

트리 구조 무선 센서 네트워크에서의 데이터 재사용 기반의 전력 절감 기법

준회원 이상현, 종신회원 유명식*^o

Power Saving Algorithm based on Data Reuse in Tree Structured Wireless Sensor Networks

Sanghyun Lee Associate Member, Myungsik Yoo*^o Lifelong Member

요 약

무선 센서 네트워크는 센서 노드 크기의 제약으로 인해 제한된 배터리 용량을 갖는다. 따라서 장시간 동안 네트워크를 유지하기 위해 배터리를 효율적으로 관리해야 하며, 이를 위한 전력 절감 기법이 매우 중요한 기술로 부각되고 있다. 이러한 무선 센서 네트워크의 전력 절감 기법으로 데이터 재사용 기법이 매우 활발히 연구되고 있으며, 본 논문에서는 기존 클러스터 기반의 데이터 재사용 기법의 문제점을 제시하고, 이를 해결하기 위한 트리 구조 기반의 데이터 재사용 기법을 제안한다. 제안된 기법은 무선 센서 네트워크에서의 제한된 배터리를 효율적으로 사용하기 위해 데이터를 최적화된 중계 노드에 임시 저장하고 해당 데이터를 유효시간 내에서 재사용하는 전력 절감 기법으로써 전체 센서 네트워크의 전력 소모를 최소화하고 센서 노드 간에 균등한 전력 소모가 가능하게 한다. 이를 위해 센서 노드의 잔여 배터리 상황에 따른 최적의 임시 저장 노드를 결정하는 방식을 제안하였으며, 이에 대한 수학적 분석 및 시뮬레이션을 통해 무선 센서 네트워크의 전력 절감 효과를 확인하였다.

Key Words : Wireless Sensor Network, Power Saving, Data Reuse

ABSTRACT

Due to limited size and limited battery lifetime of sensor node, one has to address the power saving issue in wireless sensor network. The existing power saving algorithm based on data reuse was proposed for the cluster structured wireless sensor network. We state the problem of existing power saving algorithm and propose new power saving algorithm for tree structured wireless sensor network. The proposed algorithm reduces power consumption by buffering the sensed data at the selected relay node for its data lifetime. The optimum buffering node is selected so that the power saving gain is maximized and at the same time, power consumption among sensor nodes are equally distributed in the network. With computer simulations, it is shown that the proposed algorithm outperforms the conventional algorithm in terms of power saving gain.

I. 서 론

미래의 주요 기술로 주목받고 있는 무선 센서 네트워크는 최근 일상생활에 산재한 사물과 물리적

대상이 점차 정보의 대상으로 확대됨에 따라 인간과 컴퓨터 및 사물들이 유기적으로 연계되어 다양하고 편리한 새로운 서비스를 제공해주는 유비쿼터스 컴퓨팅(Ubiquitous Computing)의 핵심 인프라가

* 본 연구는 서울시 산학연 협력 사업 (과제 번호 : 10544)의 지원 연구 결과임.

* 송실대학교 정보통신공학부 통신망설계 및 분석연구실 (myoo@ssu.ac.kr) (°:교신저자)

논문번호: #KICS2008-12-554 접수일자: 2008년 12월 15일, 최종논문접수일자: 2009년 7월 1일

될 것으로 예상되고 있다¹¹⁾.

무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network)는 빛, 소리, 온도, 움직임과 같은 다양한 물리적 데이터를 센서 노드에서 측정하거나 감지하여 사용자에게 전달하는 네트워크를 의미한다. 이처럼 다양한 물리적 데이터를 넓은 공간에서 센싱(Sensing)할 수 있는 무선 센서 네트워크는 환경 감시나 목표물 추적, 고속도로 교통 정보 관리, 건물 감시 등의 기존 응용 서비스뿐만 아니라 위치인지 서비스, 의료 시스템, 로봇 시스템 등과 같이 새롭게 나타나고 있는 지능형 응용 서비스들에 활발히 적용되고 있다¹²⁾¹³⁾.

일반적인 무선 센서 네트워크는 그림 1과 같이 센싱을 수행하는 센서 노드(Sensor Node), 센싱된 데이터를 전달받아 인터넷과 같은 공중망(Public Network)을 통해 사용자에게 전송하는 싱크 노드(Sink Node)로 구성된다¹⁴⁾.

이러한 무선 센서 네트워크가 다양한 응용 분야에 실제 적용되기 위해서는 하드웨어의 특성상 초소형, 저가격, 저전력의 요구사항을 만족시킬 수 있어야 한다. 그 중 저전력 및 전력 절감 기술은 제한적인 배터리로 동작하는 센서 노드를 고려할 때 매우 중요한 기술이라 할 수 있다¹⁵⁾. 더욱이 센서 네트워크 포설 후 배터리의 교체가 용이하지 않은 점을 고려한다면 센서 노드의 전력 절감 기술이 반드시 요구된다.

이처럼 전력 절감 문제를 해결하기 위해 기존 무선 센서 네트워크에서는 클러스터 기반의 데이터 재사용 기법이 제안되었다. 그러나 클러스터 기반의 데이터 재사용 기법은 클러스터 헤드의 선정 및 유지가 어려우며, 클러스터 헤드에 전력 소모가 집중되어 균등한 전력 소모가 불가능하다는 문제를 갖는다.

따라서 본 논문에서는 트리 구조를 기반으로 센싱된 데이터를 싱크 노드로 전송하는 과정에서 경로상의 중계 노드에 데이터를 임시로 저장하고 유

효시간 내에 데이터를 재사용하는 전력 절감 기법을 제안한다. 이러한 전력 절감 기법은 센서 노드의 전력 소모를 감소시키고 트리 구조 무선 센서 네트워크 전체의 균등한 전력 소모를 가능하게 하여 네트워크의 수명을 증대시킨다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 기존에 제안된 무선 센서 네트워크의 전력 절감을 위한 기법들을 분석한다. III장에서는 본 논문에서 제안하는 전력 절감 기법을 설명하고, IV장에서 제안한 기법에 대한 모의실험 결과를 통하여 성능을 분석한다. 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

현재 무선 센서 네트워크를 위한 많은 전력 절감 기법이 제안되어 있으며, 특히 네트워크 계층과 MAC(Medium Access Control) 계층에서 다양한 전력 절감 기법이 활발히 연구되고 있다.

먼저, 네트워크 계층에서는 전력 소모를 최소화할 수 있는 최적의 라우팅 경로 설정을 위한 다양한 기법이 제안되었다. 이 중 전력 인식 라우팅 프로토콜(Power-aware Routing Protocol)¹⁶⁾은 센서 노드의 현재 전력 상태를 고려하여 최적의 전송 경로를 선택하고 잔여 전력이 낮은 센서 노드를 보호함으로써 센서 네트워크 전체 수명을 증대시킨다. 그러나 네트워크 계층에서 에너지 효율적인 경로를 선택하는 것은 저전력 상태의 센서 노드를 보호하는데 매우 효율적일 수 있으나 실제 데이터 전송에 따른 근본적인 전력 소모를 줄이는데 한계가 존재한다.

MAC 계층에서는 센서 노드의 동작 구간을 수면(Sleep) 구간과 활성(Active) 구간으로 구분하고 데이터 전송이 없는 경우에는 전력소모가 작은 수면 상태를 유지하여 전력 절감 효과를 얻는 기법이 제안되었다¹⁷⁾. 특히 S-MAC¹⁸⁾의 경우 데이터의 감지를 위한 청취(Listen) 구간을 통해 채널을 감지하고 전송중인 데이터가 없을 경우 센서 노드를 수면 구간으로 전환하여 전력 소모를 줄이는 기법을 사용한다. 그러나 MAC 계층에서 센서 노드의 동작 구간을 제어할 경우 실제 데이터 전송에 참여하는 센서 노드의 수가 감소하지 않아 근본적인 전력 소모를 줄이는데 한계가 존재한다.

이러한 네트워크 계층과 MAC 계층에서의 전력 절감 기법의 한계를 극복하기 위해 데이터 재사용 기법이 제안되었다. 데이터 재사용 기법은 무선 센

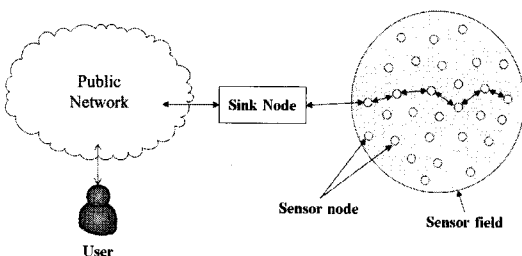


그림 1. 무선 센서 네트워크 구조

서 노드가 센싱한 데이터의 변화가 미비할 경우 기존의 데이터를 재사용하여 전력 소모를 줄이는 방법을 말한다. 그 결과 기존의 네트워크 계층과 MAC 계층에서 근본적으로 줄이지 못했던 통신에 참여하는 센서 노드 수를 감소시켜 전력 소모를 줄이는 효과를 갖는다.

무선 센서 네트워크에서 전력 절감을 위하여 유효한 데이터를 재사용하는 대표적인 기법으로는 TEEN(Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)^[9]과 APTEEN(Adaptive Periodic Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)^[10]을 들 수 있다.

TEEN과 APTEEN은 클러스터링(Clustering) 기반의 무선 센서 네트워크 전력 절감 기법으로 목적지 노드가 감지한 데이터가 이전의 데이터와 비교하여 변화가 없거나 데이터 변화량이 작을 경우 데이터 전송을 수행하지 않고 클러스터 헤드(Cluster Head)에 임시 저장되어있는 동일한 데이터를 재사용함으로써 데이터 전송에 따른 전력 소모를 감소시킨다. 그러나 싱크 노드와 클러스터 헤드와의 거리 멀어질수록 클러스터 헤드의 전력 소모는 급격히 증가하며, 이와 더불어 클러스터 멤버 노드들의 임시저장 데이터를 클러스터 헤드가 보관하기 때문에 데이터를 임시 저장하기 위해 전력이 소모될 뿐만 아니라 임시 저장 데이터가 빈번하게 사용될수록 클러스터 헤드의 전력 소모 또한 급격하게 증가한다. 따라서 특정 노드의 전력 소모가 집중되는 현상이 발생하여 해당 노드의 전력을 모두 소비할 경우 하위 노드들의 통신이 마비되는 문제가 발생할 수 있으며, 더욱이 일정 시간 간격을 두고 클러스터 내 노드들이 번갈아 가면서 클러스터 헤드의 역할을 수행할 수 있으나 클러스터의 위치를 결정할 수 있는 적절한 측도가 없다.

이러한 클러스터 형태의 데이터 재사용 기법이 가지는 거리 증가에 따른 전력 소모와 특정 노드의 전력 소모 집중 현상에 따른 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 싱크 노드를 중심으로 트리 구조의 무선 센서 네트워크 토폴로지를 고려한 데이터 재사용 기법을 제안한다.

III. 제안한 트리 구조 무선 센서 네트워크의 전력 절감 기법

앞서 설명한 기존 클러스터 형태의 데이터 재사용 기법의 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 트

리 구조의 네트워크를 기반으로 데이터 재사용 기법 및 데이터 재사용에 있어서 가장 중요한 임시 저장 노드 결정 방법을 제안한다.

본 논문에서 제안하는 데이터 재사용 기반의 전력 절감 기법을 보다 자세히 살펴보면, 트리 구조의 무선 센서 네트워크에서 센서 노드들이 데이터를 수집하고, 해당 데이터가 싱크 노드까지 전송되는 과정에서 네트워크 전체의 전력 소모를 최소화하고 전체 센서 노드들의 균등한 전력 소모가 가능하게 할 수 있는 센서 노드에 데이터를 임시 저장한다. 이처럼 유효한 기간 동안 임시 저장된 데이터를 재사용함으로써 전력 절감 효과를 얻는다.

제안한 기법의 전력 절감 효과는 데이터가 임시 저장을 통해 재사용됨으로써 감소되는 통신량과 비례하게 된다. 따라서 센싱된 데이터가 싱크 노드와 인접한 센서 노드에 저장될 경우 전력 절감 효과는 더 높아지게 된다. 그러나 일반적인 무선 센서 네트워크의 경우, 싱크 노드에 인접한 노드들은 중계해야 하는 데이터가 비교적 많으므로 싱크 노드와 멀리 떨어져 있는 센서 노드에 비해 높은 전력을 소모한다. 따라서 네트워크 전체의 전력 소모를 균등히 하면서 동시에 전력 절감 효과를 최대화할 수 있는 임시 저장 노드를 결정하는 기법이 요구된다.

다음은 본 논문에서 제안하는 기법의 동작과정에 대한 세부적인 설명이다.

1. 임시 저장 노드의 결정

앞서 언급한 바와 같이 임시 저장 노드는 본 논문에서 제안하는 트리 구조 무선 센서 네트워크의 평균 전력 소모 최소화 및 균등한 전력 소모를 위해 매우 신중하게 결정되어야 한다. 이에 본 논문에서는 다음의 세 가지 조건을 임시 저장 노드 결정 요소로 정의하였다.

첫째, 임시 저장 노드는 사용자 요청에 의해 발생된 데이터를 임시 저장하기 위한 충분한 저장 공간을 가져야 한다. 따라서 임시 저장 노드 결정을 위한 잔여 저장 공간($Memory_{remaining}$)은 임시 저장되는 데이터($Data_{sensed}$)보다 반드시 커야한다. 수식 1은 임시 저장 노드 결정을 위한 잔여 메모리 조건을 나타내고 있다.

$$Memory_{remaining} > Data_{sensed} \quad (1)$$

둘째, 임시 저장을 통한 전력 절감 효과가 발생해야 한다. 임시 저장 노드는 센서 노드 교유의 센싱

및 데이터 전송의 전력 소모 이외에 데이터의 임시 저장 및 재사용을 위해 메모리에 데이터를 저장하고 해당 데이터를 읽어오며 삭제하는 전력을 소모한다. 따라서 임시 저장을 통해 발생하는 전력 절감 효과가 임시 저장에 쓰이는 전력보다 작다면 오히려 전력 소모를 증가시키게 되는 문제를 야기한다.

임시 저장을 통한 전력 소모를 자세히 살펴보면, 임시 저장된 데이터의 재사용을 위해 센서 노드가 데이터를 임시 저장하기 위한 전력 소모(P_{write}), 데이터를 재사용하기 위해 읽어오는 전력 소모(P_{read}) 그리고 데이터의 유효시간이 만료됨에 따라 저장된 데이터를 삭제하기 위한 전력 소모(P_{erase})가 있다.

반대로 제안하는 기법에서는 임시 저장을 수행함으로써 감소되는 홉 수만큼의 전송 및 수신 전력($P_{Tx/Rx}$)이 절감된다. 따라서 임시 저장을 수행하기 위해 요구되는 전력 소모량이 임시 저장을 통해 얻어지는 전력 절감 효과보다 작아지는 임시 저장 노드를 반드시 선택하여야 한다. 수식 2는 전력 절감 효과가 발생하기 위해 만족해야하는 조건을 나타내고 있다.

$$\frac{P_{write/read} + P_{erase}}{P_{Tx/Rx}} < R(m - h) \quad (2)$$

여기서 m 은 싱크 노드로부터 목적지 노드까지의 홉 수이고, h 는 싱크 노드로부터 임시 저장 노드까지의 홉 수를 나타낸다. R 은 데이터가 재사용되는 횟수으로써 최초 무선 센서 네트워크가 포설되었을 경우 R 은 1이고, 이후에는 이전에 임시 저장된 데이터들의 평균 재사용 횟수를 사용한다. 이를 위해 임시 저장 노드들은 임시 저장된 데이터가 재사용된 횟수를 기록하여 평균 재사용 횟수를 갱신한다.

셋째, 임시 저장 노드의 잔여 전력, 평균 전력 절감 효과, 평균 전력 소모가 고려되어야 한다. 기존 TEEN 기법은 고정된 클러스터 헤드가 클러스터 멤버 노드의 데이터를 임시 저장함으로써 전력 소모가 집중되는 문제를 보였다. 이것은 클러스터 헤드가 사용자 요청에 따라 데이터를 센싱하는 역할뿐 아니라 주변 노드의 데이터를 중계하는 중계노드의 역할을 수행하며 동시에 데이터를 임시 저장하기 위한 별도의 전력을 소모하기 때문에 전력 소모가 집중되어 수명이 단축 될 수 있다. 이처럼 잔여 메모리 및 전력 절감 효과를 만족하는 센서 노드라도

자신의 잔여 전력이 부족한 상황에 임시 저장을 수행하는 것은 오히려 네트워크의 수명을 단축시키는 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 특정 센서 노드가 고정적으로 임시 저장의 역할을 수행하는 것은 네트워크 전체를 마비시킬 수 있다. 이에 본 논문에서는 데이터의 임시 저장과 재사용을 위해 임시 저장 노드를 센서 노드의 잔여 전력, 임시 저장을 통한 전력 절감 효과 그리고 센서 노드의 평균 전력 소모를 모두 고려하여 결정할 수 있는 방법을 제안한다.

본 논문에서는 임시 저장 노드의 역할을 수행하기 위해 고려되는 전력 요소들을 다음과 같이 정의 하였다.

1) 임시 저장 노드의 잔여 전력

임시 저장 노드는 일반 센서 노드에 비해 더 많은 전력을 소모한다. 따라서 잔여 전력($P_{remaining}$)이 낮은 노드를 임시 저장 노드로 결정하게 되면 전력 소모가 높아져 다른 센서 노드들에 비해 수명이 짧아진다. 따라서 다중 홉으로 싱크 노드에게 데이터를 전송하는 무선 센서 네트워크의 데이터 전송 경로가 끊기게 되며, 그 결과 네트워크 전체의 마비를 야기할 수 있다. 이에 본 논문에서는 잔여 전력을 수식 8에서와 같이 임시 저장 노드 선택 기준으로 사용한다.

2) 센서 노드의 전력 절감 효과

제안한 기법의 전력 절감 효과(P_{saving})는 임시 저장을 통해 감소되는 홉 수와 비례한다. 따라서 임시 저장 노드와 싱크 노드 사이의 홉 수가 작을 경우 더 높은 전력 절감 효과가 발생된다. 수식 3은 임시 저장을 통해 발생하는 전력 절감 효과를 나타내고 있다.

$$P_{saving} = P_{Tx/Rx} \times R(m - h) \quad (3)$$

이에 본 논문에서는 전력 절감 효과를 수식 8에서와 같이 임시 저장 노드 선택 기준으로 사용한다.

3) 센서 노드의 평균 전력 소모량

일반적인 무선 센서 네트워크는 다중 홉으로 데이터를 싱크 노드에 전송한다. 즉, 모든 센서 노드가 중계 노드의 역할을 수행하며 주변 노드의 데이터 중계를 위해 전력을 소모한다. 따라서 평균 전력 소모($P_{avg.consumption}$)가 큰 센서 노드를 임시 저장 노드로 결정하게 되면 다른 센서 노드들에 비해 수

명이 단축되어, 전체 네트워크를 마비시킬 수 있다.

본 논문에서는 평균 전력 소모를 계산하기 위해 다음과 같은 가정을 수행하였다. 첫째, 모든 센서 노드의 분포가 균일하며 토폴로지는 원형의 트리 구조이다. 둘째, 각 센서 노드의 평균 전력 소모는 센서 노드가 중계하는 데이터양과 같으며 이는 해당 노드를 거쳐서 싱크 노드로 데이터를 전송하는 센서 노드의 수와 비례한다. 이때 싱크 노드와 동일한 홉 수만큼 떨어져 있는 센서 노드의 수를 나타내면 수식 4와 같다.

$$n(h) = 2\pi[(hr)^2 - ((h-1)r)^2]\beta \quad (4)$$

여기서 n 은 임의의 h 홉에 분포하는 센서 노드의 수이고 r 은 한 홉 사이의 거리이며, β 는 무선 센서 네트워크에서의 센서 노드의 밀집도이다. 이때 임의의 h 홉 센서 노드들을 통해 싱크 노드로 데이터를 전송하는 센서 노드의 수는 수식 5와 같다.

$$\sum_{i=h+1}^m n(i) = 2\pi \sum_{i=h+1}^m [(ir)^2 - ((i-1)r)^2]\beta = 2\pi[(mr)^2 - (hr)^2]\beta \quad (5)$$

여기서 m 은 트리 구조 무선 센서 네트워크의 최대 홉 수이다. 따라서 임의의 h 홉에 존재하는 한 개의 센서 노드를 통해 데이터를 싱크 노드에게 전송하는 평균 센서 노드의 수는 수식 6과 같다.

$$\frac{\sum_{i=h+1}^m n(i)}{n(h)} = \frac{2\pi[(mr)^2 - (hr)^2]\beta}{2\pi[(hr)^2 - ((h-1)r)^2]\beta} = \frac{m^2 - h^2}{2h - 1} \quad (6)$$

위와 같은 수식을 통해 각 센서 노드의 평균 전력 소모량은 수식 7과 같이 계산할 수 있으며 본 논문에서는 평균 전력 소모량을 수식 8에서와 같이 임시 저장 노드 선택 기준으로 사용한다.

$$P_{avg-consumption} = P_{Tx/Rx} \times \frac{m^2 - h^2}{2h - 1} \quad (7)$$

위와 같은 세 가지 조건을 가지고 본 논문에서는 수식 8을 통하여 임시 저장 노드를 결정하기 위한 우선순위를 정한다. 수식 8에 의하면 트리 구조 무선 센서 네트워크의 전력 소모를 최소화하고 균등하게 전력을 소모하기 위해서는 임시 저장 노드의 잔여 전력과 전력 절감 효과는 높아야 하며 평균 전력 소모량은 낮아야 한다.

$$Priority = \frac{P_{remaining} \times P_{saving}}{P_{avg-consumption}} = P_{remaining} \times \frac{R(2h-1)}{m+h} \quad (8)$$

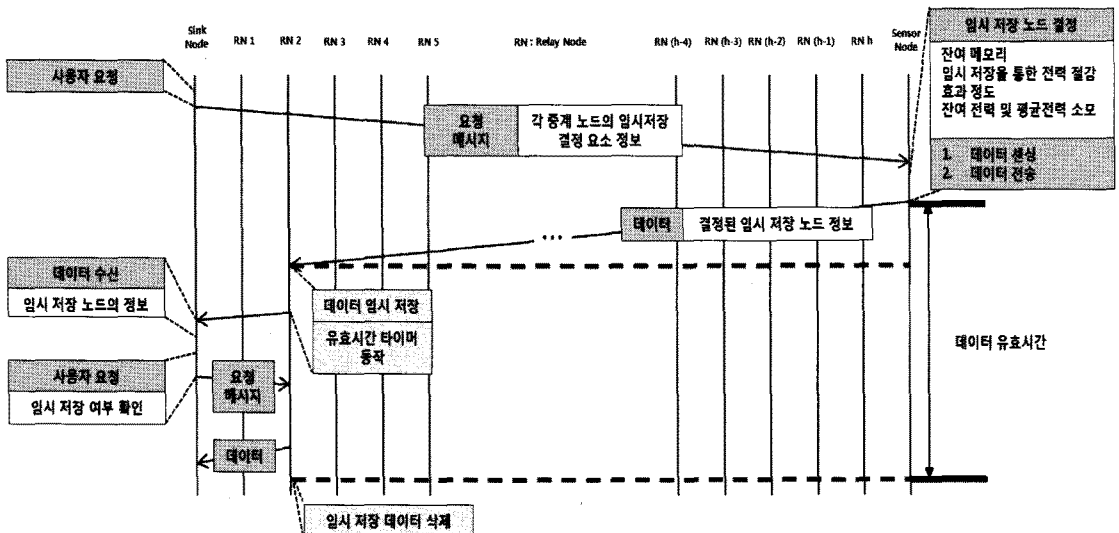


그림 2. 제안하는 트리 구조 무선 센서 네트워크의 전력 절감 기법의 동작

2. 데이터 임시 저장

데이터 센싱을 수행하는 목적지 노드는 데이터를 임시 저장하기 위한 중계 노드를 결정하고, 결정된 임시 저장 노드의 정보를 센싱된 데이터와 함께 싱크 노드에게 전송한다. 이때 다중 홉을 통해 데이터를 전송하는 중계 노드들은 자신이 임시 저장 노드로 결정되었는지 확인한다. 만약 자신이 임시 저장 노드로 결정되었다면 센싱된 데이터를 임시 저장하고 데이터를 싱크 노드로 중계 전송한다. 또한 임시 저장 노드는 데이터를 저장함과 동시에 해당 데이터에 대한 타이머를 동작한다. 타이머의 동작으로 유효시간이 지난 후에 데이터를 메모리에서 삭제함으로써 사용할 수 없는 데이터가 재사용되는 것을 방지한다.

3. 데이터 재사용

사용자로부터 동일한 요청패킷이 발생하였을 경우 싱크 노드는 요청 메시지를 임시 저장 노드에게 전송한다. 임시 저장 노드는 요청 메시지를 확인하고 유효한 데이터를 싱크 노드에게 전송해줌으로써 전송 홉 수 감소에 따른 전력 절감 효과를 얻는다. 만약 데이터 유효시간 동안 동일한 요청이 다수 발생한다면 전체 네트워크의 전력 절감 효과는 재사용 횟수에 따라 비례한다. 따라서 재사용 빈도가 높은 데이터일수록 더 높은 전력 절감 효과를 얻게 된다.

그림 2는 본 논문에서 제안한 트리 구조 무선 센서 네트워크의 전력 절감 기법의 전체 동작과정을 나타내고 있다.

IV. 성능 분석

논문에서 제안하는 데이터 재사용 기반의 전력 절감 기법의 성능 평가를 위하여 일반적인 무선 센서 네트워크 상황을 고려한 모의실험을 수행하였다. 본 논문에서 고려한 모의실험 환경은 다음과 같다. 트리 구조 무선 센서 네트워크는 싱크 노드를 중심으로 홉 간 거리가 동일한 m 홉 크기의 네트워크 토폴로지를 가정하였으며, 100개의 센서 노드들이 균일한 분포(Uniform Distribution)로 존재한다. 또한 데이터는 트리 구조 네트워크 내에서 고정된 전송 경로를 통해 다중 홉으로 싱크 노드에게 전송되며, 센서 노드의 이동성은 없다고 가정하였다. 그림 3은 본 논문에서 제안하는 트리 구조 기반의 모의 실험 환경을 도식화한 것이다.

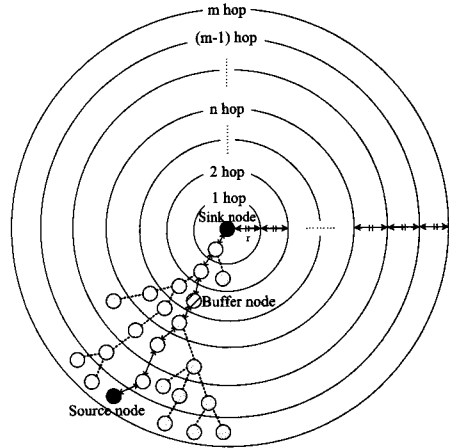


그림 3. 트리 구조 기반의 제안하는 환경

비교하고자 하는 클러스터 기반의 TEEN은 19개의 클러스터로 구성되며, 한 개의 클러스터는 4~6개의 클러스터 멤버 노드를 포함하고 있다. 클러스터 헤드는 일반적인 센서 노드와 동일하며, 클러스터 헤드와 클러스터 멤버 노드는 1홉으로 구성되었다. 그림 4는 클러스터 기반 TEEN의 모의실험 환경을 도식화한 것이다.

이와 더불어 각 센서 노드에서 싱크 노드로 전달되는 데이터는 29bytes의 고정된 크기를 가지며, 센서 노드의 메모리 용량은 4Kbytes이다. 또한 데이터 송수신 및 메모리 읽기, 쓰기과 관련된 전력 소모량은 MICA2^[11] 센서 노드를 기준으로 최초 센서 노드의 전력은 2.5J 이고 데이터 송수신 전류는 각각 25.8mW, 28.8mW를 사용하였으며, 메모리를 읽고 쓰는 전력은 각각 3.6mW와 102mW를 사용하였

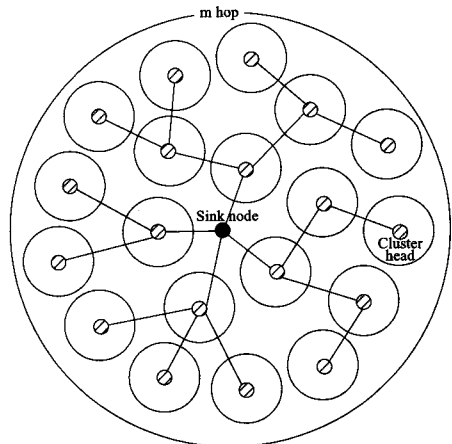


그림 4. 클러스터 기반의 TEEN 환경

다. 표 1은 본 논문에서 구현한 모의실험 환경에 사용되는 파라미터를 정리한 것이다.

이와 같은 환경을 토대로 데이터 요청을 무작위로 발생시켜 모의실험을 수행하였다. 이때 모의실험 시간, 데이터 유효시간 그리고 데이터 요청률을 변경하면서 본 논문에서 제안한 트리 구조의 데이터 재사용 기반의 전력 절감 기법과 클러스터 기반의 TEEN 그리고 데이터를 재사용 기법을 사용하지 않았을 경우를 비교 분석하였다.

그림 5는 모의실험 시간에 따른 무선 센서 노드의 평균 전력 소모를 나타내고 있다. 이때 무선 센서 노드의 평균 전력 소모를 확인하기 위해 모의실험 시간을 5,000unit에서 50,000unit까지 변경하였다. 여기서 데이터 유효시간은 2unit이고 데이터 요청률은 100packet/unit이다. 여기서 임시 저장된 데이터가 재사용될 확률은 전체 발생하는 요청패킷 중 재사용된 요청패킷의 비이다. 데이터 유효시간이 2unit이고 데이터 요청률이 100packet/unit인 상황에서 TEEN과 제안하는 기법의 데이터 재사용 확률은 86.6%이며, 데이터 재사용 기법을 사용하지 않는 경우는 해당되지 않는다.

결과에서 볼 수 있듯이 데이터 재사용을 수행하지 않은 경우 보다 TEEN과 제안하는 기법을 사용하였을 경우 더 낮은 전력 소모를 보였다. 또한 클러스터 기반의 TEEN을 사용하였을 경우보다 트리 구조의 제안하는 기법을 사용하였을 경우에 더 낮은 전력을 소모하는 것을 알 수 있다. 이를 보다 자세히 살펴보면, 싱크 노드로부터 9홉 떨어진 센서

표 1. 모의실험에 사용된 파라미터

Parameters	Value
전체 센서 노드의 수	100
전체 홉 수	9
패킷의 크기[bytes]	29
센서 노드의 메모리 크기[Kbytes]	4
센서 노드의 최초 전력[J]	2.5
패킷을 전송하는데 소모되는 전력[mW]	25.8
패킷을 수신하는데 소모되는 전력[mW]	28.8
메모리를 읽는데 소모되는 전력[mW]	2.6
메모리에 저장하고 삭제하는데 소모되는 전력[mW]	102
전송 속도[Kbps]	38.4
데이터 요청률[packet/unit]	10 ~ 100
데이터 유효시간[unit]	0 ~ 2
모의실험 단위시간[min/unit]	5

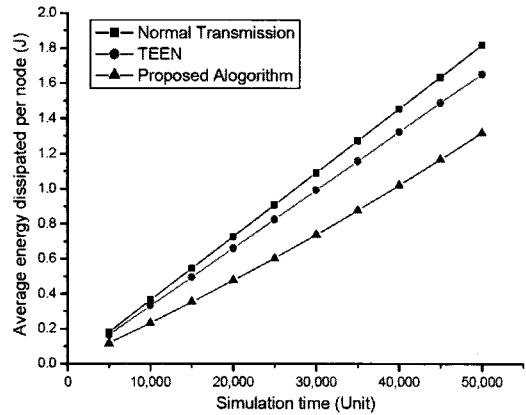


그림 5. 모의실험 시간에 따른 무선 센서 노드의 평균 전력 소모

노드에 데이터 요청이 발생한다고 가정했을 때 TEEN이 1홉 상위 클러스터 헤드에 데이터를 임시 저장하여 데이터 재사용을 통해 0.056J의 전력이 절감되는 반면, 제안하는 기법이 싱크 노드로부터 1홉 떨어진 센서 노드에 데이터를 임시 저장한다면 최대 0.1344J의 전력이 절감될 수 있다. 즉, 하나의 데이터가 재사용되는 과정에서 TEEN에 비해 제안하는 기법이 더 높은 전력을 절감할 수 있으며, 더 많은 데이터가 재사용됨에 따라 전체 네트워크에서의 전력 소모 차이가 발생하게 된다.

그림 6은 데이터 유효시간에 따른 무선 센서 노드의 평균 전력 소모를 나타내고 있다. 이때 무선 센서 노드의 전력 소모를 확인하기 위해 데이터 유효시간을 0unit에서 2unit까지 변경하였으며, 동일한 요청패킷 발생에 대하여 유효한 데이터는 모두 재사용한다. 여기서 데이터 요청률은 100packet/unit이고, 모의실험 시간은 20,000unit이다. 이러한 환경에서 TEEN과 제안하는 기법의 데이터 재사용 확률은 데이터 유효시간이 변경됨에 따라 0%에서 86.6%까지 변경된다.

그림에서 볼 수 있듯이 데이터 재사용을 수행하지 않을 경우 데이터 유효시간과 무관하게 동일한 전력이 소모되는 반면, TEEN과 제안하는 기법을 사용하였을 경우 데이터 유효시간이 증가함에 따라 평균 전력 소모가 감소함을 알 수 있다. 또한 클러스터 기반의 TEEN 방식에 비해 제안하는 데이터 재사용 기법이 더 높은 전력 절감 효과를 보이고 있는데, 이것은 제안 기법이 가능한 싱크 노드에 인접한 센서 노드에 데이터를 임시 저장하여 보다 높은 전력 절감 효과를 가지는 것을 증명한다. 이때

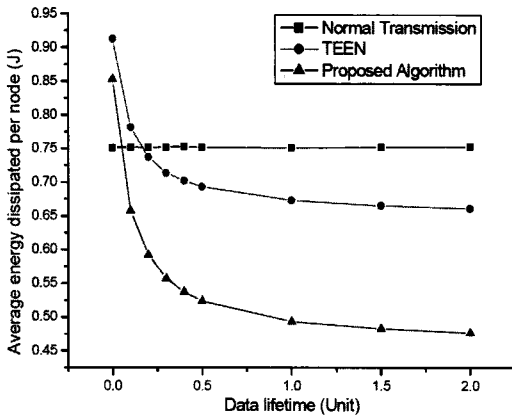


그림 6. 데이터 유효시간에 따른 무선 센서 노드의 평균 전력 소모

전력 절감 효과는 데이터 유효시간이 1unit 이상이 되었을 경우 포화되는 것을 볼 수 있는데 이는 전체 센서 노드의 데이터가 대부분 임시 저장되어 재사용되기 때문에 더 이상의 전력 절감 효과가 발생하지 않기 때문이다. 그러나 데이터 유효시간이 짧은 경우 TEEN과 제안하는 기법이 데이터 재사용을 수행하지 않을 경우보다 오히려 평균 전력 소모가 높아지는데, 이것은 데이터 유효시간이 짧아 데이터가 재사용되지 못하고 데이터를 임시 저장하기 위한 전력만 소모되었기 때문이다.

그림 7은 데이터 요청률에 따른 무선 센서 노드의 평균 전력 소모를 나타내고 있다. 이때 무선 센서 노드의 평균 전력 소모를 확인하기 위해 데이터 요청률을 10packet/unit에서 100packet/unit까지 변경하였다. 여기서 데이터 유효시간은 2unit이며, 모의 실험 시간은 50,000unit이다. 이러한 환경에서 TEEN

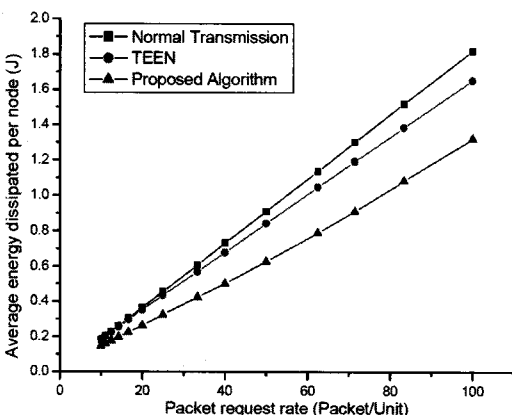


그림 7. 데이터 요청률에 따른 무선 센서 네트워크의 전력 소모

과 제안하는 기법의 데이터 재사용 확률은 데이터 요청률이 변경됨에 따라 18.2%에서 86.6%까지 변경된다.

그림에서 볼 수 있듯이 데이터 요청률이 높아질수록 동일한 모의실험 시간에서 더 많은 평균 전력을 소모한다. 하지만 제안한 기법의 경우 데이터 재사용을 수행하지 않을 경우와 TEEN을 사용했을 경우보다 센서 노드의 평균 전력 소모가 낮아지는데, 이것은 유효시간이 고정된 상황에서 데이터 요청률이 높아 데이터 요청이 발생이 빈번하게 일어나는 경우 임시 저장된 데이터의 재사용 빈도가 높아지며, 그 결과 평균 전력 소모가 더 낮아지기 때문이다. 또한 TEEN을 사용하였을 경우보다 제안하는 기법을 사용하였을 경우 데이터 요청률이 높아짐에 따라 더 낮은 평균 전력을 소모함을 보였는데, 이것은 TEEN에서 1홉 상위 클러스터 헤드에 임시 저장하였을 때보다 제안하는 기법을 사용하여 데이터를 임시 저장하였을 경우가 데이터 재사용에 따른 전력 절감 효과가 더 높기 때문이며, 이에 따라 데이터 요청률이 높을수록 데이터 재사용 빈도가 높아져 제안하는 기법이 더 높은 전력 절감 효과를 보인다.

그림 8은 데이터 요청 발생 빈도에 따른 무선 센서 네트워크의 수명을 나타내고 있다. 이때 무선 센서 네트워크의 수명을 확인하기 위해 데이터 요청률을 10packet/unit에서 100packet/unit까지 변경하였다. 여기서 데이터 유효시간은 2unit이며, 무선 센서 네트워크의 수명은 최초 하나의 센서 노드의 전력이 모두 소모되는 시간까지이다. 이러한 환경에서 TEEN과 제안하는 기법의 데이터 재사용 확률 확률

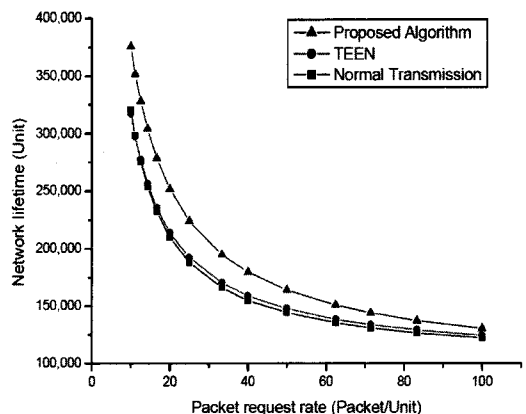


그림 8. 데이터 요청률에 따른 무선 센서 네트워크의 수명

은 데이터 요청률이 변경됨에 따라 18.2%에서 86.6%까지 변경된다.

그림에서 볼 수 있듯이 위와 같은 환경에서 제안하는 기법을 사용하였을 경우 최초 하나의 센서 노드의 전력이 모두 소모되는데 최대 37,500unit의 모의실험 시간이 소모되는 반면 데이터 재사용 기법을 사용하지 않은 경우와 TEEN은 최대 32,500unit의 모의실험 시간이 소모된다. 또한 데이터 요청률에 따라 네트워크 수명이 지속적으로 감소하는데, 이것은 데이터 요청률이 높아짐에 따라 임시 저장된 데이터 재사용 빈도가 높아지고 그 결과 대부분의 센서 노드의 데이터가 재사용됨으로 전력 절감 효과가 포화되기 때문이다. 또한 데이터 재사용 기법을 사용하지 않았을 경우와 TEEN의 수명이 비슷한 것을 볼 수 있는데, 이것은 TEEN이 고정된 클러스터 헤드에 임시 저장을 수행하여 클러스터 헤드의 전력이 먼저 소모되기 때문에 클러스터 헤드의 전력이 먼저 소모되기 때문이다. 즉, 제안하는 기법을 사용하였을 경우 전체 네트워크의 전력 절감 및 균등한 전력 소모가 이루어짐을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 트리 구조 무선 센서 네트워크에서의 데이터 재사용 기반의 전력 절감 기법을 제안하였다. 기존 무선 센서 네트워크에서 사용되었던 클러스터 기반의 데이터 재사용 기법의 문제점을 제시하고, 이를 해결하기 위해 트리 구조 기반의 데이터 재사용 기법을 제안하였다.

기존 클러스터 기반의 데이터 재사용 기법은 클러스터 헤드에 유효한 데이터를 임시 저장하고 해당 데이터를 재사용함으로써 전력 절감 효과를 얻는다. 하지만, 클러스터 헤드와 싱크 노드 사이에 통신량이 줄어들지 못하여 전력 절감 효과가 높지 못하고, 클러스터 헤드에 전력 소모가 집중되는 문제를 갖는다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 유효한 데이터를 싱크 노드에 인접한 센서 노드에 임시 저장하고 재사용함으로써 전체 네트워크의 평균 전력 소모를 최소화한다. 또한 현재 센서 노드의 잔여 전력 및 전력 절감 효과 등을 고려하여 상황에 따른 최적의 임시 저장 노드를 결정해 전체 센서 노드의 균등한 전력 소모를 가능하게 한다. 이처럼 제안하는 기법은 전력 절감 효과를 최대화하고 전체 센서 노드의 균등한 전력 소모를 가능하게 하여

전체 무선 센서 네트워크 토폴로지의 수명을 최대화할 수 있다.

제안 기법의 성능을 분석하기 위해 모의실험을 수행하였으며, 모의실험 시간, 데이터 유효시간, 데이터 요청률에 따른 전력 소모를 분석하였다. 그 결과 본 논문에서 제안한 기법은 기존 클러스터 기반의 데이터 재사용 기법과 데이터 재사용을 하지 않을 경우에 비해 더 낮은 전력을 소비하는 것을 알 수 있었다. 이것은 기존 무선 센서 네트워크에서 임시 저장을 하지 않는 경우와 비교하여 전체 네트워크 수명이 최대 15.9%까지 증가한 성능으로써 다수의 사용자가 유효시간을 갖는 동일한 데이터에 대하여 빈번한 요청이 발생하는 응용 서비스에서 더 높은 전력 절감 효과를 보일 수 있다. 이는 무선 센서 네트워크의 다양한 응용에 적용되어 보다 높은 네트워크 수명을 보장할 수 있는 기법이라 사료되며, 추후 동적 네트워크 토폴로지 및 라우팅 경로의 변화에 적응적인 전력 절감 기법에 기초하여 더 높은 성능 향상을 보일 수 있는 연구라 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] 조위덕, 이상학, 강정훈, "센서 네트워크 기술 개요", 한국정보통신학회 정보통신소사이어티 논문지, 제17권, 제1호, 2003년 5월.
- [2] J. Agre and L. Clare, "An integrated architecture for cooperative sensing networks," *IEEE Computer*, Vol.33, No.5, pp.106-108, May, 2000.
- [3] S. GLASER, "Some real-world applications of wireless sensor nodes," In Proc. of SPIE Symposium on Smart Structures and Materials, Vol.5391, pp.344-355, Mar., 2004.
- [4] G.D. Abowd and J.P.G. Sterbenz, "Final report on the inter-agency workshop on research issues for smart environments," *IEEE Personal Communications*, Vol.7, No.5, pp.36-40, Oct., 2000.
- [5] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Elsevier Computer Networks*, Vol.38, No.4, pp.393-422, Mar., 2002.
- [6] S. Singh, M. Woo, and C. S. Raghavendra, "Power-aware routing in mobile ad hoc networks," In Proc. of Mobile Computing and Networking, pp.181-190, Mar., 1998.
- [7] I. Demirkol, C. Ersoy, and F. Alagoz, "MAC

protocols for wireless sensor networks: a survey," *IEEE Communications Magazine*, Vol.44, No.4, pp.155-121, Apr., 2006.

- [8] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "Medium Access Control With Coordinated Adaptive sleeping for Wireless Sensor Networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, Vol.12, No.3, pp. 493-506, Jun. 2004.
- [9] A. Manjeshwar and D. P. Agarwal, "TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks," In Proc. of IPDPS, pp.2009-2015, Apr., 2001.
- [10] A. Manjeshwar and D. P. Agarwal, "AP TEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks," In Proc. of IPDPS, pp.195-202, Aug. 2002.
- [11] M. A. M. Vieira, C. N. Coelho Jr., D. C. da Silva Jr., and J. M. da Mata., "Survey on Wireless Sensor Network Devices," In Proc. of ETFA, pp.16-19, Sep., 2003.

이 상 현 (Sanghyun Lee)

준회원



2007년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사
2009년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 석사
<관심분야> USN, MAC Protocol

유 명 식 (Myungsik Yoo)

종신회원



1989년 2월 고려대학교 전자공학과 학사
1991년 2월 고려대학교 전자공학과 석사
2000년 6월 SUNY at Buffalo Dept. of EE 박사

2000년 9월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 교수

<관심분야> Optical Network, OBS, EPON, 인터넷 QoS, Wireless MAC Protocol, MANET