

센서 네트워크에서 에너지 효율과 충돌 회피를 위한 타임 트리 스케줄링

이길홍^{*}

요약

본 논문은 무선 센서 네트워크에서 데이터를 수집하고 스케줄링을 수행하는 방안을 제시한다. 각각의 센서 노드에서 베이스 노드로 데이터를 모으기 위해, 데이터 수집 타임 트리를 사용한다. 데이터를 베이스 노드로 전송하는 과정에서 충돌 확률을 줄이고 효율적인 에너지의 사용을 위해 타임 트리가 사용된다. 타임 트리는 베이스 노드가 루트이고, 각 센서 노드가 데이터를 전송하는 중계 노드 혹은 단말 노드가 된다. 트리내의 노드는 정해진 시간에 활성화하여 데이터를 보내고, 대기상태로 돌아가 에너지를 보존한다. 각각의 타임 트리는 서로 다른 활성화 비율과 활성화 시간을 갖는다. 제안 기법은 SMAC과 DMAC과 같은 다른 활성화 기반의 매체 접근 프로토콜과 비교해서 더 좋은 에너지 효율과 데이터 도착율을 갖는다.

A Time Tree Scheduling Scheme for Energy Efficiency and Collision Avoidance in Sensor Networks

Kil-Hung Lee^{*}

ABSTRACT

This paper presents a data gathering and scheduling scheme for wireless sensor networks. We use a data gathering tree for sending the data from the sensor node to the base station. For an energy efficient operation of the sensor networks in a distributed manner, a time tree is built in order to reduce the collision probability and to minimize the total energy required to send data to the base station. A time tree is a data gathering tree where the base station is the root and each sensor node is either a relaying or a leaf node of the tree. Each tree operates in a different time schedule with possible different activation rate. Through the simulation, we found that the proposed scheme that uses time trees shows better characteristics in energy and data arrival rate when compared with other schemes such as SMAC and DMAC.

Key words: Sensor Network(센서 네트워크), Data Gathering Tree(데이터 수집 트리), Time Scheduling (타임 스케줄링)

1. 서론

마이크로 일렉트로닉스에서의 최신의 기술 개발은 저전력, 저가격 및 고성능의 처리 능력과 통신 기능을 갖춘 센서 노드를 가능하게 하고 있다. 이들 장치는 소규모 혹은 넓은 지역에 분포되어 주변의 환경

정보를 얻어 필요한 곳으로 전달해 준다. 이동 혹은 고정된 형태로 분산 배치되어 무선으로 주변 정보를 전달하는 이러한 네트워크를 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network, WSN)라 부른다 [1]. 그 중에서도 보통 고정된 형태로 모든 필요한 장치와 장소에 배치되어 필요한 정보를 추출해 무선을 통해

* 교신저자(Corresponding Author): 이길홍, 주소: 서울특별시 노원구 공릉2동 172(139-743), 전화: 02)970-6704, FAX: 02)977-9441, E-mail: khlee@snut.ac.kr

접수일: 2009년 2월 13일, 완료일: 2009년 4월 28일
^{*} 서울산업대학교 공과대학 컴퓨터공학과 부교수

정보를 전달해주는 네트워크가 유비쿼터스 센서 네트워크 (Ubiquitous Sensor Network, USN)이다.

센서 노드에서 수집된 이들 정보를 효과적으로 전달하는 것은 아주 중요한 과제이다. 센서 단말 노드가 직접 목적지 노드인 데이터 수집 노드로 정보를 전달할 수도 있지만, 보통 에너지 효율을 고려하여 하나 이상의 노드를 거쳐 데이터를 전달한다. 타겟을 좀 더 자세히 관찰하기 위해 많은 센서 노드들이 같은 지역에 전개된 집중 센서 네트워크에서, 빠르고 아주 안정적인 데이터의 전달은 아주 중요한 요소이다 [2]. 하지만, 에너지 효율적이면서도 신뢰성 있는 센서망을 같이 구현하는 것은 쉬운 일이 아니다.

센서 망에서 에너지를 효율적으로 이용하기 위해 에너지 효율적인 라우팅 방안을 이용하거나 [3], 에너지 효율적인 매체 접근 기법을 이용하거나 [4], 또는 두 가지 모두를 같이 조합하여 필요한 서비스 품질을 얻도록 할 수 있다 [5]. 또한, 에너지를 보존하기 위해 무선 라디오의 기능을 관리하는 방안도 매우 효과적이다. 본 논문에서는 센서 데이터의 전달 에너지를 고려한 데이터 수집 타임 트리를 이용하여 데이터를 전달하는 에너지 효율적인 활성화 방안을 제시한다. 제안 방안은 매체 접근 제어 기법을 효율적인 스케줄링을 통해 에너지 효율화를 얻는 방안이다. 제안 방안의 개념과 동적 방안을 소개하고, 기존 방안과의 비교를 통해 제안 방안의 성능과 타당성을 제시하고자 한다. 본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 기존의 제시된 매체 접근 제어 방안 및 스케줄링 기법에 대해 알아본다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 데이터 수집 트리 기반의 타임 스케줄링 방안을 소개한다. 4장에서 시뮬레이션을 통해 제안 방안의 특성을 살펴보고 5장에서 결론을 맺겠다.

2. 관련 연구

무선 센서 네트워크는 노드 간에 라디오 채널을 공유하고, 따라서 데이터의 안전한 전달을 위한 매체 액세스 제어 (MAC, Medium Access Control)가 필요하다. MAC 프로토콜에는 경쟁 노드가 공유 매체에 액세스할 할 때 생길 수 있는 노드 사이의 충돌과 간섭이 생기지 않도록 하기 위한 방안이 마련되어 있다. 무선 센서 네트워크에서 많이 사용하는 두 가지 접근 방법은 일반적으로 경쟁 기반과 슬롯 기반의

MAC 프로토콜이다.

경쟁 기반의 MAC 프로토콜은 공유 매체를 랜덤하게 액세스하고 충돌을 방지하는 메커니즘을 가지고 있다. ALOHA[6]와 CSMA/CA (Carrier Sense Medium Access/Collision Avoidance) 프로토콜 같은 경우가 이런 방식의 프로토콜이다. IEEE 802.11 무선 표준[7]은 데이터를 충돌 없이 안전하게 보내고 숨겨진 노드 현상을 방지하기 위해 RTS/CTS (Request to Send/clear to Send) 메커니즘을 사용한다. IEEE 802.11에서는 크게 두 가지 방식의 데이터 전달 방식이 있는데, 하나는 분산 제어 방식 (Distributed Coordinated Function, DCF)과 지점 제어 방식 (Point Coordination Function, PCF)으로 알려져 있다. DCF는 CSMA/CA 기반 프로토콜과 ACK를 사용하여 데이터를 전달한다. PCF는 중앙 액세스 포인트에서 각각의 노드를 주기적으로 폴링하여 데이터를 보낼 데이터를 조정하여 매체 접근을 제어한다. 낮은 속도의 무선 개인 네트워크의 표준이 IEEE 802.15.4 (LR-WPAN)[8]의 슈퍼 프레임내의 CAP (Contention Access Period)에 경쟁 기반의 프로토콜을 사용한다.

무선 매체에 대한 또 다른 접근법은 스케줄링 기반의 MAC 프로토콜이 있다. 이 방식에서는 무선 노드가 무선 매체에 접근하는 방식은 미리 결정된 패턴에 따른 순서에 기반 한다. 적절한 스케줄링 정책하에서는 이 방식이 높은 트래픽 부하에 좋은 성능을 보여줄 수 있다. 시간 분할 다중 접속 (TDMA) 또는 주파수 분할 다중 접속 (FDMA)과 코드 분할 다중 접속 (CDMA) 기술의 채널을 기반으로 분할하여 할당 하는 방안이 이러한 예이다. 하지만 대부분의 경우에, 매체의 접근을 효율적으로 하기 위해 이러한 기술을 매체 결합 방식을 함께 사용한다. 802.15.4의 CFP (Contention Free Period)의 경우에 스케줄링 기법을 사용하여 충돌 없이 사용할 수 있다.

센서 네트워크의 에너지를 줄이기 위해서는, 노드의 무선 라디오의 활동을 적절히 관리하는 방식이 노드의 에너지 절약에 아주 중요한 방안이다. 이 방식은 주기적으로 혹은 노드가 데이터를 보내고 있지 않거나 수신하지 않을 경우에 가능한 한 라디오를 대기 모드로 전환하는 방식이다. SMAC[9]에서는, 네트워크내의 모든 노드가 미리 정해진 시간에 같이 깨어나서 보낼 데이터가 있는 경우에는 데이터를 보

내고, 일정시간 다시 대기 모드로 전환한다. 이러한 대기 및 활성화 방식은 네트워크의 노드의 에너지를 획기적으로 절약해 준다. SMAC에서의 문제점은 수면 방식에 따른 데이터 전달에 있어서의 긴 지연시간이다. 적응 수신 기법[10]의 SMAC 확장 방안은 노드의 활성화 기간을 가변적으로 하여 어느 정도 지연 시간을 단축시켜 준다. TMAC (Timeout MAC)[11] 프로토콜도 노드의 활성화 시간을 인근 노드의 데이터 전송을 감지하여 가변적으로 활성화 시간을 조절하여 대기 시간으로의 전환을 가변적으로 조절한다.

데이터 수집 MAC (Data-gathering MAC, DMAC)에서는 이러한 데이터 전달 지연 문제를, 활성화 및 대기의 시간을 데이터 수집 트리에서의 노드의 위치에 따라 스케줄링 함으로써 해결하고 있다 [12]. 이 방식은 데이터의 전달 시간에 맞춰 노드가 활성화 되고 이를 통지받을 수 있으므로 중단 없는 데이터의 연속적인 전달이 가능해진다. DMAC은 또한, 채널 경쟁과 충돌에 따른 문제를 해결하기 위해, 데이터 예측 방식과 추가 데이터 전달 (More to Send, MTS) 방식을 제안하고 있다. 연속적인 노드의 활성화 방안과 MTS 기법의 사용으로 DMAC 방안은 데이터의 신뢰성을 보장하면서도 높은 에너지 절약과 지연 절감 효과를 가능하게 해 준다.

3. TTS (Time Tree Scheduling) Scheme

네트워크의 데이터 전송경로는 서로 다른 활성 시간을 갖는 복수개의 집성 트리로 구성된다. 각 트리는 트리의 깊이에 따라 순차적으로 깨어나서, 루트 노드인 BS (Base Station) 노드로 데이터를 전송하는 망 내의 노드 집합 트리이다. 데이터를 보내고자

하는 센서 노드는, 선택한 트리를 따라 루트 노드로의 밴드폭을 예약한 다음, 해당 트리의 활성화 시간에 순차적으로 깨어나서 데이터를 트리의 부모 노드로 전송한다. 전송된 데이터는 트리 내에서 단계별로 시간 차이를 가지면서 활성화된 노드를 따라 순차적으로 BS 노드로 모아진다. 각각의 트리는 서로 다른 트래픽을 효과적으로 처리할 수 있고, 서로 다른 비율로 활성화되어 데이터를 나른다.

3.1 트리 구성

트리 구성은 BS 노드가 트리 메시지를 보내는 것으로부터 시작된다. BS 노드는 트리의 식별자와 속성을 가진 트리 메시지를 주변 노드로 보낸다. 트리 메시지를 받은 각 노드는 트리 메시지의 깊이를 증가시키고 주변 노드로 다시 방송한다. 메시지에는 트리의 깊이뿐만 아니라, BS 노드까지 보내는데 필요한 에너지와 활성화 속도, 가능 밴드폭 등이 같이 들어 있다. 다수의 주변 노드로부터 들어온 같은 식별자의 트리 메시지를 검토한 후에, 충분한 밴드폭을 가지면서 BS 노드로의 깊이와 전송 에너지를 최소로 하는 노드를 부모 노드로 하고, 다시 주변 노드로 트리 메시지를 방송한다.

그림 1과 같이 각 트리의 식별자별로 별도의 트리 T_a 및 T_b 가 네트워크 내에 독립적으로 존재한다. 그림 1(a)에서 각 노드는 트리의 식별자별로 부모 노드가 따로 존재한다. 트리의 구성을 위해, 부모 노드로 정해진 노드로 자식 노드가 트리의 등록 메시지를 전송한다. 등록 메시지를 받은 부모 노드는, 메시지를 보낸 노드를 자식 노드 그룹에 포함 시키고, 응답 메시지를 보낸다. 응답 메시지를 받은 자식 노드는,

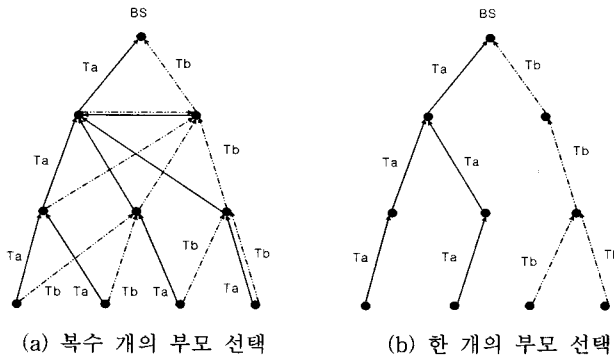


그림 1. 트리의 구성 형태

부모 노드가 아닌 다른 모든 주변 노드로 해당 이름을 갖는 트리 메시지를 방송하면서 트리가 구성되고 확장된다. 복수개의 타임 트리의 장점은 에너지 소비의 분산과 대체 경로의 확보에 있다.

그림 1(b)와 같이 부모 노드를 오직 하나만 선택하고, 다른 하나는 백업만을 위한 잠정 부모 노드로 지정하는 경우, 각각의 타임 트리는 서로 분리된 노드 그룹이 된다. 이 경우, 각 타임 트리는 따로 활성화되기 때문에 노드의 활성화 빈도를 줄일 수 있다. 활성화 빈도를 줄이면 노드의 에너지를 줄일 수 있고, 충돌의 확률도 줄일 수 있다. 각 노드의 위치를 정확히 알 수 있는 경우, 노드들을 적절한 트리로 분류 및 선택하게 함으로써, 동시에 활성화되는 노드간의 거리를 넓게 할 수 있어 충돌의 확률을 더 줄일 수 있다.

3.2 전송 사이클

각 노드에서의 전송은 DMAC [12]에서와 같이 트리의 하단부터 BS 노드로, 트리를 따라 순차적으로 수행된다. 즉, 그림 2에서와 같이 데이터를 보내려는 한 노드에서 트리의 부모 노드로 데이터 송신을 수행하고, 이때 부모 단에서는 데이터 수신 동작이 일어난다. 다음에, 부모 노드에서 또한 자신이 속한 트리의 부모 노드로 데이터 송신을 하고, 부모의 부모 단에서 데이터 수신이 일어난다. 이러한 사이클이 루트 노드인 BS 노드까지 계속 이루어진다.

각 노드의 전송 시간은 프레임내의 각 사이클로 구성된다. 그림 3에서 하나의 프레임은 T_n 개의 타임

트리로 시간을 분리한 다음, 각 노드는 해당 트리에 설정된 시간 내에서 각 노드의 트리 내에서의 깊이에 따라, 전송 및 수신 시간이 정해진다. BS 노드에 연결된 첫 번째 자식 노드는 프레임 내의 한 슬롯에서 데이터를 BS 노드로 전송한다. 첫 번째 자식 노드에 연결된 자식 노드들은 해당 프레임의 시작 시간에서, 다음 트리의 시작 슬롯 시간 전에 자신의 데이터의 전송을 마쳐야 한다.

한 노드에서 몇 개의 송신 및 수신 사이클을 수행한 뒤에 대기 모드로 들어갈 것인가는 트리 초기화 메시지에 나타나 있다. 활동 사이클의 슬롯 개수가 1인 경우, 하나의 수신 슬롯 이후에 하나의 송신 슬롯이 온다. 사이클의 개수가 2개인 경우, 2개의 수신 슬롯 이후에 2개의 송신 슬롯이 온 이후에 대기 사이클이 된다. 각 트리마다 활성화 슬롯의 개수가 다르게 책정될 수 있다. 트래픽이 작은 경우에는 하나의 활성화 슬롯이 효과적이지만, 트래픽이 많은 경우에는 많은 개수의 활성화 슬롯이 에너지 절약에 효과적일 수 있다. 다만, 복수 개의 활성화 슬롯의 경우, 트리의 깊이가 길어지면, 센서 단말 노드에서 BS 노드로의 종단 간 지연이 증가하게 된다. 트리의 깊이에 따라 활성화 슬롯의 개수를 달리할 수도 있다. BS 노드가 가까운 노드일수록 활성화 슬롯의 개수를 많이 하고, BS 노드에서 멀어질수록 활성화 슬롯의 개수를 줄일 수 있다. 이는 BS에서 먼 노드들의 에너지를 절약하여 주는데, 이들 노드는 통신에 사용되는 에너지를 줄이는 대신 센싱 데이터를 얻거나 처리하는데 더 많은 에너지를 소비할 수 있다. 트리를 데이터의 유형에 따라 밴드폭을 다르게 사용할 수 있다. 동시성 트래픽과 랜덤 트래픽을 서로 다른 트리를 이용하게 함으로써 트래픽 조절을 쉽게 할 수 있다.

3.3 트래픽 예약

모든 센서 트래픽은 예약 과정을 거쳐 송신 노드로부터 BS 노드까지 밴드폭을 확보한 후에 데이터 전송이 이루어진다. 밴드폭은 노드의 활성화율로 표현된다. 처음에는 모든 노드가 기본 활성화율($Ta-1$)로 동작한다. 더 높은 밴드폭이 필요한 경우 활성화율을 2배로 높인다($Ta-2$). 트래픽이 더 증가한 경우 다시 2배로 올린다($Ta-4$). 이러한 방법으로 가능한 최대 활성화율까지 높일 수 있다. 하나의 노드에 여러 개의 타임 트리가 존재하는 경우, 각각의 타임 트

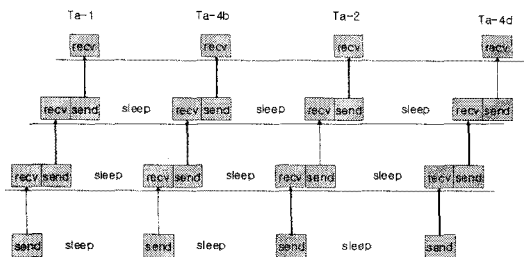


그림 2. 데이터 전송 사이클

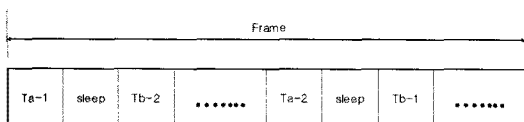


그림 3. 프레임 구조와 슬롯 배치

리에 데이터를 분산하여 보낼 수 있을 것이다. 따라서, 최대 가능한 데이터 전송 비율은 각 타임 트리의 최대 활성화율을 더한 값이 될 것이다.

트래픽 예약 과정은 처음에 BS 노드로부터 시작된다. BS 노드는 필요한 데이터를 기술한 작업 메시지를 망 내의 모든 노드로 브로드캐스팅 한다. 메시지 안에는 필요한 밴드폭이 명시되어 있다. 메시지를 받은 노드는 메시지 내의 데이터 정의가 자신의 노드에서 응답 가능한 데이터의 경우, 예약 응답 메시지를 트리의 부모 노드로 전송한다. 부모 노드는 예약 확인 메시지로 응답하고, 다시 자신의 부모 노드로 예약 응답 메시지를 전달한다. 중간에 밴드폭이 부족한 경우, 밴드폭을 예약한 자식 노드로 예약 해제 메시지를 전달한다. 이 메시지는 응답 메시지를 처음 전송한 노드로 되돌려지고, 이 메시지를 받은 종단 노드는 다른 트리를 선택하여 새로운 트리의 부모 노드로 메시지를 전달해 나간다.

이러한 결과로 각 트리의 데이터 활성화 비율이 트래픽에 따라 변한다. 트리 내에서도 루트 부근의 활성화 비율이 종단 노드의 활성화율과 다를 수 있다. 트리의 루트로 올라감에 따라 트리의 활성화 비율이 높아진다. 예약을 필요로 하지 않은 일과성 이벤트 메시지는 기존의 채널을 통해 전송된다.

망의 각 노드는 데이터 전송을 위해 예약된 경로의 밴드폭을 보장 받는다. 각 노드에서 전송한 데이터의 충돌이 생기지 않는다면 해당 사이클에서 BS 노드로 전송될 수 있다. 이런 경우, 지연은 해당 사이클의 활성화 기간 범위 내에 있다. 하지만 충돌이나 다른 문제로 해당 사이클에 데이터를 전송하지 못했을 경우에는 다음 사이클에서 다시 시도하게 된다.

데이터의 전송 지연이 한 사이클 이내로 제한된 애플리케이션의 경우에는 다음 사이클까지 기다리지 않고 추가 사이클을 요구할 수 있다. 추가 사이클은 해당 트리의 최대 활성화율의 다음 활성화 시간에 데이터의 재전송이 시도 된다. 재전송을 허용할지의 여부는 트리 메시지내의 옵션으로 지정되어 있다. 이러한 방안은 트리별로 다르게 적용할 수 있다.

3.4 매체 액세스 제어

제안 방안에서 사용하는 미디어 액세스 동작은 IEEE 802.11의 동작에 기초를 둔다. 데이터를 보내고자 하는 노드는 활성화 시간 중에 RTS 메시지를 보내

고, 수신 노드로부터 CTS 메시지를 응답 받은 후에 데이터를 보낸다. 특정 시간에 활성화된 노드 중에서 데이터를 보내고자 하는 노드들은 자식 노드들이고, 데이터를 받는 노드는 부모 노드일 것이다. 하나의 부모에 연결된 자식 노드들은 복수개가 될 수 있다.

자식 노드의 데이터의 전송은 같은 슬롯에서 동시에 시도할 수도 있다. 이때 데이터의 충돌이 일어날 수 있고, 이러한 충돌은 데이터 채널의 전송 실패로 이어지고, 계속해서 부모 노드로의 데이터 채널은 빈 채널로 채워진다. 또는, 2개의 부모 노드가 인접한 경우에 각각의 부모에 대한 자식 노드가 데이터를 보낼 때 경합을 통해 전송하게 되는데, 충돌이나, 다른 노드의 전송으로 인해 전송할 채널이 데이터의 전송을 못하게 되는 경우가 있을 수 있다. 이때 RTS/CTS 메커니즘이 이들 충돌 문제를 해결한다.

또한, RTS/CTS 메커니즘은 일종의 타임 동기화 기능을 수행한다. 모든 노드가 시간적으로 동기화 되어 있어야 타임 트리를 통한 순차적 전송이 이루어진다. 부모 노드가 자식 노드보다 늦게 활성화되는 경우 부모 노드는 자식 노드의 RTS 메시지에 응답을 못할 수도 있다. 부모 노드의 장애나, 트리의 활성화 시간에 데이터를 보내지 못하는 상황이 계속되면, 트리의 재구성을 시도한다. 새로운 트리의 재구성이 일어날 때 까지는, 데이터는 라우팅 계층에서 다른 타임 트리를 따라 갈 수 있도록 라우팅 될 수 있다. 어떤 타임 트리를 통해 BS 노드로 갈 것인가는 라우팅 테이블의 타임 트리에 대한 정보에 따른다.

3.5 라우팅 및 복구

라우팅은 데이터 소스나 장애를 감지한 복구 노드에서 일어난다. 라우팅은 트리의 루트 노드로 향하는 방향으로 진행된다. 처음에 어느 트리를 선택할지는 데이터를 보내고자 하는 데이터 소스 노드에서 정한다. 일단 타겟 트리가 정해지면, 예약 절차를 통해 트리를 따라 밴드폭이 예약되고, 해당 트리 내에서 상위 노드로 데이터가 전달된다. 트리의 중간 노드에서 데이터 혼잡이나 노드의 장애 등의 상황을 통해 트리의 재구성이 일어나는 경우에는, 임시로 다른 트리로 경로를 변경할 수 있다.

라우팅 테이블의 참조는 데이터의 소스 노드와 전송 실패에 따른 데이터의 트리를 변경하려는 중간 노드에서 일어난다. 망 내의 트리에서 부모 노드와의

관계에 장애가 발생하면, 해당 전송 시퀀스에서 데이터를 부모 노드로 보낼 수가 없다. 이 경우, 다음 활성화 시간에 깨어나서, 다른 예비 부모 노드로 등록을 하고, 성공적인 트리의 부모 관계를 맺은 다음에 메시지를 전송 할 수 있다. 트리의 재구성이 완성될 때까지는, 임시로 다른 트리의 활성화 시간에 보장 시간 중 여유 시간에 존재하는 경우에 데이터를 보낼 수 있고, 비보장 시간을 통해서도 보낼 수 있다.

데이터를 복수개의 트리로 분산하여 BS 노드로 전달하는 경우, 일부 트리에 장애가 생기더라도 나머지 트리를 이용하여 정상적으로 서비스 된다면, 수신 데이터 비율이 조금 낮아지더라도 최소한의 기본적인 데이터를 계속해서 보낼 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

타임 트리 프로토콜 동작 및 성능을 위해 ns-2 시뮬레이션 패키지를 사용하였다. 제안 프로토콜의 성능을 알아보기 위하여 SMAC [9], DMAC [12] 프로토콜과 완전 활성화 (Full Active) 방안도 같이 실험하였다. 실험에서 비교한 메트릭은 망 내 노드 에너지 소비량, 데이터 전달 지연, 주기적 트래픽과 버스트 트래픽에 대한 데이터 전달율 등이다.

4.1 시뮬레이션 환경

시뮬레이션에서 센서 노드의 수는 베이스 노드와 100 개의 센서 노드로 구성하였다. 센서 노드들은 격자 토폴로지 형태로 약간의 변위를 랜덤하게 주어서 배치하였다. 네트워크내의 트리의 개수는 10개로 하였다. 시뮬레이션에서 각 노드는 데이터를 발생하여 트리를 통해 베이스 노드로 전송된다. 기타 시뮬레이션에서 사용한 매개 변수를 표 1에 보였다. 각각의 트리에서 오직 기본 데이터 속도만을 이용하였다. 데이터의 발생 비율을 증가하면 충돌 발생 비율이 높아지고, 데이터 전송 실패율이 증가한다. 센서 노드와 BS 노드간의 중단 지연도 역시 증가하고, 전체적인 데이터의 전달 성능이 저하된다. 한 노드에서 재전송시도 횟수가 일정 값을 넘으면, 그 데이터는 버려진다.

모든 시뮬레이션에서, 각 노드의 활성화 비율은 10%로 설정하였다. SMAC과 DMAC/MTS와 제안 방안에서의 경우, 전송 및 수신 슬롯 길이를 11ms로

표 1. 시뮬레이션 매개 변수

매개 변수	값
네트워크의 크기	1100 × 550m
라디오 송신 범위	250m
라디오 간섭 범위	550m
패킷 길이	100bytes
라디오 밴드 폭	1Mbps
송신 전력	0.66W
수신 전력	0.395W
대기 전력	0.35W

하였다. 제안 방안의 시뮬레이션에서는 활성화 비율은 고정하여 실험하였고, 변동 비율 제어 메커니즘은 사용하지 않았다. 따라서, 부모 노드로 데이터를 보내는 경우에 장애가 생기는 경우에는 노드의 다음 활성화 시간에 다시 시도한다.

실험은 주로 5가지의 경우에 대하여 실시하였다. 완전 활성화 (Full Active) 방안에서는 네트워크내의 모든 노드는 항상 활성화 되어 있고, 대기 상태로 바뀌지 않는다. SMAC 경우에는 모든 노드가 위치에 상관없이 독립적으로 같은 시간에 깨어나서 데이터를 송신하고 수신한다. DMAC/MTS의 시뮬레이션에서 하나의 노드에서 충돌이 있었거나, 보낼 데이터가 더 있는 경우에, 일단 대기 상태로 바뀌었다가 5 슬롯 이후에 다시 활성화 되어 데이터의 전송을 시도한다. 제안 방안인 TTS에서는 네트워크에 10개의 독립적인 트리를 구성하였고, 주로 2 가지의 경우에 대해 실험을 하였다. TTS-2에서 10 개의 트리는 2개의 그룹으로 분리된다. 하나의 그룹은 같은 시간에 활성화되고, 다른 그룹의 트리들은 다른 시간에 활성화된다. 그룹 내의 트리들은 같은 시간대에 활성화되고, 다른 그룹과 번갈아 활성화된다. TTS-5에서는 모든 트리들이 5개의 그룹으로 분류되고, 그룹들이 순서적으로 번갈아 활성화된다. TTS의 대기시간은 DMAC/MTS의 경우와 같게 설정하였고, TTS-5의 대기 시간은 TTS-2의 대기시간보다 2.5배 길다.

4.2 시뮬레이션 결과

그림 4는 데이터 소스에서 목적지의 길이를 다양하게 변화시키면서 노드의 에너지 소비량을 측정된 결과 그래프이다. 이 시뮬레이션에서, 10개의 데이터 소스 노드가 트리의 같은 깊이에서 데이터를 트래픽

을 생성한다. 소스 트래픽은 1초 간격의 시간을 갖는 CBR 형태의 낮은 부하 상태이다. 에너지 소비량은 BS 노드에서 소스까지의 거리가 증가함에 따라 같이 증가한다. 하지만 완전 활성화 방안의 경우, 트리에서 소스를 깊이에 따른 에너지 소비의 차이가 크지 않다. 전반적으로, 완전 활성화의 경우가 다른 방안보다 에너지의 소비가 8배 이상 많다. SMAC의 경우는 DMAC/MTS와 TTS-2 보다 2배 정도의 더 많은 에너지를 소비한다. DMAC/MTS와 TTS-2는 비슷한 정도의 에너지를 소비한다. TTS-2가 약간 적게 소비하는 것으로 나와 있으나 그 차이는 크지 않았다. TTS-5는 DMAC/MTS와 TTS-2보다 절반 정도의 에너지를 소비한다.

그림 5는 트리에서 소스 노드의 깊이를 변화시키면서 관찰한 데이터의 중단간 지연에 대한 특성이다. 이 실험에서, 해당 깊이에 있는 노드만이 데이터를 발생하였다. 대체적으로 소스의 깊이에 대한 BS 노드로의 전달 지연의 값은 약간은 변화가 있었지만 큰 변화는 보이지 않았다. 주로 데이터 지연은 노드에서 데이터 발생 후에 활성화되어 데이터를 보낼

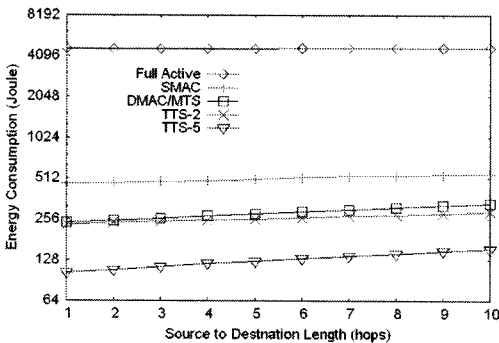


그림 4. 트리 깊이에 따른 네트워크의 에너지 소비

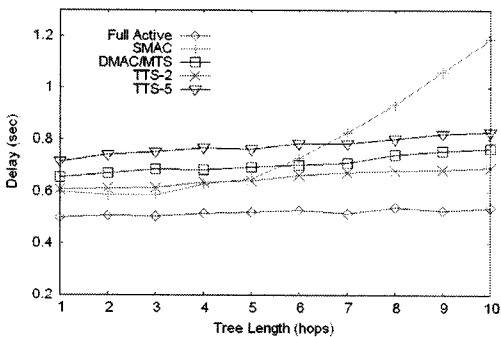


그림 5. 트리에서의 노드 깊이에 따른 전달 지연의 변화

때까지의 대기 시간이 차지하였다. 트리에서 소스 노드의 길이가 길어짐에 따라 약간은 증가함을 보이고 있다. 그 보다는 각 방식에 의한 차이점이 두드러진다. 완전 활성화 방안에서 지연 시간이 최소로 관찰되었다. 이 방안에서는 데이터가 발생하자마자 바로 전송될 수 있었다. TTS-2에서의 전달 지연 값은 DMAC/MTS 보다 약간 적었지만 큰 차이는 보이지 않았다. 노드의 트리에서의 깊이가 5 이상 증가하는 시점에서 전달지연이 갑자기 큰 폭으로 증가하는 현상이 관찰되었다. 바로 대기 시간에 의한 전달 지연의 증가로 보인다.

그림 6은 CBR 소스의 데이터 발생 간격을 변화하면서 관찰한 데이터의 전달 지연 특성이다. CBR 소스 특성의 시간 간격이 1.4초 이상일 때에는 모든 경우에 있어서 지연은 1초 이내에 있다. 시간 간격이 0.6초 이하로 떨어질 때에는 각각의 그래프 특성이 다르게 나타난다. 완전 활성화 방안에서는 모든 시간 간격에서 가장 낮은 지연 특성을 보여준다. 실험을 한 여러 가지 방안 중에서 SMAC의 경우에 가장 긴 지연 특성을 보인다. 시간 간격이 0.4초 이하에서 TTS-5가 DMAC보다 조금 우수한 특성을 보이고, TTS-2가 TTS-5보다 조금 더 우수한 특성을 보여준다.

소스 데이터의 버스트 길이에 대한 데이터의 BS 노드 도착율이 그림 7에 나와 있다. 이 시뮬레이션에서 트래픽 로드는 그림 6에서의 시간 간격 1.0초의 특성에 해당한다. 그림 6에서의 실험과 다른 점은 그림 6에서는 10개의 소스에서 데이터를 발생하였고, 그림 7에서는 100개의 노드에서 트래픽을 발생시킨다는 점이다. 그림 7에서 SMAC의 도착율은 다른 방안에서보다 현저히 낮게 관찰되었다. 버스트 트래픽

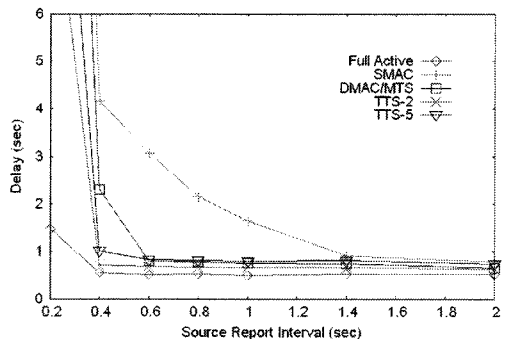


그림 6. 소스의 데이터 발생 간격에 따른 전달 지연의 변화

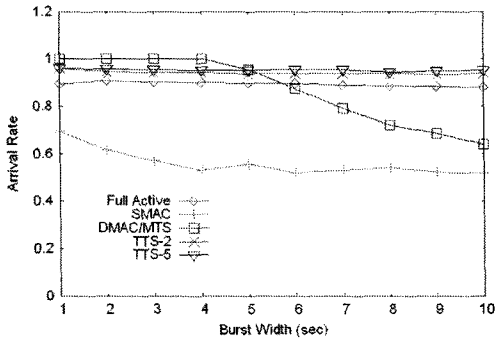


그림 7. 버스트 트래픽에 따른 도착률 변화

의 길이가 5초 미만의 경우에서 완전 활성화 방안과 DMAC/MTS, TTS 방안에서 모드 도착율의 변화가 크게 변화하지 않았지만, 버스트의 크기가 5초 이상으로 올라가자 DMAC/MTS의 경우에 도착율이 떨어지는 현상이 관찰되었다. 완전 활성화 방안과 TTS-2 및 TTS-5 방안에서는 안정적인 도착율 특성을 보여 주고 있다.

4.3 결과 분석

보다 정확한 비교를 위해 에너지 사용량과 도착율의 일부 결과를 표 2와 3에 보였다.

이 표의 내용과 4.2절의 시뮬레이션 결과를 종합해 보면, 완전 활성화 방안이 에너지 사용량은 높지만 지연 특성에서 가장 우수하고 도착율도 비교적 안정적인 특성을 보여줌을 알 수 있었다. SMAC의 경우에 에너지 소비를 완전 활성화 방식의 8분의 1로 줄일 수 있었지만, 전달 지연이 홉의 증가와 함께 크게 증가하고, 버스트 트래픽의 도착율 특성은 다른 방안과 비교하여 가장 저조한 특성을 보여 준다. DMAC/MTS와 TTS-2의 경우에는 완전 활성화 방

표 2. 각 방안의 에너지 사용량 비교 (소스-중단간 길이 10홉의 경우)

	Full Active	SMAC	DMAC	TTS-5	TTS-2
에너지(J)	4639	504	280	258	126

표 3. 각 방안의 도착율 비교표 (버스트 길이 10초의 경우)

	Full Active	SMAC	DMAC	TTS-5	TTS-2
도착율(%)	88.01	51.49	63.84	93.63	95.11

안보다 에너지를 16배 이상 감소시키는 특성을 보이고, TTS-5는 DMAC/MTS 방안보다 에너지를 2배 이상 더 감소시켜 준다. 하지만 TTS-2 방안은 에너지와 지연에서 DMAC/MTS와 비슷한 특성을 보이고, 버스트 트래픽 환경의 도착율 특성에서 DMAC보다 더 안정적인 성능을 보여 준다. TTS-5는 DMAC/MTS 보다 전달 지연이 약간 증가하였지만, 에너지를 반 이상 더 줄여주고, 도착율 특성에서 더 우수한 성능을 보여 주었다. 결론적으로 TTS 방안은 에너지 사용을 줄여주면서도 전달 지연과 도착율 특성에서 우수한 성능을 보여 준다고 할 수 있다.

5. 결 론

제안 방안은 센서 네트워크에서 데이터 전송을 위한 타임 트리 스케줄링을 사용한다. 노드의 데이터 전송 시간은 노드가 포함되어 있는 트리의 깊이에 의해 정해진 시간에 따른다. 타임 트리의 사용 목적은 각 트리의 서로 다른 전송 시간의 분배에 다른 충돌의 확률을 줄이고, 이를 통해 에너지 사용을 줄이는데 있다. 기존의 다른 활성화 방안과 비교하였을 때, 제안 방안은 기존의 다른 방안 보다 에너지의 사용을 현저히 줄여줌을 알 수 있었다. 제안 방안의 지연 특성은 안정적으로 낮은 값을 보여 주었고, 버스트 트래픽에 대한 도착율 특성은 가장 좋은 성능을 보였다.

제안 방안은 센서 노드에서 데이터 전송 시에 RTS/CTS 메커니즘을 사용하고 있다. 이 방안은 에너지와 시간을 더 많이 소비하지만, 노드가 밀집한 환경에서 트래픽이 많을 경우에 데이터의 충돌을 줄여주고, 센서 노드간의 동기화 메커니즘을 제공해 준다. 센서 노드들이 많이 배치되어 집중적으로 모니터링을 수행하는 네트워크 환경에서, 제안 방안이 에너지의 소비를 줄이면서도 전송 지연과 안정적인 도착율 성능을 보여주는 효과적인 방안이 될 수 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] I. Akyildiz et al., "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol.40, No.8, pp. 102-114, Aug. 2002.
 [2] J. Carle and D. Simplot-Ryl, "Energy-

Efficient Area Monitoring for Sensor Networks," *IEEE Computer*, Vol.37, No.2, pp. 40-46, Feb. 2004.

[3] Jamal N. Al-Karaki et al., "Routing Techniques in wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Communications Magazine*, Vol.11, No.6, pp. 6-28, Dec. 2004.

[4] Sunil Kumara, Vineet S. Raghavanb, and Jing Dengc, "Medium Access Control protocols for ad hoc wireless networks: A survey," *Ad hoc Networks*, Vol.4, Issue 3, pp. 326-358, 2006.

[5] T. Bheemarjuna Reddy, I. Karthigeyan, B.S. Manoj, and C. Siva Ram Murthy, "Quality of service provisioning in ad hoc wireless networks: a survey of issues and solutions," *Ad hoc Networks*, Vol.4, Issue 1, pp. 83-124, 2006.

[6] N. Abramson, "The ALOHA systems - another alternative for computer communications," *Fall Joint Computer Conference*, Vol. 37, Montavale, NJ, pp. 281-285, 1970.

[7] IEEE 802.11, IEEE Standards for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Network - Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 1999.

[8] IEEE 802.15.4, IEEE Standard for Information Technology-Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS), 2003.

[9] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An

Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," *Proceedings of IEEE INFOCOM*, Vol.3, pp. 1567-1576, June 2002.

[10] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "Medium Access Control with Coordinated, Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks," *ACM/IEEE Transactions on Networking*, Vol.12, No.3, pp. 493-506, June 2004.

[11] T. Van Dam and K. Langendoen, "An adaptic energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," *Proceedings of the First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003)*, Lod Angels, CA, pp. 171-180, Nov. 2003.

[12] Gang Lu, Bhaskar Krishnamachari, and Cauligi S. Raghavendra, "An Adaptive Energy-Efficient and Low-Latency MAC for Data Gathering in Wireless Sensor Networks," *Proceedings of WMAN'04*, Vol.13, No.13, 2004.



이길홍

1985년 2월~1989년 2월 연세대학교 전자공학과 공학사
 1989년 3월~1991년 2월 연세대학교 전자공학과 공학석사
 1991년 1월~1995년 2월 LG정보통신 연구소 네트워크그룹 주임연구원
 1995년 3월~1999년 8월 연세대학교 전기컴퓨터공학과 공학박사
 2000년 5월~현재 서울산업대학교 공과대학 컴퓨터공학과 부교수
 관심분야 : 초고속통신, 센서망, 망관리, 에이전트 통신