

논문 2008-45CI-3-20

# 에너지 효율적인 데이터 수집을 이용한 LEACH 기반 무선 센서 네트워크의 수명 연장

( Prolonging Lifetime of the LEACH Based Wireless Sensor Network  
Using Energy Efficient Data Collection )

박 지 원\*, 모 상 만\*\*, 정 일 용\*\*\*, 배 용 근\*\*\*

( Jiwon Park, Sangman Moh, Ilyong Chung, and Yong Geun Bae )

## 요 약

애드혹 네트워크의 실용 영역인 무선 센서 네트워크에서 센서 노드는 배터리에 의해 동작하고 일반적으로 한번 배치된 후 다시 회수 되지 않는다. 따라서 각각의 센서 노드는 한정된 에너지로 감지하고 통신해야 하며, 에너지 효율성은 무선 센서 네트워크의 수명을 결정하는 핵심 설계 요소로서 활발히 연구되고 있고 근래에는 크로스 레이어 최적화를 통해 더욱 개선되고 있다. 본 논문에서는 무선 센서 네트워크 시스템인 ZigbeX 플랫폼에서 센서 노드의 전송 출력 제어를 통하여 데이터 수집 과정에서 소모되는 에너지를 절약하는 새로운 기법을 제안하여 구현하고 실험 및 측정을 통하여 성능 개선 효과를 입증한다. 클러스터 멤버를 구성하는 각 센서 노드에서 클러스터 헤드로 데이터를 전송하는 과정에서 멤버 노드의 송신 출력을 통신 가능한 적정 수준으로 낮춤으로써 에너지를 절약하게 된다. 각 멤버 노드는 클러스터 헤드로부터 수신한 패킷의 RSSI (Received Signal Strength Indicator) 값을 기반으로 하여 자신의 송신 출력을 조절한다. 즉 자신이 전송한 패킷을 클러스터 헤드가 안전하게 수신할 수 있는 적정 수준으로 출력을 낮춤으로써 에너지를 절약하게 된다. ZigbeX 플랫폼 상에서 구현한 프로토콜을 자체 개발한 패킷 분석기를 이용하여 반복 측정한 결과에 의하면, 제안한 출력 제어 기법을 사용함으로써 통신량의 대부분을 차지하는 데이터 수집 과정에서의 에너지가 절약되어 네트워크 수명이 최대 21.9% 증가됨을 확인할 수 있었다.

## Abstract

In wireless sensor networks with ad hoc networking capability, sensor nodes are battery operated and are usually disposable once deployed. As a result, each sensor node senses and communicates with limited energy and, thus, energy efficiency has been studied as a key design factor which determines lifetime of a wireless sensor network, and it is more improved recently by using so-called cross-layer optimization technique. In this paper, we propose and implement a new energy saving mechanism that reduces energy consumption during data collection by controlling transmission power at sensor nodes and then measure its performance in terms of lifetime improvement for the wireless sensor network platform ZigbeX. When every sensor node transmits sensed data to its clusterhead, it controls its transmission power down to as low level as communication is possible, resulting in energy saving. Each sensor node controls its transmission power based on RSSI (Received Signal Strength Indicator) of the packet received from its clusterhead. In other words, the sensor node can save energy by controlling its transmission power down to an appropriate level that its clusterhead safely receives the packet it transmits. According to the repetitive experiment of the proposed scheme on the ZigbeX platform using the packet analyzer developed by us, it is observed that the network lifetime is prolonged by up to 21.9% by saving energy during the data collection occupying most amount of network traffic.

**Keywords :** Wireless sensor network, ad hoc routing, energy efficiency, cross-layer optimization, LEACH.

\* 학생회원, \*\* 평생회원-교신저자, \*\*\* 정회원, 조선대학교 컴퓨터공학부  
(School of Computer Engineering, Chosun University)

※ 이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임  
(KRF-2007-331-D00439).

접수일자: 2008년3월14일, 수정 완료일: 2008년4월24일

## I. 서 론

최근 센서 및 무선 통신 기술의 발전으로 저전력, 저비용, 초소형의 센서 노드들이 개발되고 있고 이에 힘입어 애드혹 통신에 기반을 둔 무선 센서 네트워크에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 무선 센서 네트워크는 센서 노드를 이용하여 간단하게는 온도, 습도, 조도 복잡하게는 환경의 변화, 지진 활동, 건물의 상태 등의 정보를 수집한다. 센서 노드는 온도, 습도, 조도 등의 물리량을 감지할 수 있는 센서와 데이터 처리 및 무선 통신 기능을 포함하는 모드로 이루어져 있다. 일반적으로 무선 센서 네트워크는 광범위한 지역에 수많은 센서 노드들이 배치되어 이루어지고, 과학적, 의학적, 군사적, 상업적 용도 등 다양한 분야에 적용될 수 있다<sup>[1]</sup>.

애드혹 모드로 운용되는 대부분의 무선 센서 네트워크에서는 운용상의 특징 때문에 대부분의 경우 센서 노드를 다시 회수하지 않고, 외부 전원이 존재하지 않는다. 한번 배치되면 배터리의 충전이 어렵기 때문에 센서 노드의 수명은 전적으로 배터리의 수명에 의존적이다. 센서 노드가 하는 일은 현재 상태를 감지하여 데이터를 생성하는 일과 생성된 데이터를 전송 및 중계하는 라우터 역할도 수행한다. 이에 센서 노드는 매우 제한된 에너지 자원을 얼마나 효율적으로 사용하느냐에 따라 네트워크의 수명에 영향을 미친다<sup>[2]</sup>. 이와 같은 이유로, 에너지 효율성은 무선 센서 네트워크의 수명을 결정하는 핵심 설계 요소로서 활발히 연구되고 있고 근래에는 크로스 레이어 설계를 통해 더욱 개선되고 있다.

에너지의 소모를 줄이는 방법으로는 사용하지 않는 무선 송수신기의 전원 차단, 무선 송수신기의 출력 제어<sup>[3]</sup>, 에너지 효율을 높인 프로토콜 사용<sup>[4]</sup> 등이 있다. 이 중에서 출력 제어는 무선 송수신기의 전원 차단이나 프로토콜 개선에 비해 직접적으로 에너지를 절약하는 방법이다. 출력 제어 기법은 패킷을 전송할 때 무선 송수신기의 최대 전송 거리로 전송하지 않고 목적지 노드에 안전하게 도달할 수 있는 적정 수준의 출력으로 전송하는 방식이다. 이로 인해 얻어지는 효과는 출력 감소에 따른 에너지 절약으로 네트워크 수명이 연장될 뿐만 아니라 부수적으로 무선 전송 범위를 줄였기 때문에 노드간의 신호 간섭이 줄어들게 된다<sup>[5]</sup>.

본 연구에서는 무선 센서 네트워크 시스템인 ZigbeX 플랫폼에서 운용되는 변형 LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 프로토콜에서, 센서 노드의 전송 출력 제어를 통하여 데이터 수집 과정에서

소모되는 에너지를 절약하는 새로운 기법을 설계 및 구현하였다. 여기서, LEACH<sup>[6~7]</sup>는 확률적인 랜덤 방식으로 클러스터 헤드를 주기적으로 선정하는 클러스터 기반 라우팅 프로토콜로서, 클러스터 헤드 선정 후 클러스터 내의 각 센서 노드가 데이터를 클러스터 헤드로 전송하면 클러스터 헤드가 이들 데이터를 모아서 싱크 노드에게 전송한다. 제안한 기법에서는 클러스터 멤버를 구성하는 각 센서 노드에서 클러스터 헤드로 데이터를 전송하는 과정에서 멤버 노드의 송신 출력을 통신 가능한 적정 수준으로 낮춤으로써 에너지를 절약하게 된다. 각 멤버 노드는 클러스터 헤드로부터 수신한 패킷의 RSSI (Received Signal Strength Indicator) 값을 기반으로 하여 자신의 송신 출력을 조절한다. 즉 자신이 전송한 패킷을 클러스터 헤드가 안전하게 수신할 수 있는 적정 수준으로 출력을 낮춤으로써 에너지를 절약하게 된다. ZigbeX 센서 네트워크 플랫폼 상에서 구현한 프로토콜을 자체 개발한 패킷 분석기를 이용하여 반복 측정된 결과에 의하면, 제안한 출력 제어 기법을 사용함으로써 통신량의 대부분을 차지하는 데이터 수집 과정에서의 에너지가 절약되어 네트워크 수명이 주어진 실험 환경에서 최대 21.9% 증가됨을 확인할 수 있었다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제 II장은 기존의 관련 연구를 정리한 것으로서, 무선 센서 네트워크에서의 출력 제어 및 본 연구의 기반이 되는 LEACH 프로토콜에 대하여 기술한다. 제 III장에서는 본 논문에서 제안한 출력 제어 기법이 체계적으로 기술되고, 데이터 수집 과정에서 에너지가 절약되는 논리적 근거가 제시된다. 제 IV장에서는 ZigbeX 플랫폼 상에서 구현 및 반복 실험을 통해 성능을 측정하여 비교 분석한 결과를 기술하고, 마지막으로 V장에서는 본 연구의 결론을 기술한다.

## II. 관련 연구

본 절에서는 무선 센서 네트워크를 위하여 연구된 기존의 전송 출력 제어 기법들을 검토하고, 본 연구의 기반이 되는 LEACH 프로토콜의 주요 특징 및 동작에 대하여 간략히 기술한다.

### 1. 무선 센서 네트워크에서의 출력 제어

무선 센서 네트워크에서 사용할 수 있는 출력 제어 방법은 다양한 방식으로 분류할 수 있다. 첫째, 물리 계층의 정보인 RSSI, SIR (Signal to Interference

Ratio), BER (Bit Error Rate) 등을 참조하여 조절하는 방법이다<sup>[5]</sup>. 수신측의 패킷 수신율에 따라서 파워를 조절하는 PCBL (Power Control with Black Listing) 알고리즘이 물리 계층의 정보를 활용하는 대표적인 예에 해당한다<sup>[8]</sup>.

둘째, 전체 네트워크의 연결을 유지하는 최소한의 전송 출력을 찾아서 이 값을 모든 노드의 공통 출력으로 설정하는 CPC (Common Power Control) 기법과 반대로 각 노드의 전송 출력을 서로 다르게 설정하는 IPC (Independent Power Control) 기법이 있다<sup>[5]</sup>. 무선 애드혹 네트워크에서 전송 출력을 조절하는 COMPOW (Common Power) 방법은 라우팅 테이블에서 최소 출력 값을 찾아 공유하는 알고리즘이다<sup>[9]</sup>.

셋째, 각 노드의 전송 출력을 중앙에서 관리하는 중앙 집중 방식과 노드 자신의 로컬 정보를 기반으로 자율적으로 결정하는 분산 처리 방식이 있다<sup>[5]</sup>.

넷째, 자신이 수신한 파워 레벨을 기준으로 전송 출력을 조절하는 방법(open loop)과 수신 노드가 수신 파워 레벨을 송신 노드에게 전송하여 송신 노드로 하여금 전송 출력을 조절하도록 하는 방법(closed loop)이 있다. PCSMAC (Power Controlled Sensor MAC) 프로토콜<sup>[5]</sup>에서는 수신 노드가 수신 패킷의 RSSI 정보를 송신 노드에게 전송하여 전송 출력을 조절하게 하는 closed loop 방식의 프로토콜이다. 본 논문에서 제안하는 전송 출력 제어 방식은, 각 클러스터 멤버 노드에서 수신 패킷의 RSSI 정보를 이용하여 송신 파워를 조절하는 open loop 방식으로 분류될 수 있다.

## 2. LEACH 프로토콜

최근 들어 무선 센서 네트워크에서의 라우팅에 대한 많은 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 기존의 라우팅 프로토콜은 크게 세 가지로 구분할 수 있다<sup>[10]</sup>. 첫 번째는 데이터 중심적 프로토콜로 싱크 노드가 특정 지역 또는 특정 속성을 필요로 할 경우 질의를 전송함으로써 특정 위치의 노드로부터 싱크 노드까지 경로가 설정되는 방식이고, Directed Diffusion<sup>[11~12]</sup>, SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation)<sup>[13~14]</sup>, Rumor Routing<sup>[15]</sup> 프로토콜이 데이터 중심적 라우팅 기법에 해당한다. 두 번째는 위치 기반 프로토콜로서 위치 정보를 사용하여 특정 지역에만 질의함으로써 불필요한 라우팅 설정을 없애는 방법이다. 위치 기반 라우팅에는 GEAR (Geographic and Energy Aware

Routing)<sup>[16]</sup>, LAR (Location-Aware Routing)<sup>[15]</sup>, GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing)<sup>[15]</sup> 프로토콜 등이 있다. 세 번째는 계층적 프로토콜로 인접 노드의 유사한 데이터를 중복 전송함으로써 유발되는 불필요한 에너지 낭비를 막고 중계 노드에 대한 부하를 줄이고자 제안된 클러스터 기반 라우팅 프로토콜이다.

LEACH 프로토콜은 클러스터 기반으로 동작하는 라우팅 기법으로 계층적 프로토콜의 대표적인 예이다. LEACH는 클러스터 헤드가 클러스터 내에 있는 센서 노드들로부터 데이터를 전송 받아 데이터를 병합하여 싱크 노드로 전송한다.

LEACH 프로토콜의 동작은 두 단계로 나눌 수 있고, 이 두 단계가 반복되어지는 형태로 이루어진다. 새로운 라운드가 시작되면 그림 1에서 보는 바와 같이 첫 번째 단계인 설정(set-up) 단계가 이루어진다. 이 단계에서 각 센서 노드는 사전에 정해진 확률에 따라 자신이 클러스터 헤드가 될 것인지 클러스터 멤버가 될 것인지를 랜덤 방식으로 결정한다. 예를 들어, 0과 1사이의 난수를 발생함으로써 사전에 정해진 확률 값보다 작으면 클러스터 헤드로 선정되고, 확률 값 이상이면 클러스터 멤버가 된다. 그리고 선정된 클러스터 헤드는 자신이 클러스터 헤드임을 알리는 광고 메시지를 주변 노드에게 방송(broadcast)한다. 이웃 노드들은 수신한 광고 메시지의 RSSI 정보를 기반으로 수신 신호 강도가 가장 강한 광고 메시지를 전송한 노드를 클러스터 헤드로 선정함으로써 클러스터가 형성된다. 그 후 클러스터 헤드는 자신이 관리할 멤버 노드의 정보를 기초로 TDMA (Time Division Multiple Access) 스케줄을 작성하여 구성원 노드에게 알린다.

두 번째 단계인 안정 상태(steady state) 단계에서 클러스터 멤버는 설정된 TDMA 스케줄에 따라서 클러스터 헤드와 통신하고 자신에게 할당된 타임 슬롯(time slot)이 지나면 슬립(sleep) 상태로 들어가게 된다. 클러스터 헤드는 멤버 노드로부터 수신한 센싱 데이터를 병합한 후 싱크 노드에게 전달한다. 클러스터를 구성하는데 소모하는 에너지를 줄이기 위해서 센싱 데이터를 여러 번 전송한 후에 다시 클러스터를 구성한다. 그리고

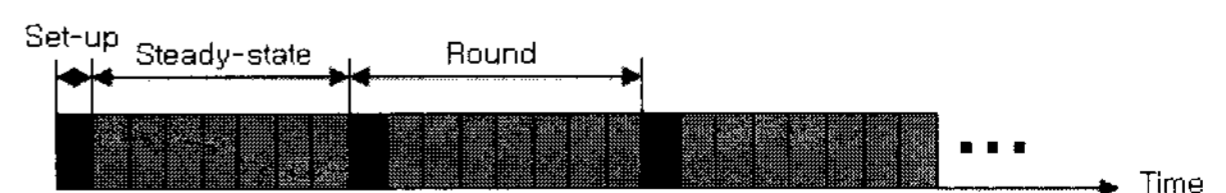


그림 1. LEACH 프로토콜  
Fig. 1. LEACH Protocol.

이 과정을 계속 반복하면서 클러스터링과 라우팅이 이루어진다. 즉 라운드마다 랜덤 방식으로 새로운 클러스터 헤드가 결정되고 더불어 멤버쉽도 새롭게 형성된다.

### III. 에너지 효율적인 데이터 수집을 위한 출력 제어 기법

본 연구는 유비쿼터스 센서 네트워크 시스템인 ZigbeX 플랫폼에서 운용되는 변형 LEACH 프로토콜에서, 센서 노드의 전송 출력 제어를 통하여 데이터 수집 과정에서 소모되는 에너지를 절약하는 새로운 기법을 제안하여 구현하고 실험 및 측정을 통하여 성능 개선 효과를 입증한다.

ZigbeX 플랫폼에서 운용되는 변형 LEACH 프로토콜의 기본적인 동작은 LEACH 프로토콜<sup>[6~7]</sup>과 같다. 라운드가 시작하면 먼저 셋업 단계가 진행되는데 이때 클러스터 헤드가 확률적인 랜덤 방식으로 결정되고 각 센서 노드는 RSSI 값에 따라 자신의 클러스터 헤드를 지정한다. 이후 안정 상태(steady state) 단계에서 각 센서 노드는 데이터를 자신의 클러스터 헤드에게 전송하고 클러스터 헤드는 멀티 홉 통신 방식에 따라 최종적으로 싱크 노드에게 전달된다. 하지만, LEACH 프로토콜에 비해 세 가지의 점에서 차이가 있다. 첫째, 클러스터 헤드에서 데이터 병합이 일어나지 않는다. 둘째, 클러스터 헤드는 데이터를 싱크 노드로 직접 보낼 수 없을 경우 클러스터 헤드간 멀티 홉 통신 방식으로 전송한다. 셋째, LEACH에서 클러스터 헤드는 확률적인 랜덤 방식으로 선정되기 때문에 어느 클러스터 헤드에도 연결되지 않는 노드가 존재할 가능성이 있다. 이와 같은 노드는 데이터를 싱크에게 전달하지 못하게 된다. 단절된 센서 노드는 이웃 노드가 클러스터 헤드에게 전송하는 것을 감지하면, 해당 이웃 노드에게 클러스터 헤드가 되어줄 것을 요청하여 단절을 극복한다.

ZigbeX 무선 센서 네트워크 플랫폼에서 운용되는 변형 LEACH 프로토콜은 항상 최대 출력으로 통신을 하기 때문에 불필요한 에너지 소모가 발생하게 된다. 본 연구에서는 센서 노드에서 클러스터 헤드로 데이터를 전송하는 과정에서 RSSI 정보를 이용하여 송신 출력을 적절한 수준으로 낮추어 에너지를 절약하게 된다. 클러스터 헤드는 항상 최대 출력으로 패킷을 전송한다. 클러스터 헤드의 송신 출력을 조절하려면 클러스터를 구성하는 모든 멤버 노드가 수신할 수 있는 적정한 출력 값을 파악해야 하는데, 이 과정은 별도의 오버헤드를

유발하게 되기 때문이다. 각 멤버 노드는 클러스터 헤드로부터 수신한 패킷의 RSSI 값을 기반으로 하여 자신의 송신 출력을 조절한다. 즉 자신이 전송한 패킷을 클러스터 헤드가 안전하게 수신할 수 있는 적정 수준으로 출력을 낮춤으로써 에너지를 절약하게 된다.

그림 2에서 S는 싱크 노드이고 2번 노드는 클러스터 헤드이고 1번 노드는 멤버 노드이며, 실선은 각 노드의 최대 전송 범위이고 점선은 1번 멤버 노드의 조절된 출력에 의한 전송 범위를 나타낸다. 즉 멤버 노드의 전송 범위가 R에서 R'로 감소하게 된다. 클러스터 헤드인 2번 노드는 항상 최대 출력으로 패킷을 전송한다. 1번 노드는 2번 노드로부터 수신된 RSSI 값을 기반으로 최대 출력에서 얼마만큼 줄여도 2번 노드가 수신 가능할 것인지 결정하고, 이후 조절된 출력으로 데이터를 전송한다. 그림 2에는 하나의 멤버 노드만 나타나 있지만 실제로는 하나의 클러스터에 다수의 멤버 노드가 존재하므로, 멤버 노드의 송신 출력 제어는 전체 네트워크 시스템의 에너지 절약에 크게 기여하게 된다. 또한, 클러스터 헤드는 매 라운드마다 확률적인 랜덤 방식으로 다시 선정하게 되므로 특정 노드가 장시간 클러스터 헤드 역할을 수행하지 않는다. 따라서, 에너지 절약 효과는 특정 노드에게 국한되는 경우가 없이 전체 노드에 골고루 효과를 미치게 되어 결과적으로 네트워크 수명을 연장시키게 된다.

노드간의 RSSI 정보는 Zigbex 센서 노드에서 거리에 따라 반복 측정된 데이터를 작성하였고 거리가 멀어짐에 따라 RSSI 값이 작아지는 현상을 확인하였다. 그림 3은 서로 다른 거리에 대해 15회 측정하여 평균값을 나타낸 것으로서 1m와 3m의 측정값에 커다란 차이가 없는 것을 볼 수 있다. 전송 거리가 매우 짧은 경우에는

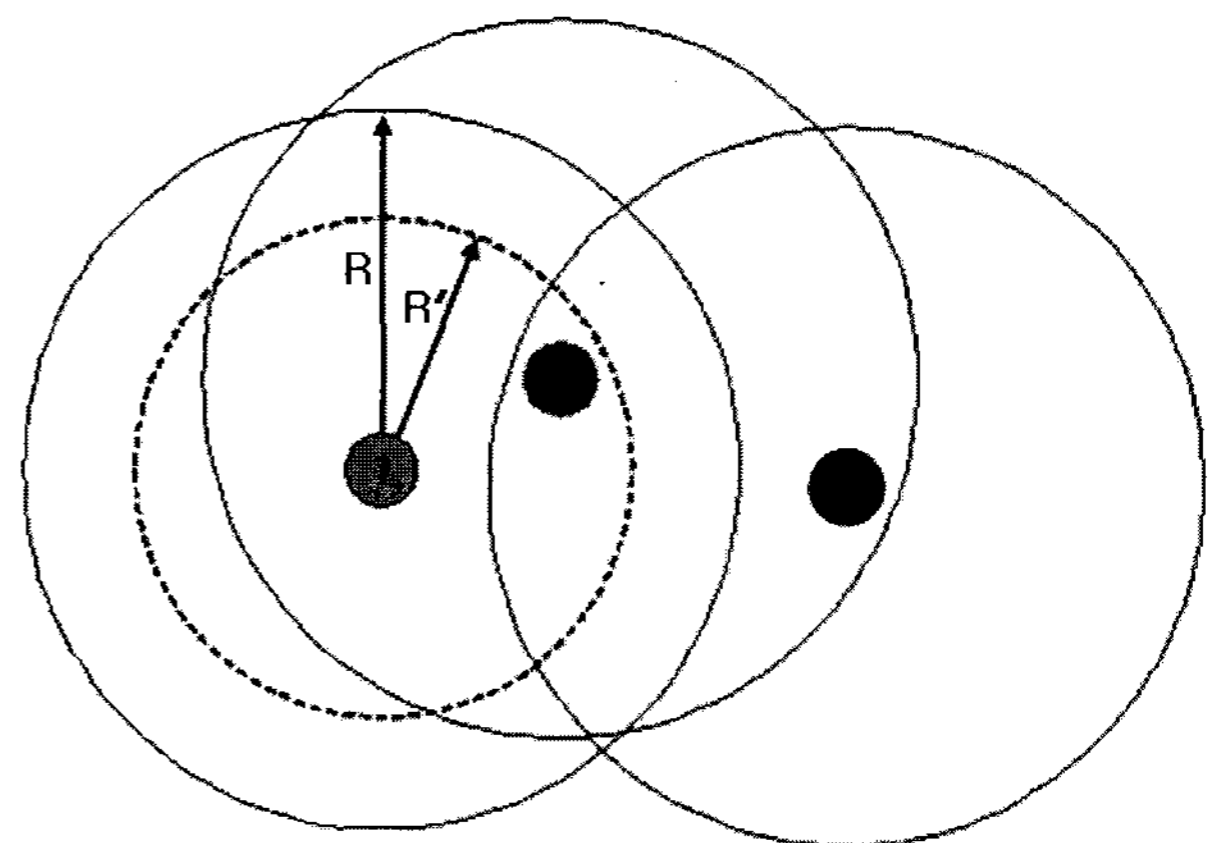


그림 2. 멤버 노드의 송신 출력 제어  
Fig. 2. Transmission power control of a member node.

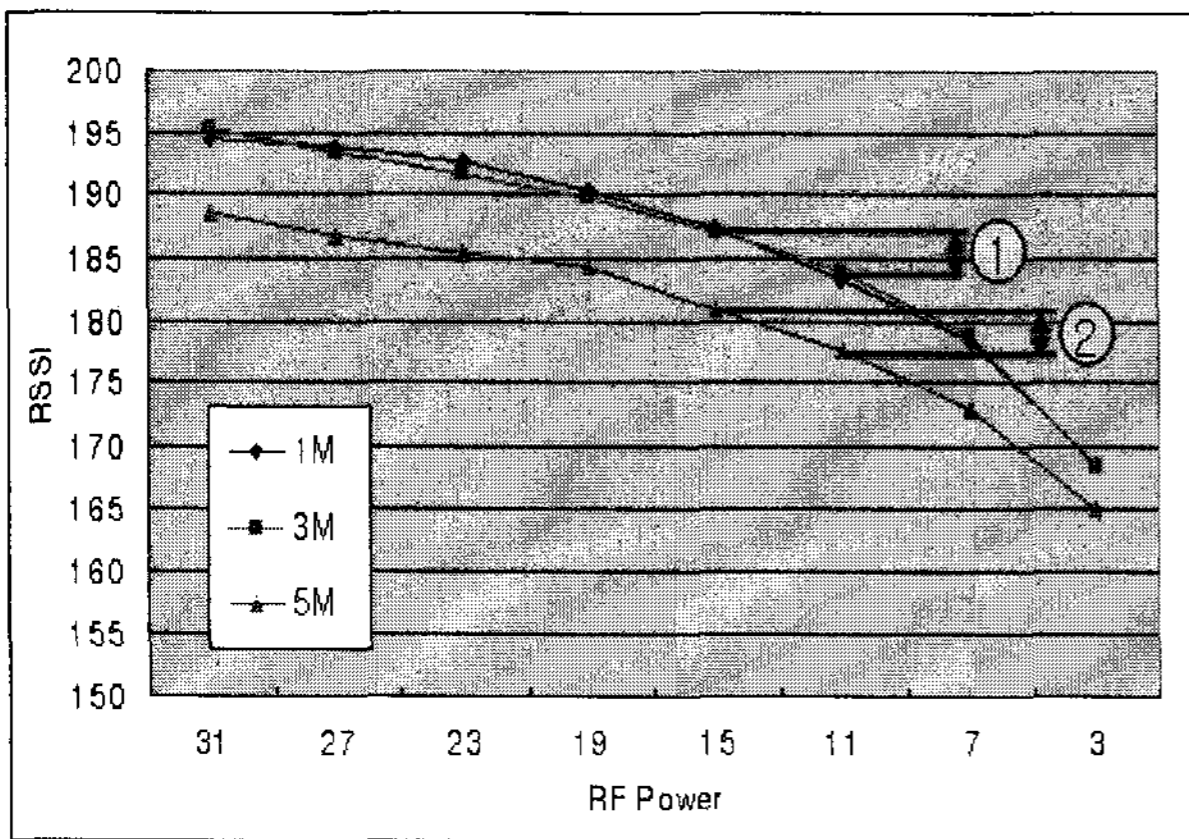


그림 3. 거리에 따른 RSSI 값  
Fig. 3. RSSI measured at different distance.

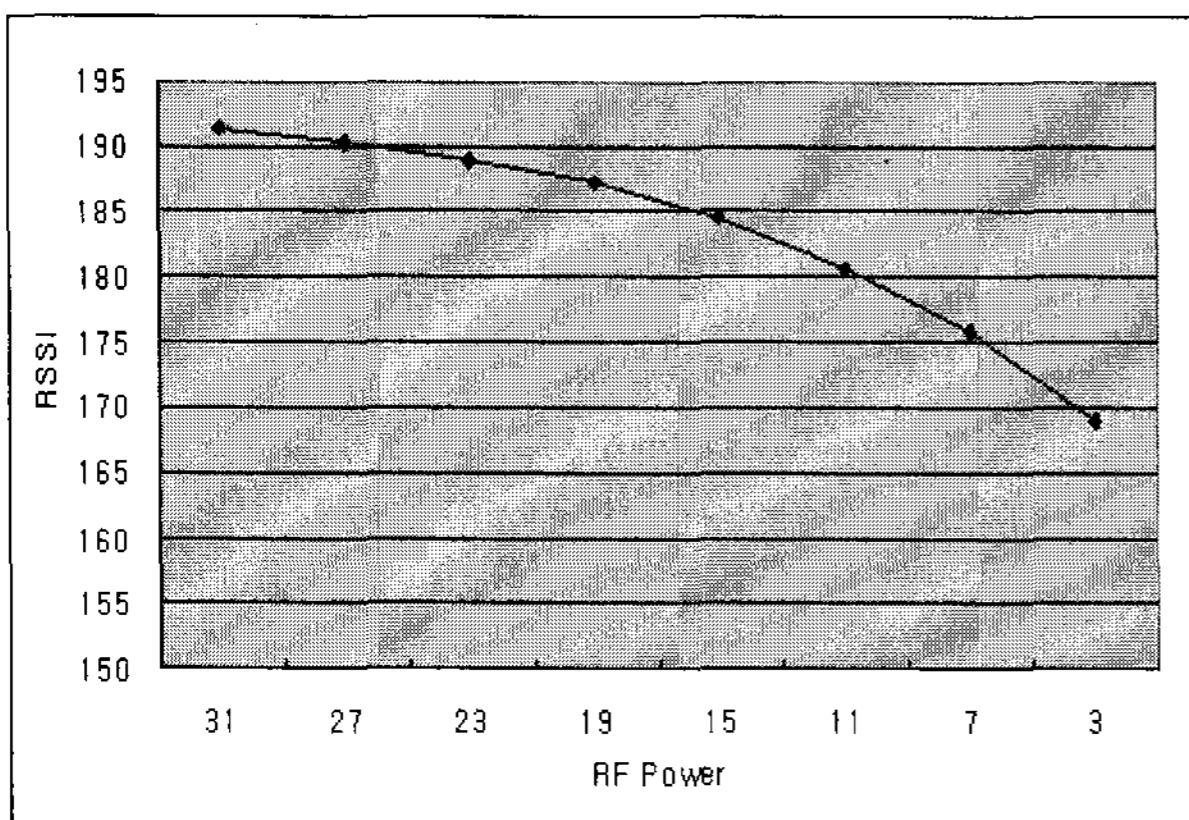


그림 4. 송신 출력과 RSSI 값의 상관관계  
Fig. 4. Correlation of transmission power and RSSI.

출력 감쇄가 크지 않을 뿐만 아니라 송수신 노드의 잡음 및 주변 환경의 영향에 민감하여 큰 차이를 보이지 않고 있다. 그림 3에서 주목할 점은 출력 변화에 따른 RSSI 값 차이가 전송 거리에 별 영향을 받지 않고 거의 일정하다는 것이다. 예로서 그림 3에서 ①과 ②의 값이 거의 같음을 알 수 있다. 다른 구간에서도 출력 변화에 따른 RSSI 값의 차이는 일정하게 나타난다. 따라서, 거리가 달라지거나 환경이 변하여도 곡선의 형태는 일정하다는 결론을 내릴 수 있다. 측정 횟수를 80회로 늘려 측정한 데이터를 평균한 곡선이 그림 4에 도시되어 있다. 이 RSSI 값을 기준으로 클러스터 멤버 노드의 송신 출력을 조절한다.

그림 5는 각 멤버노드가 클러스터 헤드로부터 수신한 패킷의 RSSI 값을 이용하여 자신의 송신 출력을 얼마로 제어할 것인지 결정하는 알고리즘을 나타낸다. 그림 5에 나타난 바와 같이 각 멤버 노드는 자신의 송신 출력을 클러스터 헤드로부터 수신한 패킷의 RSSI에 대응하는 값으로 조절한다. 그리고 보정된 출력으로 데이

```
uint16_t rssi_data[8] = {191, 190, 189, 187, 184, 180, 176, 169};
correction_data = rssi_data[0] - parentRSSI;
if( rssi_data[1] - correction_data < 175 ) {
    call CC2420Control.SetRFPower(31);
} else if( rssi_data[2] - correction_data < 175 ) {
    call CC2420Control.SetRFPower(27);
} else if( rssi_data[3] - correction_data < 175 ) {
    call CC2420Control.SetRFPower(23);
} else if( rssi_data[4] - correction_data < 175 ) {
    call CC2420Control.SetRFPower(19);
} else if( rssi_data[5] - correction_data < 175 ) {
    call CC2420Control.SetRFPower(15);
} else if( rssi_data[6] - correction_data < 175 ) {
    call CC2420Control.SetRFPower(11);
} else if( rssi_data[7] - correction_data < 175 ) {
    call CC2420Control.SetRFPower(7);
} else {
    call CC2420Control.SetRFPower(3);
}
```

그림 5. 클러스터 멤버 노드에서의 출력 제어 알고리즘  
Fig. 5. Power control algorithm at cluster member nodes.

터를 클러스터 헤드로 전송함으로써, 각 멤버 노드로부터 클러스터 헤드로 데이터를 전송하는 과정에서 에너지를 절약하게 된다.

#### IV. 구현 및 성능 평가

본 절에서는 제안한 전송 출력 제어 알고리즘을 nesC 언어<sup>[17]</sup>로 구현한 결과, 성능 측정을 위한 센서 네트워크의 구성과 실험 환경, 그리고 실험 결과를 분석하여 제안한 전송 출력 제어 기법의 성능 개선 효과를 기술한다.

##### 1. 구현

본 논문에서 제안한 전송 출력 제어 기법의 성능을 평가하기 위해 (주)한백전자의 ZigbeX 플랫폼<sup>[18]</sup> 상에서 프로토콜을 구현하였다. 구현은 nesC 언어를 사용하여 ZigbeX 플랫폼에 포함되어 있는 변형 LEACH 프로토콜에 전송 출력 제어 알고리즘을 이식하고 센서 네트워크를 구성한 실장 실험으로 통하여 구현 기능을 검증한 후 성능 실험을 수행하였다. 아울러 구현 프로토콜의 동작을 확인하고 성능을 보다 효과적으로 측정하기 위한 목적으로 서버에 별도의 패킷 분석기를 구현하여 활용하였다. ZigbeX 플랫폼은 센서 네트워크 시스템, 임베디드 시스템, RF (Radio Frequency) 시스템을 결합한 유비쿼터스 센서 네트워크 시스템으로서 일반 컴퓨터를 서버로 운용할 수 있다. 센서 노드에서

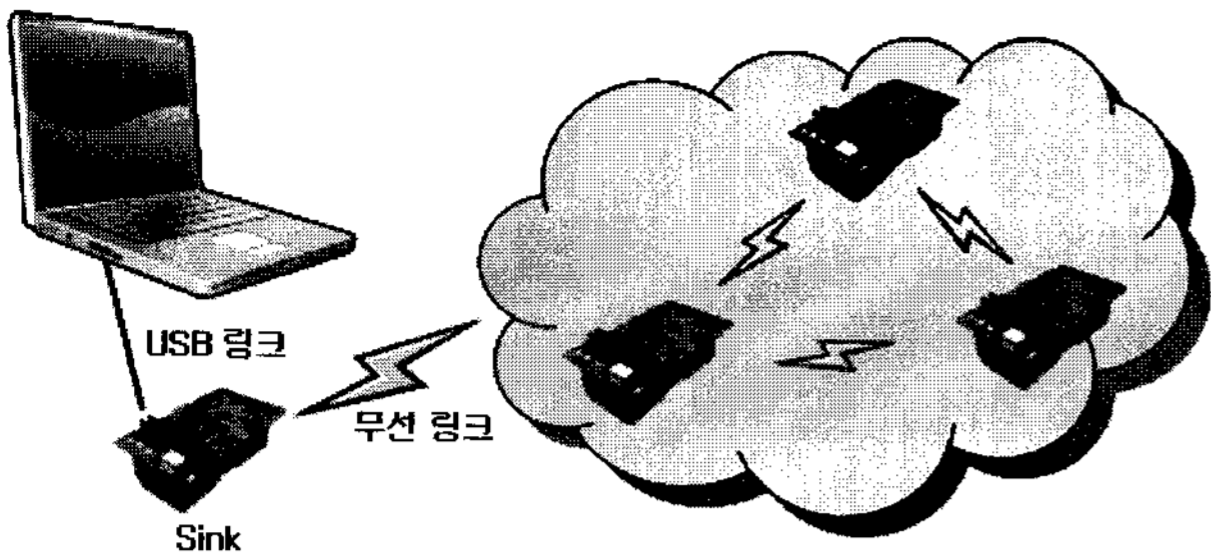


그림 6. ZigbeX 플랫폼 기반 센서 네트워크 구성도  
 Fig. 6. Sensor network configuration based on the Zigbex platform.

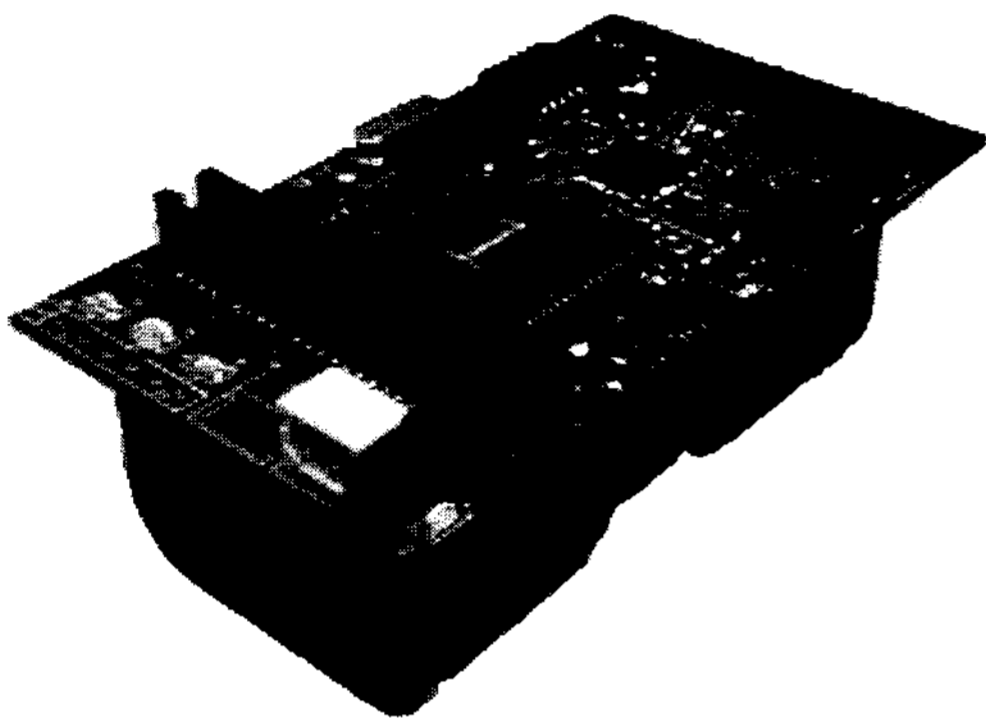


그림 7. 센서 노드  
 Fig. 7. Sensor node.

사용되는 임베디드 운영체제는 프로그램 크기가 작기 때문에 작은 센서 노드의 운용에 적합 TinyOS<sup>[19]</sup>가 사용되었다.

그림 6은 ZigbeX 플랫폼 기반으로 구성된 무선 센서 네트워크의 개념도를 나타낸다. 서버(그림 6에서의 노트북 컴퓨터)와 싱크 노드는 유선 USB (Universal Serial Bus) 링크로 연결되고, 센서 노드 상호간 또는 센서 노드와 싱크 노드 사이의 연결은 Zigbee 프로토콜에 따라 무선으로 연결된다. 그림 7은 센서 노드를 나타낸 것으로 싱크 노드, 클러스터 헤드 노드, 클러스터 멤버 노드 등 모든 노드가 동일하다.

2. 실험 환경

센서 네트워크 구성은 그림 8에 도시한 바와 같이, 싱크 노드(그림에서 S로 표기된 노드)를 제외하고 총 10개의 노드를 동일한 평면에 배치하였다. 그림 8에서 실선은 벽면을 나타내고 나머지 영역에는 장애물이 없는 자유 공간이다. 배터리를 완전히 충전한 상태에서 네트워크 가동을 시작하였다. 그림 8에서의 센서 노드 사이의 간격은 약 8미터이다.

그림 8의 네트워크 구성에서 ZigbeX 플랫폼에 기본

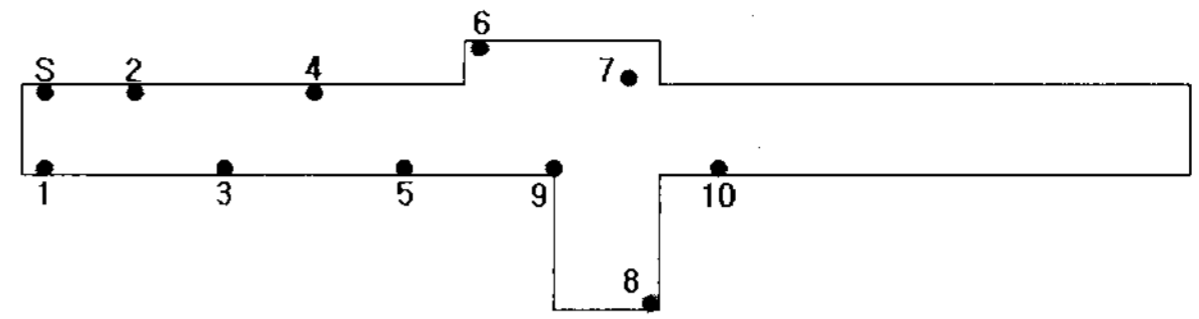


그림 8. 센서 네트워크 구성을 위한 센서 노드의 배치  
 Fig. 8. Arrangement of sensor nodes for sensor network configuration.

으로 포함된 변형 LEACH 프로토콜과 제안한 전송 출력 제어 알고리즘을 이식한 프로토콜을 수행하여 각각의 성능을 측정 비교하였다. 두 가지 경우 모두에 대하여 1라운드는 10분으로 설정하였다. 각각의 센서 노드는 10ms 및 20 ms의 측정 간격으로 주변 온도를 측정하여 싱크 노드로 보내도록 구현하였다.

3. 실험 결과

그림 9는 프로토콜의 동작과 기능을 확인하고 성능을 효과적으로 측정하기 위하여 자체적으로 구현한 패킷 분석기를 이용하여 성능 측정 실험을 수행하는 모습을 나타낸다. 서버에 자체 구현한 패킷 분석기를 이용함으로써 각 센서 노드로부터 패킷이 전송되는 상황을 실시간으로 확인할 수 있고 노드별 에너지 고갈 시점을 정확하게 파악할 수 있다.

그림 10은 ZigbeX 플랫폼에 기본으로 포함된 변형 LEACH 프로토콜과 제안한 전송 출력 제어 알고리즘을 이식한 프로토콜을 각각 측정 간격을 달리 수행하여 실험한 결과를 나타낸다. 즉 완전 충전한 배터리를 사용하여 센서 네트워크를 운용을 시작한 후 시간 경과에 따른 생존 노드의 수를 보여준다. 그림 10의 그래프에 나타난 바와 같이 ZigbeX 플랫폼에 기본으로 포함된 변형 LEACH 프로토콜을 10ms로 수행한 경우에는

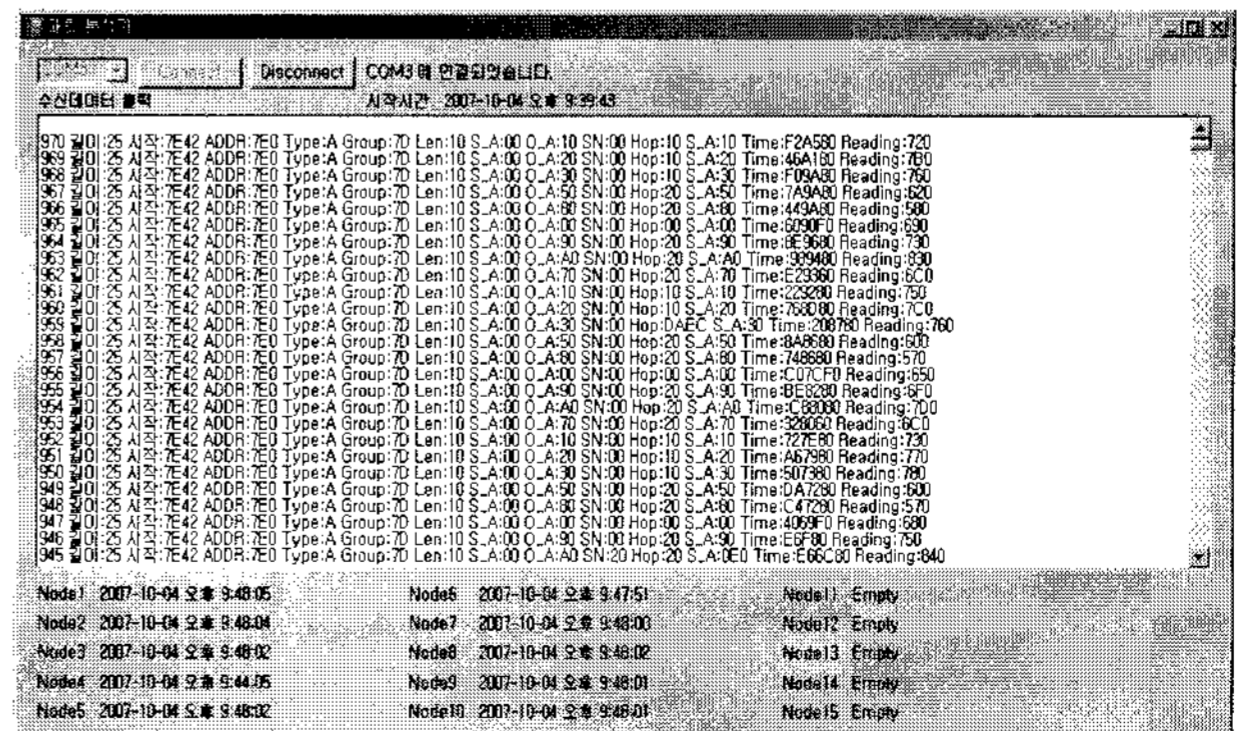


그림 9. 자체 구현한 패킷 분석기의 성능 측정 화면  
 Fig. 9. Performance measurement using the packet analyzer developed.

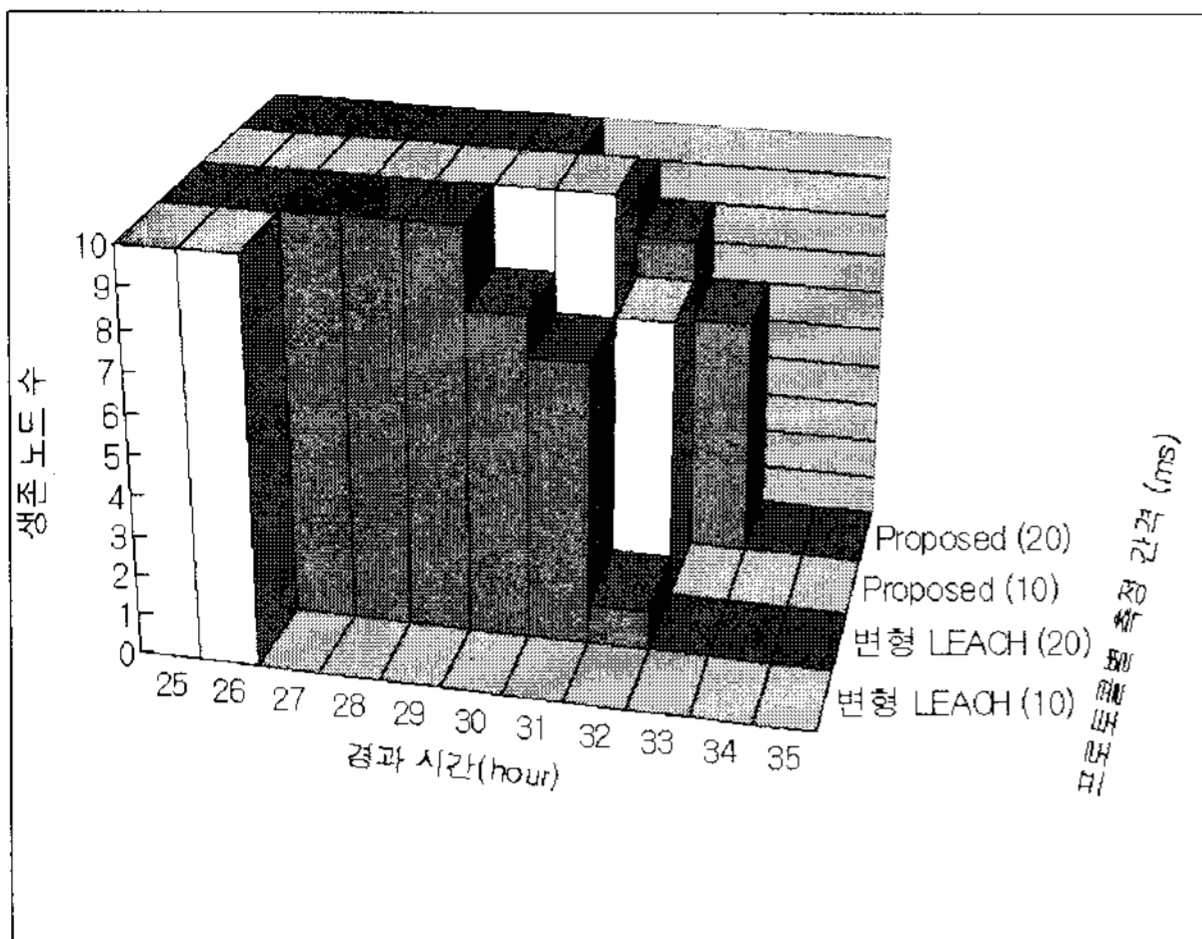


그림 10. 경과 시간과 측정 간격에 따른 생존 노드 수  
Fig. 10. Number of operational nodes along with elapsed time for different sensing interval.

26시간이 지나면서 에너지가 고갈된 노드가 나타나기 시작하고 27시간이 경과하면서 모든 노드의 에너지가 고갈되었다. 반면에 제안한 전송 출력 제어 알고리즘을 이식한 프로토콜을 10ms으로 수행한 경우에는 32시간이 지난 후에 최초로 에너지가 고갈된 노드가 나타나기 시작하고 33시간이 되어 모든 노드의 수명이 다한 것을 볼 수 있다. 그리고 변형 LEACH 프로토콜을 20ms으로 수행한 경우에는 29시간이 지나면서 에너지가 고갈된 노드가 나타나기 시작하고 32시간이 경과하면서 모든 노드의 에너지가 고갈되었다. 반면에 제안한 전송 출력 제어 알고리즘을 이식한 프로토콜을 20ms으로 수행한 경우에는 30시간이 지난 후에 최초로 에너지가 고갈된 노드가 나타나기 시작하고 33시간이 되어 모든 노드의 수명이 다한 것을 볼 수 있다. 결과적으로 제안한 전송 출력 제어 알고리즘을 기반으로 센서 네트워크를 운용하면 데이터 수집 과정에서의 에너지가 절약됨으로써, 주어진 ZigbeX 무선 센서 네트워크 실험 환경에서 네트워크 수명이 5.5 ~ 21.9% 연장됨을 확인할 수 있었다.

측정 간격이 증가하면 개선 정도가 작아지는 이유는 네트워크 시스템의 전체 소비 에너지에서 데이터 수집 과정에 소비된 에너지의 상대적 비율이 작아지기 때문이다. 즉, 측정 간격을 10ms에서 20ms로 증가시키면, 데이터 수집 빈도가 반으로 줄어들게 되므로 데이터 수집 과정에 소비된 에너지 역시 감소하게 되는 것이다. 반대로, 측정 간격을 줄이게 되면 측정 빈도와 함께 전송 빈도가 증가하여 데이터 수집 과정에 소비된 에너지가 증가하게 된다. 따라서 본 논문에서 제안한 기법은

측정 간격을 줄여 측정 빈도를 높게 할수록 더욱 우수한 수명 연장 효과를 얻을 수 있다.

### V. 결 론

애드혹 네트워크 특히 센서 네트워크에서 물리 계층에서 라우팅 계층에 이르는 크로스 레이어 설계 및 최적화 연구는 전송 성능과 신뢰도 개선은 물론 에너지 절감에도 매우 유용한 방법론으로 받아들여지고 있다. 본 논문에서는 센서 노드의 전송 출력 제어를 통하여 데이터 수집 과정에서 소모되는 에너지를 절약하는 새로운 기법을 제안하여 ZigbeX 무선 센서 네트워크 플랫폼 상에서 구현하고 실험 및 측정을 통하여 성능 개선 효과를 입증하였다. 제안한 기법에서 클러스터 멤버를 구성하는 각 센서 노드는 클러스터 헤드로부터 수신한 패킷의 RSSI 값을 기반으로 하여 자신의 송신 출력을 클러스터 헤드가 안전하게 패킷을 수신할 수 있는 적정 수준으로 낮춤으로써 에너지를 절약하게 된다. 성능 실험 결과에 의하면, 제안한 전송 출력 제어 알고리즘을 이식한 프로토콜이 ZigbeX 플랫폼에 기본으로 포함된 변형 LEACH 프로토콜보다 데이터 수집 과정에서의 에너지가 절약되어 네트워크 수명이 최대 21.9% 증가하였다.

앞으로의 연구에서는 LEACH 이외의 다양한 라우팅 프로토콜에 적합한 최적의 전송 출력 제어 기법을 도출하고 비교 평가할 예정이다. 아울러 RSSI 값뿐만 아니라 SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) 등 다양한 전송 파라미터를 기반으로 전송 출력을 효과적으로 제어하는 새로운 알고리즘을 고안하고자 한다.

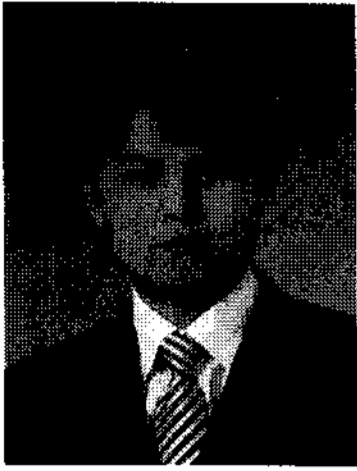
### 참 고 문 헌

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," IEEE Communications Mag., Vol. 40, No. 8, pp. 102-114, Aug. 2002.
- [2] K. Akkaya and M. Younis, "A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks," Ad Hoc Networks, Vol 3, pp. 325-349, 2005.
- [3] 임홍식, 김건욱, "전송전력 최적화를 통한 센서네트워크의 효율적인 에너지관리에 대한 연구," 전자공학회 논문지, 제44권 CI편, 제3호, 37-42쪽, 2007년 5월

- [4] 박재홍, 류경식, 김용득, “무선 센서 네트워크에서의 S-MAC 기반의 에너지 효율적인 MAC 프로토콜,” 전자공학회 논문지, 제44권 CI편 제2호, 19-24쪽, 2007년 3월
- [5] P. C. Nar and E. Cayirci, “PCSMAC: A Power Controlled Sensor-MAC Protocol for Wireless Sensor Networks,” Proc. of 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks, pp. 81-92, Jan. 31 - Feb. 2, 2005.
- [6] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks,” IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 1, Issue 4, pp. 660-670, Oct. 2002.
- [7] 최진철, 이채우, “클러스터 기반 센서 네트워크의 에너지 모델링 기법,” 전자공학회 논문지, 제44권 CI편, 제3호, 14-22쪽, 2007년 5월
- [8] D. Son, B. Krishnamachari, and J. Heidemann, “Experimental study of the Effects of Transmission Power Control and Blacklisting in Wireless Sensor Networks,” Proc. of IEEE Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, pp. 289-298, Oct. 4-7, 2004.
- [9] S. Narayanaswamy, V. Kawadia, R. S. Sreenivas, and P. R. Jumar, “Power Control in Ad Hoc Networks: Theory, Architecture, Algorithm, and Implementation of the COMPOW Protocol,” Proc. of European Wireless Conference, Feb, 2002.
- [10] 정상준, “무선 센서 네트워크에서의 비트맵 브로드캐스팅 라우팅 알고리즘,” 한국통신학회논문지, 제31권, 제5A호, 459-468쪽, 2006년 5월
- [11] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, “Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks,” Proc. of ACM MobiCom '00, pp. 56-67, 2000.
- [12] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, and F. Silva, “Directed diffusion for wireless sensor networking,” IEEE/ACM Transactions on Networking, pp. 2-16, Feb, 2003.
- [13] W. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan, “Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks,” Proc. 5th ACM/IEEE Mobicom Conference (MobiCom '99), pp. 174-8, August, 1999.
- [14] J. Kulik, W. R. Heinzelman, and H. Balakrishnan, “Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks,” Wireless Networks, pp. 169-185, 2002.
- [15] 김재현, 김석규, 이재용, “무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율성을 고려한 MAC/라우팅 프로토콜,” 전자공학회지, 제32권, 제7호, 57-73쪽, 2005년 7월
- [16] Y. Yu, D. Estrin, and R. Govindan, “Geographical and Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks,” UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR-01-0023, May, 2001.
- [17] D. Gay, P. Levis, R. V. Behren, M. Welsh, E. Brewer, and D. Culler, “The nesC Language: A Holistic Approach to Networked Embedded Systems,” In Proceedings of Programming Language Design and Implementation (PLDI) 2003, June 2003.
- [18] Hanback Electronics Co., Ubiquitous Sensor Network ZigbeX, <http://www.hanback.co.kr/htm/sub1.htm>, 2007.
- [19] TinyOS Community Forum, <http://www.tinyos.net/>, 2008.



저 자 소 개



**박 지 원**(학생회원)  
 2007년 조선대학교 컴퓨터공학과  
 학사 졸업.  
 2007년~현재 조선대학교 컴퓨터  
 공학과 석사과정.  
 <주관심분야 : WSN, MANET>



**정 일 용**(정회원)  
 1983년 한양대학교 공과대학  
 학사 졸업.  
 1987년 City University of New  
 York 전산학과 석사 졸업.  
 1991년 City University of New  
 York 전산학과 박사 졸업.  
 1991년~1994년 한국전자통신연구소 선임연구원.  
 1994년~현재 조선대학교 컴퓨터공학부 교수.  
 <주관심분야 : 네트워크보안, 전자상거래, 분산시  
 스템관리, 코딩이론, 병렬알고리즘, 모바일애드혹  
 네트워크>



**모 상 만**(평생회원)-교신저자  
 2002년 한국정보통신대학교(ICU)  
 공학부 박사 졸업.  
 1991년~2002년 한국전자통신  
 연구원(ETRI) 컴퓨터소프  
 트웨어연구소 팀장.  
 2002년~현재 조선대학교 컴퓨터  
 공학부 재직.

<주관심분야 : 모바일컴퓨팅, 애드혹네트워크, 센  
 서네트워크, 병렬분산컴퓨팅, 컴퓨터구조>



**배 용 근**(정회원)  
 1984년 조선대학교 컴퓨터공학과  
 학사 졸업.  
 1995년 원광대학교 대학원  
 전자공학과 박사 졸업.  
 <주관심분야 : 프로그래밍언어론,  
 마이크로프로세서응용>