

무선 센서 네트워크를 위한 하이브리드 Inter-Cell TDMA/Intra-Cell CSMA 아키텍처

(Hybrid Inter-Cell TDMA/Intra-Cell CSMA Architecture for Wireless Sensor Networks)

이 한 선[†] 원 광 호^{**}
 (Hansun Lee) (Kwangho Won)

이 상 신^{***} 정 광 수^{****}
 (Sangshin Lee) (Kwangsue Chung)

요 약 본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 센서 노드의 에너지 소모를 줄이고 네트워크의 수명을 최대화하기 위한 하이브리드 MAC 아키텍처를 제안한다. 하이브리드 MAC 아키텍처는 싱크노드와 센서노드로 구성되는 계층적 센서 네트워크 구조에서 싱크노드의 최대 전송 영역은 스케줄 기반의 TDMA를 사용하고, 이외의 영역은 경쟁 기반의 CSMA를 사용함으로써 많은 데이터 트래픽이 집중하여 혼잡상황이 잦은 싱크노드 주변의 송수신을 관리하여 불필요한 에너지 소비를 줄이도록 설계되었다. 또한 ns-2 시뮬레이터를 이용한 실험을 통하여 제안한 기법의 성능을

CSMA, TDMA와 비교하였다. 실험 결과를 통해 제안하는 기법이 에너지 효율적으로 동작하는 것을 확인하였다.

키워드 : 센서네트워크, 아키텍처, TDMA, CSMA

Abstract In this paper, we propose a hybrid MAC architecture for reducing energy consumption and maximizing network lifetime in wireless sensor networks. For this purpose, the hybrid MAC architecture is proposed for energy efficient by combining inter-cell TDMA and intra-cell CSMA scheme. Based on the ns-2 simulation result, we prove that the proposed architecture improves energy efficiency as compared with CSMA and TDMA.

Key words : Wireless Sensor Network, Architecture, TDMA, CSMA

1. 서론

무선 센서 네트워크에서 센서 노드는 일반적으로 배터리를 전원으로 동작하기 때문에 에너지 소비를 줄이는 것이 매우 중요하다. 대부분의 에너지 소모는 센서 노드의 무선 장치에서 소비되며, 송신 뿐 아니라 수신 과정에서도 송신 시의 반 이상의 에너지를 소모한다[1].

기존의 MAC 프로토콜 연구들은 패킷 전송률을 최대화하거나 전송지연을 최소화, 플로우 간 공정성을 유지하기 위해 제안되었으나 무선 센서 네트워크를 위한 프로토콜은 에너지 소비를 최소화 하는 것에 초점을 두고 있다. 그러나 센서 네트워크는 응용에 따라 최소 전송률이나 최대 전송지연의 요구사항이 정해질 수 있고, 일반적으로 센서 노드는 하나의 응용 부분이나 공통된 목적을 위해 동작하기 때문에 공정성은 고려되지 않는다.

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 센서 노드의 에너지 소모를 줄이고 네트워크의 수명을 최대화하기 위한 하이브리드 MAC 아키텍처를 제안한다. 하이브리드 MAC 아키텍처는 싱크노드와 센서노드로 구성되는 계층적 센서 네트워크 구조에서 싱크노드의 최대 전송 영역에는 스케줄 기반의 TDMA를 사용하고, 이외의 영역은 경쟁 기반의 CSMA를 사용함으로써 많은 데이터 트래픽이 집중하여 혼잡상황이 잦은 싱크노드 주변의 송수신을 관리하여 불필요한 에너지 소비를 줄이도록 설계하였다. 또한 스케줄 기반으로 동작할 때 공간사용을 최대화하여 전송률을 높이고 전송지연을 줄이도록 하였다.

본 논문의 2장에서는 무선 센서 네트워크 환경에서 에너지 소비를 줄이기 위한 관련 연구에 대하여 기술하였고, 3장에서는 새롭게 제안한 하이브리드 MAC 아키텍처에 대해 기술하였으며, 4장에서는 시뮬레이터를 이용하여 제안한 알고리즘의 성능을 검증하고 기존 프로토콜과의 성능 비교 결과를 기술하였다. 마지막으로 5장에서는 결론을 맺었다.

· 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT성장동력기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다(2008-S-041-01, u-City용 센서네트워크 PHY/MAC 개발). 연구비 지원에 감사드립니다.
 · 이 논문은 제35회 추계학술대회에서 '무선 센서 네트워크를 위한 하이브리드 Inter-Cell TDMA/Intra-Cell CSMA 아키텍처'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

[†] 학생회원 : 광운대학교 전자통신공학과
 hslee@cclab.kw.ac.kr
^{**} 정 회 원 : 전자부품연구원 U-임베디드융합연구센터 그룹장
 khwon@keti.re.kr
^{***} 정 회 원 : 전자부품연구원 U-임베디드융합연구센터 선임연구원
 sslee@keti.re.kr
^{****} 종신회원 : 광운대학교 전자통신공학과 교수
 kchung@kw.ac.kr
 논문접수 : 2008년 12월 22일
 심사완료 : 2009년 7월 14일

Copyright©2009 한국정보과학회: 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.
 정보과학회논문지: 컴퓨팅의 실제 및 레터 제15권 제9호(2009.9)

2. 관련연구

무선 센서 네트워크의 MAC 프로토콜의 가장 큰 목적은 노드에서 에너지 소모를 최소화하여 전체 네트워크의 수명을 최대화하는 것이다. 기존의 무선 네트워크에서는 CSMA(Carrier Sense Multiple Access)가 단순하고, 다루기 쉽고, 강건하기 때문에 일반적으로 많이 사용되었다. 그러나 전송된 패킷이 은닉 터미널(Hidden Terminal Problem) 및 노출 터미널 문제(Exposed Terminal Problem)로 인해 손실되어 재전송이 요구되는 충돌문제, 이를 해결하기 위해 RTS(Request-To-Send), CTS(Clear-To-Send)를 사용하여 발생하는 오버헤드, 전송할 데이터가 없음에도 불구하고 이웃 노드의 데이터를 받기 위해 항상 수신 상태로 동작해야하는 유휴 청취(Idle Listening), 다른 노드에게 보내어지는 패킷을 엿듣게 되는 엿듣기(Overhearing) 등의 문제들로 인해 불필요한 에너지 낭비가 발생하게 된다[2].

CSMA와 같은 경쟁기반의 프로토콜의 문제점인 유휴 청취와 엿듣는 문제를 해결하기 위한 방법으로 스케줄 기반으로 충돌을 회피하여 에너지 낭비를 줄이는 TDMA(Time-Division Multiple Access) 프로토콜이 있다. TDMA는 스케줄 기반으로 동작하여 각각 다른 시간에 전송하게 함으로써 충돌이 발생하지 않고, 별도의 오버헤드 없이 은닉 터미널 문제를 해결한다. 또한 스케줄에 따라 송수신을 하기 때문에 유휴 청취(Idle Listening)나 엿듣음(Overhearing)에 의한 에너지 소모를 줄일 수 있다. 그러나 TDMA는 스케줄을 위한 시간 동기화가 필요하며, 대규모의 네트워크에 사용될 경우 효율적으로 스케줄을 관리하기 위한 방법을 찾기 힘들다. 그리고 무선 센서 네트워크는 빈번하게 토폴로지가 바뀔 수 있기 때문에 유지하는데 어려움을 갖는다.

무선 센서 네트워크에서 에너지를 효율적으로 사용하여 네트워크의 수명을 최대화하는 MAC 프로토콜에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 대표적으로 S-MAC[3]과 T-MAC[1]은 CSMA와 TDMA의 하이브리드 형태로 시간 동기에 의한 슬롯을 사용하는데, TDMA의 슬롯보다 큰 슬롯을 사용하며 동기적인 듀티 사이클을 기반으로 고정된 활성화 구간 내에 RTS/CTS를 사용하여 송수신하기 때문에 동기 실패가 통신 실패를 야기시키지 않는다. S-MAC은 고정된 활성화 구간으로 인해 트래픽(Traffic) 변화에 동적으로 대응하지 못하는 문제를 갖고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 활성화 구간을 적응적으로 변화시키는 T-MAC이 제안되었다.

B-MAC[4]은 긴 프리앰블(Preamble)을 사용하여 LPL(Low Power Listening) 기법으로 동작하는 각 노드에서의 비동기적인 듀티 사이클을 에너지 효율적으로

지원하였다. B-MAC은 S-MAC이나 T-MAC에 비해 더 높은 전송률과 에너지 효율을 보인다.

Z-MAC[5]은 TDMA기반으로 CSMA의 장점을 포함하는 하이브리드 형태의 MAC 프로토콜이다. 혼잡상황에서는 스케줄 기반의 TDMA로 동작하여 충돌을 회피하고, 혼잡하지 않을 경우에는 다른 노드가 소유한 슬롯을 사용함으로써 TDMA가 갖는 낮은 전송률과 긴 전송지연의 단점을 보완하였다.

기존 센서 네트워크는 동종의 센서 노드로 이루어진 평면적인 네트워크를 가정하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 이런 구조는 센서노드에 데이터 센싱과 수집, 전달과 같은 많은 기능을 부과하여 에너지 소비를 재촉하고 있다. 그래서 데이터 수집 이외의 기능을 하나의 노드에게 부여하는 LEACH[6]와 같은 클러스터링 구조나 게이트웨이와 센서노드의 이중 장치로 구성되는 계층적 네트워크 구조들이 제안되었다.

3. 하이브리드 MAC 아키텍처

본 장에서는 무선 센서 네트워크에서 센서 노드의 에너지 소모를 줄이고 네트워크의 수명을 최대화하기 위해 제안한 하이브리드 MAC 아키텍처에 대해 기술한다. 제안한 하이브리드 MAC 아키텍처는 그림 1과 같이 여러 개의 싱크노드와 센서노드로 구성되는 계층적 센서 네트워크 구조에서 싱크노드의 최대 전송 영역에서는 스케줄 기반의 TDMA를 사용하고, 그 이상의 영역에서는 경쟁 기반의 CSMA를 사용함으로써 많은 데이터 트래픽이 집중하여 혼잡상황이 잦은 싱크노드 주변의 송수신을 관리하여 불필요한 에너지 소비를 줄이도록 한다.

그림 1(a)는 일반적인 셀 기반의 아키텍처로 각각의 싱크노드는 셀을 구성하고, 각 노드들은 셀에 포함되어 구성된다. 이러한 셀 구조는 계획성 있게 셀을 배치해야 하기 때문에 동적으로 구성되는 센서 네트워크에서는 구조적 어려움이 있다. 그림 1(b)는 느슨한 셀 구조로써 셀 외부에 존재하는 센서노드들도 네트워크에 포함되어 동작하게 된다. 따라서 일반적인 셀 구조와는 달리 배치를 위한 계획이 필요 없고, 항공기에서 센서노드가 뿌려지는

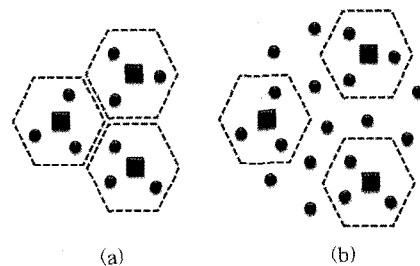


그림 1 하이브리드 MAC 아키텍처

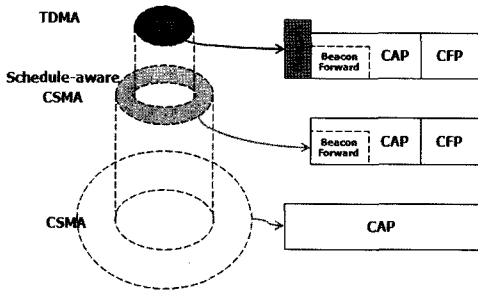


그림 2 셀 및 프레임 구조

상황과 같은 동적 네트워크 구조에서도 동작할 수 있다.

하나의 셀 구조는 그림 2와 같이 TDMA, CSMA, Schedule-aware CSMA 영역으로 구성된다. 스케줄 기반의 TDMA 영역과 경쟁 기반의 CSMA 영역 사이에 두 기법을 인지할 수 있는 영역이 필요하게 되고, 두 영역 사이에 Schedule-aware CSMA 영역을 두게 된다. TDMA 영역의 노드는 비콘을 수신하게 되면, 비콘의 스케줄 정보를 Schedule-aware CSMA 영역으로 전달하게 된다. 스케줄을 수신한 노드들은 TDMA 영역의 노드들이 언제 데이터를 송수신하는지 알 수 있기 때문에 TDMA 영역에서 데이터 송수신을 방해하지 않게 된다. CSMA 영역에서 송신되는 데이터들이 언제 수신될지 알지 못하지만 같은 CSMA를 사용하기 때문에 경쟁 기반으로 데이터를 송수신 할 수 있다.

TDMA와 Schedule-aware CSMA 영역에 스케줄을 업데이트하기 위해 싱크 노드는 주기적으로 경로 정보를 요청하고 수신하게 된다. 시간에 따른 MAC 프레임 변화를 보면 그림 3과 같다. 경로 정보를 요청하고 수신하기 위한 컨트롤 패킷은 데이터 패킷에 비해 매우 작은 크기를 가지고 있기 때문에 여러 비콘 주기마다 한 번씩 데이터 구간을 일찍 마치고 라우팅 구간을 두어 전송한다.



그림 3 시간에 따른 MAC 프레임 변화

3.1 Inter-Cell TDMA

TDMA의 경우 노드에 할당된 슬롯에서만 동작하여 유휴 청취(Idle Listening)와 엿듣음(Overhearing)을 줄임으로써 에너지 소비를 줄인다는 장점을 가지고 있지만, 할당된 슬롯에서만 데이터를 송수신 할 수 있기 때문에 낮은 전송률과 높은 전송지연을 갖는다는 문제점을 가지고 있다. 이런 단점을 보완하기 위해 Inter-Cell TDMA에서는 공간사용을 최대화 하여 전송률을 높이고 전송지연을 줄이는 슬롯할당 기법을 사용한다.

슬롯을 할당하고 스케줄링을 하기 위해 싱크노드는 최대 전송 범위로 센서노드의 경로 정보를 요청한다. 경로 요청을 받은 센서노드는 너비우선탐색(BFS: Breadth First Search) 기법을 통해 싱크노드로 경로 정보를 전달하게 된다. 너비우선탐색을 통하면 싱크노드로부터 먼 노드부터 정보를 받으며, 전송을 마친 노드는 수면 상태로 에너지 소모를 줄일 수 있게 된다. 싱크노드 SN이 경로요청 RouteReq를 전송하면 이를 받은 센서노드들은 싱크노드로부터 먼 거리에 있는 노드부터 경로정보 RouteRep를 전송하게 된다.

싱크노드는 수신한 경로정보를 기반으로 슬롯할당을 위한 스케줄을 정하게 된다. 전송에 의한 충돌과 간섭을 최소화하기 위해서는 4홉 이상의 구간이 요구된다. 임의의 노드는 두 홉 상위의 부모노드의 자식노드들 중에서 자신의 부모노드의 자식노드가 아닌 노드들 중 선택하게 된다. 선택된 노드는 이와 같은 방법을 반복하여 노드들을 선택하고, 선택된 노드들은 충돌과 간섭에 자유로운 노드들로 동시에 데이터를 전송 할 수 있다. 이때 같은 슬롯을 사용할 수 있는 노드의 수는 식 (1)과 같다. h는 홉 수로 2홉에서 3홉 구간에서는 최대 4개의 노드까지 한 번에 전송할 수 있으며, 4홉에서 5홉 구간에서는 최대 8개까지 전송 할 수 있다.

$$\max \text{ spatial reuse value} = 2^{\lfloor \frac{h+1}{2} \rfloor}, h = 2, 3, 4, \dots \quad (1)$$

각 노드는 자신에게 할당된 슬롯에서 동작(Active) 상태로 데이터를 송수신하며, 할당되지 않은 슬롯에서는 휴면(Sleep) 상태로 에너지 소비를 줄인다.

TDMA 영역에서 싱크노드로 데이터 패킷을 전송할 때 스케줄에 따라 할당받은 슬롯에서 전송하게 되며, 싱크노드에서 컨트롤 및 데이터 패킷을 센서노드로 전송할 때는 최대 전송 영역의 경계부분의 노드들만 패킷 전달에 관련되어 동작한다. 따라서 TDMA 영역에서 경계 이외의 노드들은 싱크노드로 전송과정에만 관련되므로 에너지 소모를 조금 더 줄일 수 있다.

3.2 Intra-Cell CSMA

모든 노드에서 TDMA를 사용하게 되면 네트워크 크기가 커지고 노드의 이동이 잦게 되면 스케줄을 관리하기 힘들 뿐 아니라 많은 컨트롤 오버헤드를 가지게 된다. 셀 영역에서만 TDMA를 사용하여 네트워크 크기에 상관없이 동일한 오버헤드를 가지고 동작하고, 이외의 영역에서는 CSMA를 사용하여 동적인 네트워크에 효율적으로 동작하도록 한다.

4. 실험 및 성능 평가

4.1 실험 환경

제안한 하이브리드 MAC 아키텍처의 성능을 평가하

기 위해, ns-2(Network Simulator)를 사용하였다[7]. 그림 4는 실험환경을 나타낸다. 본 실험은 100m × 100m 크기의 네트워크 구역을 가정하고, 100개의 노드를 임의로 배치하여 토폴로지를 구성하였다. 싱크노드의 최대 전송범위는 50m, 센서노드의 전송범위는 20m로 하였고, 모든 노드는 128Kbyte의 패킷을 1초마다 전송하였다. 에너지 모델로 초기 에너지는 0.1J, 송수신 회로는 50nJ/bit, 전송 측 증폭기는 100pJ/bit로 설정하였다. 제안한 하이브리드 MAC 아키텍처와 성능을 비교하기 위한 기존 프로토콜로 TDMA, CSMA 프로토콜을 사용하였다.

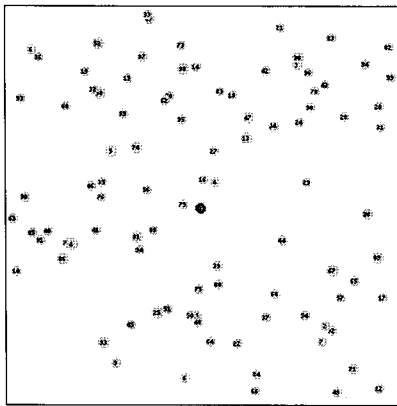


그림 4 실험 환경

4.2 성능 평가

본 논문에서 제안하는 하이브리드 MAC 아키텍처는 계층적 센서 네트워크 구조에서 싱크노드의 최대 전송 영역을 스케줄 기반의 TDMA를 사용하고, 이외의 영역은 경쟁 기반의 CSMA를 사용함으로써 많은 데이터 트래픽이 집중하여 혼잡상황이 잦은 싱크노드 주변의 송수신을 관리하여 불필요한 에너지 소비를 줄이는 것을 목적으로 하고 있다. 또한 공간사용을 최소화 하여 전송률을 높이고 전송지연을 줄이는 슬롯할당 기법을 제안하고 있다. 제안하는 프로토콜의 에너지 효율성을 검증하기 위해 기존 프로토콜인 CSMA와 TDMA를 비교하였다.

그림 5에서 CSMA의 경우 빠르게 에너지가 소모되어 생존하는 노드가 급격히 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 트래픽이 집중하는 싱크노드 주변에 배치된 노드들은 잦은 충돌과 과도한 트래픽으로 인해 에너지 소모가 일어난다. 결과적으로 22라운드에서 센서노드에서 보낸 데이터가 싱크노드까지 전송되지 않아 네트워크의 수명이 끝나게 된다. TDMA는 스케줄 기반으로 동작하여 충돌이 일어나지 않기 때문에 CSMA보다 더 오랜 시간 네트워크를 유지한다. 제안한 하이브리드 MAC 아키텍처는

TDMA와 비슷한 결과를 보이지만 다소 일찍 죽는 센서노드를 볼 수 있는데, CSMA 영역에서의 충돌 때문이다.

그림 6과 그림 7은 시간경과에 따른 CSMA와 하이브리드 MAC 아키텍처의 생존 센서노드의 분포를 나타낸다.

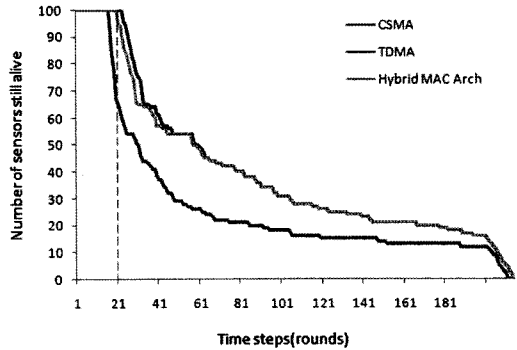


그림 5 시간에 따른 생존 노드 수

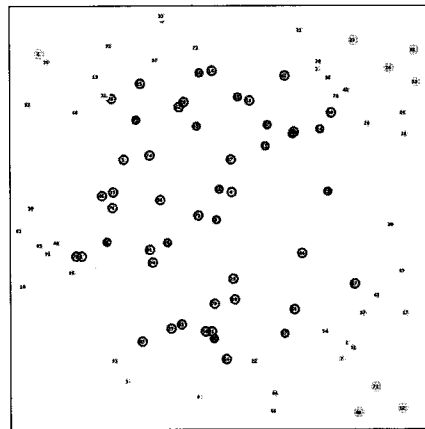


그림 6 CSMA 생존 센서노드(30round)

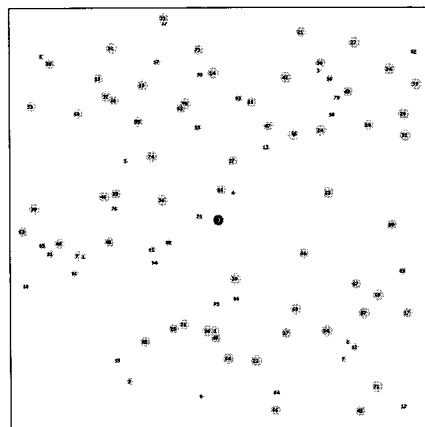


그림 7 하이브리드 MAC 아키텍처 생존 센서노드(80round)

CSMA의 경우 싱크노드 주변에 트래픽이 집중되어 에너지 소모가 빨리된다. 반면에 싱크노드에서 가장 먼 센서노드는 충분한 에너지를 갖는 대조적인 현상을 보인다. 반면에 하이브리드 MAC 아키텍처는 스케줄 기반으로 밀집되는 트래픽을 관리하기 때문에 고른 에너지 분포를 보인다. 센서 네트워크에서 네트워크의 수명이 가장 중요한 문제인데 그림 6을 보면 싱크노드 주변의 노드들은 에너지가 완전히 소모되었지만, 싱크노드로부터 멀리 있는 노드들은 많은 에너지가 남아있으며 거의 소모되지 않은 노드들도 보인다. 그러나 그림 7을 보면 에너지 소모 분포가 분산적으로 나타나며 80라운드까지 지났음에도 싱크노드 주변에 있는 노드들은 많은 에너지를 가지고 있는 것을 볼 수 있다.

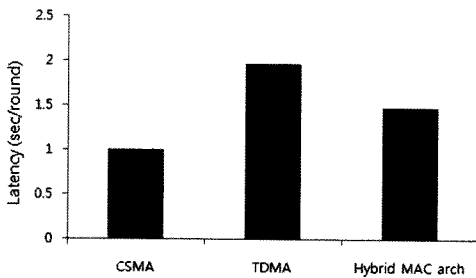


그림 8 전송 시간 비교

각 프로토콜에 따른 라운드당 소요시간을 보면 그림 8과 같다. CSMA는 경쟁 기반으로 동작하여 빠른 전송 시간을 보이는 반면에 TDMA는 스케줄 기반으로 할당된 슬롯에서만 데이터를 보낼 수 있기 때문에 높은 전송 지연을 보인다. 하이브리드 MAC 아키텍처는 영역에 따라 TDMA와 CSMA를 사용하기 때문에 CSMA영역에서는 빠른 전송을 보이지만 TDMA 영역에서의 전송 지연으로 CSMA보다 높지만 TDMA보다 낮은 전송 지연시간을 갖게 된다.

TDMA와 하이브리드 MAC 아키텍처의 성능비교를 보면 근사한 결과를 보이지만 센서 네트워크의 크기가 커짐에 따라 TDMA는 스케줄을 위한 컨트롤 오버헤드가 커질 뿐 아니라, 전체적인 스케줄을 관리하기 어렵게 된다. 하지만 하이브리드 MAC 아키텍처에서는 싱크노드의 최대 전송 범위 안에 있는 노드들만 비콘과 경로 요청에 의해 스케줄을 관리하여 동작하기 때문에 매우 적은 컨트롤 오버헤드와 단순한 스케줄링 과정을 통해 관리를 쉽게 할 수 있다. 또한 최대 전송 범위 이외의 노드들은 CSMA를 기반으로 동작하기 때문에 빠르게 전송 할 수 있으며, LEACH와 같은 클러스터링 기법을 통해서 더 많은 에너지 소모를 줄일 수 있을 것이라 생각 된다.

5. 결론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크 환경에서 센서 노드의 에너지 소모를 줄이고 네트워크의 수명을 최대화 하기 위해 하이브리드 MAC 아키텍처를 제안한다. 하이브리드 MAC 아키텍처는 싱크노드와 센서노드로 구성되는 계층적 센서 네트워크 구조에서 싱크노드의 최대 전송 영역을 스케줄 기반의 TDMA를 사용하고, 이외의 영역은 경쟁 기반의 CSMA를 사용함으로써 많은 데이터 트래픽이 집중하여 혼잡상황이 잦은 싱크노드 주변의 송수신을 관리하여 불필요한 에너지 소비를 줄이도록 설계되었다.

시뮬레이터를 이용한 실험을 통해서 하이브리드 MAC 아키텍처의 성능 비교하기 위해 기존의 경쟁 기반의 CSMA와 스케줄 기반의 TDMA를 사용하였다. 실험 결과를 통해 제안하는 하이브리드 MAC 아키텍처가 무선 센서 네트워크 환경에서 에너지 효율적으로 동작하는 것을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] T. Dam, K. Langendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," *Proc. of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.171-180, Nov. 2003.
- [2] J. Kim, S. Kim, J. Lee, "MAC/Routing Protocol Considering Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks," *Magazine of the IEK*, vol.32, no.7, pp.825-841, Jul. 2005. (in Korean)
- [3] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," *Proc. of the 21st IEEE INFOCOM*, vol.3, pp.1567-1576, Jun. 2002.
- [4] J. Polastre, D. Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks," *Proc. of the 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.95-107, Nov. 2004.
- [5] I. Rhee, A. Warriar, M. Aia, J. Min, "Z-MAC: a Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks," *Proc. of the 3rd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp.90-101, Nov. 2005.
- [6] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," *Proc. of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, vol.2, pp.1-10, Jan. 2000.
- [7] The network simulator ns-2, <http://www.isi.edu/nanam/ns/>