

무선 센서 네트워크에서 통신 반경에 따른 에너지 효율적인 Cross Layer Protocol에 대한 연구

준회원 김 현 서*, 정회원 정 원 수*, 종신회원 윤 찬 영**, 정회원 오 영 환*

A Research on a Cross Layer Protocol with Communication Radius in Wireless Sensor Networks

Hyun-Seo Kim* Associate Member, Won-Soo Jung* Regular Member,
Chan-Young Yun** Lifelong Member, Young-Hwan Oh* Regular Member

요 약

본 논문에서는 제한된 에너지(Energy)를 갖는 센서 노드(sensor node)들로 구성된 센서 네트워크(network)에서 송신 전력에 따른 통신 반경을 구성하여 효율적 에너지 관리를 위한 Cross Layer 프로토콜(Protocol)을 제안한다. 성능평가는 기존에 통신 반경 알고리즘(Algorithm)으로 사용되었던 GAF(Geographical adaptive fidelity)와 비교하였으며, 성능평가의 파라미터(Parameter)로 송신 전력에 따른 에너지 소모율과 통신 반경을 사용하였다. 통신 반경은 시뮬레이션(simulation)을 사용한 이론값과 IEEE 802.15.4를 지원하는 Chipcon사의 CC2420을 적용한 한백전자의 ZigbeX Mote를 사용하여 실측하였다. 또한, 송신 전력으로 인한 노드 간 지연 여부도 측정하였다. 성능평가 결과, 제안한 알고리즘은 기존에 제안된 GAF 알고리즘보다 높은 에너지 효율을 보였다. 네트워크 구성 초기 및 30 개 이하의 적은 노드로 구성 시 기존 알고리즘의 에너지 효율이 약간 더 높았으나, 다수의 노드로 구성되고 긴 시간 사용되는 센서 네트워크 환경에서는 네트워크 생존 시간에 큰 영향을 미치지 못하기 때문에 보다 효율적인 네트워크 사용이 가능하다.

Key Words : IEEE 802.15.4, Wireless Sensor Network, Zigbee, Cross Layer Protocol

ABSTRACT

In this paper, we proposed energy efficient Cross Layer Protocol with communication radius which consider transmission power. We simulated the Cross Layer Protocol with the GAF (Geographical adaptive fidelity) which suggested communication radius algorithm before. Using the simulation parameter, communication radius and energy consumption rate by transmission power. We test ZigbeX Mote applied CC2420 which made by Chipcon and applied IEEE 802.15.4. Also, we test data transmission delay with transmission power. The performance evaluation results, The proposed algorithm shows that the energy efficiency is higher than the GAF algorithm that is proposed before. If we use under 30 node, the energy efficient of the existing GAF algorithm will be higher than the proposed algorithm. But, wireless sensor network operate long time and consist of many nodes. so, the problem is not a concerning. The proposed Cross Layer Protocol can prolong the network lifetime.

* 광운대학교 전자통신공학과 통신망연구실 (niinew@hanmail.net), ** 계원조형예술대학 임베디드소프트웨어과
논문번호 : 08013-0227, 접수일자 : 2008년 2월 27일

I. 서론

유비쿼터스 컴퓨팅(Ubiquitous Computing)환경에서 가장 각광받는 기술 중 하나인 무선 센서 네트워크(Wireless sensor network)는 유무선 네트워크 인프라에 상황인지를 위한 센서 디바이스(sensor device)를 결합하여 감지된 환경 데이터(Data)를 응용 서비스 서버(service server)와 연동하는 기술이다^{[1][2]}. 센서 노드는 배터리(battery)를 사용하는 저전력 저가의 시스템(System)으로 에너지 사용에 제약 받으며 배터리가 소모되어 노드의 동작이 멈추면 더 이상 네트워킹의 수단으로 사용될 수 없다. 따라서 무선 센서 네트워크는 노드에 사용되는 전력의 사용을 효율적으로 하여 네트워크의 생존시간(Lifetime)을 최우선으로 생각한다^{[1][2][3]}.

무선 센서 네트워크는 2.4GHz의 주파수 대역을 사용하고 있으며, Zigbee는 센서 네트워크의 기본 기술로 사용되고 있다^[4]. 센서 네트워크 MAC(Media Access Control) 계층(Layer)에서는 무선 계층의 에너지 소모를 줄이기 위해 가장 에너지 소모가 큰 영역인 라디오(Radio)에 대한 연구를 진행하고 있다. 센서 노드의 상태를 Sleep과 Active 상태로 구분하여, 센서 노드가 데이터 전송을 하지 않을 경우 라디오에 사용되는 불필요한 전원에 따른 에너지 소비를 줄이는 방안에 대해 연구가 활발히 이루어지고 있다. 하지만 라디오가 사용되는 시점에서 에너지 소모가 가장 큰 요소인 송신 전력에 대한 연구는 기존의 대다수 시스템의 경우와 같이 고정된 송신 전력에 의한 고정된 반경을 사용하고 그에 따른 스케줄링 기법이 중점이고 센서 네트워크 역시 고정된 반경의 시스템 위주의 사용을 중점으로 두고 있기에 고려되고 있지 않았다.

무선 센서 네트워크의 네트워크 계층에서는 기존 무선 네트워크처럼 IP 기반의 데이터 통신이 아닌 전송패킷에 포함된 목적지 노드의 주소에 의존하여 수신 노드까지 데이터가 전달되는 데이터 중심(Data Centric)이다. 네트워크를 구성하는 노드는 데이터 수신 후 자신의 패킷(Packet)인지 판별하여 응답하거나 재전송하기 때문에 이로 인한 중복 데이터의 발생으로 에너지 소모를 야기 시킨다. 이를 방지하기 위해 평면기반, 클러스터기반 그리고 위치 기반 등 에너지 효율적인 라우팅(Routing) 프로토콜들이 제안되어 왔다^{[6][7][8]}.

Zigbee는 MAC과 PHY(Physical) 계층을 IEEE

802.15.4 프로토콜로 표준화했으며 이는 네트워크 계층과 Application 계층의 표준화를 진행하는 Zigbee Alliance와 독립적으로 에너지 효율적인 프로토콜에 대한 연구를 진행하였다.^[9] 독립적으로 개발된 네트워크 계층 및 MAC 계층의 에너지 효율적인 프로토콜은 상호 호환에 문제점을 나타내었으며, 결국 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 데이터 전송방식으로 MAC 계층에 의존하고 있다.

네트워크 계층 간 상호 호환을 위하여 무선 센서 네트워크에서는 Cross Layer 프로토콜에 대한 연구가 진행 중에 있다^{[9][10]}.

본 논문에서는 MAC과 네트워크 계층을 하나의 프로토콜 스택으로 구성하는 Cross Layer 프로토콜을 제안한다. MAC 계층의 기능으로 네트워크의 모든 노드들이 고정된 송신 전력에 의한 통신 반경 내의 이웃 노드 선출이 아닌 멀티 홉에 적합한 이웃 노드와 효율적으로 링크를 구성할 수 있는 송신 전력을 사용하여 통신 반경을 구성하였다. 네트워크 계층의 기능으로는 MAC에서 설정한 이웃 노드와의 송신 전력을 바탕으로 설정된 링크를 이용하여 단일 경로 기반의 효율적인 멀티 홉(Multi-Hop) 통신 방식을 사용하였다. 제안한 알고리즘의 성능평가를 위해 기존 통신 반경을 고려한 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜인 GAF와 에너지 소모율을 비교하였으며, 실측된 데이터와 유럽 전파 통신 위원회인 ERO (European Radiocommunication Office)에서 개발한 Seamcat 시뮬레이터(Simulator)를 사용하여 성능을 비교하였다^{[10][11][12][13][14]}.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 무선 센서 네트워크에서의 에너지 관리 동향, S-MAC(Sensor-MAC) 프로토콜과 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜 그리고 Cross Layer 프로토콜에 대한 관계이론을 기술하고 제 3장에서는 제안한 에너지 효율적인 Cross Layer 프로토콜의 구성 및 동작과정에 대해 소개한다. 4장에서는 제안한 프로토콜의 성능평가를 수행하고 결과에 따른 비교 및 고찰을 기술한다. 마지막으로 제 5장에서 결론을 맺는다.

II. 관계이론

2.1 무선 센서 네트워크 에너지 관리 동향

무선 센서 네트워크는 주변 현상이나 이벤트(Event)를 발견하는 동시에 정보의 수집 및 이벤트의 처리 그리고 정보를 원하는 사용자에게 센싱

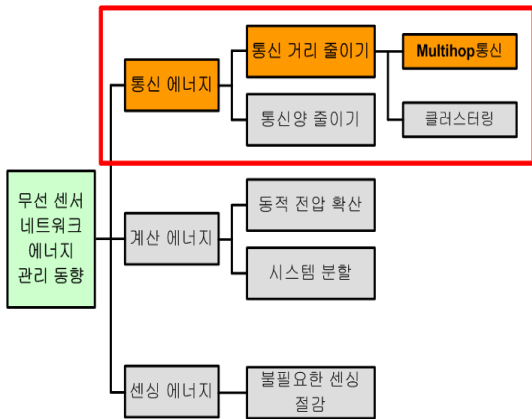


그림 1. 센서 네트워크 에너지 관리 동향
Fig. 1. Power Control Techniques in Wireless Sensor Network

(Sensing)된 정보의 전달을 목적으로 하는 네트워크로 정의되어 있다. 센서 네트워크는 적은 크기의 메모리(Memory)와 낮은 능력의 프로세스(Process), 그리고 제한된 에너지로 무선 채널을 통한 통신 기능을 가진 센서 노드로 이루어져 있다.

그림 1은 센서 네트워크에서 에너지 소모를 줄이기 위한 기술 개발 동향을 나타내고 있다.

센서 네트워크는 기존 무선 네트워크의 트래픽(Traffic), 최단경로, 지연 등의 문제와는 달리 에너지 소모 문제가 가장 큰 이슈(issue)이다. 배터리 소모를 다한 노드로 인하여 토폴로지(Topology)가 바뀌게 되면 토폴로지 변화로 인한 전체 네트워크의 에너지 소모와 기능 마비 문제를 일으킬 수 있기 때문이다.

이중 가장 이슈화 되는 것은 센서 노드 간 통신에 불필요한 에너지를 방지하는 것과 통신에 필요한 에너지를 최소화 하는 것으로서 전체 네트워크의 효율적인 멀티 홉 통신에 대한 연구가 진행 중에 있다.

2.2 Zigbee

무선 센서 네트워크 노드는 Zigbee를 기반으로 동작한다. Zigbee는 IEEE 802.15.4 기반으로 하는 WPAN 기술로 높은 에너지 효율을 보이며 적은 비용으로 센서 네트워크를 구현하기에 최적의 방안을 제공하는 기술의 하나로 다양한 센서 네트워크 응용 분야에 대한 기술 개발이 이루어지고 있다.

Zigbee에서는 PHY 계층 및 MAC 계층을 IEEE 802.15.4 WPAN(Wireless Personal Area Networks)

기술을 사용하고 있으며, 네트워크 계층과 응용 계층과 같은 상위 계층에서의 프로토콜은 Zigbee Alliance에서 정의 하고 있으며, 그림 2는 정의된 Zigbee 시스템 구조를 보여주고 있다.

IEEE 802.15.4 표준규격에서는 868MHz(BPSK/1 채널/유럽), 902~928MHz(BPSK/10 채널/미국), 2.4GHz(OQPSK/16 채널/전 세계) 등 3개의 주파수 대역에서 DSSS 변조 방식으로 최대 100m까지 20~250Kbps의 전송 속도를 지원할 수 있도록 정의 하고 있다. 또한 주소에 64비트(bit)를 할당함으로써 최대 65,000개의 노드를 사용할 수 있으며, 액세스(Access) 방법으로 WLAN(Wireless Local Area Network)과 비슷한 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance)를 사용하며 QoS를 위해 GTS 메커니즘(Guaranteed Time Slot Mechanism)을 도입하고 있다. 또한 리피터(Repeater)를 사용해 네트워크를 수 km 이상으로 확장 가능함은 물론, Ad-Hoc, Star, Mash, Cluster 등의 다양한 토폴로지로 네트워크를 구성할 수 있다.

특히, Zigbee/802.15.4의 큰 장점은 Bluetooth, UWB(Ultra-wideband), WLAN 등의 에너지 소모량(200mW~1W)과 비교하여 평균 에너지 소비 수준이 50mW 정도로 낮은 수준으로 시스템의 수명이 최대 2~3년 정도까지 사용할 수 있는 장점을 가지므로 산업, 가정, 의료, 군사 등의 다양한 어플리케이션 영역에서 경쟁력 있는 단거리 무선통신 기술로 각광을 받을 전망이다.

IEEE 802.15.4 MAC은 가입(Association) 및 탈퇴(Disassociation)를 지원하고 Ack 프레임(Frame)

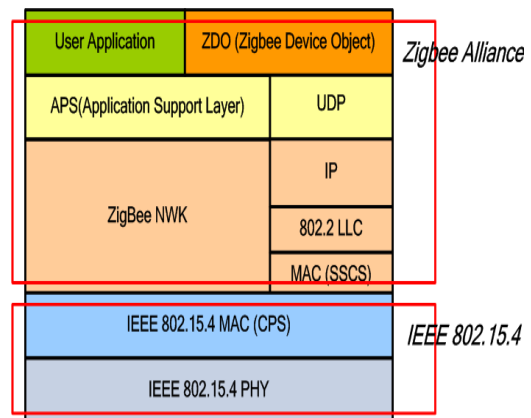


그림 2. Zigbee 프로토콜 스택 구조
Fig. 2. Zigbee protocol stack structure

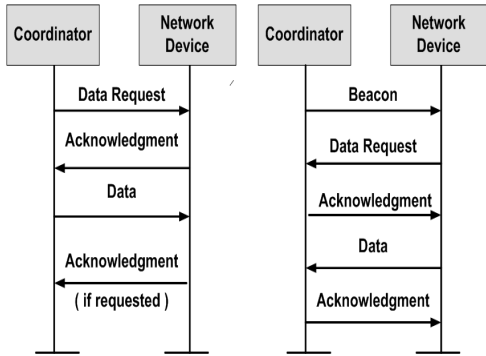


그림 3. IEEE 802.15.4 데이터 송수신 과정
Fig. 3. IEEE 802.15.4 data transmission process

을 사용하며 프레임 유효성 검사 및 GTS 사용을 지원하며 비컨(Beacon) 관리 등의 특징을 가지며 16비트 Short Address와 64비트 Extended Address를 사용한다. 그림 3은 IEEE 802.15.4의 데이터 송신 및 수신 과정을 나타내고 있다.

2.3 에너지 효율적인 라우팅 프로토콜

무선 센서 네트워크는 다수의 노드로 구성되어지며, 노드의 이동성 및 손실에 따른 토폴로지 정보의 변화에 따른 루트(route) 정보를 갱신해야 한다. 이러한 작업은 데이터 전송과 직접적 관련이 없는 에너지 소모를 발생시킨다. 무선 센서 네트워크는 전송거리가 제한된 노드들이 원거리에 위치한 노드와 통신을 하기 위해서 멀티 홉 통신방식을 기본 전제로 라우팅을 수행한다. 센서 노드는 제한된 용량의 배터리를 사용하기 때문에 에너지 상태를 고려한 통신이 필요하다.

무선 센서 네트워크의 네트워크 계층의 라우팅 프로토콜은 데이터나 제어 패킷의 중복전송을 피하는 방법, 노드의 에너지 상태를 파악하여 루트 정보를 갱신하는 방법 등이 연구 대상이다. 무선 센서 네트워크 라우팅 프로토콜은 평면(Flat)기반, 클러스터(Cluster) 기반 그리고 위치(Location)기반으로 분류할 수 있다.

평면 기반은 기본적으로 싱크(Sync)가 데이터를 얻고자 할 때 네트워크에 원하는 데이터가 무엇인지를 알리고 데이터를 얻어오는 On-demand 방식의 프로토콜이다. 이러한 특징은 데이터 병합(Aggregation)과 저장(Caching) 특성을 요구한다. SPIN(Sensor Protocols for Information via Negotiation), Directed Diffusion, Rumor 라우팅 등이 평면 기반 라우팅에 속한다.

클러스터 기반 라우팅 기술은 센서 네트워크의 밀집된 많은 노드를 지역적으로 여러 개의 단위로 묶어 관리하여 전체적으로 통신에 사용하는 에너지를 균등하게 할당할 수 있다는 장점이 있다. Leach, Leach-C 프로토콜이 대표적인 클러스터 라우팅 프로토콜이다.

위치기반 라우팅 기술은 노드의 지리적인 위치 정보를 이용하여 라우팅을 하는 기술이다. 위치기반 기술을 이용하면 라우팅이 용이하고, 빈번한 네트워크 토폴로지의 변화에 적응하기 쉬우며, 각각의 노드는 자신의 이웃 노드의 정보만 유지하고, 네트워크 전체에 해당하는 Flooding 사용이 없기 때문에 네트워크 확장성이 높다. 위치기반 라우팅에는 LAR(last acknowledgement received), GEAR(Geographic and Energy Aware), GAF 등이 존재한다.

2.4 무선 센서 네트워크 Cross Layer 프로토콜

무선 센서 네트워크에서는 각 노드 당 에너지 소모를 줄이는 것도 중요하지만, 네트워크 전체의 에너지 소모를 줄이는 것도 중요하여 에너지 효율적인 MAC 프로토콜과 라우팅 프로토콜이 다수 제안되었다.

그러나 기존 OSI 7 계층처럼 독립적으로 개발된 MAC 프로토콜은 IEEE 802.15.4에서, 라우팅 프로토콜은 Zigbee Alliance에서 연구되어 프로토콜 계층 간 호환성에 많은 문제점이 나타났다. 이로 인하여 현존하는 많은 라우팅 프로토콜의 일부만 사용되거나, 데이터 전송을 MAC 계층에 의존하는 경향이 나타나고 있다. 이러한 문제 해결을 위해 센서 네트워크에서는 노드의 자원을 보다 효율적으로 사용하고, 계층 간 상호 호환성 문제 해결을 위한 계층적 병합 기법인 Cross Layer 프로토콜에 대한 연구가 이슈화 되고 있다.

Cross Layer 프로토콜은 기존에 사용되어진 OSI 7 계층들을 네트워크의 효율성을 고려하여 하나의 스택(Stack)으로 구성하는 기법이다.

무선 센서 네트워크에서 Cross Layer 기법을 적용하기 위해 연구되고 있는 계층은 MAC과 PHY, MAC과 라우팅, Transport과 PHY 그리고 3-Layer의 병합이며 이중, Zigbee Alliance와 IEEE 802.15.4의 호환성 문제 해결을 위한 MAC과 라우팅 프로토콜을 하나로 구성한 프로토콜 스택에 대한 연구가 가장 이슈화 되고 있다.

III. 제안한 Cross Layer 프로토콜

제안한 Cross Layer 프로토콜은 MAC 계층에서 송신 전력에 따른 에너지 소모 및 거리를 고려하고, 네트워크 계층에서 최적 멀티 홉 전송을 위한 단일 경로 알고리즘을 적용하였다.

3.1 제안한 Cross Layer 프로토콜의 기능

기존의 Zigbee 기반의 센서 네트워크에서는 기존의 OSI 7 계층과 같은 계층적인 프로토콜의 개발로 인해 다음과 같은 문제가 있다. 각각 독자적으로 MAC 과 네트워크 프로토콜을 연구하기 때문에 하위계층 또는 상위계층의 동작을 고려하지 않고 프로토콜을 설계하였다. 이로 인하여 실제 MAC을 고려하지 않은 대다수의 라우팅 프로토콜들은 연구의 대상일 뿐 알고리즘의 적용에는 많은 어려움이 있으며, 실제 센서 Mote를 사용하여 네트워크를 구축하게 되면, 데이터 전송의 역할을 MAC 계층에 의존하고 있는 현실이다. 둘째, 기존에 무선 네트워크에서 사용된 노드는 정전압은 물론 하드웨어적으로 다양한 프로토콜을 적용할 수 있는 능력을 보유하고 있지만, 제한된 자원으로 구성된 센서 노드에서는 다양한 계층적 프로토콜을 적용시키는데 에너지 및 처리능력의 제약을 가지고 있다.

제안한 알고리즘은 Zigbee 방식의 네트워크 구조를 해결하기 위하여 현재 가장 이슈가 되고 있는 MAC과 네트워크 계층의 Cross Layer를 구성하는데 있어 다음과 같은 방안을 제시하였다.

이웃 노드와 링크를 구성하고 목적지 까지 데이터를 전송하는데 있어서 MAC 계층의 기능으로 이웃 노드와 링크를 설정할 때, 가장 에너지 소모가 적은 이웃 노드를 기준으로 통신 환경을 설정하고, 네트워크 계층의 기능으로 MAC에서 설정된 링크 정보를 바탕으로 목적지까지 에너지 소모가 가장 적은 멀티 홉 데이터 전송을 수행한다.

전파 손실에 L을 dB단위로 나타내고, 등방성 안테나(Antenna)의 사용을 가정으로 주파수의 단위를 MHz, 거리의 단위를 Km로 한다면 식 (1)을 유도할 수 있다.

$$L = 32.44(dB) + 20\log fMz + 20\log dKm \quad (1)$$

무선 계층에서 송신 전력은 자유 공간에서 거리의 제곱에 비례하여 손실되기 때문에 통신 거리의 증가에 따른 전송 에너지 소모는 지수적으로 증가한다.

$$L = Const \cdot R^\alpha \quad (2)$$

자유공간에서의 전파상수 α (2와 동등한 값)와 거리 R로 전파손실 L을 식 (2)에서 나타냈다. 일정한 수신기 잡음 레벨(Level)에서 정확한 수신을 위한 최소 수신 전력 Prxmin이 필요하다. 따라서, 거리 R의 1홉에 대한 송신 전력은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{Tx} = P_{R_{x_{min}}}^{Const \cdot R^\alpha} \quad 1hop \quad (3)$$

$$P_{Tx} = P_{R_{x_{min}}}^{Const \cdot (R/N)^\alpha} \quad Nhop$$

식 (3)는 식 (4)와 같이 N^α 의 인수가 하나의 단일 홉보다 적은 것이다.

$$N^\alpha / N = N^{\alpha-1} \quad (4)$$

그러므로, 홉수가 증가할수록 송신 전력의 감소가 감소하는 것을 알 수 있다. 전송 에너지의 효율적인 사용을 위해서 센서 네트워크에서는 짧은 통신거리로 목적지까지 여러 번에 걸쳐 정보가 전달되는 멀티 홉 형태의 네트워크를 구성하는 것이 바람직하다. 따라서 멀티 홉을 사용하여 데이터를 전송할 경우 목적지 까지 사용되는 노드의 수는 증가하나 전송에 사용되는 전체적인 에너지 소모는 줄일 수 있다. 이러한 방법을 기반으로 무선 센서 네트워크 환경에 적합한 Cross Layer 프로토콜 모델을 제안하

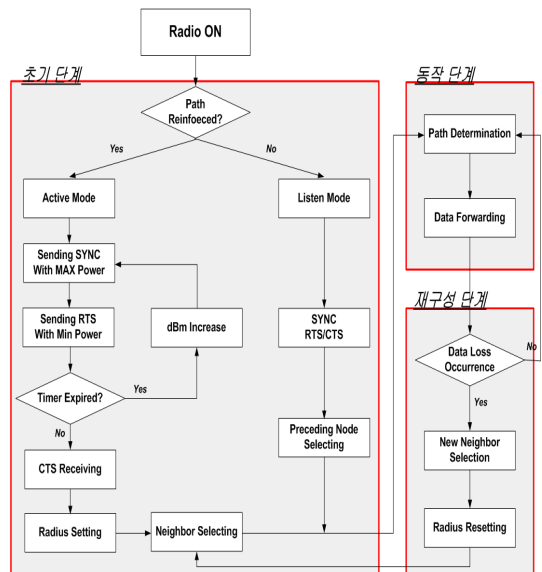


그림 4. 제안하는 알고리즘의 순서도
Fig. 4. Flowchart of proposed Algorithm

였으며, 각 기능은 다음과 같다.

- MAC Layer Function : 이웃 노드와 적합한 통신 환경 설정 및 설정된 통신 환경 기반으로 링크 구성
- Network Layer Function : MAC에서 설정된 링크를 바탕으로 멀티 홉에 적합한 단일 경로 구성

3.2 제안한 Cross Layer 프로토콜 알고리즘

제안한 Cross Layer 프로토콜 알고리즘은 이웃 노드와 적합한 통신 환경을 구성하기 위한 통신 환경 및 이웃 노드 선정 방법이 핵심이다. 제안한 알고리즘은 초기단계, 동작단계 그리고 재구성 단계로 구성되어 동작한다.

3.2.1 초기 단계

초기 단계에서 라디오를 켜 센서 노드가 자신의 이웃 노드에 대한 송신 전력의 확립 여부를 판단하고, 최소의 송신 전력으로 통신할 수 있는 이웃 노드를 선정하여 링크를 설정하는 단계이다.

그림 5는 센서 노드가 이웃 노드와 최적의 통신 환경을 구현하기 위한 메시지(Message) 흐름도를 나타내고 있다.

먼저 기준 노드는 SYNC를 이용 통신 환경 내에 존재하는 노드들의 라디오를 ON 시킨 후, 최소 송신 전력을 기준으로 RTS(Request to Send)를 보내게 된다. RTS 메시지를 보낸 후, Timer가 만료 시까지 이웃한 어떤 노드에게도 CTS(Clear to Send)를 받지 못하면 CTS를 받을 때 까지 송신 전력을 다음 단계로 증가시켜 RTS를 전송한다. 이웃 노드로부터 CTS를 전송받으면 자신의 이웃 노드로 선정하고 적합한 송신 전력으로 링크를 구성한다. 이웃 노드로 선정되지 못한 노드는 Sleep 상태로 돌아가 통신에 필요한 라디오를 Off 시킨다.

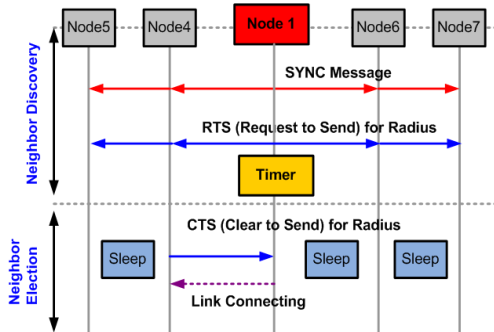


그림 5. 초기단계의 메시지 흐름도
Fig. 5. Message flowchart of childhood

초기 동작 상태를 위해 RTS 메시지 포맷(Format)에 Timer와 송신 전력 증가를 위한 Parameter를 대입했다. 다음 그림 6은 UC Berkeley 대학에서 개발한 TinyOS에 사용되는 MAC 프로토콜의 RTS 메시지를 바탕으로 Timer와 Power를 정의한 것이며, 그림 7은 제안한 알고리즘 초기 단계에 의해 구성된 이웃 노드와의 링크 설정과정을 나타내고 있다.

RTS (Request to Send) msg on S-MAC Protocol (10 bytes)

Length (1byte)	Type (1byte)	To Addr (2 bytes)	From Addr (2 bytes)	Duration (2 bytes)	CRC (2bytes)
----------------	--------------	-------------------	---------------------	--------------------	--------------

RTS (Request to Send) msg on Cross Layer Protocol (10 bytes)

Length (1byte)	Type (1byte)	Timer (1 byte)	Set Power (1 byte)	Neighbor Addr (1 byte)	To Addr (1 byte)	Duration (2 bytes)	CRC (2bytes)
----------------	--------------	----------------	--------------------	------------------------	------------------	--------------------	--------------

그림 6. 제안하는 프로토콜의 제어메시지
Fig. 6. Control message of proposed protocol

3.2.2 동작 단계

동작 단계에서는 초기 단계에서 설정된 이웃노드와의 링크를 바탕으로 데이터를 전송한다. 네트워크에 존재하는 노드들은 자신과 가장 최소의 송신전력을 사용하여 통신을 할 수 있는 노드와 링크를 연결하고 싱크 노드까지 경로를 생성하게 된다. 그림 8은 동작단계에서 데이터 전송과정을 나타내고 있다.

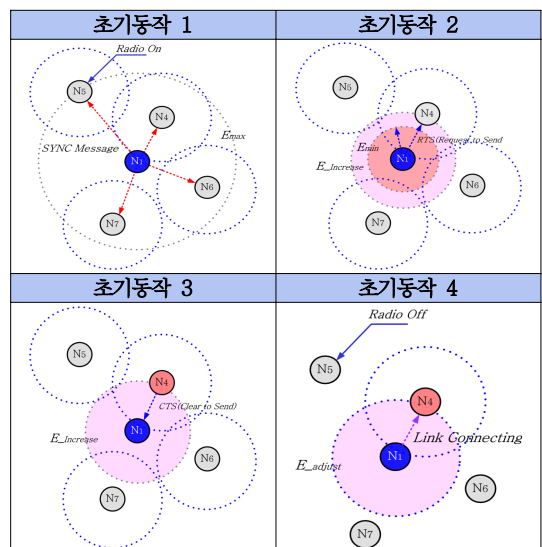


그림 7. 초기단계에서의 링크 구성 과정
Fig. 7. Link connecting in childhood

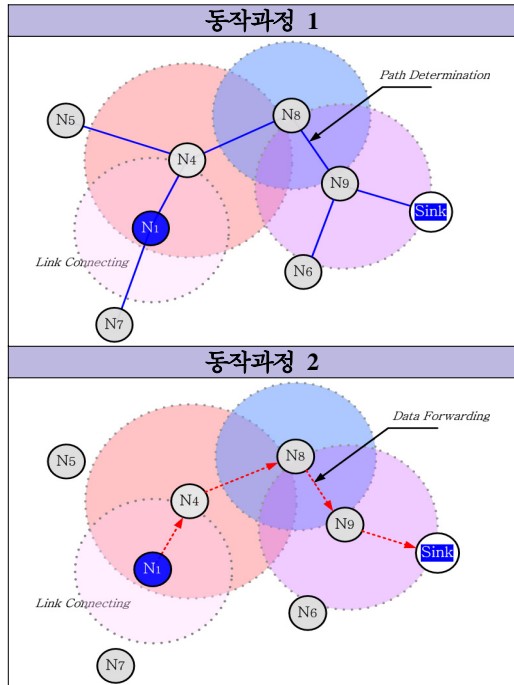


그림 8. 동작단계에서의 데이터 전송 과정
Fig. 8. Data Forwarding in operating state

1번 노드에서 싱크 노드로 데이터를 전송 할 경우 다음과 같이 4번, 8번, 그리고 9번 노드를 거쳐 싱크 노드에 도착하게 된다. 각 노드들은 자신의 이웃 노드 정보를 바탕으로 싱크 노드까지 생성된 단일 경로를 따라 데이터를 전송하게 된다.

3.2.3 재구성 단계

재구성 단계는 배터리 소모 등의 이유로 이웃 노드로부터 받은 데이터를 다른 노드로 전송할 수 없을 때 수행한다. 단일 경로로 구성된 멀티 홉 환경이기 때문에 이웃 노드와의 링크가 손실되면 단일

```

IF, (In case of Timer expired)
    ...
IF, (Neighbor N's CTS message does not arrive)
    Tx_Power increase,
    To receive CTS from New Neighbor
ELSE IF, (Timer restart Compare each Node's Npratio)
    IF, (CTS received from New Neighbor )
        Increased RTS message transmission,
        Route renewal
    ELSE, end
    ELSE, end
ELSE, end
    ...
    
```

그림 9. 재구성 단계의 Pseudo Code
Fig. 9. Pseudo Code of reconfiguration step

경로가 붕괴되기 때문에 이를 방지하기 위해 새로운 이웃 노드를 탐색한다.

그림 9는 이웃 노드가 손실 된 경우 동작하는 재구성 단계를 Pseudo Code로 나타낸 것이다.

그림 10은 재구성 단계에서 이웃 노드를 손실한 노드 N1이 통신 반경을 증가시켜 새로운 이웃 노드인 N6과 링크를 설정하는 방법을 나타내고 있다.

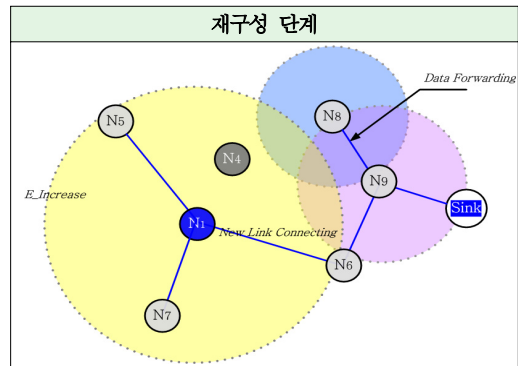


그림 10. 재구성 단계의 동작 과정
Fig. 10. Remaking of link connecting

IV. 성능 평가 및 고찰

본 논문에서는 제안한 알고리즘의 구현 및 성능 평가를 위해 IEEE 802.15.4 표준을 지원하는 Chipcon사의 CC2420을 적용한 한백전자의 Zigbee 모듈(Module)인 ZigbeX Mote를 사용하였다. 또한, 송신 전력에 따른 통신 반경의 거리와 소모 에너지를 기반으로 Win32 API 및 TinyOS에서 제공하는 Tinyviz Tool을 사용하여 제안한 알고리즘의 성능 평가를 실시하였다. 또한, ZigbeX Mote로 통신 반경에 따른 노드 간 지연을 측정하고 Seacat 시뮬레이터로 송신 전력에 따른 최대 거리를 시뮬레이션 하여 보다 적합한 시뮬레이션 파라미터를 선정하였다.

4.1 성능 평가 파라미터

성능평가를 위해서는 다음과 같은 세 가지 파라미터가 필요하다. 첫째, 송신 전력에 따른 최대 통신 거리와 패킷 손실률을 알아야 한다. 둘째, 모든 등급의 송신전력 환경에서 1 bit 및 각 패킷 당 소모되는 에너지를 알아야 한다. 마지막으로 노드와 노드 간 통신에 걸리는 지연을 알아야 한다. 시뮬레이션 환경에 이를 적용하기 위해 ZigbeX Mote를 사용하여 송신 전력에 따른 거리 및 패킷 손실률을

측정하였으며, 무선 계층 시뮬레이터인 Seamcat과 그 결과를 비교하였다. 또한, 1000개의 패킷을 기준으로 Delay와 손실률을 측정하였다.

4.1.1 송신 전력에 따른 통신 반경 파라미터

제안한 프로토콜의 성능평가를 위해 사용된 라디오 칩셋(Chipset)인 CC2420은 송신전력이 -82dBm인 지역이 최대 송신 거리이다. 먼저 이론적으로 -82dBm의 송신 전력을 사용한 경우 데이터 전송이 가능한 통신 반경은 식 (1)과 같다. 주파수를 2.4GHz라 가정한다면 식 (1)에 의하여 송신 전력을 0dBm으로 사용할 경우 -82 dBm 일 때의 통신 반경은 약 125m가 된다.

CC2420은 최대 통신 반경인 -82dBm 이외에 신뢰성을 위한 -76dBm 지점을 정의했다. 송신 전력이 -76dBm인 지점은 PER(Packet Error Rate)이 1% 미만이 되는 지점이며, -76dBm이내에서 통신을 해야만 패킷 손실에 따른 재전송에 사용되는 에너지 소모를 방지할 수 있을 것으로 예상된다.

그러나, 실제 네트워크를 구성하는 센서 Mote의 경우 PCB 안테나를 사용하게 되며 송, 수신 노드 안테나의 방향성에 따라 많은 오차를 보이게 된다. 시뮬레이션 환경에 보다 적합한 데이터 입력을 위해 Seamcat을 사용하여 간섭원이 존재하는 환경에서의 송신 전력에 따른 통신 반경과 실제 ZigbeX Mote를 사용하여 송신 전력에 따른 통신 반경을 살펴보았다.

송신 거리를 측정하기 위해 싱크 노드가 노트북(Laptop)에 연결되어 Base Station을 구축하였으며, 0 dBm부터 -25dBm까지 설정된 8개의 센서 노드를 준비하였다. CC2420은 Zigbee 스펙(specification)에 맞게 250kbps의 데이터율을 가지고 있으며 비트 당 전송 속도는 4us가 소모된다. 전송거리 측정 결과 표 1의 결과를 얻었다.

그러나 최대 통신 반경의 경우, 1000개의 패킷을 대상으로 송수신 실험을 한 결과 20% 이상의 손실률을 나타내었다. PER 1% 이하인 지점은 최대 통신 거리의 1/2 지점보다 짧기 때문에 통신 반경에 대한 이용성 문제를 찾을 수 있었다.

실측한 결과의 신뢰성을 높이기 위해 실험 환경에서 사용되었던 송신 전력 및 기본 환경 정보를 바탕으로 Seamcat Simulator를 사용하여 시뮬레이션으로 결과를 살펴보았다. 표 2는 Seamcat으로 구한 최대 통신 반경 지점인 -82dBm과 PER 1%인 -76dBm인 지점의 거리를 나타낸다.

표 1. ZigbeX로 실측한 CC2420 통신반경
Table 1. CC2420 Communication Radius with ZigbeX

Radio Output Power(dBm)	최대 통신거리 (m)	PER 1% 지점 (m)
0	142	66.5
-1	122	59
-3	93	46.5
-5	79	36.5
-7	68	29
-10	43	21.5
-15	27	13
-25	9	3.8

표 2. Seamcat 시뮬레이터로 확인한 CC2420 통신 반경
Table 2. CC2420 Communication Radius with Seamcat

Radio Output Power(dBm)	최대 통신거리 (m)	PER 1% 지점 (m)
0	124	62
-1	111	56
-3	88	44
-5	70	35
-7	55.5	28
-10	39.5	19.7
-15	22	11
-25	7	3.5

4.1.2 송신 전력에 1비트 및 패킷 당 소모 에너지

두 번째 파라미터인 데이터 전송에 소모되는 에너지를 알아야 한다. 먼저 1bit당 소모되는 에너지를 측정하기 위해서는 식 (5)가 사용된다.

$$P_{Bit} = I_{Tx} \times V_s \times \frac{1}{R_{Tx}} \tag{5}$$

비트 당 전송에 소모되는 에너지는 설정된 송신 전력의 전류 I_{Tx} 와 전압 V_s 그리고 데이터율 R_{Tx} 의

표 3. CC2420 송신 전력에 따른 비트 및 패킷의 소모 에너지
Table 3. Energy Consumption Bit and Packet in CC2420 output power

Radio Output Power (dBm)	Energy /bit (nJ/b)	Energy /Control_Packet (uJ/p)	Energy /Packet (uJ/p)
0	208.8	16.7	60.1
-1	198	15.8	57
-3	182.4	15	52.5
-5	166.8	13.3	48
-7	150	12	43.2
-10	134.4	10.8	38.7
-15	118.8	9.5	34.2
	102	8.1	29.4

역수의 곱으로 구할 수 있다. 표 3은 소모 전력에 따른 비트 및 패킷 당 소모 에너지를 나타낸다.

4.1.3 송신 전력에 따른 전송 지연

시뮬레이션 환경에 적용할 마지막 파라미터는 네트워크 지연이다. 다수의 노드로 구성된 센서 네트워크에서는 데이터 경로로 사용되는 노드가 존재하며 Duty Cycle을 가지고 서로 다른 시간대에 데이터를 전송해도 충돌할 확률은 존재한다. 데이터의 충돌이 일어나면 데이터 재전송에 따른 패킷 지연이 발생한다. 이를 검증하기 위해 0.5sec 간격으로 1000 개의 패킷을 전송하여 송신 전력에 따른 패킷 지연을 측정하였다.

노드 간 36bytes의 패킷 전송에 소모되는 시간은 1152us로 0.5 sec에 한번 씩 이벤트가 발생하는 환경에서 홉 카운트(Hop-Count)가 약 500 이하이면 네트워크에서 데이터 충돌은 발생하지 않는다. 이러한 이유로 본 논문에서는 랜덤(Random)하게 분포한 노드가 최대 500 홉 미만의 홉 카운트를 보유한 네트워크의 지연은 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 검증하였다.

4.2 성능평가

제안한 알고리즘은 TinyOS 환경에서 Tinyviz를 사용하여 구성한 센서 네트워크에서 제안한 알고리즘의 동작을 확인하였다. 알고리즘 동작의 비교는 기존에 제안된 알고리즘들 중에 본 논문의 성격에 적합한 통신 반경 내에서 가장 먼 지점의 노드에게 데이터를 전송하여 통신에 소모되는 에너지 요소를 고려한 GAF 알고리즘을 선택하였다. 기존 Cross

Layer 프로토콜은 서로 다른 MAC 프로토콜을 사용하여 비교 대상에 적합하지 않기 때문에, 동일 MAC환경에서 기존 GAF 방식의 고정된 통신 반경과 제안한 라우팅의 송신 전력에 따른 통신 반경을 기반으로 구성된 라우팅과 비교하였다. 시작 노드는 11번 노드이며 싱크 노드의 방향으로 데이터가 전송된다. 그림 11과 12은 GAF 알고리즘과 제안한 알고리즘의 동작과정을 Tinyviz로 확인한 것이다.

Tinyviz의 경우 네트워크 토폴로지 동작과정 및 노드의 센싱 정보 및 디버그(Debug) 메시지의 확인은 가능하나 송신 전력에 따른 에너지 소모율을 확인하는데 많은 어려움이 있다.

송신 전력에 따른 에너지 소모율 측정을 위해 Win32 API 기반으로 Tinyviz와 유사한 환경을 구성하고 송신 전력 및 그에 따른 소모 에너지 파라미터를 사용하여 성능평가를 수행하였다. 성능평가를 위한 환경은 표 4와 같다.

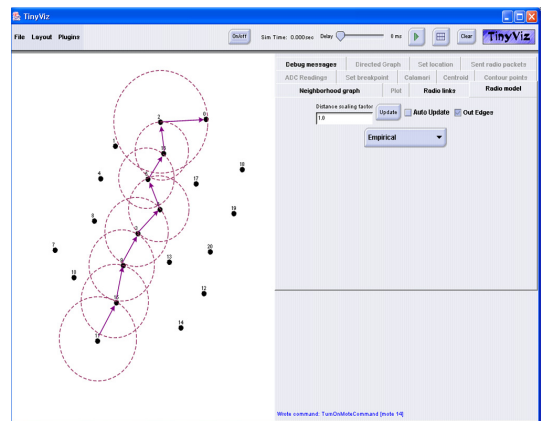


그림 12. 제안한 알고리즘 동작상태
Fig. 12. Operation of proposed algorithm

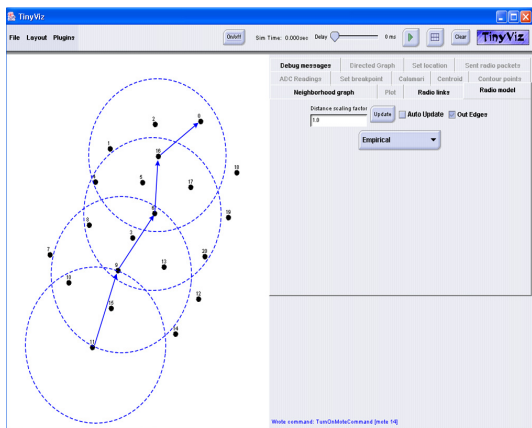


그림 11. GAF 알고리즘 동작상태
Fig. 11. Operation of GAF algorithm

표 4. 성능평가 파라미터
Fig. 4. Performance Evaluation Parameter

구분	적용
Duty Cycle	1 ~ 99%
최대 송신 전력 (0dBm)	17.4 mA
최소 송신 전력 (-25dBm)	8.5 mA
최대 전송 거리	66.5m
최소 전송 거리	3.8m
Packet size	36 Bytes
Control Message size	10 Bytes
전원	3V
노드 수	10 ~ 100
packet 갯수	1000개
Event Time	0.5sec

제한한 알고리즘과의 성능평가를 위해서 기존에 통신 환경을 다룬 알고리즘인 GAF와 제안한 알고리즘을 센서 네트워크 환경에 각각 적용하여 송신 전력에 따른 에너지 소모율을 측정하였으며, 송신 전력에 따른 최대 거리는 실측한 PER 1% 지점으로 설정하였다.

노드의 개수와 노드간 거리에 따른 송신 전력의 변화로 전체 네트워크에서 소모되는 에너지 및 노드 간 에너지 소모를 측정 노드의 수에 따라 측정하였다. 그림 13은 기존 및 제안한 알고리즘이 소비하는 전체 네트워크의 에너지를 시뮬레이션한 결과이다.

100개의 노드로 네트워크가 구성될 때, 기존 방식보다 제안한 방식이 최대 12%의 에너지 효율을 나타냈다. 네트워크를 구성하는 노드의 수가 30개 미만인 경우, 제안하는 알고리즘보다 기존의 GAF 방식이 약간 더 적은 에너지 소모를 나타냈지만, 센서 네트워크는 대규모로 구성되기 때문에, 30개 미만인 경우 기존 알고리즘이 약간의 효율성이 더 높은 결과는 논문에 큰 영향을 미치지 않는다.

에너지 효율이 발생하는 30개의 노드를 측정 시간에 따른 전체 네트워크 에너지 소모량 측정 결과에서는 이벤트 횟수가 약 250회 이상 발생하는 지점부터 제안한 알고리즘이 기존 알고리즘과 비교하여 에너지 소모량이 적었으며, 최대 5% 이상의 에너지 효율을 나타내었다. 그림 14는 기존 및 제안한 알고리즘의 프로토콜 동작 시간에 따른 에너지 소모율을 시뮬레이션한 결과이다.

센서 네트워크는 배터리의 수명을 장시간 사용하면서, 송·수신하는 데이터를 처리한다. 250회, 125sec 정도의 이벤트 및 사용시간은 평균 네트워크 사용시간을 1년으로 계산하는 기존 방식과 비교할 때, 논문의 결과에 큰 영향은 주지 않으며, 네트워크 동작시간이 늘어날수록 제안한 방식이 기존 방식에 비해 에너지 이용이 효율적이라는 것을 알 수 있었다.

프로토콜의 동작을 시작하는 초기에는 기존 방식보다 더 높은 에너지 소모율을 확인할 수 있었다. 이는 데이터 전송과는 별도로 이웃노드 선정과정에서 소모하는 에너지가 원인이다. 또한, 제안한 알고리즘의 경우 급격하게 네트워크 에너지 소모율이 증가하는 영역이 발생하는데 이는 손실된 노드가 발견되어 이웃 노드의 재 선출 과정이 원인이다. 제안하는 알고리즘은 기존 알고리즘에 비하여 30개 이상의 노드로 네트워크를 구성하였을 때, 5% 정도

의 에너지 효율을 보여주었다. 또한, 노드별 에너지 소모는 싱크 노드에 근접할수록 데이터 경로 횟수로 사용되는 노드일수록 높게 나타났으며, 이는 무작위로 구성된 네트워크 토폴로지에 영향을 받는다.

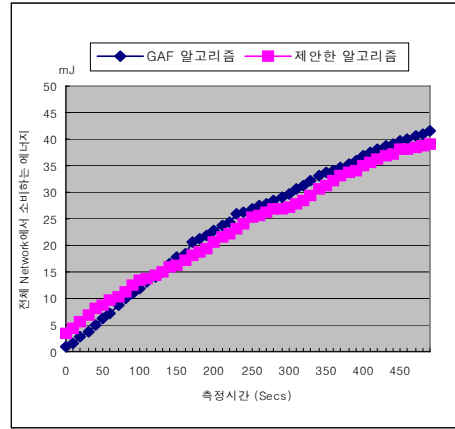


그림 14. 30개 노드로 구성된 프로토콜 동작 시간 및 소비 에너지
 Fig. 14. Protocol operating time and energy consumption in 30's nodes

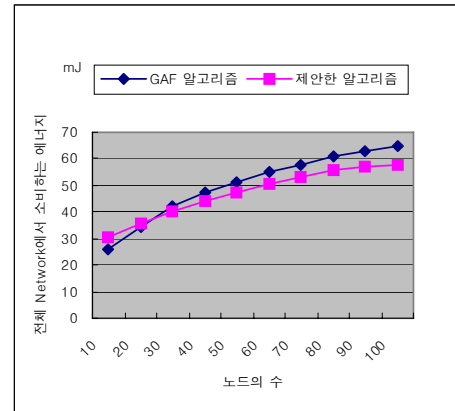


그림 13. 노드의 수에 따른 네트워크 에너지 소모량
 Fig. 13. Network Energy Consumption with Nodes

V. 결론

본 논문에서는 제한된 에너지를 갖는 센서 노드들로 구성된 센서 네트워크의 효율적인 에너지 사용을 위한 Cross Layer 프로토콜을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 기존의 Zigbee 기반 센서 네트워크 운영 방식에서 고려하지 않았던 송신 전력을 제어함으로써 센서 노드 및 센서 네트워크의 에너지 효율을 개선하고, 손실된 노드로 인하여 발생하는 토폴로지 변화를 고려하였다. 성능 평가 결과 네트워크를 구성하는 노드의 수가 증가하고, 네트워크 사

용 시간이 증가 할수록 제안한 알고리즘이 보다 긴 네트워크 생존시간을 보유하고 있다.

30개 이상의 노드로 구성된 네트워크에서 기존 알고리즘에 비해 제안한 알고리즘이 최대 12%의 에너지 효율성을 나타냈으며, 노드의 수와 네트워크 사용시간이 증가한다면 보다 높은 에너지 효율을 보여줄 것으로 예측할 수 있다.

노드의 수가 적고 네트워크 운용시간이 길지 않은 경우에, 목적지까지 데이터를 전송하기 위한 에너지 소모율은 제안한 알고리즘이 기존 알고리즘 보다 높았다. 그러나 센서 네트워크는 그 목적상 에너지 소모가 다할 때 까지 사용되고, 다수의 노드로 구성되기 때문에 전체 네트워크 에너지 측면에서 큰 영향을 미치지 않는다.

향후 연구 과제로 노드의 효율적 배치에 따른 에너지 소모 상태 및 개선 방안과, 싱크 주변에 존재하여 통신량이 많은 노드들의 효율적인 사용을 위한 방안이 향후 연구 과정을 통해 개선해야 할 문제로 지적된다.

참 고 문 헌

[1] I. F. Akyildiz, S. Weilian, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Network," *Comm. IEEE. Vol.40, No.8*, pp.102-114, 2002.

[2] 이상학, 정태충, "유비쿼터스 컴퓨팅의 핵심, 무선 센서 네트워크 기술," *경희대학교출판국*, 2005년 1월.

[3] 김기일, 김상하, "MANET 에서의 다중 경로 라우팅 프로토콜 연구 동향," *주간기술동향*, 2005년 7월.

[4] IEEE Standard for Information technology- Telecommunications and information exchange between systems- Local and metropolitan area networks- Specific requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), 2006.

[5] ZigBee Alliance home page, <http://www.zigbee.org>

[6] W. B. Heinzelman, A.P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor net-

works", *Wireless Comm. IEEE, Vol.1, No.4*, pp660-670, 2002.

[7] W.B Heinzelman, "Application-Specific protocol Architectures for Wireless Networks", *ph. D. dissertation, Mass. Inst. Tech., Cambridge*, 2000.

[8] Y. Xu, J. Heidemann, and D. Estrin, "Geography-Informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing," *Proc. of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM)*, pp. 70-84, 2001.

[9] I.F. Akyildiz, M.C. Vuran, O.B. Akan, "A Cross-Layer Protocol for Wireless Sensor Networks", *in: Proc. of CISS 2006, Princeton, NJ, March*, 2006.

[10] T. Melodia, M. C. Vuran, D. Pompili, "The State of the Art in Cross Layer Design for Wireless Sensor Netwrks," *to appear in Springer Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, 2006.

[11] 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-Ready RF Transceiver (Rev. B), 20 Mar., 2007.

[12] (주)한백전자 기술연구소, "유비쿼터스 센서 네트워크 시스템" 2006년 5월.

[13] <http://www.xbow.com>

[14] <http://www.seamcat.org>

김 현 서 (Hyun-Seo Kim)

준회원



2006년 2월 대전대학교 통신공학 졸업
2008년 2월 광운대학교 전자통신공학과 석사
<관심분야> 센서 네트워크, 임베디드 시스템, USN

정 원 수 (Won-Soo Jung)

정회원

한국통신학회논문지 제32권 제12호 참조

윤 찬 영 (Chan-Young Yun)

종신회원

한국통신학회논문지 제33권 제2호 참조

오 영 환 (Young-Hwan Oh)

정회원

한국통신학회논문지 제32권 제12호 참조