

무선 센서 네트워크에서 링크 상태 및 트래픽 분산 정보를 이용한 효과적인 라우팅 방법

김선명¹ · 양연모^{2†}

An Efficient Routing Scheme based on Link Quality and Load Balancing for Wireless Sensor Networks

Sunmyeng Kim · Yeon-Mo Yang

ABSTRACT

ZigBee is a standard for wireless personal area networks(WPANs) based on the IEEE 802.15.4 standard. It has been developed for low cost and low power consumption. There are two alternative routing schemes that have been proposed for the ZigBee standard: Ad-hoc On-Demand Distance Vector(AODV) and tree routing. The tree routing forwards packets from sensors to a sink node based on the parent-child relationships established by the IEEE 802.15.4 MAC topology formation procedure. In order to join the network, a sensor node chooses an existing node with the strongest RSSI(Received signal strength indicator) signal as a parent node. Therefore, some nodes carry a large amount of traffic load and exhaust their energy rapidly. To overcome this problem, we introduce a new metric based on link quality and traffic load for load balancing. Instead of the strength of RSSI, the proposed scheme uses the new metric to choose a parent node during the topology formation procedure. Extensive simulation results using TOSSIM(TinyOS mote Simulator) show that the CFR scheme outperforms well in comparison to the conventional tree routing scheme.

Key words : Cost function, Routing protocol, Tree routing, Sensor network, WPAN, ZigBee

요 약

ZigBee는 WPAN(Wireless Personal Area Networks)을 위해 IEEE 802.15.4 표준에 근거하여 저비용, 저전력 소모를 위해 만들어진 표준이다. ZigBee 표준에서 라우팅을 위해 AODV(Ad-hoc On-Demand Distance Vector)와 트리 라우팅(Tree Routing) 두 가지 방법이 제시되었다. 트리 라우팅은 IEEE 802.15.4 MAC 계층의 토폴로지 형성 과정 동안에 만들어진 부모-자식 관계에 근거하여 센서 노드로부터 싱크 노드(Sink node)로 데이터를 전송한다. 이 방법에서 새로운 노드가 네트워크에 가입하기 위해 RSSI(Received signal strength indicator) 신호가 가장 강한 노드를 부모 노드로 선택한다. 그러므로 트래픽 분산이 이루어지지 않아 일부 노드는 많은 트래픽 양을 전달하게 되고 에너지는 빠르게 고갈된다. 본 논문에서는 트래픽 분산을 위해 링크 품질과 트래픽 양 정보를 이용하는 새로운 메트릭(Metric)을 제시한다. 제안되는 방법은 RSSI 신호 세기를 사용하는 대신에 새롭게 제안된 메트릭을 사용하여 부모 노드를 선택하여 네트워크에 가입한다. TinyOS TOSSIM(TinyOS mote Simulator) 환경에서 시험을 통하여 제안한 방법이 기존 트리 라우팅 방법에 비해 우수한 성능을 가짐을 알 수 있다.

주요어 : 비용 함수, 라우팅 프로토콜, 트리 라우팅, 센서 네트워크, WPAN, ZigBee

*이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음.
(KRF-2008-331-D00338)

*본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문임.

접수일(2010년 4월 22일), 심사일(1차 : 2010년 8월 9일, 2차 : 2010년 10월 2일), 게재 확정일(2010년 10월 4일)

¹⁾ 금오공과대학교 컴퓨터공학부

²⁾ 금오공과대학교 전자공학부

주 저 자 : 김선명

교신저자 : 양연모

E-mail; yangym@kumoh.ac.kr

1. 서 론

문헌에 따르면 가까운 시간에 농경, 자연재해 감시, 3차원 게임, 네트워크 기반 장난감, 산업용 설비, 노년층 복지 및 환경 감시 등을 효과적으로 수행하기 위하여 에너지 효율이 우수한 사용자 공간 무선 센서 네트워크(Wireless Personal Area Networks, WPAN) 수요가 증대된다고 한다. 이러한 응용을 위하여 제한된 배터리 전력을 이용하여 무선 환경으로 동작하는 소형 임베디드 시스템은 필요하다. 기존 유선망과 비교하여 무선 센서 네트워크는 우수한 처리율 및 상대적으로 낮은 데이터 전송율이 요구된다^[1-6]. 무선 센서 노드에게는 외부 또는 인적이 드문 곳에 설치되는 특성상 극히 낮은 전력 소비율이 절대적으로 요구된다.

WPAN 환경에서 이전 표준이 블루투스(Bluetooth) 표준과 비교하여 IEEE 802.15.4는 매우 낮은 배터리 전력 소비 및 우수한 가격 경쟁력을 제공한다. 기존 IEEE 802 표준과 호환성 및 연계가 가능한 물리계층(PHY) 및 매체 제어계층(Media Access Control, MAC)에 대한 표준을 정의하며, 네트워크 및 상위 계층은 기존 WPAN 장치 사이 호환성을 목적으로 결성된 ZigBee 연합 표준을 따른다. MAC 계층은 WPAN에서 에너지 절약 및 효율적인 자원 공유 측면에서 매우 중요한 역할을 담당한다. IEEE 802.15.4와 ZigBee 연합 사이 관계는 기존 IEEE 802.11과 WiFi 연합 사이 관계와 유사한 점이 많다. 최근 IEEE 802.15.4 기반 ZigBee 연합은 상위 계층 표준 수정 작업을 계속 진행 중이다.

무선 센서 네트워크를 위한 많은 라우팅 프로토콜이 연구되고 있다. 이러한 연구들은 다음과 같이 네 개의 그룹으로 나뉘어 질 수 있다. 최소 홉 라우팅, 최소 에너지 라우팅, 로드 분산 라우팅, 지리적 라우팅. 최소 홉 라우팅은 싱크 노드까지 도달하기 위해 필요한 홉을 최소화할 수 있는 경로를 선택하는 방법이다^[7-8]. 최소 에너지 라우팅 방법은 데이터 패킷 전송을 위해 필요한 에너지와 전송 거리 관계를 고려하여 에너지 소모를 최소화할 수 있는(소스노드, 싱크노드) 경로를 선택한다^[9]. 로드 분산 라우팅 방법은 선택된 경로가 에너지 소모와 관련하여 최적의 경로가 아닐지라도 가능한 많은 노드를 통해 트래픽을 분산시킬 수 있는 경로를 선택한다^[10]. 지리적 라우팅(Geographic Routing) 방법은 최종 목적지 및 이웃 노드들의 위치 정보를 획득한 후에 전송할 데이터 패킷을 갖고 있는 노드의 위치보다 최종 목적지에 더 가까운 위치에 있

는 노드에게 패킷을 전달하는 것이다^[11-13].

ZigBee에서는 간단하면서도 제한된 자원을 사용하여 라우팅이 가능한 트리 라우팅(Tree Routing)을 선호한다. 트리 라우팅은 IEEE 802.15.4 MAC 계층의 토폴로지 형성 과정 동안에 만들어진 부모-자식 관계에 근거하여 센서 노드로부터 싱크 노드로 데이터를 전송한다^[4,6,14]. 그러나 트리 라우팅 방법이 최적이지 아닌 경로를 선택하고 혼잡이 발생하며 트래픽이 균등하게 분산되지 않아 네트워크의 성능과 노드의 수명을 낮추는 결과를 초래할 수 있다. 네트워크 로드의 불균등은 특별한 노드의 에너지를 빠르게 고갈시킬 수 있다. ImpTR(Improved Tree Routing) 방법은 기존 트리 라우팅 방법과 달리 목적지에 대한 라우팅 비용을 최소화하기 위해 부모-자식 관계 대신에 이웃 노드에 대한 테이블을 이용하여 목적지에 대한 최단 경로를 갖는 노드를 다음 홉 노드로 선택한다^[15]. EAMTR(Energy Aware Multi-Tree Routing) 방법은 네트워크 트래픽을 분산시키기 위해 여러 개의 트리를 만든 후에 각 노드는 자신이 사용할 트리를 하나 선택하고 해당 트리의 카운터 값을 증가시킨다^[16]. 카운터 값은 각 트리마다 존재하며 트리를 선택한 노드의 수를 의미한다. 따라서 노드들은 카운터 값이 가장 적은 트리를 선택한다. ImpTR 방법은 트래픽 분산을 전혀 고려하지 않고 최단 거리를 갖는 경로를 선택하기 때문에 위에 제시된 문제를 해결하지 못한다. 또한 EAMTR 방법은 단순히 카운터 값이 작은 트리를 선택하기 때문에 각 노드가 전송하는 트래픽 양이 다를 경우 위 문제를 해결하지 못한다.

트리 라우팅에서 새로운 노드가 네트워크에 가입하기 위해 RSSI(Received signal strength indicator) 신호가 가장 강한 노드를 부모 노드로 선택한다. 그러므로 트래픽이 분산이 이루어지지 않아 일부 노드는 많은 트래픽 양을 전송하게 되고 에너지는 빠르게 고갈된다. 본 논문에서는, 트래픽 분산을 위해 링크 품질과 트래픽 양 정보를 이용하는 새로운 메트릭(Metric)을 제시하고 RSSI 신호 세기를 사용하는 대신에 새롭게 제시된 메트릭을 사용하여 부모 노드를 선택하여 네트워크에 가입하는 방법을 제안한다. 제안한 방법(CFR: Cost Function based Routing)은 불필요한 라우팅 경로 요청 메시지를 사용하지 않고 각 노드가 망 가입 시 형성되는 부모-자식 사이 결합 정보를 이용하여 라우팅 테이블을 작성한다. 제안된 방법을 통하여 부모-자식 관계를 형성하고 트리 라우팅처럼 패킷이 전송된다. 부모-자식 관계 선택을 위해 필요한 관련 정보는 비콘(Beacon)을 통해 전달된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 비콘 구간

및 트리 라우팅 방법에 대하여 간단히 설명한다. 3장에서는 링크 품질과 트래픽 로드와 관련하여 제시된 비용 함수에 대하여 기술하고 4장에서는 새롭게 제시된 비용 함수를 이용하여 부모 노드를 결정하는 방법에 대하여 기술한다. 5장에서는 제안된 방법과 트리 라우팅 방법에 대하여 성능을 비교 분석하고 6장에서 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

2.1 비콘 구간(BOP: Beacon Only Period)

무선 센서 네트워크에서 현재 널리 사용되고 있는 MAC 프로토콜은 크게 TDMA(Time Division Multiple Access) 방식과 CSMA(Carrier Sense Multiple Access) 방식으로 나뉜다. TDMA 방식은 싱크 노드가 각 노드들에게 자원 점유에 따라 타임 슬롯을 할당하여, 각 센서 노드가 상향/하향 데이터 패킷을 전송하도록 하는 방식이다. CSMA 방식은 경쟁을 기반으로 임의 백오프(Random Backoff) 및 경쟁 윈도우(Contention Window)에 따른 자원 공유 알고리즘을 사용한다. 현재 WPAN에서는 TDMA 및 CSMA를 모두 수용할 수 있는 MAC 표준이 IEEE 802.15.4에서 진행되고 있다. 또한 네트워크 계층에서는 업체 표준으로 ZigBee Alliance가 제공되고 있다. IEEE 802.15.4에서 표준화 관련하여 제시된 수퍼프레임(Super Frame) 구조는 시간 분할 비콘(Time Division Beacon, TDB)과 공유 비콘(Beacon-Only Period, BOP) 방식으로 분류할 수 있다³⁾. 본 논문에서 그림 1과 같은 공유 비콘(Beacon-Only Period, BOP) 방식을 이용하여 효율적인 라우팅 프로토콜을 제안하고자 한다. BOP 구간에서 노드 ZR0는 B1, ZR1은 B2, ZR2는 B3을 사용하며 구체적인 비콘 공유 구조와 방법은 그림 1과 같다.

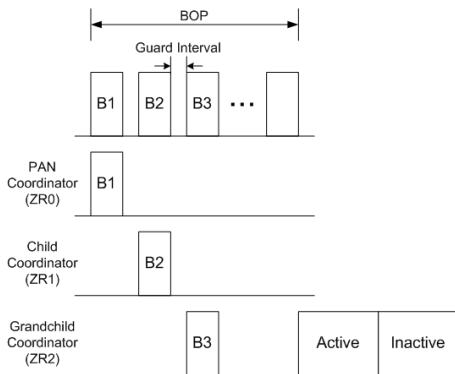


그림 1. 비콘 구간(BOP) 공유 원리

IEEE 802.15.4의 한 수퍼프레임은 BO(Beacon Order) 값에 의한 BI(Beacon Interval) 구간 값과 SO(Superframe Order) 값에 의해 각각 SD(Superframe Duration) 구간으로 나뉜다. SD 구간에서 Active 영역은 BI의 크기와 상관없이 항상 16 개의 슬롯(Slot)으로 나뉘며 이 구간은 다시 Beacon 또는 BOP(Beacon Only Period), CAP(Contention Access Period), CFP(Contention Free Period)/GTS(Guaranteed Time Slot) 구간으로 나뉜다. BOP 구간에서는 ZigBee Coordinator (ZC0)와 다수의 ZigBee Router (ZR1~2) 들이 비콘을 전송하기 위한 구간으로, BOP 구간에 CSMA와 무관하게 비콘을 전송하는 구간을 의미한다. 이때, 하나의 수퍼프레임 내에 여러 개의 비콘이 동기화되어 있으므로 하나의 WPAN 네트워크에 존재하는 모든 기기들은 같은 수퍼프레임 구조를 이용하여 데이터를 송/수신한다.

2.2 트리 라우팅 (Tree Routing)

표준에 따르면 그림 1과 같이 BOP 구간에서 비콘을 수신한 노드는 망 자원을 공유하기 위하여 연결(Association) 작업이 필요하다. 먼저 ZR1은 ZR0에 연결하기 위하여 MAC 계층에서 발생하는 Association Flooding (Beacon Request) 정보를 이용하여 무선 센서 노드로부터 싱크 노드까지 효율적인 패킷 전송 경로를 설정하는 트리 라우팅 방법을 이용한다^{4,6)}. IEEE 802.15.4 표준에 따르면 ZED 또는 ZR은 WPAN에서 패킷을 전송하기 전에 연결(Association, Flooding)을 요구한다. 이러한 연결은 기본적으로 그림 2와 같이 부모 노드(Parent Node)와 자식 노드(Child Node)사이의 제어 정보 공유를 통하여 이루어진다. 이때 각 자식 노드들은 연결 시 부모 노드의 주소를 알 수 있다. 이때 발생하는 부모 노드와 자식 노드

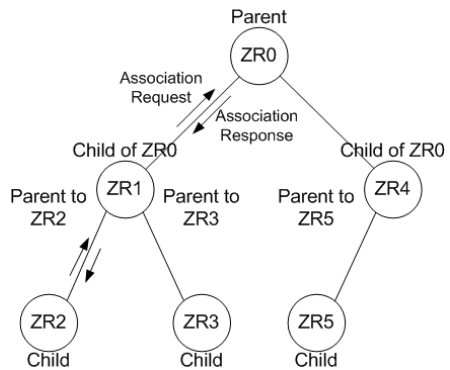


그림 2. 트리 라우팅 동작 원리

사이의 연결 구조(Association Tree)를 이용하여 무선 노드와 싱크 노드 사이의 연결 구조를 생성하고 이를 이용하여 통신하는 것이 교차 계층 트리 라우팅이다. 선행 연구 결과에 따르면 ZR1이 ZR0에 연결 시 RSSI 또는 ED (Energy Detection) 스캔 같은 단순 링크 특성을 이용하여 가입한다. 이러한 방식은 주변 부하와 RSSI 사이에 큰 차이가 있는 환경에서 단순 RSSI만 고려하여 가입을 수행하는 기존 방식은 최적 경로 선정에 많은 문제가 있다.

이에 본 논문에서는 네트워크 계층에서 주변 노드들의 비용을 고려하여 무선 센서 노드로부터 싱크 노드까지 효율적인 패킷 전송 경로를 설정하는 방법을 제시한다. 구체적으로 BOP 구간과 트리 라우팅을 기반으로 주변 RSSI 및 트래픽 분산 정보에 따른 비용을 고려하여 최적 경로를 결정하는 방식이다.

3. 비용 함수

표준에 따르면 새로운 노드가 네트워크에 접속하기 위해서는 연결 단계를 거쳐야 한다. 이 단계에서 새로운 노드는 이웃 노드들을 발견하기 위해 스캔과정을 수행하고 가장 강한 RSSI를 갖는 노드를 부모 노드로 선택하여 이 노드와 연결을 수행한다. 그러나 이 방법은 노드의 트래픽 로드를 전혀 고려하지 않고 단지 RSSI 신호 세기에 따라 부모 노드를 결정하고 연결을 하기 때문에 전체 네트워크 측면에서 로드 분산(Load Balancing)이 되지 않는다. 그림 3은 새로운 노드가 네트워크에 연결하는 예를 보여준다. 이 그림에서 노드 6이 새로운 노드이고 노드 4와 2로부터 비콘 프레임을 받는다고 가정한다. 그리고 노드 4로부터의 신호가 노드 2로부터의 신호보다 강하다고 가정한다. 표준 방법에 따르면 강한 RSSI 신호를 갖는 노드 4를 선택하고 연결을 수행할 것이다. 그러면 노드 6이 전송한 데이터는 싱크 노드까지 전송되는 과정에서 노드 1, 3, 4, 7, 8이 전송하는 데이터와 경쟁해야 한다. 싱크

노드의 오른쪽은 노드 2와 5만 경쟁하기 때문에 트래픽 분산의 불균형을 초래하게 된다. 따라서 트래픽 분산을 고려하여 노드 6은 노드 2와 연결하는 것이 더 좋다.

새로운 노드의 연결 단계에서 트래픽 분산만을 고려하는 것은 좋지 않다. 라디오 채널의 링크 품질에 따라서 무선 센서 네트워크의 성능은 크게 영향을 받기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 트래픽 양(*TR*: Traffic Load)과 링크 품질(*LQ*: Link Quality)을 고려한 새로운 메트릭(Metric)인 트래픽 전송 비용(*Cost* 값)을 제시하고 이에 따라 어느 노드와 연결을 할지 결정하는 방법을 제안한다. 본 논문에서는 노드가 전송할 트래픽 양이 가변적이지 않으며 네트워크에 연결하는 단계에 알고 있다고 가정한다.

일반적인 통신에서 트래픽 양이 많을수록 그리고 링크 품질이 낮을수록 데이터 전송을 위한 비용은 많이 들어간다. 따라서 본 논문에서 사용되는 *Cost* 값은 다음과 같이 정의된다.

$$Cost = \frac{TR}{LQ} \tag{1}$$

3.1 링크 품질(LQ)

라디오 채널의 *LQ* 값은 RSSI에 근거하여 계산된다. RSSI 값은 1 바이트로 표시되며 0~255 사이의 정수 값을 갖는다. 256개의 신호 세기 레벨을 표현하는 벤더(Vendor)의 제품은 없다. 즉, 벤더에 따라 적절한 최대 RSSI 값($RSSI_{max}$)이 선택되고 사용된다. 따라서 어느 한 벤더가 만든 제품의 RF(Radio Frequency) 에너지 레벨은 0~ $RSSI_{max}$ 값을 갖는다. 본 논문에서는 벤더의 제품에 상관없이 서로 비교할 수 있도록 RSSI 값 자체를 *LQ* 값으로 사용하지 않고 수신한 패킷에 대한 RSSI 값을 $RSSI_{max}$ 로 나눈 값을 사용한다. 즉, 다음과 같이 표현된다.

$$LQ = \frac{RSSI_{receive}}{RSSI_{max}} \tag{2}$$

여기서, $RSSI_{receive}$ 는 노드가 패킷 수신 시 측정된 RSSI 값이다. RSSI 값은 시간에 따라 동적으로 변하기 때문에 일정 시간동안 측정하여 얻은 값에 대한 평균값을 사용한다. 일반적으로 *LQ* 값이 약 0.2 정도이면 로밍 한계치를 의미하고 0.1 이하이면 링크 채널에 전송 중인 신호가 없는 것으로 간주한다. 따라서 새로운 노드가 네트워크에 연결하고 정상적으로 동작하기 위해서는 *LQ* 값이 0.3 이상이어야 한다.

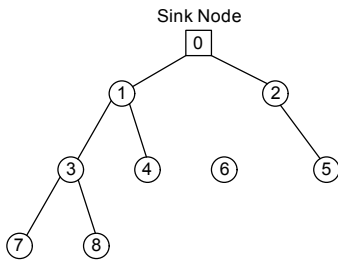


그림 3. 노드의 연결 과정 예

표 1. 트래픽 테이블 예

자식 노드 ID	하위 계층 노드 ID	트래픽 양
3	3	TR_3
3	7	TR_7
3	8	TR_8
4	4	TR_4

3.2 트래픽 양 (TR)

$Cost$ 값을 계산하기 위해서 각 노드는 트래픽 정보를 갖고 있어야 한다. 각 노드는 트래픽 정보를 위해 트래픽 테이블을 유지 관리한다. 트래픽 테이블은 하위 계층에 있는 어떤 노드가 어떤 자식 노드를 통해 얼마만큼의 트래픽을 전송하는지를 알 수 있도록 다음 세 가지 정보를 포함한다. (자식 노드 ID, 자식 노드를 통해 트래픽을 전송하는 하위 계층 노드 ID, 각 노드의 트래픽 양). 이 테이블에는 자식 노드의 트래픽 정보도 포함된다. 표 1은 그림 3에서 노드 1의 트래픽 테이블을 나타낸다. TR_i 는 노드 i 가 발생하여 싱크 노드로 전송하는 트래픽 양을 의미한다. 본 논문에서 각 노드는 일정한 트래픽 양을 발생하여 싱크 노드로 전송한다고 가정한다.

새로운 노드 i 는 4장에서 설명할 방법에 의해 이웃 노드 중에서 어떤 노드와 연결을 수행할지 결정한 후에 연결 요청(Association Request) 메시지를 통해 자신의 TR_i 값을 부모 노드에게 전달한다. 그러면 부모 노드는 이 정보를 자신의 트래픽 테이블에 기록하고 다시 자신의 부모 노드에게 연결 요청 메시지를 전달하여 트래픽 테이블을 갱신할 수 있도록 한다. 이 과정은 연결 요청 메시지가 싱크 노드에 도달할 때까지 계속된다. 이를 통해 싱크 노드는 네트워크에 연결된 모든 노드의 트래픽 정보를 알 수 있다.

4. 부모 노드 결정 방법

각 노드는 자신의 비콘 프레임에 $Cost$ 값 정보를 포함하여 자식 노드에게 주기적으로 전송한다. 비콘 프레임에서 $Cost$ 값과 관련된 형식은 그림 4와 같이 부모 노드 정보와 자식 노드 정보 두 부분으로 구성된다. 자식 노드 정보 부분의 길이는 각 노드가 갖는 자식 노드 수에 따라 달라진다. 그림에서 PID는 부모 노드의 ID이고 CID는 자식 노드의 ID이다. 자식 노드 ID는 비콘 프레임에 포함된 $Cost$ 값이 어느 자식 노드에 대한 값인지를 알려주기 위

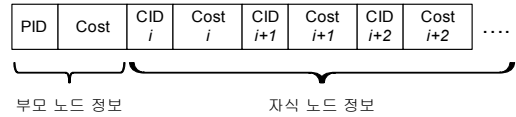


그림 4. 비콘 프레임에 포함되는 $Cost$ 값 정보

해 사용된다.

부모 노드로부터 비콘 프레임 수신한 노드 i 는 다음과 같이 자신이 전송할 비콘 프레임 구성한다. 부모 노드 정보 부분의 PID는 자신의 ID i 이고, $Cost$ 값은 자신의 부모 노드가 전송한 비콘 프레임의 자식 노드 정보 부분에서 자신의 노드 ID로 전송한 $Cost_i$ 이다. 자식 노드 정보 부분의 CID는 자신의 자식 노드인 j 이고 이에 대한 $Cost_j$ 값은 다음과 같다.

$$Cost_j = Cost_i + Cost_{i,j} \quad (3)$$

여기서, $Cost_{i,j}$ 는 노드 i 가 자식 노드 j 를 통해 수신할 트래픽($TR_{i,j}$)과 노드 i, j 간 통신에서 측정된 LQ 값을 이용하여 수식 (1)로 계산된 $Cost$ 값이다. $TR_{i,j}$ 는 노드 j 의 TR_j 와 노드 j 의 자식 노드 k 의 TR_k 의 합이다. 예를, 그림 3에서 노드 1이 자식 노드 3으로부터 수신할 트래픽은 $TR_{1,3} = TR_3 + TR_7 + TR_8$ 이다. 각 자식 노드로부터 수신할 트래픽 양은 자신이 유지 관리하는 트래픽 테이블을 통해 얻어진다. 계산된 $Cost$ 값이 정수가 아니면 표현의 편리성을 위해 반올림하여 정수로 나타낸다. 자신이 마지막 노드여서 자식 노드가 없는 경우에는 비콘 프레임에 부모 노드 정보만 포함하여 전송한다. 비콘 프레임의 $Cost$ 값 정보를 구성하는 과정을 그림 5에 나타내었다.

위와 같이 비콘 프레임에 포함되어 전송되는 $Cost$ 값을 각 링크를 통해 전송되는 $Cost$ 값이 아닌 하위 계층 노드의 $Cost$ 값을 더하는 누적 값을 사용한 이유는 다음과 같다. 새로운 노드가 네트워크에 연결을 시도할 때는 부모 노드부터 싱크 노드까지 경로상의 각 링크에 전송되는 $Cost$ 값 정보를 알아야 최적으로 트래픽을 분산시킬 수 있는 경로를 선택할 수 있다. 모든 링크에 대한 $Cost$ 값 정보를 비콘 프레임에 실어서 전송할 경우에는 정보의 양이 많으므로 간단하게 경로의 트래픽 상태를 알 수 있도록 할 수 있는 누적된 정보를 사용한다.

동작 과정에 대한 구체적인 예는 다음과 같다. 그림 3에서 싱크 노드를 제외하고 각 노드의 TR 값은 10이고 모든 링크의 LQ 값은 1이며 노드 6은 아직 네트워크에

```

if(노드 i가 부모 노드로부터 비콘 프레임 수신)
  // 부모 노드 정보 부분
  PID = i
  Cost = 수신한 비콘 프레임의 자식 노드 정보
        부분에 포함된 Costi

  // 자식 노드 정보 부분
  for(j ∈ 노드 i의 자식 노드 리스트) {
    CID = j

    // 자식 노드 j의 Cost 계산
    TRi,j = TRj (노드 j가 전송할 트래픽 양)
    for(k ∈ 노드 j의 하위 노드 리스트) {
      TRi,j = TRi,j + TRk
    }

    Costi,j = TRi,j/LQ (수식 1)
    Costj = Costi + Costi,j (수식 3)
  }
}
    
```

그림 5. 비콘 프레임의 Cost 값 구성 과정 의사 코드

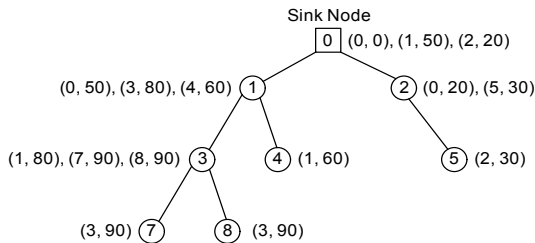


그림 6. 각 노드가 비콘 프레임을 통해 전송하는 Cost 값 예

없다고 가정한다. 그림 6은 각 노드가 전송하는 비콘 프레임에 포함된 Cost 값 예를 나타낸 것이다. 싱크 노드는 부모 노드가 존재하지 않기 때문에 비콘 프레임의 부모 노드 정보 부분에는 자신의 노드 ID와 Cost 값 ‘0’으로 하여 (0, 0)같은 형식으로 하고 자식 노드 정보 부분은 자식 노드 ID와 각 자식 노드에 해당하는 Cost 값을 계산하여 전송한다. 싱크 노드가 유지 관리하는 트래픽 테이블을 통해 자식 노드 1로부터 수신할 트래픽 양($TR_{0,1} = TR_1 + TR_3 + TR_4 + TR_7 + TR_8 = 50$)을 알고 자식 노드 1과 통신하는 동안에 측정하여 얻어진 LQ 값을 이용하여 수식 (1)에 따라 Cost 값을 계산한다. 자식 노드 2에 대한 Cost 값도 이와 같이 계산된다. 계산 결과에 따라 싱크 노드는 비콘 프레임을 통해 정보 (0, 0), (1, 50), (2, 20)을 자식 노드에게 전송한다. 이 비콘 프레임을 수신한

노드 1과 2는 자신의 비콘 프레임을 구성하여 전송한다. 노드 1은 먼저 자신의 부모 노드로부터 수신한 비콘 프레임에 포함된 자식 노드 정보 부분에서 자신의 노드 ID로 전송된 $Cost_1$ 값을 이용하여 부모 노드 정보 부분을 채운다. 즉, (0, 50)이다. 그 다음에 트래픽 테이블을 통해 자신의 각 자식 노드로부터 수신할 트래픽 양을 얻고 LQ 값을 이용하여 각 자식 노드에 대한 Cost 값을 계산한다. 즉, 자식 노드 3과 4 각각에 대한 $Cost_{1,3}$ 과 $Cost_{1,4}$ 값은 30과 10이다. 따라서 노드 1은 부모 노드인 싱크 노드로부터 수신한 Cost 값과 자신이 계산한 각 자식 노드에 대한 Cost 값을 합하여 비콘 프레임의 자식 노드 정보 부분을 채운다. 즉, (3, 80), (4, 60)이다. 마지막으로 노드 1은 채워진 부모 노드 정보 부분과 자식 노드 정보 부분을 비콘 프레임에 포함하여 전송한다. 즉, (0, 50), (3, 80), (4, 60)이 전송된다. 부모 노드로부터 비콘 프레임을 수신한 노드는 이와 같은 과정을 수행한다. 그림에서 노드 4, 5, 7, 8은 자식 노드를 갖지 않기 때문에 부모 노드 정보 부분만 비콘 프레임에 포함하여 다음과 같이 전송한다: 노드 4-(1, 60), 노드 5-(2, 30), 노드 7-(3, 90), 노드 8-(3, 90).

네트워크에 연결하기를 원하는 새로운 노드는 이웃 노드로부터 수신한 비콘 프레임에 포함된 부모 노드 정보 부분의 Cost 값과 비콘 프레임 수신 시 측정된 RSSI 값을 이용하여 얻어진 LQ 값에 근거하여 어떤 이웃 노드를 부모 노드로 결정하고 연결을 수행할지를 결정한다. 본 논문에서 새로운 노드는 다음과 같이 최소 Cost 값을 갖는 이웃 노드를 부모 노드로 결정한다.

$$\min_{i \in N} (Cost_i + Cost_{i,j}) \tag{4}$$

여기에서 N은 새로운 노드의 이웃 노드 셋이고 $Cost_i$ 는 이웃 노드 i로부터 수신한 비콘 프레임에 포함된 부모 노드 정보 부분의 Cost 값이고, $Cost_{i,j}$ 는 새로운 노드 j의 TR_j 와 이웃 노드 i로부터 비콘 프레임 수신 시 측정된 RSSI 값에 근거하여 계산된 LQ 값을 수식 (1)에 대입하여 얻어진 값이다. 그림 7에 부모 노드 선택 과정에 대한 의사 코드를 나타내었다.

예를 들어 설명하기 위해, 그림 3에서 노드 6이 네트워크에 연결하기를 원하고 노드 2와 4로부터 비콘 프레임을 수신하였으며 LQ 값은 각각 0.8과 1이라고 가정한다. 또한 노드 6의 TR_6 은 10이며 이웃 노드로부터 수신한 Cost 값은 그림 6과 같다. 노드 2와 노드 6 사이의 $Cost_{2,6}$ 값은 $13(=10/0.8)$ 이고 노드 4와 노드 6 사이의 $Cost_{4,6}$ 값은 $10(=10/1)$ 이다. 이웃 노드의 부모 노드 정

```

for( $i \in$  새로운 노드  $j$ 의 이웃 노드) {
  if(이웃 노드  $i$ 로부터 비콘 프레임 수신) {
    RSSI 측정
    LQ 계산 (수식 2)
     $Cost_i$  = 노드  $i$ 가 전송한 비콘 프레임에서
      부모 노드 정보 부분의  $Cost$  값
     $Cost_{i,j}$  =  $TR_j/LQ$  (수식 1)
     $Cost_{neighbor_i}$  =  $Cost_i + Cost_{i,j}$  (수식 3)
  }
}
최소  $Cost_{neighbor_i}$  값을 갖는 노드를 부모 노드로
선택 (수식 4)
    
```

그림 7. 부모 노드 선택 과정 의사 코드

표 2. 시뮬레이션 파라미터

파라미터	값
Number of Nodes	9
Packet Size	128 Bytes
Duty Cycle(BO:SO)	(8:4, 8:5, 8:6, 8:7, 8:8)
Simulation Time	1000 sec

보 부분의 값을 고려하면 노드 2와 연결 시에는 비용이 $33(=Cost_2 + Cost_{2,6}=20+13)$ 이고 노드 4와 연결 시에는 $70(=Cost_4 + Cost_{4,6}=60+10)$ 이 되므로 새로운 노드는 노드 2를 부모 노드로 결정한다.

5. 성능 평가

제안한 CFR 프로토콜의 효율성을 검증하기 위하여 TinyOS용 시뮬레이터인 TOSSIM 환경에서 CFR 및 트리 라우팅(TR: Tree Routing)을 구현하였다. 시험한 망 구성은 그림 3과 같으며 총 노드 수는 9개이다. 인접한 노드는 무선 주파수 도달 범위에 배치하였다.

설정된 노드는 일정한 간격으로 배치하고 각 노드는 라우팅 기능을 탑재한 FFD(Full-function device) 노드로 구성된 비콘 기반 IEEE 802.15.4 망을 형성한다. 시뮬레이션에서 사용된 파라미터는 표 2와 같다. 각 노드는 CBR(Constant Bit Rate)로 데이터를 생성한다.

본 논문에서 사용된 성능 평가 요소는 다음과 같다.

- 전달율(Delivery Ratio): 각 센서 노드가 전송한 데이터 패킷 중에서 싱크 노드에 정확하게 도달한 패킷의 비율을 나타낸다.

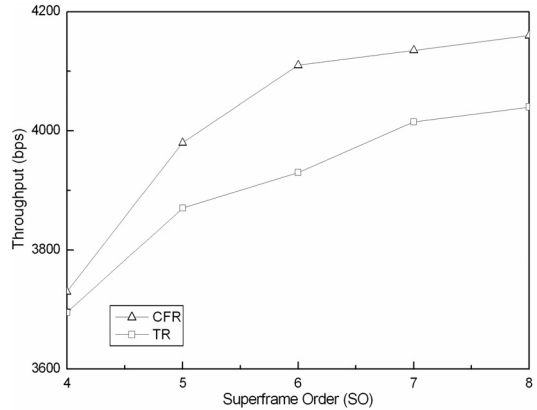


그림 8. Duty Cycle에 따른 효율

- 효율(Throughput): 싱크 노드가 에러 없이 수신한 데이터양을 나타낸다.
- 에너지(Energy): 네트워크 상의 노드가 데이터 패킷을 전송할 때 소비하는 에너지 총량을 나타낸다.

그림 8은 Duty Cycle에서 BO 값을 8로 고정된 후에 SO 값을 4에서 8까지 변경할 때의 효율을 나타낸다. 결과에 보인 것처럼 SO 값이 커짐에 따라 두 가지 방법 모두 효율은 증가함을 볼 수 있다. 이는 SO 값이 커지면 각 노드가 휴지 모드(Sleep Mode)에 있는 시간보다 동작 모드에 있는 시간이 커지기 때문에 전송할 데이터를 싱크 노드로 많이 전송할 수 있기 때문이다. 제안한 방법은 SO 값의 변화와 상관없이 효율이 트리 라우팅보다 좋음을 알 수 있다. 트리 라우팅은 RSSI 값에 의해 부모 자식 관계를 형성하기 때문에 트래픽을 분산시키지 못하고 많은 트래픽이 같은 경로를 따라 전송되기 때문에 채널 점유를 위한 경쟁 및 충돌을 유발하여 성능이 좋지 않다. 그러나 제안한 CFR 방법은 비용 함수에 근거하여 트래픽을 분산시켰기 때문에 상대적으로 경쟁과 충돌이 줄어들어 성능을 향상시킨다.

그림 9는 Duty Cycle에서 SO 값의 변화에 따른 전송 데이터 패킷이 싱크 노드에 정확히 도달되는 비율을 나타낸다. 그림 8에서 보인 것처럼 제안된 방법은 비용 함수를 사용하여 트래픽을 분산시켰기 때문에 성공적으로 싱크 노드로 패킷이 전달될 가능성도 높음을 알 수 있다. 트리 라우팅 방법은 분산되지 않은 트래픽으로 인해 인터플로우(Inter-flow) 문제와 인트라플로우(Intra-flow) 문제를 더 크게 유발한다. 따라서 서로 데이터를 전송하기 위해 경쟁하기 때문에 전달율은 낮다.

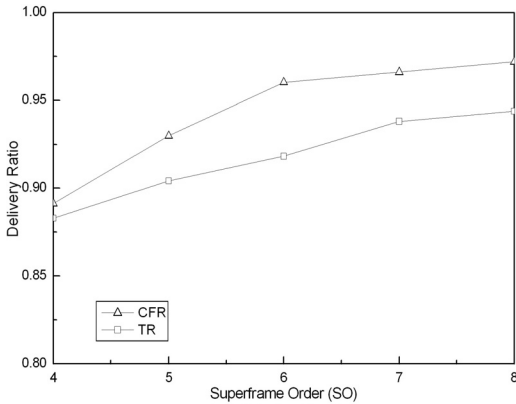


그림 9. Duty Cycle에 따른 전달율

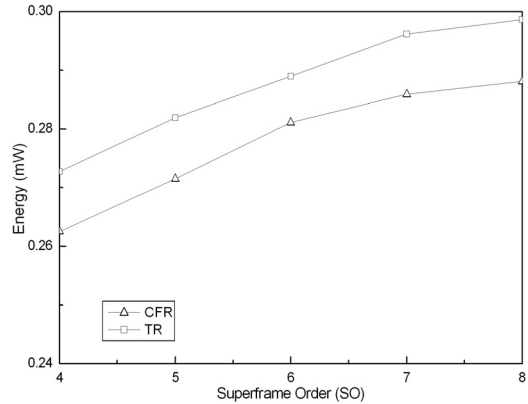


그림 10. Duty Cycle에 따른 에너지 소비량

그림 10은 Duty Cycle에 따라 각 노드가 데이터 패킷 전송 시 소비되는 에너지 총량을 나타낸 것이다. 그림 8, 9에서 보인 것처럼 SO 값이 증가함에 따라 노드가 동작 모드에 있을 시간이 많아지게 되어 효율 및 전달율 또한 증가한다. 이와 같이 전송되는 데이터 패킷이 증가하게 되어 소비되는 에너지 또한 증가하게 된다. 그러나 제안하는 방법은 트래픽 분산으로 인터플로우 및 인트라플로우 문제가 줄어들고 충돌이 적어지기 때문에 트리 라우팅 방법보다 소비되는 에너지량은 적음을 알 수 있다.

6. 결 론

IEEE 802.15.4의 트리 라우팅 방법은 MAC 계층의 토폴로지 형성 과정 동안에 만들어진 부모-자식 관계에 근거하여 센서 노드로부터 싱크 노드로 데이터를 전송한다. 이 방법은 새로운 노드가 네트워크에 가입하기 위해 강한 RSSI 신호를 갖는 노드를 부모 노드로 선택하기 때문에 트래픽 분산이 이루어지지 않는다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 로드 분산을 위해 링크 품질과 트래픽 양 정보를 이용하는 새로운 메트릭을 제시하고 RSSI 신호 세기 대신에 제시된 메트릭을 사용하여 부모 노드를 선택하여 네트워크에 가입하는 방법을 제안하였다. 제안된 CFR 방법은 트리 라우팅 방법에 비해 SO 값과 상관없이 성능을 항상 좋게 유지함을 보였다.

참 고 문 헌

1. P. Levis, N. Lee, M. Welsh, and D. Culler, "TOSSIM: accurate and scalable simulation of entire TinyOS

applications," *SenSys'03*, 2003.

2. A. Koubaa, M. ALVES, and E. TOVAR, "A comprehensive simulation study of slotted CSMA-CA for IEEE 802.15.4 wireless sensor networks," *IEEE WFCS'06*, pp. 63-70, 2006.

3. A. Koubaa, M. Alves, M. Attia, and A. Nieuwenhuysse, "Collision-free beacon scheduling mechanisms for IEEE 802.15.4/ Zigbee cluster-tree wireless sensor networks," Technical Report IPP-Hurray, TR-061104, 2006.

4. F. Cuomo, L. Della, U. Monaco, and F. Melodia, "Routing in ZigBee: benefits from exploiting the IEEE 802.15.4 association tree," *IEEE ICC07*, pp. 3271-3276, 2007.

5. E.M. Royer, C.E. Perkins, and S.R. Das, "Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing," RFC 3561.

6. W. Qiu, E. Skafidas, and P. Hao, "Enhanced tree routing for wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 3, pp. 638-650, 2009.

7. C.E. Perkins and E.M. Royer, "Ad-hoc on-demand distance vector routing," in *Proceedings of the Second IEEE Workshop on Mobile Computer Systems and Applications*, New Orleans, USA, pp. 90-100, 1999.

8. D.B. Johnson, D.A. Maltz, and J. Broch, *DSR: the dynamic source routing protocol for multi-hop wireless ad hoc networks*, Ad-Hoc Networking, Addison Wesley, pp. 139-172, 2001.

9. B. Zhang and H.T. Mouftah, "Energy-aware on-demand routing protocols for wireless ad hoc networks," *Wireless Networks*, vol. 12, pp. 481-494, 2006.

10. J.-H. Chang and L. Tassiulas, "Routing for maximum system lifetime in wireless ad-hoc networks," in *37th Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing*, 1999.

11. S. Giordano, I. Stojmenovic, and L. Blazevic, "Position-based routing algorithms for ad hoc networks: a taxonomy," *Ad Hoc Wireless Networks*, pp. 103-36, 2004.
12. J. Sanchez, P. Ruiz, and R. Marin-Perez, "Beacon-less geographic routing made practical: challenges, design guidelines, and protocols," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 8, pp. 85-91, 2009.
13. S. Subramanian and S. Shakkottai, "Geographic routing with limited information in sensor networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 56, no. 9, pp. 4506-4519, 2010.
14. Y.-M. Yang and I. Jeon, "An efficient self routing scheme by using parent-child association for WSNs," *LNCS 5370*, pp. 785-794, 2008.
15. M. Al-Harbawi, M.F.A. Rasid, and N.K. Noordin, "Improved tree routing (ImpTR) protocol for ZigBee network," *International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 9 no. 10, pp. 146-152, 2009.
16. H. Fariborzi and M. Moghavvemi, "EAMTR: energy aware multi-tree routing for wireless sensor networks," *IET Communications*, vol. 3, no. 5, pp. 733-739, 2009.



김 선 명 (sunmyeng@kumoh.ac.kr)

2000 아주대학교 정보 및 컴퓨터공학부 학사
 2002 아주대학교 정보통신공학과 석사
 2006 아주대학교 정보통신공학과 박사
 2006~2008 플로리다대학교 전기 및 컴퓨터공학과 박사후 과정
 2008~현재 금오공과대학교 컴퓨터공학부 조교수

관심분야 : 무선 랜 및 팬, 무선 메쉬 네트워크, 수중 센서네트워크



양 연 모 (yangym@kumoh.ac.kr)

1990 한국과학기술원 전기및전자공학과
 2006 광주과학기술원 정보및기전공학부 공학박사
 2005 노스캐롤라이나 주립대학
 2006~2008 대구경북과학기술원
 2008~현재 금오공과대학교 전자공학부 전자통신

관심분야 : WSNs, PONs, URC, 위치인식 융합기술