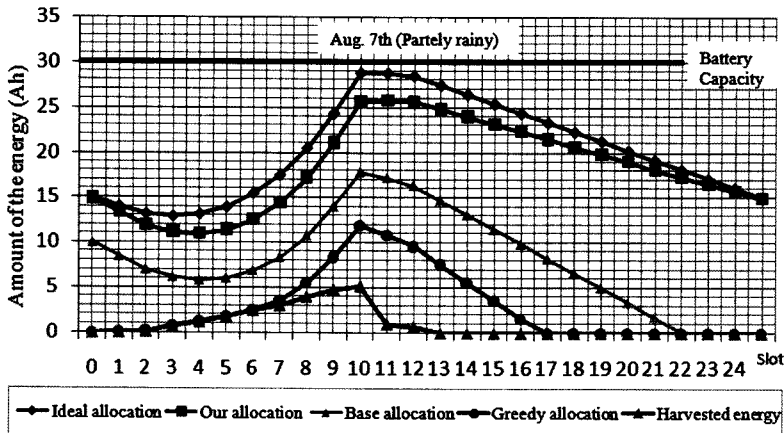


그림 9 여러 가지 에너지 할당 기법으로 인한 8월 7일(오전에 비) 노드 9의 배터리 잔량 추이

지 측면에서 비교적 높은 편차를 보인다. 왜냐하면 이 기법은 에너지의 균형을 고려하지 않고 다음 슬롯에 가능한 한 많은 에너지를 할당하기 때문이다. 더욱이 그림 9에서 보면, 배터리에 남은 에너지량이 슬롯 17이후에 0이 된다. 따라서 그 노드는 다음 수집 주기의 에너지 수집이 시작될 때까지 수면 상태로 머물러야 한다. 우리의 기법은 이전 슬롯에서의 예상 오차를 감안하여 다음 슬롯에 할당되는 에너지를 결정하기 때문에, 할당되는 에너지는 시간이 갈수록 점점 이상적인 값에 가까워지는 것을 알 수 있다. 수집되는 에너지가 없는 밤 동안의 슬롯(슬롯 13~슬롯 24)의 경우에는 예상 오차도 없으므로 오차 보정이 이루어질 필요가 없다. 이것이 우리의 할당 기법이 슬롯 13부터 마지막 슬롯까지 할당 에너지의 변화가 없는 이유이다. 요컨대, 우리의 기법은 ENO 상태를 만족시키면서 이상적인 할당에 가장 근접한 결과를

보여주었다.

그림 10은 맑은 날 여러 가지 기법들에 의해 노드 9에 할당된 에너지량을 보여준다. 그림 10만 보았을 경우, 그리디 기법이 가장 효율적으로 에너지를 할당 하는 듯 보인다. 그러나 그림 11의 배터리 잔량과 함께 살펴 보면, 그리디 기법은 초기 배터리 잔량 0에서 시작하여 슬롯 22에서 다시 배터리 잔량이 0이 됨을 알 수 있다. 이 경우 그리디 기법은 수집 에너지의 양을 가장 많이 활용하는 것은 맞지만(초기 에너지가 0이므로, 다른 기법들처럼 버려지는 태양 에너지 양이 가장 적음), 다음 수집 주기에서 노드의 동작을 보장할 수 없게 된다. 그림 10에서 이상적인 기법과 기본 기법, 우리의 기법 모두 첫 슬롯부터 슬롯 11까지 최대의 에너지를 할당하고 있는 것을 알 수 있는데, 이는 수집된 에너지를 최대한 사용하기 위함이다. 다시 말하면, 배터리는 그 날의 과

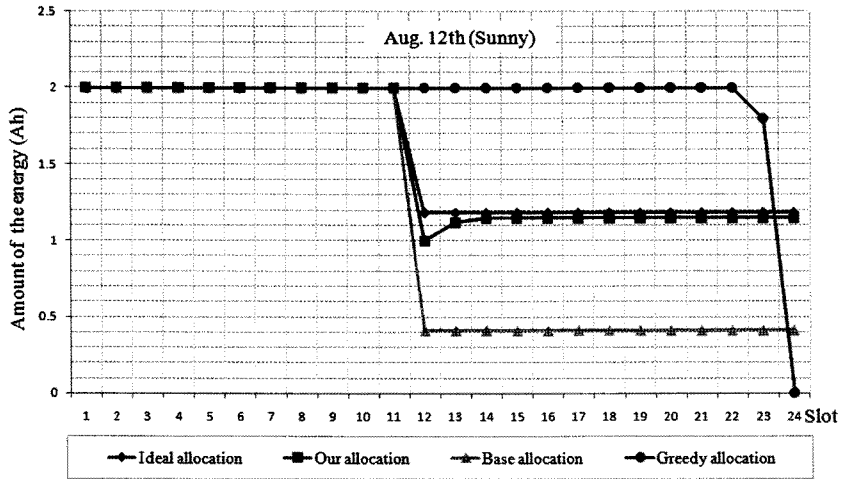


그림 10 여러 가지 기법에 의해 8월 12일(맑음) 노드 9에 할당된 에너지량

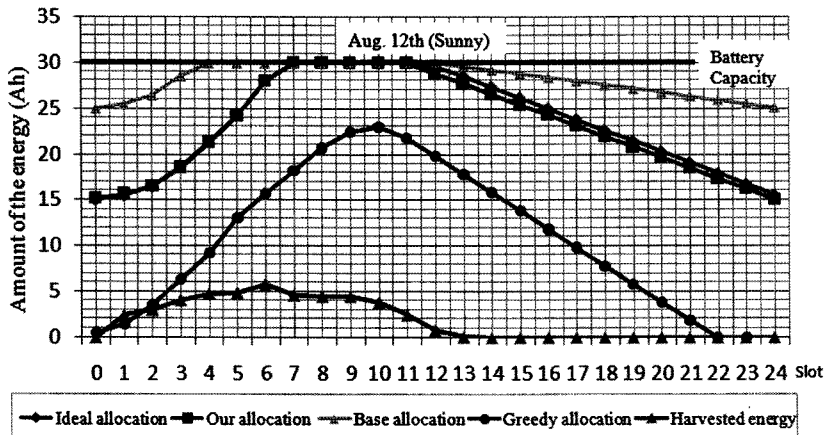


그림 11 여러 가지 에너지 할당 기법으로 인한 8월 12일(맑음) 노드 9의 배터리 잔량 추이

잉 에너지를 저장할 공간이 충분하지 않기 때문에, 배터리가 가득 차게 되기 전에(그림 11에서 배터리의 완전 충전 상태를 볼 수 있음) 가능한 한 많은 에너지를 각 슬롯에 할당함으로써 에너지의 낭비를 최소화하기 위함이다. 그리고 에너지의 수집이 더 이상 이루어 지지 않는 슬롯 12이후에는 ENO 컨디션을 유지하면서, 균형적으로 에너지를 분배하게 된다. 이 날은 맑은 날이므로, 기본 기법의 경우에는 수집 에너지 예측값(평균값)이 이날의 실제 수집값보다 적다. 따라서 그 만큼 적은 양의 에너지를 할당하게 된다. 그러나 우리의 기법은 그만큼의 오차가 고려된 에너지가 할당되므로 이상적인 에너지 할당 값에 근접하게 된다. 또한 그림 11에서처럼 그리디 기법은 기법의 특성 상 ENO 컨디션을 전혀 고려하지 않는다. 마찬가지로 기본 기법 또한, 예측 오차로 인한

여 ENO 컨디션을 만족시키지 못한다. 따라서 이 두 기법의 경우 수집주기의 시작에서 즉, 슬롯 0에서의 배터리 잔량이 초기 값 15Ah를 유지하지 못하고 예측 불허의 값이 되어, 시스템의 성능을 예측할 수 없다.

마지막으로, 본 에너지 할당 기법의 오버헤드를 측정하여 보았다. 앞서 4.1절에서 설명한 것처럼 우리의 기법은 매 수집 주기(하루)의 시작 지점에서 단 한번 런타임으로 수행된다. 우리의 센서 시스템(Asus EeePc)은 900 MHz CPU, 1GB DDR2의 계산 자원을 가지고 있는데, 실험 결과 식 (3)의 선형 프로그래밍 문제 해결(LP solver)을 포함하고 있는 우리의 에너지 할당 알고리즘의 계산 시간은 1초 이내로써, 단위 시간 슬롯의 길이인 1시간과 비교할 때 시간적인 오버헤드는 거의 무시할 수 있을 만한 수준이었다. 아울러 우리는 파워 미

터(power meter)를 사용하여 에너지 할당 알고리즘을 수행 할 때의 파워 소모와 기본 동작(센싱)만을 수행할 때의 파워 소모량을 측정하였는데, 그 차이는 평균 2Watt 미만이었다. 이러한 적은 파워 소모와 짧은 수행시간을 함께 고려할 때 우리 알고리즘 수행을 위한 에너지 오버헤드 역시 센서 노드의 성능에 거의 영향을 미치지 않을 정도라 할 수 있다.

6. 결론

태양 에너지는 주기적이고 끊임없이 공급될 수 있는 에너지라는 점에서 센서 노드에 아주 매력적인 에너지 원이지만, 공급되는 양이 계속해서 바뀌고, 또 그 양을 예측 할 수 없으므로, 이를 센서 노드에 적용하려면 고려할 점이 많이 있다. 본 논문에서 우리는 태양 에너지를 이용한 센서 네트워크에서의 적합한 태양 에너지 수집 모델을 제시했고, 또한 이 모델을 이용하여 수집된 에너지를 각 시간 슬롯에 최적으로 할당하는 실용적인 알고리즘을 구축했다. 이 알고리즘의 주요 이점은 주기적으로 수집되는 태양 에너지의 사용을 최대화하면서(에너지 낭비를 최소화), 시간에 따라 슬롯 별로 할당되는 에너지의 변화를 최소화하고 항상 배터리의 일정 수준 이상을 유지시킴으로써 매우 안정적인 시스템을 유지할 수 있다는 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Roundry S., Otis B., Chee Y. H., Rabaey J., Wright P.: A 1.9GHz RF transmit beacon using environmentally scavenged energy. In: ISLPED. (2003).
- [2] Minami, M., Morito, T., Morikawa, H., Aoyama, T.: Solar Biscuit: a batteryless wireless sensor network system for environmental monitoring applications. In: INSS. (2005).
- [3] Simjee, F., Chou, P.H.: Everlast: Longlife, super capacitor operated wireless sensor node. In: ISLPED. (2006).
- [4] Taneja, J., Jeong, J., Culler, D.: Design, modeling and capacity planning for micro-solar power sensor networks. In: IPSN. (2008).
- [5] Maleki, M., Dantu, K., Pedram, M.: Lifetime prediction routing in mobile ad hoc networks. In: WCNC. (2003).
- [6] Shah, R.C., Rabaey, J.M.: Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks. In: WCNC. (2002).
- [7] Younis, M., Youssef, M., Arisha, K.: Energy-aware routing in cluster-based sensor networks. In: MAS-COT. (2002).
- [8] Zhao, J., Govindan, R., Estrin, D.: Residual energy scans for monitoring wireless sensor networks. In: WCNC. (2002).

- [9] Mini, R.A.F., Nath, B., Loureiro, A.A.F.: A probabilistic approach to predict the energy consumption in wireless sensor networks. In: IV Workshop de Comunicacao sem Fio e Computao Mvel. Sas Paulo. (2002).
- [10] Kansal, A., Srivastava, M.B.: An environmental energy harvesting framework for sensor networks. In: ISLPED. (2003).
- [11] Voigt, T., Ritter, H., Schiller, J.: Utilizing solar power in wireless sensor networks. In: LCN. (2003).
- [12] Kansal, A., Hsu, J., Zahedi, S., Srivastava, M.B.: Power management in energy harvesting sensor networks. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 6(4), 1-38 (2007).
- [13] Vigorito, C.M., Ganesan, D., Barto, A.G.: Adaptive control of duty cycling in energy-harvesting wireless sensor networks. In: SECON. (2007).
- [14] Kumar, P., Varaiya, P.: Stochastic Systems: Estimation, Identification and Adaptive Control. Prentice-Hall, Inc. (1986).
- [15] Yang, Y., Wang, L., Noh, D.K., Le, H.K., Abdelzaher, T.: SolarStore: Enhancing data reliability in solar-powered storage-centric sensor networks. In: Mobi-Sys'09. (2009).
- [16] Noh, D.K., Wang, L., Yang, Y., Le, H.K., Abdelzaher, T.: Minimum Variance Energy Allocation for a Solar-Powered Sensor System. In: DCOSS'09. (2009).
- [17] X10: Smart Home Controller <http://www.x10.com/>.



노 동 준

2000년 서울대학교 컴퓨터공학과 학사
2002년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 석사
2007년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 박사
2007년 9월~현재 UIUC 컴퓨터과학과 박사후연구원. 관심분야는 Ad-hoc Network, Sensor Network, Mobile

Computing



윤 익 준

2006년 전북대학교 전자정보공학부 학사
2009년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 석사
박사 통합과정 수료. 현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 박사과정. 관심분야는 Sensor Network, Mobile Computing