

## 적응형 저전력 전송 기법을 사용한 효율적인 BMA 데이터 전송 기술

김 상 철\*

# An Efficient Data Transmission Strategy using Adaptive-Tier Low Transmission Power Schedule in a Steady-state of BMA

Sang-Chul Kim\*

### 요 약

본 논문에서는 TDMA ad hoc MAC 프로토콜에서 적응형 저전력 전송 기법을 이용한 효율적인 타임 슬롯 할당 데이터 전송 기법을 제안한다. Ad hoc 네트워크의 자원은 간섭과 경쟁 기반의 제한된 무선 통신 채널의 재사용을 특징으로 가지고 있기 때문에 ad hoc 알고리즘 개발 시 노드 수의 증가에 따른 효율적인 타임 슬롯 할당 및 저전력 전송 기법 문제는 주요한 연구 과제이다. 제안된 알고리즘은 이웃 클러스터의 패킷 전송에서 발생하는 전력 간섭을 최소화함으로써 얻어지는 패킷 충돌 회피의 장점을 이용하여, 클러스터에서 사용되는 총 전력 소비량을 최소화하고, 나아가, TDMA 슬롯의 패킷 처리량을 높이는 것을 목표로 한다. 제안된 적응형 저전력 전송 기법을 기존의 two-tier 전력 전송 기법과 비교 분석한 결과, BMA 프로토콜에 의한 메시지 전송에서 15.8%의 에너지 사용 저감 효과를 나타내었으며, 또한 4.66% 높은 타임 슬롯 사용 효율성을 나타내었다.

### Abstract

This paper proposes an efficient data transmission strategy using adaptive-tier low transmission power schedule in a TDMA-based ad hoc MAC protocol. Since the network resource of ad hoc networks has the characteristic of reassignment due to the multiple interferences and the contention-based limited wireless channel, the efficient time slot assignment and low power transmission scheme are the main research topics in developing ad hoc algorithms. Based on the proposed scheme of interference avoidance when neighbor clusters transmit packets, this paper can minimize the total energy dissipation and maximize the utilization of time slot in each ad hoc node. Simulation demonstrates that the proposed algorithm yields 15.8 % lower energy dissipation and 4.66% higher time slot utilization compared to the ones of two-tier conventional energy dissipation model.

▶ Keyword : 저전력 전송(low power transmission), TDMA 슬롯 스케줄링(TDMA slot scheduling), 패킷 충돌(packet collision)

• 제1저자, 교신저자 : 김상철

• 투고일 : 2010. 03. 25, 심사일 : 2010. 04. 01, 게재확정일 : 2010. 04. 12.

\* 국민대학교 컴퓨터공학부 교수

※ 본 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(No. 2009-0071268), 2009년도 국민대학교 교내연구지원금 및 서울시 산학연 협력사업(No. 10848)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## I. 서론

최근 몇 년 동안 모바일 이동 통신 네트워크와 무선 센서 네트워크 기술의 보편화로, 다수의 이동 노드들이 자율 조직(self-organizing)을 형성하며, 노드들 사이에서 다중 홉(multi-hop)으로 데이터를 교환하도록 하는 ad-hoc 무선 통신에 대한 다양한 형태의 기술 서비스 요구가 발생하고 있다. Ad-hoc 네트워크에서 노드는 베이스 스테이션(base station, BS) 또는 액세스 포인트(access point)와 같은 고정 통신 기반 시설 없이 다중 홉으로 무선 링크를 통해 목적지까지 패킷을 전송한다.

Ad-hoc 무선 통신의 네트워크 계층에서는 이동 디바이스의 수가 급격히 증가하는 동적인 환경에서도 양극단 지연시간, 지터 등을 안정적으로 유지할 수 있는 라우팅 알고리즘 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. MAC(media access control) 계층에서는 제한된 무선 통신 자원을 노드들끼리 효율적으로 공유하기 위해 contention-based, contention free 및 hybrid와 같은 채널 재사용 알고리즘들이 사용되고 있다[2]. CSMA-CA(carrier sensing multiple access-with collision avoidance)는 contention-based 채널 재사용 알고리즘들 중의 하나이며, TDMA(time division multiple access)는 contention-free 채널 재사용 알고리즘 중의 하나이다. MAC 프로토콜로 현재 가장 많이 사용되는 CSMA 기술은 기반시설 지원, 시간 동기화(time synchronization) 및 네트워크 전체의 토폴로지(topology) 정보를 요구하지 않는 비교적 단순한 구조를 가지는 융통성 있는 기술이다. 하지만, 패킷 충돌에 의한 패킷 전송 지연, hidden terminal 문제를 해결하기 위한 RTS/CTS(request to send/clear to send) 컨트롤 오버헤드에 따른 데이터 패킷 처리량 감소는 보완되어야 할 문제점으로 인식되고 있다.

CSMA/CA와 대조적인 TDMA 기술은 노드 간의 타임 슬롯 할당(time slot assignment)에 근거하며 추가적인 컨트롤 오버헤드 없이 hidden terminal 문제를 해결한다. 각각의 노드는 데이터 패킷을 전송하고 수신하는 자체 타임 슬롯을 보유하기 때문에 TDMA는 CSMA/CA에 내재한 무작위적(randomness)인 데이터 패킷 전송을 피할 수 있어서 신뢰할 수 있는 데이터 전송이 가능하다. TDMA에서 데이터 송수신을 할 수 있는 타임 프레임내의 타임 슬롯의 개수는 ad-hoc 네트워크를 구성하는 노드 수로 정해진다. 하지만, ad-hoc 네트워크에서는 노드 이동성에 의해 클러스터내의 노드 수의 증가와 감소가 빈번하게 발생하며, 이러한 ad-hoc

환경에서, 이전 시간에 결정된 타임 프레임내의 타임 슬롯의 수가 현재 시간의 변동된 노드 수와 일치하지 않는 현상이 발생한다. 이러한 노드의 이탈(leave)과 합병(join)을 효율적으로 TDMA 네트워크 타임 슬롯에 실시간으로 배분하는 타임 슬롯 스케줄링 운영 기술은 ad hoc TDMA 기술의 기반을 이루는 중요한 기술이다. 또한 TDMA 기술은 센서 노드들끼리 정확한 시간 동기화를 맞추기 위해 높은 컨트롤 오버헤드를 필요로 한다.

Ad-hoc 통신의 물리 계층에서는 노드의 제한된 배터리 사용 시간을 효율적으로 늘리면서, 많은 수의 데이터가 송수신 되도록 하는 최적화된 전력 전송 기술에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.

본 논문에서는 클러스터 기반에서 패킷 충돌 회피 스케줄링 기법을 이용한 적응형(adaptive) 저전력 전송 TDMA ad hoc MAC 프로토콜 기술을 제안한다. 이러한 기술은 네트워크 계층, MAC 계층, 물리 계층에서 공통적인 사안이 되는 효율적인 에너지 운용 메커니즘의 기반이 되며, 각 계층의 기술들이 최대의 성능을 가질 수 있도록 MAC 계층의 역할을 정립하는 데 도움이 되는 기술이다.

본 논문의 2장에서는 TDMA 기반 MAC 스케줄링에 관련된 연구를 소개하고, 3장에서는 제안된 알고리즘을 상세히 설명한다. 4장에서는 실험과 고찰을 실시하고, 5장에서는 결론을 맺도록 한다.

## II. 기존 연구

무선 센서 네트워크(WSN)와 모바일 사용자 장치의 대중화로 제한된 무선 채널의 효율적인 재사용은 중요한 연구 항목 중의 하나이다. 현재 많은 연구들이 TDMA 기반 MAC 스케줄링 부분에서 수행되고 있다. [2]의 저자들은 대규모 센서 노드로 구성된 WSN(wireless sensor network)의 클러스터 사이(intra-cluster)에서 효율적인 에너지 TDMA 통신을 위하여 BMA(bit-map-assisted) 프로토콜을 제안하였다. 효율적인 배터리 사용을 위해 클러스터 내에서 중요한 이벤트가 발생한 센서 노드만 클러스터 헤드(Cluster Head, CH)에게 메시지를 전송한다. 또한, TDMA 방식을 선택하여 데이터 전송과 수신에 관여하지 않는 노드는 무선(radio)을 끌 수 있는 turn off 모드를 가진다.

기존의 TDMA 노드는 전송, 수신, idle listening, 및 sleep이라는 4가지 동작 모드를 가진다. idle listening 모드에서는 노드가 데이터를 전송하지 않더라도 예약된 슬롯이 무선을 켜야(turn on) 하고, 이러한 동작 모드는 수신 모드에

서 사용되는 전력의 50~100%의 전력을 소모하기 때문에 ad-hoc 네트워크에서는 효율적이지 못하다. 따라서 데이터 전송과 수신에 관여하지 않는 노드는, 수신 모드에 비해서 50%~100%의 에너지를 소모하는 idle listening 모드를 turn off 모드로 전환함으로써 배터리 전원을 절약하였다[2].

Z(Zebra)-MAC은 TDMA와 CSMA 프로토콜의 장점을 통합한 알고리즘으로, 낮은 채널 경쟁 상태에서는 기본적으로 CSMA를 사용하며, 높은 채널 경쟁 상태에서는 TDMA를 사용한다. 초기 노드 구성원들 사이의 네트워크를 형성하기 위해 컨트롤 오버헤드가 많이 발생한다. Z-MAC 노드들은 채널 재사용 스케줄링 알고리즘인 DRAND 기술을 이용하여 타임 슬롯을 할당하며 패킷을 전송하기 전에 항상 carrier-sensing을 수행하고 해당 채널이 비었을 경우에 패킷을 전송한다. Z-MAC의 성능이 최저로 저하되면 CSMA의 성능에 가까워진다[1].

TDMA based MAC은 수신자로의 데이터 전송을 기지국에서 조절하는 전력감지(power-aware) TDMA MAC 프로토콜이다. 이 프로토콜은 데이터 전송(data transfer), 갱신(refresh), event-triggered rerouting 및 refresh-based rerouting 단계로 구성되어 있다. Event-triggered rerouting은 센서 노드의 전원이 특정 임계치 이하로 내려가거나 센서 노드의 배치가 변경되면 수행된다. 기지국은 해당 반경 내에 센서 노드 수를 기준으로 프레임을 구축한다. 트래픽 전송은 기지국에 의해 통제되며 기지국은 자체적인 라우팅 판단에 따라 슬롯을 할당한다[3].

TMMAC는 TDMA에 기반을 둔 멀티-채널 MAC 프로토콜이며, 트래픽 패턴에 따라 ATIM(ad hoc traffic indication messages) 윈도우 크기를 조절하는 방식으로 데이터 통신량을 늘리고 전원을 절약한다. ATIM 윈도우 기간 동안 노드는 데이터 통신에 사용할 채널뿐만 아니라 타임 슬롯까지 결정한다. 타임 슬롯은 고정된 길이의 beacon interval로 분할되며 각각의 beacon interval은 ATIM 윈도우와 communication 윈도우로 구성된다. ATIM 윈도우 기간 동안 모든 노드는 기본 채널을 통해 전송되는 ATIM, ATIM-ACK(Acknowledgement), ATIM-RES(Reservation), 및 ATIM-BRD (Broadcast)와 같은 ATIM 제어 메시지를 사용하여 타임 슬롯 할당에 필요한 협상을 수행한다[4].

위에 언급된 네 가지 TDMA MAC 프로토콜의 궁극적인 목표는 TDMA MAC 채널의 효율적인 타임 슬롯 재분배를 위한 스케줄링 알고리즘 개발이다. BMA와 EA-TDMA는 클러스터 기반 기술이며, Z-MAC과 TMMAC는 비클러스터 기반 기술이다. TDMA MAC의 또 다른 목표는 설정된 슬롯에

서 각 노드들이 다른 노드들에게 데이터를 저전력으로 전송할 수 있는 알고리즘을 개발하는 것이다. [5]의 저자들은 클러스터 기법을 적용한 two-tier 전력 전송기법을 제안하였다. 기존의 CH와 멤버 노드 사이의 데이터 송수신시 최대 전송 전력( $P_{max}$ )만을 사용하는 대신, CH와 거리상으로 가장 멀리 떨어져 있는 멤버 노드까지의 전송 전력을 클러스터의 공식 전송 전력으로 지정하여, 전력 손실을 절감하도록 하는 알고리즘이다.

### III. 본 론

본 논문에서는 전체  $N$ 개의 노드로 구성된 네트워크에서,  $k$ 개의 CH 노드와  $N - k$ 개의 NCH(Non-CH) 노드로 클러스터링된 무선 네트워크를 기반으로 한다. 노드는 고정 혹은 이동이 가능하며, 모든 NCH 노드는 미리 정해진 하나의 무선 채널을 통해 CH와 통신하며, CH는 별도 채널을 통해 CH끼리 통신하면서 백본 네트워크를 구성한다. NCH 노드는 백본 네트워크를 구성하는 CH를 통해 정보를 교환한다.  $M(t)$ 과  $N_i(t)$ 가 전체 CH 집합과  $i$ 번째 CH에 등록된 NCH 노드 집합을 나타낼 때, 그림 1은 클러스터링은  $M=4$ ,  $N=12$ ,  $M(t) = \{1, 2, 6, 8\}$ ,  $N_1(t) = \{4, 7, 12, 13, 14\}$ ,  $N_2(t) = \{5, 17, 18\}$ ,  $N_6(t) = \{3, 20\}$ ,  $N_8(t) = \{9\}$ 로 정의할 수 있다.

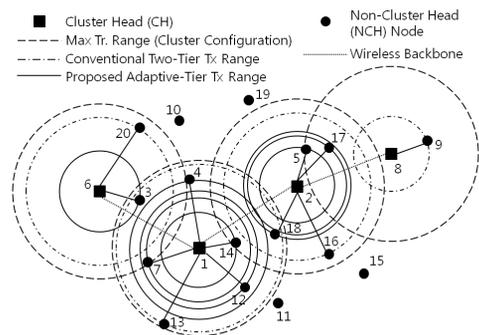


그림 1. 클러스터 기반 ad-hoc 네트워크 구조  
Fig. 1. Cluster-based ad-hoc network

제한된 알고리즘은 이웃 클러스터의 패킷 전송에서 발생하는 전력 간섭을 최소화함으로써 얻어지는 패킷 충돌 회피의 장점을 이용하여, 클러스터에서 사용되는 총 전력 소비량을 최소화하고, 나아가, TDMA 슬롯의 패킷 처리량

을 높이는 것을 목표로 한다. 한 개의 프레임은  $F$ 개의 타임 슬롯으로 구성되고, CH  $i$  와 NCH 노드  $j$  간 통신 성공을 위해 임의의 타임 슬롯  $t$ 에서 CH  $i$ 의 전송 전력  $P_{M(i)}(t)$  은 다음 제약 사항을 만족해야 한다[6].

$$P_{M(i,j)}(t) \geq P_{(i,j)}(t) = (d_{(i,j)}(t))^L R \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\forall i \in M(t), \forall j \in N_i(t)$$

여기에서  $P_{(i,j)}(t)$ 는 CH  $i$  와 NCH 노드  $j$ 사이 에 신호를 제대로 전송하는 데 필요한 최소 전송 전력 (minimum transmission power)을 나타내며,  $d_{(i,j)}(t)$  는 CH  $i$  와 NCH 노드  $j$ 간의 거리를 나타낸다.  $R$ 은 데이터 수신 성공에 필요한 수신기의 수신 감도(receiver sensitivity)이며,  $L$ 은 무선 채널의 전력 손실(path-loss) 을 나타낸다[6].

CH  $i$ 가  $P_{\max}$ 로 전송할 때 NCH 노드  $j$ 가 받아들이 는 신호 수신 강도는  $P_{\max(i,j)}(t)$ 로 나타내며, CH  $i$ 와 NCH 노드  $j$ 간의 채널 연결 상태를 나타내기 위해 이진 변수  $x_{(i,j)}(t)$ 와  $y_{(j,i)}(t)$ 를 사용한다.

$P_{M(i)}(t) \geq P_{(i,j)}(t)$  이면  $x_{(i,j)}(t) = 1$ 이고, 그 령지 않은 경우는  $x_{(i,j)}(t) = 0$ 이 된다.

$P_{N(i)}(t) \geq P_{(i,j)}(t)$ 인 경우는  $y_{(j,i)}(t) = 1$ 이 되고 그렇지 않은 경우  $y_{(j,i)}(t) = 0$ 이 된다. 프레임에는 NCH 노드당 최소한 두 개의 타임 슬롯이 있으며 타임 슬롯 하나는 CH  $i$ 에서 NCH 노드  $j$ 로  $P_{M(i,j)}(t)$ 의 전력 으로 전송할 때 사용하고, 다른 타임 슬롯은 NCH 노드  $j$ 에서 CH  $i$ 로  $P_{N(j,i)}(t)$ 으로 전력으로 전송할 때 사용 한다.

만약, 타임 슬롯  $t$ 에서  $x_{(i_1,j_1)}(t) = 1$  이고,  $x_{(i_2,j_2)}(t) = 1$  이면, 패킷 전송은 충돌(collision)이 발생하고, 이 때, 노드  $(i_1, j_1, i_2, j_2)$ 은 충돌 노드 집합  $C(t)$ 의 한 개 원소가 된다. 그림 1에서  $t_1 = t_2$ 일 때,  $x_{(1,13)}(t_1) = 1$  과  $x_{(2,18)}(t_2) = 1$ 의 전송 스케줄링은 데이터 충돌로 이 어진다. CH 1과 NCH 노드 13의 전송과 CH 2와 NCH 노드 18의 전송이 같은 시간에 발생하면, CH 1의 전송 영역과 CH 2의 전송 영역의 겹침으로 인해 NCH 노드 13과 NCH 노드 18의 패킷 수신은 충돌이 발생한다.

이러한 내용은 아래의 수식으로 표현된다[7].

Minimize

$$\sum_{t=1}^F \sum \left( P_{M(i,j)}(t) + \sum_j P_{N(j,i)}(t) \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

Constraint-1:  $\sum_{t=1}^F x_{(i,j)}(t) \geq 1$  and  $\sum_{t=1}^F y_{(j,i)}(t) \geq 1$

$$\forall i \in M(t), \forall j \in N_i(t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

Constraint-2: If  $(i_1, j_1, i_2, j_2) \in C(t)$   
then  $x_{(i_1,j_1)}(t_1) = 1$  and  $x_{(i_2,j_2)}(t_2) = 1$   
for  $t_1 \neq t_2 \quad \dots\dots\dots (4)$

제안된 알고리즘은 다음의 다섯 가지 단계로 구현된다.  
(S1) 각 CH가 CH의 식별 번호가 들어있는 클러스터 구성 (Cluster Configuration, CC) 메시지를 전송한다.  
(S2) CC 메시지를 수신한 NCH 노드가 수신한 신호 강도  $P_{\max(i,j)}(t)$ 를 측정하고 아래 (5)에서  $P_{(i,j)}(t)$ 를 구한다.

$$P_{(i,j)}(t) = (P_{\max} - P_{\max(i,j)}(t) + R) \quad \dots\dots\dots (5)$$

(S3) CH가 아래 constraint-3에 따라 연결된 클러스 터의 NCH 노드에 대한 타임-슬롯 스케줄을 정한다.

Constraint-3:  $\sum_{t=1}^F x_{(i,j)}(t) = 1$  and  $\sum_{t=1}^F y_{(j,i)}(t) = 1$

$$\forall i \in M(t), \forall j \in N_i(t) \quad \dots\dots\dots (6)$$

Constraint-3은 초기 스케줄링 단계에서 각 CH와 NCH 노드에 하나의 전송 타임 슬롯을 할당한다는 점에서 constraint-1과 차이가 있다. 그 후에 CH가 프레임 길이 정보를 교환하고 프레임 길이를 가장 긴 프레임 길이 값에 맞춘다. 프레임 길이를 맞추어야 하므로 클러스터 중 일부 는 constraint-1에 따라 프레임에 추가 전송 스케줄이 들 어갈 수도 있다.

(S4) CH  $i$  와 NCH 노드  $j$ 의 전송 전력은 최소 전력 소비를 위해 아래 (7)로 맞추어 진다.

$$P_{M(i,j)}(t) = P_{S(i,j)}(t) = P_{(i,j)}(t) \quad \dots\dots\dots (7)$$

(4a) CH  $i$  와 NCH 노드  $j$  중 어느 한 쪽의 무선 환경 변화나 노드 위치 이동으로  $P_{(i,j)}(t)$  요건이 변한 것을 탐지하면, 노드는  $P_{(i,j)}(t)$  를 다시 계산한다.

(4b) NCH 노드  $j$  가 제약사항  $P_{M(i,j)}(t) \geq P_{(i,j)}(t)$  를 만족하는 CH  $i$  (예, CH  $i$ ) 를 하나만 탐지한 경우, NCH 노드  $j$  는 CH  $i$  를 선택해 자신의 CH로 선택하고, CH  $i$  에게 등록(Registration) 메시지를 전송하여 자신이 클러스터 구성원임을 등록하고  $P_{(i,j)}(t)$  값을 알린다.

(4c) NCH 노드  $j$  가 제약사항  $P_{M(k,j)}(t) \geq P_{(k,j)}(t)$  ( $\exists k \in M(t)$ ) 를 만족하는 CH를 하나 이상 탐지한 경우에는 가장 작은  $P_{(k,j)}(t)$  값으로 도달할 수 있는 CH를 자신의 CH로 선택한다. 그림 2와 3은 클러스터 개수가 두 개일 때, 가장 작은  $P_{(k,j)}(t)$  값으로 도달할 수 있는 CH를 자신의 CH로 선택하기 전과 선택한 후의 클러스터 구성을 나타낸다. 노드  $k$  에게 등록(Registration) 메시지를 전송할 때, 노드  $k$  의 ID와 탐지한 모든 CH에 대한  $P_{(k,j)}(t)$  정보를 함께 보낸다. 이 단계는 제안된 적응형 전력 전송 알고리즘의 핵심이 된다. 이 정보는 constraint-2 스케줄링 시에 사용하는 전송 충돌 집합  $C(t)$  를 만들 때 사용된다.

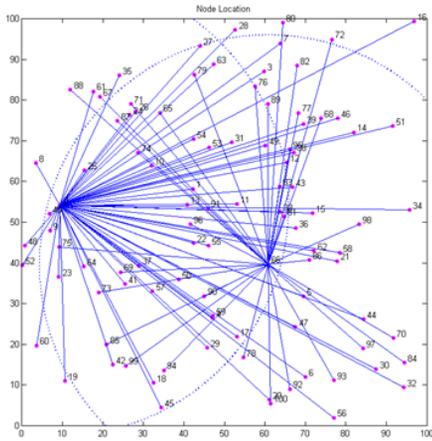


그림 2. Best CH를 선택하기 전의 클러스터  
Fig. 2. Clusters before best CHs are selected

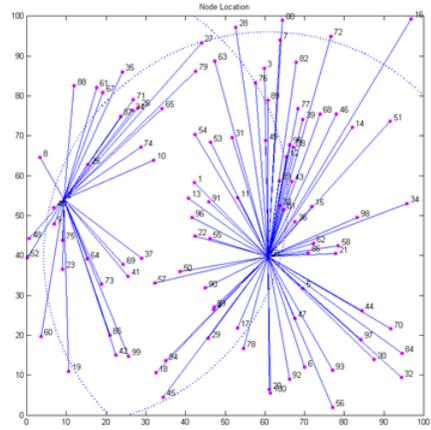


그림 3. Best CH를 선택한 후의 클러스터  
Fig. 3. Clusters after best CHs are selected

본 논문에서 제안된 적응형 저전력 전송 기법은 TDMA-클러스터 기반 ad hoc MAC 프로토콜에 적용되어, 성능이 비교, 분석된다. BMA는 차세대 ad hoc MAC 클러스터링의 기반이 되는 TDMA 기술로, 패킷 충돌과 idle listening의 불필요한 단계에서 발생하는 에너지 소모를 줄이는 것을 주목적으로 하며, 그림 4와 같이 클러스터 setup 후에 데이터 패킷을 전송하는 steady-state 단계로 구성되어 있다.

차지적으로 CH를 선출하기 위해, 클러스터 setup의 첫 번째 단계에서, 모든 노드는 네트워크의 다른 노드에게 현재 자신의 남아 있는 전력 레벨을 담은 메시지를 전송한다. 한 개의 노드가 자신의 전력 레벨을 담은 메시지를 네트워크의 모든 노드에게 브로드캐스트 전송할 때  $N$ 개의 최대 메시지가 발생한다. 이러한 과정이 네트워크의 모든 노드( $N$ )에서 이루어짐으로 인해,  $N^2$ 의 최대 메시지가 발생한다.

클러스터 setup의 두 번째 단계에서는, 자신의 남아 있는 파워와 다른 노드에서 전해져 온 잔여 전력을 비교하여 스스로 헤드 노드로 판단한 노드는 메시지를 브로드캐스트한다. 이 과정에서 헤드 노드에서 각각의 개별 노드까지의 다른 경로  $u$ 의 최대값을  $u_{max}$  라고 독립된 항목으로 표현하면 클러스터 setup의 두 번째 단계에서의 발생하는 최대 메시지는  $Nu_{max}$  가 된다. 따라서 클러스터 setup에서 발생하는 최대 메시지는 첫 번째 단계의 최대값인  $N^2$ 와 두 번째 단계의 최대값인  $Nu_{max}$ 의 합인  $N^2 + Nu_{max}$  가 된다.

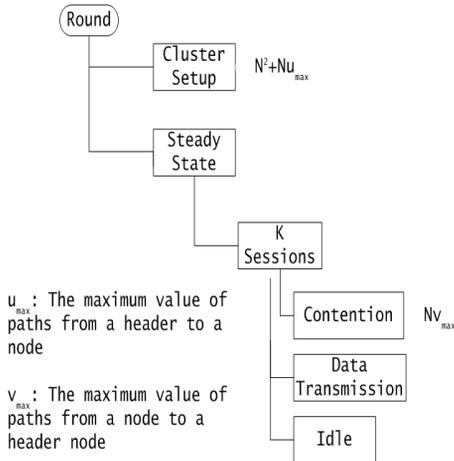


그림 4. BMA 프로토콜의 동작 순서도  
Fig. 4. Operational Flowchart of BMA

Contention 단계에서는 멤버 노드들이 1-bit 메시지를 선택되어진 헤드 노드에게 보낸다. 따라서 멤버 노드의 최대 값은  $N$ 이며, 각 노드가  $v_{max}$ 의 최대 메시지를 가짐으로 contention 단계에서 발생하는 최대 메시지는  $Nv_{max}$ 가 된다. 따라서 클러스터 setup 단계와 contention 단계의 BMA 메시지 복잡도는  $N^2 + Nu_{max} + Nv_{max}$ 가 된다. 다음 단계로 BMA는 데이터 전송(data transmission) 단계를 실행한다.

제안된 알고리즘은 BMA 데이터 전송 단계에 적용되며, [8]의 에너지 송수신 프로파일을 기반으로 하여 데이터 송수신에 대한 분석을 아래와 같이 실시한다.

클러스터 setup 단계에 의해  $k$ 개의 클러스터로 구성된 네트워크는, 클러스터당 평균  $N/k - 1$ 개의 NCH 노드를 가지고 있다. CH는 NCH 노드들로부터 오는 데이터 패킷을 수신하고, 이 데이터 패킷들을 하나의 데이터 프레임으로 변환(aggregation)하고, 변환된 데이터 프레임을 BS로 전송한다. 따라서 하나의 데이터 프레임 동안 CH에서 사용되는 에너지는 아래 (8)과 같다[8].

$$E_{CH} = lE_{elec} \left( \frac{N}{k} - 1 \right) + lE_{DA} \frac{N}{k} + lE_{elec} + l\epsilon_{amp}(d_{BS})^4 \quad (8)$$

(8)에서  $l$ 은 각 NCH 노드로부터 오는 데이터 패킷의 bit 수이며,  $E_{elec}$ 는 데이터 패킷에 digital coding, modulation, spreading이 부가될 때 사용되는 송수신기의 자체 에너지이

며,  $E_{DA}$ 는 BS에서 데이터 패킷을 프레임으로 변환(aggregation)할 때 사용되는 에너지이다.  $\epsilon_{amp}$ 는 BS와 CH사이의 거리( $d_{BS}$ )에 따라,  $d_{BS}^4$ 에 비례하는 채널의 전력 손실 모델이다. 본 논문에서는  $l=525$  bytes,  $E_{elec}=50$  nJ/bit,  $E_{DA} = 5$  nJ/bit/signal,  $\epsilon_{amp}=10$ pJ/bit/m<sup>2</sup> (NCH와 CH 사이의 거리에 따른 채널 전력 손실 모델) 또는 0.0013pJ/bit/m<sup>4</sup> (BS와 CH 사이의 거리에 따른 채널 전력 손실 모델)을 사용하였다[8].

각각의 NCH 노드는 하나의 프레임 동안 한 번 CH에게 자신의 데이터를 지정된 타임 슬롯에서 전송한다. 각각의 NCH 노드들에서 사용되는 에너지는 아래 (9)와 같다.

$$E_{Non-CH} = lE_{elec} + l\epsilon_{amp}(d_{CH})^2 \quad (9)$$

NCH와 CH 사이의 거리( $d_{CH}$ )에 따라,  $d_{CH}^2$ 에 비례하는 전력 손실 채널 모델( $\epsilon_{amp}$ )이 사용된다.

프레임동안 한 개의 클러스터에서 사용되는 에너지는 아래 (10)과 같다.

$$E_{Cluster} = E_{ch} + \left( \frac{N}{k} - 1 \right) E_{Non-CH} \quad (10)$$

네트워크는  $k$ 개의 클러스터로 구성되어 있으므로, 전체 네트워크에서 사용되는 에너지는 아래 (11)과 같다.

$$E_{Total} = kE_{Cluster} \quad (11)$$

### IV. 성능 평가

제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 불연속-이벤트 특성을 갖는 Matlab 시뮬레이터가 개발되었다. MATLAB R2008 버전을 갖는 시뮬레이터는 인텔 코어 2 3.06 GHz CPU 기반의 32 bit 윈도우 7 운영체제에서 수행되었다. 이 시뮬레이터의 특징은 100m<sup>2</sup>의 네트워크 영역 안에 무작위로 100개의 노드를 배치하면서 다양한 네트워크 토폴로지를 생성하고, 제안된 적응형 저전력 알고리즘 적용하면서 발생하는 에너지 사용량을 계산하였다. 또한, 시뮬레이터 성능을 입증하기 위해 QualNet에 의해 수행된 ADB 알고리즘[9]을 비교 테스트하였고, 그 결과 100, 125, 150 및 175개의 노드에 대해 클러스터 당 평균 노드 개수가 [9]의 결과와 1% 이하의 차이를 나타냄을 보였다.

본 논문에서 사용한 시뮬레이터의 파라미터 값은  $l=525$  bytes,  $E_{elec}=50$  nJ/bit,  $E_{DA}=5$  nJ/bit/signal,  $\epsilon_{amp}=10$  pJ/bit/m<sup>2</sup> (NCH와 CH 사이의 거리에 따른 채널 전력 손실 모델) 또는 0.0013pJ/bit/m<sup>4</sup> (BS와 CH 사이의 거리에 따른 채널 전력 손실 모델)이며, 표 1에 요약하였다(8,10). 그림 5는 시뮬레이터의 실행 장면을 캡처한 그림이다.

표 1 시뮬레이션 파라미터 (8)  
Table 1. Simulation Parameters

항목	파라미터	항목	파라미터
시스템	Intel 3.06 GHz Core 2 Duo	구현 프로토콜	BMA
네트워크 크기	100m <sup>2</sup>	노드 수	100
$k$	1~11	$E_{elec}$	50 nJ/bit
$E_{DA}$	5 nJ/bit/signal	$\epsilon_{amp}$ (NCH-CH)	10 pJ/bit/m <sup>2</sup>
$\epsilon_{amp}$ (BS-CH)	0.0013 pJ/bit/m <sup>4</sup>	$l$	525 bytes

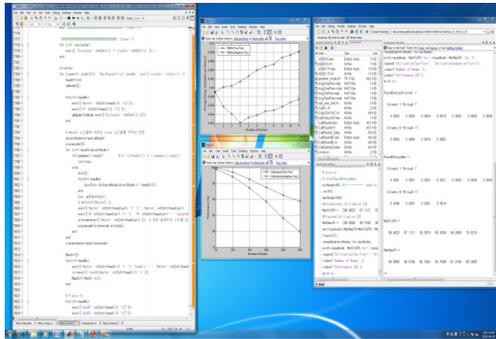


그림 5. 시뮬레이터 실행 화면  
Fig 5. Snapshot of Simulator

[8]에서와 같이 초기 CH는 임의적으로 선택되며, 클러스터 내의 NCH 노드가 순차적으로 CH가 되도록 하여, CH에 집중된 에너지를 NCH 노드에게 분산되도록 하였다. 네트워크의 클러스터 수  $k$ 는 1부터 11까지 변화시켰다. 525 데이터 패킷은 500 bytes의 데이터와 25 bytes 패킷 헤드로 구성된다. BS의 위치는 (50 m, 175m)로 하였다.

그림 6은 제안된 적응형 저전력 알고리즘과 two-tier 전력 전송 알고리즘의 성능을 네트워크의 한 개의 NCH 노드가 사용하는 에너지 관점에서 비교한 그래프이다. 그림 5에서  $x$

축은 클러스터 수를 나타내며,  $y$  축은 한 개의 NCH 노드가 사용하는 평균 에너지를 나타낸다.

제안된 적응형 저전력 전송 기법을 사용했을 때, 기존의 two-tier 전력 전송 방법보다 각 노드 당 평균 에너지 사용량은 각 클러스터에서 0.16%~19.93% 정도 줄어들었음을 확인할 수 있었다.

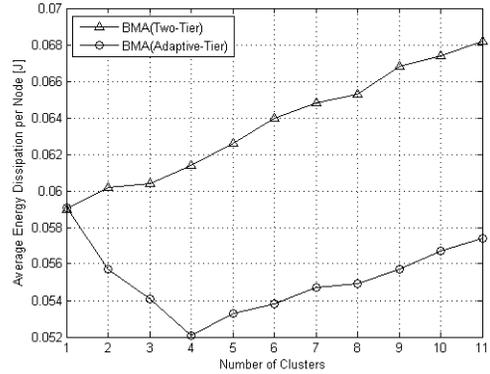


그림 6. BMA의 노드당 평균 에너지 사용량  
Fig. 6. Average Energy Dissipation per Node in BMA

제안된 적응형 저전력 전송기법에서는 네 개의 클러스터 수에서 NCH 노드들이 최소의 전력을 사용하는 것으로 나타났다. 전체 네트워크의 크기와 전체 노드 수, 클러스터 당 적정 NCH 노드 수 및 NCH 노드의 적응형 전송 반경 등이 복합적으로 작용할 때, BMA 에너지 프로파일에서의 최적 클러스터의 수는 네 개임을 의미한다.

Two-tier 전력 전송 방법은 클러스터가 1부터 11개까지 증가할 때, NCH 노드들의 평균 사용 에너지도 함께 선형적으로 증가함을 보였다. 이는 클러스터링에 관계없이 CH와 거리상으로 가장 멀리 떨어져 있는 NCH 노드까지의 전송 전력이 최대 전송 전력과 거의 유사하기 때문이다.

한 개 클러스터일 때는 two-tier 전력 전송 방법과 제안된 기법사이에는 에너지 사용량에 차이가 없는 것으로 확인되었다.

그림 7은 제안된 패킷 충돌 최소화 알고리즘의 성능을 나타낸다. 패킷 충돌 회피 알고리즘의 성능을 광범위하게 알아보기 위해, 네트워크의 전체 노드 수를 50개에서 300개까지 증가시키면서, CH의 비율을 20%로 한정하였다. 따라서 전체 네트워크는 일정 수의 클러스터를 가지며, 각 클러스터에서 CH는 다른 인접 클러스터들의 CH들의 데이터 송수신에서 전송 영역의 겹침으로 인한 패킷 충돌을 회피하도록 구현되었다.

각 클러스터 당 송수신해야 할 데이터 패킷 수는 NCH 노

드 수에 의해 정해져 있으며, 실제로 다른 CH와 전송 영역이 겹칠 때는 패킷 충돌을 회피하기 위해 여분의 타임 슬롯을 클러스터 할당해야하기 때문에 불필요한 타임 슬롯이 추가된다. 이러한 전송 영역의 겹침으로 발생한 추가 타임 슬롯의 발생은 네트워크의 성능을 낮추게 되는 주된 요인이 되게 된다.

실제 패킷 전송 시 전송 영역을 완벽하게 회피하여 타임 슬롯을 추가로 할당해서 확정된 총 타임 슬롯 수를 two-tier 알고리즘으로 구현된 확정 총 타임 슬롯 수와 그림 7에 비교하였다. 그림 7의  $x$ 축은 전체 네트워크의 노드 수를 나타내며,  $y$ 축은 타임 슬롯의 사용률(utilization)을 나타낸다. 사용률은 클러스터 내에서 패킷 전송에 필요한 타임 슬롯 수를 실제로 패킷 전송 시 전송 영역을 완벽하게 회피하여 타임 슬롯을 추가로 할당해서 확정된 총 타임 슬롯 수로 나눈 값으로 정의하였다.

같은 수의 데이터 패킷을 보낼 때, 제안된 적응형 저전력 전송기법이, two-tier 전력 전송 방법보다 타임 슬롯을 0.43%~10.55% 적게 사용하는 것을 알 수 있다. 이는 제안된 적응형 저전력 전송기법이 무선 TDMA의 재분배 자원인 타임 슬롯의 사용면에서 효율성이 더 높다는 것을 의미한다.

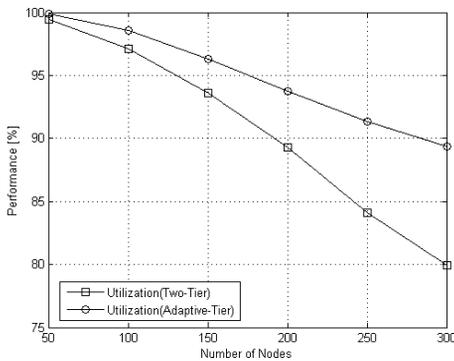


그림 7. Utilization 비교  
Fig. 7. Utilization Comparison

### V. 결론

본 논문에서는 TDMA 기반 MAC 프로토콜의 다양한 스케줄링 기법을 소개하면서, 효율적인 TDMA 타임 슬롯 배정안을 제안하였다. 또한, 에너지 사용 측면에서 클러스터 기반 기술이 비클러스터 기반 기술보다 나음을 기반으로 하여, 본 논문에서는 클러스터 기반의 TDMA MAC 노드의 전력 소비량을 최소화하는 적응형 저전력 전송 기법을 제안하였다. 기존의 two-tier 알고리즘은 CH와 NCH 노드 사이의 송수신

시 CH와 거리상으로 가장 멀리 떨어져 있는 NCH 노드까지의 전송 전력을 클러스터의 공식 전송 전력으로 지정하였지만, 적응형 저전력 전송 알고리즘에서는 다양한 CH와 NCH 노드 사이의 거리만으로 전송 전력을 설정하므로 전력 손실을 절감하였다.

또한 본 논문에서는 하나 이상의 CH를 탐지한 경우에는 가장 작은 전송 전력값으로 도달할 수 있는 CH를 자신의 best CH로 선택하는 알고리즘을 구축하였다.

제안된 알고리즘은 이웃 클러스터의 패킷 전송에서 발생하는 전력 간섭을 최소화함으로써 얻어지는 패킷 충돌 회피의 장점을 이용하여, 클러스터에서 사용되는 총 전력 소비량을 최소화하고, TDMA 슬롯의 패킷 처리량을 높이게 되었다.

따라서 제안된 적응형 저전력 전송 알고리즘은 기존의 two-tier 전력 전송 기법보다, BMA 프로토콜에 의한 메시지 전송에서는 15.8%의 에너지 사용 저감 효과를 나타내었으며, 또한 4.66% 높은 타임 슬롯 사용 효율성을 나타내었다.

### 참고문헌

- [1] I. Rhee, A. Warriar, M. Aia, J. Min, and M.L. Sichitiu, "Z-MAC: A Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol. 16, Iss. 3, pp. 511-524, Jun. 2008.
- [2] J. Li and G. Y. Lazarou, "A bit-map-assisted energy-efficient MAC scheme for wireless sensor networks," *Proceedings of the 3rd international symposium on Information processing in sensor networks table of contents*, pp. 55-60, 2004.
- [3] 김성철, 김형주, "클러스터 기반의 무선 센서 네트워크 환경에서 트래픽 부하 정보를 고려한 MAC 프로토콜," *한국컴퓨터정보학회논문지*, 제 14권, 제 3호, 113-119쪽, 2009년 3월.
- [4] K. Arisha, M. Youssef, and M. Younis, "Energy-Aware TDMA-Based MAC for Sensor Networks," *IEEE IMPACCT*, pp. 21-40, 2002.
- [5] J. Zhang, G. Zhou, C. Huang, S.-H. Son, and J.-A. Stankovic, "TMMAC: An Energy Efficient Multi-Channel MAC Protocol for Ad Hoc Networks," *ICC' 07*, pp. 3554-3561, 2007.
- [6] Ryu, J.-H., Song, S., and Cho, D.-H., "Energy-conserving clustering scheme for multicasting in two-tier mobile ad-hoc networks," *IET Elect. Lett.*, Vol. 37, No. 20, pp.

1253-1255, Sept. 2001.

- [7] J.-M. Chung, S.-C. Kim, W.-C. Jeong, S.S. Joo, "Minimized power consuming adaptive scheduling mechanism for cluster-based mobile wireless networks," IET Elect. Lett., Vol. 45, No. 19, pp. 985-986, Sept. 2009.
- [8] W. B. Heinzelman, A.P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks," IEEE Trans. Wireless Comm., Vol. 1, No. 4, pp. 660-670, Oct. 2002.
- [9] C.-C. Shen, C. Srisathapornphat, R. L. Z. Huang, C. Jaikaeo, and E.L. Lloyd, "CLTC: A cluster-based topology control framework for ad hoc networks," IEEE Trans. Mobile Computing, Vol. 3, No. 1, pp. 18-32, Jan.-Mar. 2004.
- [10] 김석규, "무선 센서 네트워크에서 보이드 문제 해결을 위한 위치 기반 데이터 전송 기법," 한국컴퓨터정보학회논문지, 제14권, 제4호, 59-67쪽, 2009년 4월.

## 감사의 글

본 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(No. 2009-0071268), 2009년도 국민대학교 교내연구지원금 및 서울시 산학연 협력사업(No. 10848)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 저자 소개



김 상 철

2005 : 미국 오클라호마 주립대학교,  
Electrical & Computer  
Eng., 공학박사.  
1994-2000 : 삼성 SDS, 삼성 테크  
원 시스템 엔지니어  
2005-현재 : 국민대학교 컴퓨터공학  
부 조교수  
관심분야 : 디지털 유무선 통신공학