

태양 에너지 수집형 무선 센서 네트워크의 연구 이슈

노동건
숭실대학교

요약

무선 센서 네트워크(WSN, Wireless Sensor Network)는 최근 주목 받고 있는 가상-물리 시스템 (CPS, Cyber-Physical System)의 입력을 담당하는 부분으로써 CPS를 구성하는 주요한 부분 중 하나이다. 본고에서는 기존의 배터리 기반 WSN의 짧은 수명 및 높은 유지관리 비용을 극복하기 위하여 최근 활발히 연구되고 있는 태양 에너지 기반 무선 센서 네트워크(SP-WSN, Solar-powered WSN)의 연구 동향과 이슈들을 살펴보고자 한다.

I. 서론

센싱 기술과 마이크로프로세서, 무선 송수신기의 비약적인 발전으로 인해, 최근 들어 성능 좋은 소형 스마트 센서 노드들이 등장하고 있다. 이러한 무선 스마트 센서들로 이루어진 센서 네트워크는 자율적으로 구성되고 동작하여, 궁극적으로 관

리자(사용자)가 필요로 하는 센싱 데이터를 지속적이고 안정적으로 제공하는 것을 목표로 한다. 이러한 센서 네트워크는 <그림 1>과 같이 구조물(다리, 도로, 댐, 빌딩 등)의 상태 기반 유지/관리[1] 또는 환경 및 생태계 모니터링[2]이나 국방 기술[3], U-Health [4] 등 광범위한 응용에 유용하게 사용될 수 있다. 최근 우리나라에서도 차세대 네트워크로써 센서 네트워크의 중요성을 인식하고 이에 대한 활발한 R&D를 수행하고 있다.

센서 네트워크는 수십~수천 개의 스마트 센서 노드들로 구성되는데(그림 2), 이러한 센서 노드들은 매우 제한된 (계산/저장/통신/에너지 등의) 자원을 기반으로 동작한다. 특히 배터리를 에너지원으로 하는 기존의 무선 센서 네트워크의 핵심은 얼마나 오랜 기간 동안 센서 노드 또는 네트워크가 정상적으로 동작할 수 있는가 하는 문제였다. 각 노드의 배터리를 수동으로 교환하거나 재충전하는 데는 한계가 있고, 또한 높은 비용 또한 문제가 될 수 있다. 아울러, 이러한 교환 또는 재충전이 불가능한 지역(전쟁 지역, 야생 등 위험 지역 등)에 무선 센서 네트워크가 구성될 수도 있다.

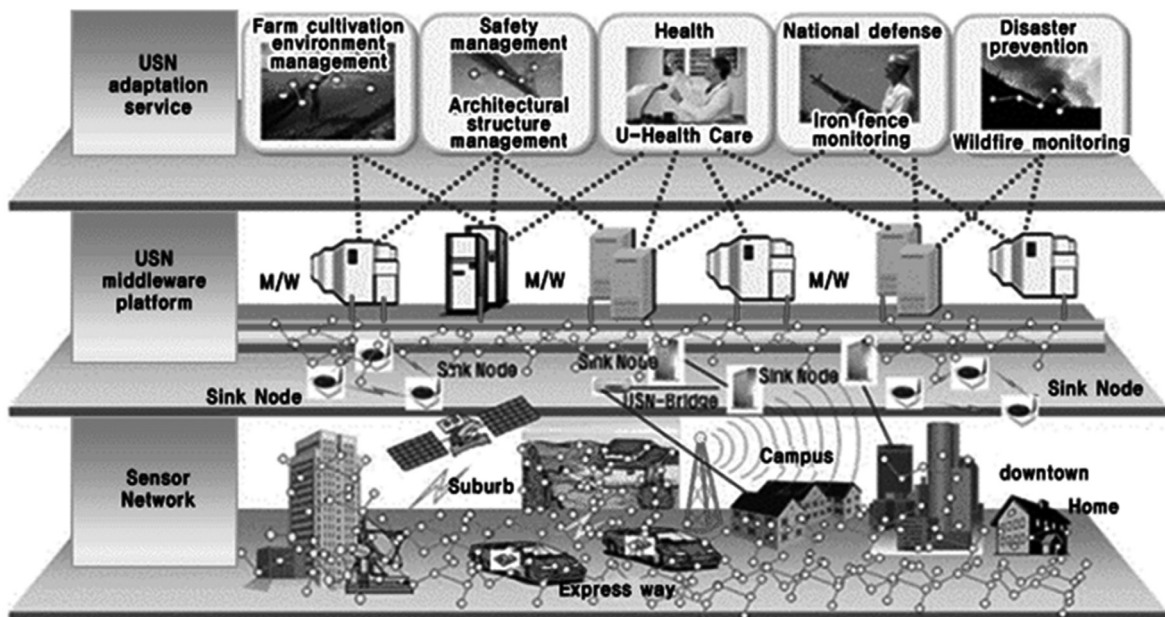


그림 1. 센서 네트워크의 활용 분야

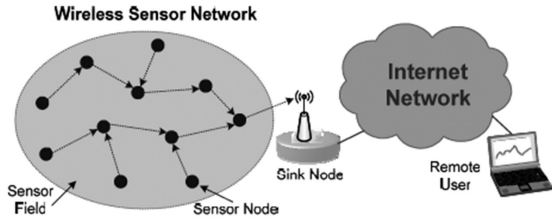


그림 2 무선 센서 네트워크의 일반적인 구조

따라서 배터리 기반 센서 네트워크가 보다 자율적으로 오랜 기간 동작하기 위해서는 제한된 에너지의 사용을 최소화하는 기술이 요구되어 진다. 이를 위하여 (즉, 배터리 기반 무선 임베디드 시스템의 짧은 수명을 극복하고자) 지금까지는 최소한의 에너지로 센서를 구동하고 네트워크를 구성할 수 있는 시스템 계층 또는 네트워크 계층(예를 들어, 라우팅 계층 또는 MAC 계층)의 에너지 적응적 동작에 대한 연구가 주를 이루고 있었다. 그러나 이러한 기법을 적용하더라도 배터리 기반의 에너지원 자체의 양적 제한으로 인해, 그 지속성과 안정성에는 한계가 있을 수밖에 없었다.

이러한 한계를 극복하고, 에너지의 측면에서 센서 노드/네트워크의 자율성과 영속성을 최대한 만족시키고자, 센서가 주변 에너지들을 자율적으로 수집하는 시스템이 최근 관심을 받고 있다. 최근에는 에너지 수집 장비의 비약적 발전으로 인해 태양, 진동, 바람, 압력, 온도 차 등의 환경 에너지가 무선 센서 노드의 에너지원으로 거론되고 있는데, 특히 태양 에너지는 충분한 파워 밀도와 예측 가능성 덕분에 센서 노드의 주요 에너지원으로 주목받고 있다.

표 1. 각종 주변 에너지들의 파워 밀도

Power Source	Power Density
Solar cells (outdoors at noon)	15mW/cm ³
Piezoelectric (shoe inserts)	330uW/cm ³
Vibration (microwave oven)	116uW/cm ³
Thermoelectric (10oC gradient)	40uW/cm ³
Acoustic noise (100dB)	960nW/cm ³

〈표 1〉 [5]은 몇 가지 에너지 수집 기술의 입방 센티미터 당 파워의 양(파워 밀도)을 보여주고, 〈표 2〉 [6]는 일반적인 센서 노드의 평균 에너지 요구량을 나타내고 있다. 일반적인 센서 네트워크 응용에서 센서 노드들의 듀티사이클(전체 시간 대비 노드가 실제로 동작하는 시간의 비율)이 0.1~0.2 인 것을 감안하면, (솔라 셀의 수율을 감안하더라도) 수집되는 태양에너지가 아주 고사양의 센서 노드를 제외한 일반적인 센서 노드의 파워 요구량을 거의 대부분 정도 만족시킬 수 있음을 알 수 있다. 실

제로, UCLA에서 개발한 Heliomote [7]의 경우 평균 에너지 수집량이 25mW로써 일반적인 센서 노드의 파워 요구량을 충분히 넘어 선다. 또한, 태양 에너지의 낮 시간대 에너지 집중이라는 특징은 재충전 가능 배터리(rechargeable battery) 또는 대용량 축전기(ultra capacitor)와 함께 사용함으로써 안정적이고 효율적으로 극복할 수 있다. 따라서 센서 네트워크의 에너지원으로서 태양 에너지의 사용은 연구 가치가 충분하다고 할 수 있는데, [8]의 연구에서는 센서 네트워크에서 배터리의 대안으로써 태양 에너지의 장점과 필요성이 자세히 설명되고 있다.

표 2. 일반적인 센서 장치들의 파워 소모량

Sensor	Producer	Sensing	Power Demand
STCN77	STM	Temp.	0,4 mW
QST108KT6	STM	Touch	7 mW
SG-LINK(1000 Ω)	MicroStrain	Strain	9 mW
SG-LINK(350 Ω)	MicroStrain	Strain	24 mW
iMEMS	ADI	Accelerometer	30 mW
2200/2600 Series	GEMS	Pressure	50 mW
T150	GEFRAN	Humidity	90 mW
LUC-M10	PEPPERL+FUCHS	Level Sensor	300 mW
CP18, VL18, GM60	VISOLUX	Proximity	350 mW
TDA0161	STM	Proximity	420mW
FCS-GL1/2A4-AP8X	TURCK	Flow Control	1250 mW

본고에서는 태양 에너지 기반 센서 네트워크의 주요 연구 이슈들을 주제별로 정리하고 있는데, 우선 ① 에너지 수집형 센서 노드의 설계 및 구현과 ② 수집 에너지에 따른 시스템 레벨의 적응, ③ 네트워크 레벨의 적응, 그리고 ④ QoS를 위한 수집 에너지의 사용에 대한 연구, 마지막으로 ⑤ 실제 응용 예에 대하여 설명하도록 한다. 이러한 연구는 궁극적으로 유비쿼터스 환경이 지향하는 영속적이고 효율적인 자율형 네트워크를 위한 기반 연구가 될 것으로 기대한다.

II. 본 론

1. 태양 에너지 수집형 센서 노드의 설계

태양 에너지와 배터리 에너지는 그 특성이 상이함으로, 태양 에너지 기반의 센서 노드에 기존의 배터리 기반 센서 노드에 사용되던 기술을 그대로 적용할 수는 없다. 예컨대, 각각의 전압-전류 특성이 다르고, 태양 에너지는 특정 시간에만 집중적으로 공급되기 때문에 이를 효율적으로 활용하는 에너지 시

시스템의 설계가 필요하다. 따라서 시간에 따라서 변하는 최적 전압점을 찾아 항상 최대 에너지양을 수집할 수 있도록 하는 MPPT(maximal power point tracker) 모듈과, 수집된 에너지를 임시로 저장하고 있을 대용량 축전지 및 시스템이 요구하는 적정 전압으로 바꿔줄 DC-DC 컨버터 등 새로이 추가되어야 할 장치들이 많고, 이들의 효율적 결합을 위해 시스템 설계 단계에서 많은 노력이 요구된다. [8]의 연구에서는 이러한 에너지 수집 시스템에서 필요한 모듈들을 <그림 3>과 같이 정의하고 있다.

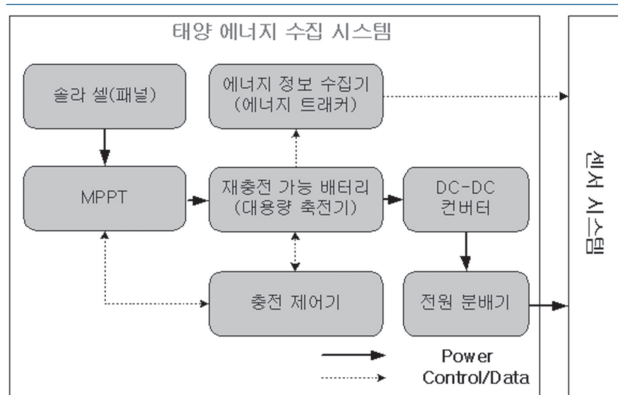


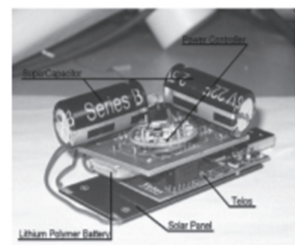
그림 3. 태양 에너지 수집 시스템의 간단한 블록도

그러면, 무선 센서 노드가 정상적으로 동작하는데 필요한 에너지를 공급해 줄 수 있는 적당한 솔라 셀/패널의 크기와 그렇게 수집된 에너지를 저장할 수 있는 재충전배터리 및 축전지의 적당한 크기는 어떻게 될 것인가? 셀의 크기와 저장 공간의 크기가 클수록 유리하지만, 비용과의 이율배반적(trade-off) 관계로 인하여 적당한 크기가 계산되어야 한다. 시스템이 활용할 수 있는 수집 에너지의 양을 최대화 하면서 비용을 최소화 할 수 있는 솔라 셀과 축전지의 최적 크기는 시스템이 요구하는 파워 요구량과 패널의 종류, 수집되는 에너지의 속도, 저장 공간의 종류 및 방전 사이클 등에 따라 달라지는데, [10]의 연구에서는 이를 수식으로 모델링하여 접근하고 있다.

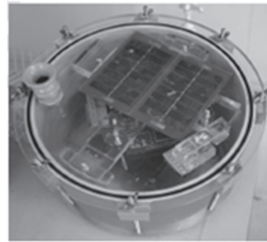
이미 다수의 태양 에너지 수집형 센서 시스템들이 구현되어 있는데, 그 중의 일부가 그림 4에서 보여 지고 있다. UCLA의 HelioMote[7], Berkely의 Prometheus[11], 동경대학의 SolarBiscuit[12] 등이 대표적인데, 최근에는 이탈리아의 Milano Politec 대학[13]과 한국의 ETRI[14]에서도 이를 구현한 바 있다. <표 3>은 HelioMote의 에너지 수집 모듈이 보여주는 주요 특성 값들을 나타내고 있는데, 결과적으로 평균 수집 속도가 25mW로 대부분의 센서 노드들의 에너지 소모 속도를 충족한다. Prometheus는 HelioMote를 기반으로 하지만, 에너지 수집 시스템을 재충전 배터리와 바로 연결하는 대신 고용량 축전지 (ultra capacitor)를 중간에 위치시킴으로써, 재충전



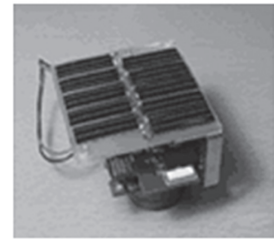
Heliomote @ UCLA



Prometheus @ Berkeley



@Milan Politec Univ.



Solar Biscuit @ Tokyo Univ.

그림 4. 태양에너지 기반 센서 시스템 구현 사례

배터리의 수명을 연장하는 효과를 가져왔다.

마지막으로, 이러한 태양에너지 기반 센서 시스템이 경제적으로 가치가 있는가에 대한 논의를 할 필요성이 있다. [15]의 연구에서는 이 문제에 대하여 논의를 하고 있는데, 연구에 의하면 태양 에너지 수집형 센서 노드의 단가는 배터리 기반에 비해서 높은 것은 사실이나, 솔라셀의 가격이 급격히 낮아지고 있고, 다른 환경 에너지와 비교할 때 현격한 경쟁력의 차이가 있으므로 앞으로의 사용량이 크게 증가할 것이고, 이로 인해 대량 생산이 용이해져, 가격의 하락속도가 더욱 가속화할 것으로 예상하고 있다.

표 3. Heliomote의 에너지 수집 특성

Parameter	Value
Noon time solar cell output current	60 mA
Solar cell output voltage range	2 V ~ 3 V
DC/DC converter output	3 V
NiMH battery capacity	1800 mAh
Average power	25 mW

2. 시스템 레벨 수집 에너지 적응

위와 같은 하드웨어적인 설계 외에도 태양 에너지의 효율적 활용을 위한 시스템 수준의 에너지 관리 기법도 필요하다. 태양 에너지의 충전이 하루 단위로 반복되므로, 에너지 관리 장치는 한 주기(하루) 동안의 수집 에너지를 센서 시스템이 효율적으로 사용할 수 있도록 해야 한다. [16]의 연구에 의하면 태양 에너지 기반 센서 노드에서 에너지를 최적으로 사용하기 위해서는 다

음과 같은 요구사항을 만족시켜야 한다.

- ① 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.
- ② 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.
- ③ 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.

초기의 에너지의 수집형 센서 네트워크 연구들의[17, 18] 주된 접근 방향은 수집된 에너지를 최대한 이용할 수 있도록 각 시간 주기마다 적당한 에너지를 할당하는 방법과 이 할당된 에너지를 라우팅에 이용하는 것이었다. 예를 들어 각 시간 주기에 수집된 에너지양이 예상 보다 많으면 많은 만큼의 에너지를 효율적인 데이터 전달 경로를 찾는데 사용하는 것이다. 이는 수집 에너지를 고려하지 않는 기법보다는 더 좋은 성능과 긴 수명을 달성할 수 있었지만, 단순히 수집된 에너지를 효율적으로 이용하기 위한 휴리스틱 기법이 대부분이어서, 그것들이 수집 에너지를 최대한 사용할 수 있다는 것을 보여주지는 못했다.

좀 더 최근에, 몇몇 연구자들은 수집된 에너지에 적응적으로 듀티사이클(duty cycle)을 조절함으로써 노드의 성능을 유지하는 기법을 제시했다. [7]의 연구에서는 듀티사이클을 조절하기 위한 에너지 수집과 소모에 관한 이론을 처음으로 제시했다. 이 이론의 기본 아이디어는 에너지 중립적 동작을 만족시키는 최대의 듀티사이클을 하루 단위로 미리 결정하는 것인데, 이것을 계산하기 위해서는 앞으로 수집될 에너지양의 예측과 이 예측 오차를 보정하는 작업이 필요하게 된다. 따라서 이 연구에서는 한 주기를 같은 길이의 여러 구간들로 나누고, 과거의 프로파일링 기록에 의해 한 구간 동안 수집될 것으로 기대되는 에너지양을 예상한다. 각각의 시간 주기마다 듀티사이클이 결정되는데, 초기의 듀티사이클은 각각의 구간동안 수집될 것으로 예상되는 에너지의 평균에 의해 결정되고, 추후 실제 에너지와 제안된 모

델에 의해 예상된 에너지의 차이를 기반으로 재조정된다.

이와 비슷하게, [19]의 연구에서는 산업공학에 적용되는 적응적 제어 이론[20]에 기반 한 듀티사이클을 조절 알고리즘을 제안했다. 이 연구의 주요한 공헌은 이 문제를 해결하기 위해서 비모델(model-free) 접근 방법을 적용함으로써 태양 에너지 뿐 아니라, 다른 환경 에너지에도 적용할 수 있는 기법을 제시했다는 것이다.

앞서 살펴본바와 같이, [19]의 연구에서는 변화하는 에너지 공급에 적응적으로 노드의 듀티사이클을 계속해서 변화시킨다. 그러나 이러한 듀티사이클의 변화는 센서 노드의 안정적인 동작을 방해할 수 있다. 따라서 응용에 따라서 각 시간 주기의 듀티사이클을 일정한 수준으로 유지하는 것이 필요할 수도 있다. [21]의 연구에서는 태양 에너지 기반 센서 시스템에서 사용 가능한 에너지를 최대한 이용함과 동시에 각 시간 주기마다 일정 수준의 에너지를 안정적으로 제공하기 위한 기법을 제안하고 있다. 이를 위해서는 각 노드가 자신이 수집할 수 있는 에너지의 양을 예측하고 이를 효율적으로 할당하는 기법이 필요하다. 따라서 이 연구[21]에서는 시간 슬롯 단위의 수집 가능 에너지양에 대한 기댓값 모델을 기반으로, 각 시간 슬롯에 할당되는 에너지의 변화를 최소화함과 동시에, 주기적으로 수집되는 태양 에너지를 최대한 활용하기 위한 에너지 할당 문제를 최적화 문제로 모델화하여 선형 프로그래밍 기법을 사용하여 풀어내고 있다. 결과적으로, 시간에 따라 슬롯 별로 할당되는 에너지양의 변화를 최소화하면서 에너지 잔존량을 항상 일정 수준 이상으로 유지함으로써 안정적인 시스템을 유지할 수 있다.

마지막으로 [22]의 연구에서는 노드의 동작을 센싱/데이터처리/데이터전송/수면으로 나누고, 수집되는 에너지의 양에 따라 노드의 동작을 결정하는 기법을 사용하였다. 요컨대, <그림 5>

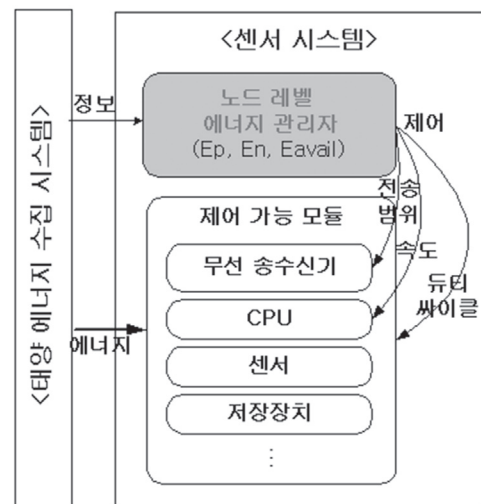


그림 5. 시스템 수준 에너지 관리 기법

와 같이 에너지 수집 시스템에서 보내오는 에너지 정보를 바탕으로 각각의 하드웨어 모듈의 동작을 결정하도록 한다.

3. 네트워크 레벨 수집 에너지 적응

기존의 배터리 기반 센서 네트워크를 위해 제안된 네트워크 프로토콜들의 가장 큰 목표는 네트워크 존속 시간을 늘리는 것이었다. 가격적 제약으로 인해 기존의 배터리 기반 센서 네트워크에 소수의 에너지 수집형 노드를 추가하여 하이브리드 형식으로 구성된 네트워크를 구성해야 했던, 에너지 수집형 WSN의 초창기의 연구들에서는 기존에 사용되던 배터리 기반 센서 네트워크들의 라우팅 프로토콜을 확장하여 사용할 수밖에 없었다. 이는 하이브리드 네트워크 역시 배터리로 인한 네트워크 존속시간에 한계가 있기 때문에, 이를 최대화할 수 있는 라우팅 프로토콜을 사용해야 했기 때문이다. [18, 23]의 연구에서는 LEACH [24]와 Directed Diffusion [25]과 같은 배터리 기반 WSN의 대표적인 라우팅 프로토콜을 확장하였는데, 에너지 수집형 노드와 배터리 기반 노드들이 릴레이하는 부하의 비율을 조절하여 네트워크의 존속시간을 늘릴 수 있는 방향으로 수정되었다.

그러나 순수하게 에너지 수집형 센서들로 이루어진 센서 네트워크에서는 네트워크의 존속시간을 늘리는 것이 더 이상 목표가 될 수 없으므로, 네트워크가 수용하고 있는 부하(Workload)의 양을 최대화하는데 목표를 둔 라우팅 프로토콜들[26, 27]이 제안되었다. 즉, 수집되는 에너지를 네트워크의 처리량(throughput)의 최대화를 위해 사용하게 된다.

최근에는 상대적으로 수집 에너지가 많은 노드와 그렇지 못한 노드들 사이의 구분을 두어, 에너지가 풍부한 노드들끼리 백본 네트워크(그림 6)를 구성하는 토폴로지 제어 기법[28]도 연구되었다. 이 기법에서는 데이터의 전달을 제외한 센서 노드의 다른 기능들에 영향을 주지 않는 에너지의 양의 문턱값(threshold)을 계산하고, 그 문턱값보다 많은 에너지가 존재하는 노드들은 백본 네트워크를 이루는 노드로 지정하도록 하였

다. 그리고 이렇게 구성된 백본 네트워크가 데이터 전송의 대부분을 담당하도록 하였다. 물론 노드의 에너지가 계속해서 변화하기 때문에 일정 주기를 두어 백본 네트워크를 재구성한다. 에너지가 상대적으로 부족한 노드들은 데이터를 센싱한 후 가장 가까운 백본 노드로 보내거나, 주변에 백본 노드가 없을 경우에는 지리적으로 싱크 노드에 가장 가까운 이웃 노드에게 전달하는 에너지 절약 라우팅 작업을 반복하여, 결과적으로 백본 네트워크로의 데이터 전달이 이루어지게 된다. 백본 노드들이 데이터 전송의 대부분을 담당하므로 에너지 소비속도가 빨라지게 되는데, 이는 다음 주기의 백본 노드 결정에 반영되어, 에너지가 충분치 않으면 백본 네트워크에 참여하지 못하게 된다.

[29]의 연구에서도 수집에너지 적응적인 토폴로지 제어 기법이 제안되었는데, 이 기법에서 각 노드는 수집 에너지양에 따라 무선 트랜시버의 거리를 결정하게 된다. 무선 트랜시버의 거리에 따라 이웃 노드의 범위가 결정되는데, 이 이웃 노드들의 범위는 라우팅 시에 데이터가 전달될 다음 노드의 결정에 큰 영향을 미치게 된다. 예를 들어 이웃 노드의 범위가 커지면, 데이터를 전달할 후보가 많아지게 되고, 많은 후보들 중에 데이터의 종류에 따라 가장 적합한 노드를 선택할 수 있기 때문이다. 만약, 긴급 데이터나 제어 데이터로써 네트워크 존속시간을 손해 보더라도 빠른 전달을 해야 하는 데이터라면, 이웃 노드들 중 가장 싱크에 가까운 노드를 선택하여 데이터를 전송하도록 한다.

4. QoS 향상을 위한 수집 에너지의 사용

최근 들어, 태양 에너지 기반 센서 네트워크에서 데이터의 QoS의 향상을 다루는 연구들이 시작되고 있다. 예를 들어, [28, 30]과 같은 연구에서는 태양 에너지 기반 센서 네트워크의 서비스 품질(QoS)로써 데이터의 지연시간을 다루고 있는데, 이웃 노드의 듀티사이클(duty cycle)과 수집된 태양 에너지의 양, 지리적 위치 등을 고려한 최저 지연시간 데이터 전달 기법을 제안하고 있다.

아울러 최근의 연구[31]에서는 태양 에너지 수집 모델과 센서의 에너지 소비량 프로파일링을 통하여 센서의 기본 동작을 보장하는 에너지 문턱값을 계산하였는데, 이 값을 기반으로 문턱 값 이상의 에너지양이 존재하면 그 만큼의 여분의 에너지를 활용하여 데이터의 안정성(reliability)을 향상시키는데 사용하였다. 센서 네트워크에서는 센서 노드들의 예기치 않은 고장이 많고 유지관리가 어려움으로 데이터의 안정성, 즉 센싱된 데이터가 손상되지 않고 온전히 싱크 노드로 전달되어 오는 것이 중요하다. 따라서 이러한 확률을 높이는 것이 전체적인 센서 네트워크의 성능을 향상 시키는데 중요하게 작용하는데, 이런 의미에서 가치가 있

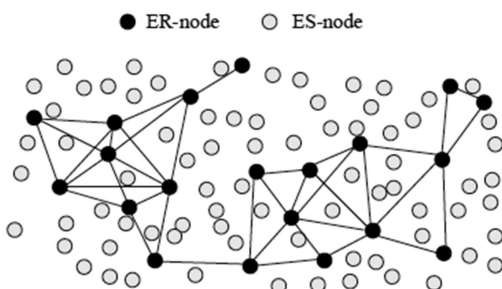


그림 6. 에너지가 풍부한 노드(ER-node)들로 이루어진 백본 네트워크

는 연구라 할 수 있다. 기본적으로 데이터의 안정성을 높이는 것과 리소스(에너지/저장장치) 절약과는 이율배반적(trade-off) 관계가 있다. 따라서 배터리 기반 센서 노드에서는 안정성을 높인다는 것은 곧 네트워크의 생존 시간을 줄이는 것을 의미하였다. 그러나 에너지 수집형 센서 네트워크에서는 주기적으로 수집되는 태양 에너지를 효율적으로 사용하여 네트워크의 동작에 영향을 최소화하면서 안정성을 높일 수 있는 방법이 가능하고, 이 연구[31]에서는 이러한 기법들을 제안하고 있다.

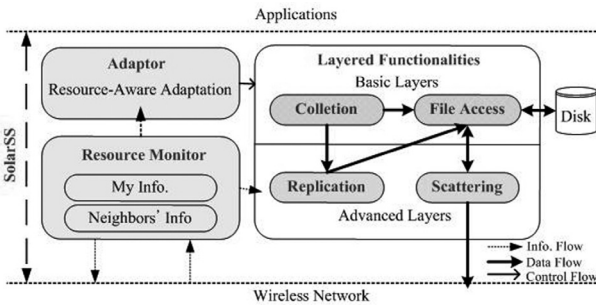


그림 7. 데이터의 안정성을 높이기 위한 수집 에너지 적응적인 파일 시스템 구조

비슷한 방법으로, 태양 에너지 수집형 센서 네트워크에서 안정성을 높이기 위한 수집 에너지 적응적인 파일 시스템[32]도 연구 되었다. 이 연구에서는 수집 에너지의 양에 따라 적응적으로 활성화되는 파일 서비스들이 결정되는데, 그림 7에서 보듯이 에너지가 충분할수록 데이터 안정성과 관계된 계층(Replication 계층, Scattering 계층)이 활성화된다. 제안된 파일 시스템은 두 개의 제어 모듈, 즉 적응 모듈(adaptor)과 자원 모니터 모듈(resource monitor), 그리고 이 제어 모듈에 따라서 활성화되는 계층적 서비스 모음(layered functionalities)으로 구성되어 있는데, 이 기능들을 계층화 구조로 되어 있어서 서로 독립적으로 동작할 수 있다.

이 외에도 기본 센서 노드의 동작들에 사용하고 남은 여분의 에너지를 나중을 위해 저장하지 않고, 다양한 QoS 에 활용하는 다양한 연구들이 진행되고 있는데, 네트워크의 고장 감내(fault tolerance)와 데이터의 보안(Security)에 여분의 수집 에너지를 활용하는 연구도 그 중 하나이다.

5. 태양 에너지 기반 WSN 응용 사례

[13]의 연구에서는 해양 수질 환경 모니터링용 태양 에너지 기반 WSN을 소개하고 있다. 태양 에너지 수집형 센서 노드의 설계부터 모니터링 응용 프로그램 구현, 실제 해양에 배치, 그리고 중앙 제어 센터의 수집 데이터 분석 도구까지 모두 구현을

마쳤고, 현재에도 동작하고 있다. 아래 <그림 8>은 구현된 센서 노드의 모습을 보여주고 있고, <그림 9>는 실제 배치된 모습과 토폴로지를 보여주고 있다. 센서들은 자신이 센싱한 정보를 게이트웨이 노드로 보내고, 이 게이트웨이 노드는 데이터를 모으고 압축하여 중앙 제어 센터까지 장거리 통신 안테나를 사용하여 보내게 된다. 특히 이러한 해양 응용을 위한 WSN에 태양 에너지 수집형 센서 네트워크가 매우 유용하게 사용될 수 있는데, 이는 해양의 특성상 배터리의 수동 교체 등의 유지관리가 매우 어렵고, 태양 에너지의 수집이 용이하다는 특징 때문이다. 이 사례에서 도출 수 있듯이, 실제로 노드의 고장이 없다면, 반영구적으로 센서 네트워크가 동작할 수 있다.

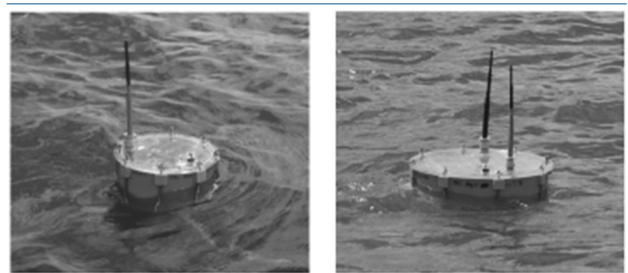


그림 8. 센서 노드의 외형 (일반노드와 게이트웨이노드)

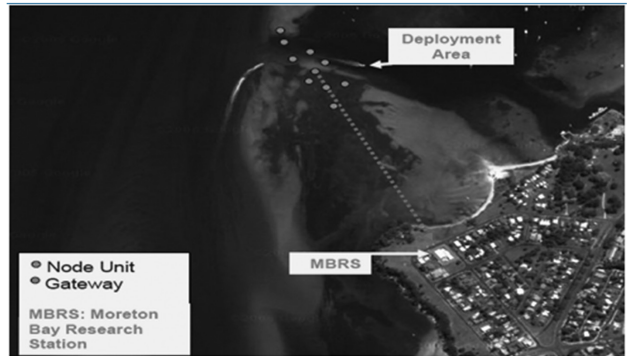


그림 9. 실제 해양에 노드가 배치된 모습

[31]의 연구에서는 또 다른 종류의 태양 에너지 수집형 WSN을 소개하고 있다. 새의 생태 관찰을 위한 음향 및 영상 모니터링을 위한 센서 네트워크인데, 응용 프로그램의 오버헤드로 인하여, 리눅스 기반의 저사양(low-end) 랩탑이 센서 노드로 사용되었고, 이 랩탑을 구동시키기 위하여 다소 큰 사이즈의 솔라 패널이 사용되었다. <그림 10>과 <그림 11>은 센서 노드의 외관과 네트워크 토폴로지를 보여준다. 또한 이 연구에서는 태양 에너지 수집형 WSN의 실내 테스트베드도 구축하였다. 옥외 실험은 같은 실험 환경이 반복되지 못하므로, 여러 가지 기법들의 공정한 비교에는 적합하지 못하다. 예를 들어, 태양 에너지는 날씨와 계절, 대기의 조건 등에 따라 달라지는데, 옥외 실험에서는 같은 환경 조건이 다시 나타날 확률이 매우 낮다. 이를 보

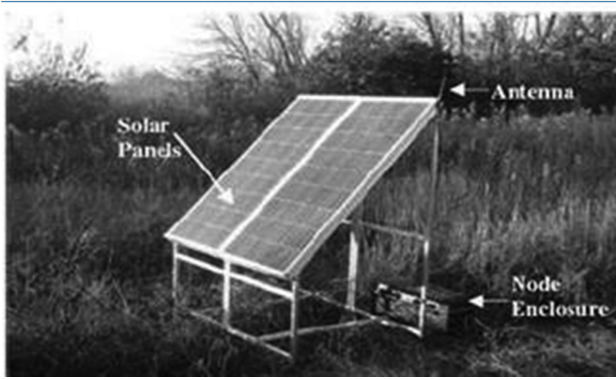


그림 10. 랩탑 기반 센서 노드의 외형

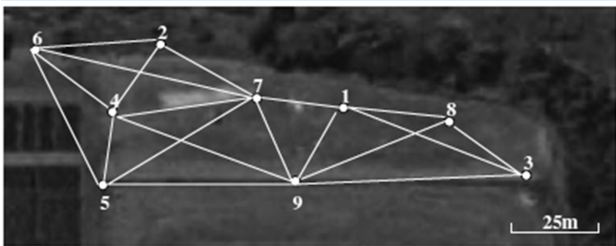


그림 11. 실제 숲에 노드가 배치된 모습

완하기 위해 이 연구에서는 에너지 수집 시스템을 제외하고 옥외 테스트베드와 똑같은 하드웨어와 소프트웨어를 가지고 실내(indoor) 테스트베드를 구축하였고, 에너지 수집 시스템은 태양 에너지 수집 애플레이터를 포함하여 소프트웨어로 구현하였다.

태양 에너지 수집을 의료용 WSN에 적용한 연구[33]도 있다. 이 연구에서는 환자의 상태를 체크하는 센서가 전송하는 데이터들을 태양 에너지 수집 라우터들이 받아서 중앙 컴퓨터로 전송하는 계층형 구조로 이루어져있다. 실내의 센서 네트워크 라우터에 태양 에너지 수집 기법을 적용하는 또 다른 응용[34]도 있는데, 라우터는 다른 노드들과는 달리 오랜 기간의 안정된 동작을 요하므로 배터리 기반 시스템으로는 한계가 있다. 따라서 AC 전원이 불가능 한 곳은 배터리와 주변 에너지를 수집하여 안정적으로 에너지를 공급하는 것이 중요한데, 솔라 셀은 실내의 조명 등으로 에너지를 수집이 가능하므로, 태양 에너지 수집형 라우터는 좋은 응용이 될 수 있다. 이 외에도 동작 감시 시스템에 태양 에너지 기반 Zigbee 센서를 적용한 응용 사례[35]도 있다.

III. 결론

태양 에너지는 충분한 파워 밀도를 가지고 주기적으로 공급된다는 점에서 센서 노드에 아주 매력적인 에너지원이다. 하지만

공급되는 에너지의 양이 계속해서 바뀌고, 또 그 양을 정확히 예측할 수 없으므로, 이를 센서 노드에 효율적으로 적용하려면 고려해야 할 점이 많이 있다. 이를 고찰하고자 본고에서는 태양 에너지를 이용한 무선 센서 네트워크 분야의 다양한 연구 주제들을 소개하였다. 요컨대, 태양 에너지를 활용한 센서 네트워크는 기존의 배터리 기반의 그것을 보완할 수 있는 충분한 성능을 보일 수 있을 뿐 아니라, 지구의 환경 문제가 화두가 되고 있는 요즘, 그린 컴퓨팅의 한 종류로서도 의미가 있는 매우 흥미 있는 연구 주제라 할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] M. Kohler, P. Davis, I. Stubailo, and J. Wallace, "SEI1: Sensor Networks for Real Time Monitoring State of Health of Buildings," Tech. Report in Center for Embedded Network Sensing, 2005.
- [2] A. Mainwaring, D. Culler, J. Polastre, R. Szewczyk, and J. Anderson, "Wireless sensor networks for habitat monitoring," In WSN'02, Atlanta, Georgia, USA, 2002.
- [3] F. Ye, H. Luo, J. Cheng, S. Lu, and L. Zhang, "A Two-Tier Data Dissemination Model for Large-scale Wireless Sensor Networks," In MobiCom'02, Atlanta, Georgia, USA, 2002.
- [4] L. Schwiebert, S. K. Gupta, and J. Weinmann, "Research Challenges in Wireless Networks of Biomedical Sensors," In MobiCom, Rome, Italy, 2001.
- [5] I. Stojmenovic. Handbook of Sensor Networks. Wiley-Interscience, 2005.
- [6] C. Alippi, G. Anastasi, M. D. Francesco, and M. Roveri, "Energy Management in Wireless Sensor Networks with Energy-hungry Sensors," IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 12(2):16-23, 2009.
- [7] A. Kansal, J. Hsu, S. Zahedi, and M. B. Srivastava, "Power management in energy harvesting sensor networks," ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 6(4), 2007.
- [8] X. Jiang, J. Polastre, and D. Culler, "Perpetual environmentally powered sensor networks," In IPSN'05, Los Angeles, California, USA, 2009.

- [9] 노동건, 윤익준, “태양 에너지 기반 센서 시스템에서 데이터의 안정성을 향상시키기 위한 적응형 저장 시스템,” 정보과학회논문지, 시스템 및 이론 36(5):360–370, 2009.
- [10] “Sizing Solar Energy Harvesters for Wireless Sensor Networks,” Tech. Report in RFM, 2010. (<http://www.rfm.com/products/apnotes/anm1002.pdf>)
- [11] J. Jeong, X. F. Jiang and D. E. Cullern, “Design and analysis of micro-solar power systems for wireless sensor networks,” Tech. Report in EECS Dept. of UC, Berkeley, 2007.
- [12] M. Minami, T. Morito, H. Morikawa, and T. Aoyama, “Solar Biscuit: A Battery-less Wireless Sensor Network System for Environmental Monitoring Applications,” In INSS’05, San Diego, California, USA.
- [13] C. Alippi, R. Camplani, C. Galperti, and M. Roveri, “A Robust, Adaptive, Solar-Powered WSN Framework for Aquatic Environmental Monitoring,” Sensors, 11(1):45–55, 2011.
- [14] 배명남, 최병철, 이명복, 이인환 “태양 에너지를 이용한 자가충전 무선 센서노드의 개발,” 정보과학회논문지, 컴퓨팅의 실제 및 레터 18(1):12–18, 2012.
- [15] R. Nallusamy, and K. Duraiswamy, “Solar Powered Wireless sensor networks for Environmental Applications with Energy Efficient Routing Concepts: Review,” Information Technology Journal, 10:1–10, 2011.
- [16] 노동건, 윤익준, “태양 에너지 기반 센서 시스템을 위한 효율적인 에너지 관리 기법,” 정보과학회논문지, 컴퓨팅의 실제 및 레터 15(7):478–488, 2009.
- [17] A. Kansal, and M. B. Srivastava, “An environmental energy harvesting framework for sensor networks,” In ISLPED’03, Seoul, Korea, 2003.
- [18] T. Voigt, H. Ritter, and J. Schiller, “Utilizing solar power in wireless sensor networks,” In LCN’03, Bonn/Königswinter, Germany, 2003.
- [19] C. M. Vigorito, D. Ganesan, and A. G. Barto, “Adaptive Control of Duty-Cycling in Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks,” In SECON’07, San diego, California, USA, 2007.
- [20] P.R. Kumar, and P. Varaiya. Stochastic Systems: Estimation, Identification, and Adaptive Control. Prentice Hall, 1986.
- [21] D. K. Noh, L. Wang, Y. Yang, H. K. Le, and T. Abdelzaher, “Minimum Variance Energy Allocation for a Solar-Powered Sensor System,” LNCS, 5:44–57, 2009.
- [22] T. V. Prabhakar, S. Devasenapathy, and H.S.Jamadagni, “Smart Applications for Energy Harvested WSNs,” In COMSNETS’10, Bangalore, India, 2010.
- [23] T. Voigt, A. Dunkels, and J. Alonso, “Solar-aware Clustering in Wireless Sensor Networks,” In ISCC’04, Alexandria, Egypt, 2004.
- [24] W. Heinzelman, “Application-specific Protocol Architectures for Wireless Sensor Network,” vol. Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA, June 2000.
- [25] C. Intanagonwivat, R. Govindan, and D. Estrin, “Directed Diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks,” In MOBICOM’00, Boston, Massachusetts, USA, 2000.
- [26] E. Lattanzi, E. Regini, A. Acquaviva, and A. Bogliolo, “Energetic sustainability of routing algorithms for energy-harvesting wireless sensor networks,” Computer Communications, 30(14–15):2976–2986, 2007.
- [27] D. K. Noh, T. F. Abdelzaher, “Efficient flow-control algorithm cooperating with energy allocation scheme for solar-powered WSNs,” Wireless Communications and Mobile Computing, 12(5):379–392, 2012.
- [28] D. Noh, D. Lee, and H. Shin, “Qos-aware geographic routing for solar-powered wireless sensor networks,” IEICE Transactions, E90–B(12): 3373–3382, 2007.
- [29] D. K. Noh, and J. Hur, “Using a dynamic backbone for efficient data delivery in solar-powered WSNs,” Journal of Network and Computer Applications, 35(4):1277–1284, 2012.
- [30] D. Noh, I. Yoon, and H. Shin, “Low-latency geographic routing for asynchronous energy-harvesting WSNs,” Journal of Netwo가, 3(1):78–85, 2008.
- [31] Y. Yang, L. Wang, D. K. Noh, H. K. Le, and T. Abdelzaher, “SolarStore: Enhancing data reliability

- in solar-powered storage-centric sensor networks," In MobiSys'09, Krakow, Poland, 2009.
- [32] L. Wang, Y. Yang, D. K. Noh, H. K. Le, J. Liu, T. F. Abdelzaher, and M. Ward, "AdaptSens: An Adaptive Data Collection and Storage Service for Solar-Powered Sensor Networks," In RTSS'09, Washington, DC, USA, 2009.
- [33] A. Hande, T. Polk, W. Walker, and D. Bhatia, "Self-Powered Wireless Sensor Networks for Remote Patient Monitoring in Hospitals," Sensors, 6(9):1102-1117, 2006.
- [34] A. Hande, T. Polk, W. Walker, and D. Bhatia, "Indoor solar energy harvesting for sensor network router nodes," Microprocessors & Microsystems, 31(6):420-432, 2007.
- [35] A. A. Alexander, R. Taylor, V. Vairavanathan, Y. Fu, E. Hossain, and S. Noghianian, "Solar-powered ZigBee-based wireless motion surveillance: a prototype development and experimental results," Wireless Communications & Mobile Computing, 8(10):1255-1276, 2008.

약 력



노 동 건

2000년 서울대학교 공학사
2002년 서울대학교 공학석사
2007년 서울대학교 공학박사
2007년~2010년 UIUC 박사후연구원
2012년~현재 송실대학교 정보통신전자공학부
조교수
관심분야: 임베디드 시스템, 에너지 관리,
저전력 기법, 센서 네트워크