

TDMA Ad-hoc 네트워크 MAC 프로토콜의 메시지 복잡도 분석

종신회원 김 상 철*

Message Complexity Analysis of TDMA Ad-hoc Network MAC Protocols

Sang-Chul Kim* *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 TDMA ad hoc MAC 프로토콜들의 메시지 복잡도를 분석한다. Ad hoc 네트워크의 자원은 간섭과 경쟁 기반 무선 통신 채널로 제한되기 때문에 ad hoc 알고리즘을 개발하는 데 있어 노드 수의 증가에 따른 유연한 확장성(Scalability) 문제는 주요한 연구 과제 중의 하나이다. 분석 기법을 적용한 결과, MAC 프로토콜들 중에서 TMMAC가 가장 높은 메시지 복잡도를 가졌으며, SMACS 프로토콜이 가장 낮은 메시지 복잡도를 보였다. 네트워크의 크기가 커질수록 유니캐스트에 의한 메시지 복잡도의 영향이 증가함으로, N^2 항목을 가지고 있는 Z-MAC, BMA, TMMAC에서 Z-MAC은 노드 수의 증가에 따라 복잡도가 선형적으로 상승하는 반면, BMA와 TMMAC의 복잡도는 지수 형태로 상승함을 밝혔다.

Key Words : Message Complexity; TDMA; Ad hoc MAC Protocols; Scalability

ABSTRACT

This paper analyses the message complexity of TDMA ad hoc MAC protocols. Since the network resource of ad hoc networks is limited due to the multiple interferences and the contention-based wireless channel, the scalability issue is one of the main research topics in developing ad hoc algorithms. Simulation demonstrates that SMACS protocol has the lowest message complexity, whereas TMMAC has the highest. In addition, it is found that since the effect of unicast dominates in the message complexity compared to other factors with an increasing number of nodes, Z-MAC tends to have the property of linearity, whereas BMA and TMMAC show exponential increases in their complexities.

I. 서 론

최근 몇 년 동안 이동 통신과 모바일 컴퓨팅 기술의 발전에 따라 다수의 이동 노드들로 구성된 자율 조직(self-organizing)이 가능한 ad hoc 무선 통신이 새로운 연구 주제로 등장하고 있다.

Ad hoc 네트워크에서 노드는 노드 사이에 다중 홉으로 교환되는 정보를 이용하여, 자율 구성(self-

configuring) 및 자율 조절(self-administrating)이 가능한 네트워크를 구성한다. 베이스 스테이션(base station) 또는 액세스 포인트(access point)와 같은 고정 통신 기반 시설 없이 다중 홉(multi-hop) 무선 링크를 통해 목적지까지 패킷을 전송함으로써 인해 다음과 같은 항목들이 ad hoc 네트워크 TCP/IP 계층에서 주요 연구 항목으로 대두되고 있다.

네트워크 계층에서는 이동 디바이스의 수가 급격

* 국민대학교 전자정보통신대학 컴퓨터공학부 (sckim7@kookmin.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-03-105, 접수일자 : 2009년 3월 11일, 최종논문접수일자 : 2009년 7월 23일

히 증가하는 동적인 환경에서도 양극단 지연시간, 지터 등을 안정적으로 유지할 수 있는 라우팅 알고리즘연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, 노드 수의 증가에 따른 컨트롤 오버헤드(control overhead)의 확장성(scalability) 문제도 중요한 연구 주제이다^[1].

MAC(media access control) 계층에서는 제한된 무선 통신 자원을 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) 정보가 요구되지 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 데이터 패킷의 무작위성(randomness) 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.

마지막으로, 물리 계층에서는 노드의 제한된 배터리 사용 시간을 효율적으로 늘리면서, 데이터가 송수신되도록 하는 최적화된 전력 전송 기술에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.

따라서 앞에서 살펴본 바와 같이 네트워크 계층, MAC 계층, 물리 계층에서의 공통적인 사안은 각 계층의 기술들이 최대의 성능을 가질 수 있도록 도와주는 효율적인 컨트롤 메시지의 운용 메커니즘을 개발하는 것이다. 따라서 본 논문에서는 이러한 운용 메커니즘 연구의 기반이 될 수 있는 컨트롤 메시지의 확장성 분석을 TDMA ad hoc MAC 프로토콜 기술을 기반으로 수행하고자 한다.

본 논문에서 도입한 확장성 분석 도구는 메시지 복잡도이며, 메시지 복잡도는 ad hoc 네트워크에서의 통신 효율(communication efficiency), 간섭(interference), 알고리즘 설정 시간 및 전원 소비와 직간접적으로 연관이 있다.

본 논문의 2장에서는 TDMA 기반 MAC 스케줄링에 관련된 프로토콜 개요를 소개하고, 3장에서는 관련 프로토콜의 메시지 복잡도를 분석한다. 4장에서는 실험과 고찰을 실시하고, 5장에서는 결론을 맺도록 한다.

II. 관련 연구

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 헤드에게 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 켜(turn on) 하고, 이러한 동작 모드는 수신 모드에서 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 절약하였다²⁾.

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 가까워진다¹⁾.

TDMA based MAC은 수신자로서의 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 할당한다³⁾.

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 수행한다⁴⁾.

TRAMA는 유니캐스트, 멀티캐스트 및 브로드캐스트로 전송되는 패킷이 전송 중 충돌되지 않도록 하는 알고리즘을 도입하였다. 따라서 충돌된 패킷의 재전송에 필요한 에너지를 절약함으로써 에너지 효율성을 높인 TDMA MAC 프로토콜이다⁵⁾. 또한 노드가 패킷 전송과 수신을 하지 않을 때는 저 전력 즉 대기 상태(idle state)로 전환함으로써 에너지 소모를

줄인다. TRAMA에서 전송할 트래픽이 없는 노드는 타임 슬롯이 할당되지 않는다. 또한 노드들 사이의 효율적인 타임 슬롯 할당 스케줄링을 위해 송신자의 스케줄에 근거하여 수신자를 선택하는 traffic adaptive distributed election 방법을 채용한다. 노드들은 two-hop 이웃 노드 정보와 전송 스케줄을 서로 교환하면서 어떤 노드가 트래픽을 수신할지를 결정한다. NP(neighbor protocol), SEP(schedule exchange protocol) 그리고 AEA(adaptive election algorithm)의 3단계로 TRAMA가 구성된다.

SMACS는 자율 조직(self-organizing) 센서 네트워크를 위해 개발된 ad hoc MAC 프로토콜이다. [6]의 저자들은 contention-based 채널 재사용 알고리즘이 적용되는 센서 노드는 센서의 송수신기가 무선 채널의 사용 상태를 항상 감시해야 함으로 제한된 배터리로 작동되는 센서 노드의 MAC 프로토콜로 효과적인 방식이 아님을 밝혔다. SMACS 노드는 자체적으로 무선을 끄는 기능과, 다양한 주파수 대역에서 캐리어 주파수를 설정할 수 있는 기능을 가지고 있다. SMACS 프로토콜에서는 이웃 노드 발견과 동시에 발견된 이웃 노드와 채널을 할당한다. 이웃 노드를 발견하면, 즉시 하나의 채널이 이웃 노드로 할당됨으로 인해, 네트워크를 구성하는 2개의 노드 사이에는 최소 1개 이상의 멀티 홉 경로가 존재한다. 패킷 충돌을 줄이기 위해서 경로의 개별적인 링크는 서로 다른 주파수로 작동된다⁶⁾.

III. 메시지 복잡도 분석

본 절에서는 2절에서 소개된 TDMA 기반 ad hoc MAC 프로토콜들의 메시지 복잡도를 분석한다.

네트워크 노드 수의 증가에 따른 프로토콜의 확장성을 분석하기 위해, N , u , v 변수 등을 도입한다. N 은 네트워크의 전체 노드 수이며, u 와 v 는 특정 경로(path)에 있는 노드 수이다. 헤더 노드에서 특정 노드까지의 경로에 있는 실제 노드 수를 u 로 나타내고, 특정 노드에서 헤드 노드사이의 경로에 있는 노드 수를 v 로 나타낸다. u , v 의 최대값은 u_{max} , v_{max} 로 표현한다. 실험에서는 u , v 값은 네트워크 토폴로지에 따라 0과 N 사이에서 다양한 값을 가지면서 변화한다. 각 MAC 프로토콜의 메시지 복잡도는 $f(N)_{MAC}$ 프로토콜의 형태로 나타나며, $f(N)_{MAC}$ 프로토콜은 N , u_{max} , v_{max} , 및 기타 변수의 최대값들로 구성된 함수이다.

3.1 BMA

패킷 충돌과 idle listening의 불필요한 단계에서 발생하는 에너지 소모를 줄이는 것을 주목적으로 하는 BMA 프로토콜은 그림 1과 같은 cluster setup 단계와 steady state 단계를 수행하면서 BMA 관련 메시지를 발생시킨다.

Cluster setup 단계에서 발생하는 최대 메시지는 $N^2 + Nu_{max}$ 이다. Cluster setup의 첫 번째 단계에서, 클러스터 헤드를 선출하기 위해, 모든 노드는 네트워크의 다른 노드에게 현재 자신의 남아 있는 파워 레벨을 담은 메시지를 전송한다.

한 개의 노드가 자신의 power 레벨을 담은 메시지를 네트워크의 모든 노드에게 브로드캐스트 전송할 때 N의 최대 메시지가 발생한다. 이러한 과정이 네트워크의 모든 노드(N)에서 이루어짐으로 인해, N^2 의 최대 메시지가 발생한다.

Cluster setup의 두 번째 단계에서는, 자신의 남아 있는 파워와 다른 노드에서 전해져 온 잔여 파워를 비교하여 스스로 헤드 노드로 판단한 노드는 메시지를 브로드캐스트한다.

이 과정에서 헤드 노드에서 각각의 개별 노드까지의 다른 경로 u의 최대값을 u_{max} 라고 독립된 항목으로 표현하면 cluster setup의 두 번째 단계에서의 발생하는 최대 메시지는 Nu_{max} 가 된다.

따라서 cluster setup에서 발생하는 최대 메시지는 첫 번째 단계의 최대값인 N^2 와 두 번째 단계의 최대값인 Nu_{max} 의 합인 $N^2 + Nu_{max}$ 으로 표현된다.

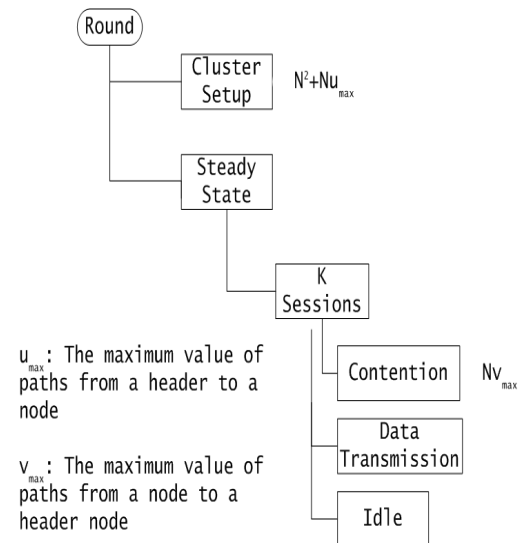


그림 1. BMA 프로토콜의 동작 순서도

Contention 단계에서는 멤버 노드들이 1-bit 메시지를 선택되어진 헤드 노드에게 보낸다. 따라서 멤버 노드의 최대값은 N이며, 각 노드가 v_{max} 의 최대 메시지를 가짐으로 contention 단계에서 발생하는 최대 메시지는 Nv_{max} 가 된다. 따라서 cluster setup 단계와 contention 단계를 고려한 BMA의 메시지 복잡도 $(f(N)_{BMA})$ 는 $N^2 + Nu_{max} + Nv_{max}$ 가 된다.

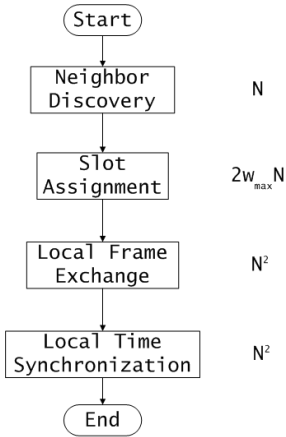
3.2 Z-MAC

Z-MAC은 TDMA와 CDMA의 장점을 결합시킨 프로토콜로서, 노드 경합이 높을 때에는 TDMA를 사용하고, 낮을 때에는 CSMA를 사용한다. Z-MAC 프로토콜은 1) neighbor discovery, 2) slot assignment, 3) local frame exchange, 4) local time synchronization으로 구성된다.

Neighbor discovery 과정에서는 모든 노드(N)가 자신의 one-hop 이웃노드에게 Hello 메시지를 전송함으로 N개의 최대 메시지가 발생한다. Slot assignment 단계에서 각 노드는 Hello 메시지로부터 얻은 one-hop 이웃노드 정보를 이용하여 two-hop 이웃노드 정보까지 파악하고, DRAND 알고리즘을 이용하여, two-hop 이웃 노드까지의 타임 슬롯을 할당한다. 각 노드는 slot assignment 메시지를 전송하면서, 할당된 타임 슬롯의 스케줄을 전송한다. Slot assignment 메시지는 two-hop 이웃 노드까지 2번의 메시지 전송을 통해 전달된다. 따라서 노드의 two-hop 이웃 노드의 최대 수를 w_{max} 라고 하면, 한 개 노드에서 발생된 slot assignment 메시지의 최대값은 $2w_{max}$ 이며, 네트워크 전체적으로 발생하는 최대 메시지는 $2w_{max}N$ 이 된다.

Local frame exchange 메시지는 전체 네트워크로 전송된다. 모든 노드(N)가 메시지를 다른 모든 노드 (N)에게 전송함으로 발생하는 최대 메시지는 N^2 가 된다. Local time synchronization 메시지도 전체 네트워크로 전송되며, 메시지의 최대값은 모든 노드(N)가 메시지를 다른 모든 노드 (N)에게 전송함으로 N^2 가 된다.

따라서 Z-MAC의 메시지 복잡도 $(f(N)_{Z-MAC})$ 는 $N + 2w_{max}N + 2N^2$ 가 된다. 그림 2는 Z-MAC의 프로토콜 동작 순서도와 4 단계에서 발생하는 메시지 복잡도를 보여 준다.



w_{max} : The maximum value of two hop neighboring nodes for a node

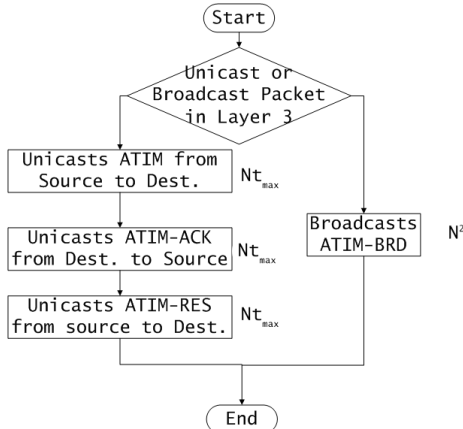
그림 2. Z-MAC 프로토콜의 동작 순서도

3.3 TMMAC

TMMAC는 그림 3과 같이 IP 계층에서 생성된 라우팅 메시지의 유니캐스트 또는 브로드캐스트 전송 방법에 따라 MAC 계층의 TDMA 채널 예약 방법을 다르게 가진다.

유니캐스트 전송 방법을 가진 메시지가 IP 계층에서 생성되면, TMMAC에서는 ATIM, ATIM-ACK, ATIM-RES의 3가지 종류의 메시지를 사용하여 소스와 목적지 노드 사이에 채널을 할당한다. ATIM과 ATIM-RES 메시지는 소스 노드에서 목적지 노드까지, ATIM-ACK 메시지는 목적지 노드에서 소스 노

Unicast Packet Channel Negotiation Broadcast Packet Channel Negotiation



t_{max} : The maximum value of paths from a source node to a destination node

그림 3. TMMAC 프로토콜의 동작 순서도

드까지 유니캐스트된다.

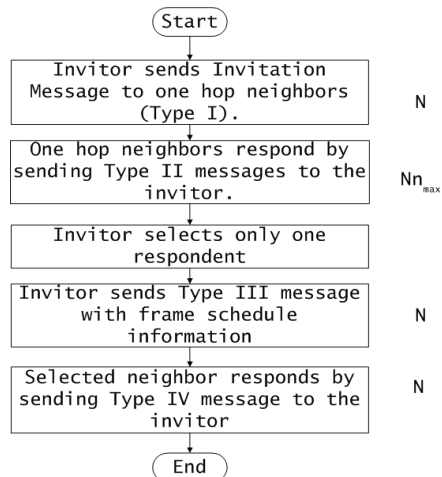
모든 노드(N)가 유니캐스트 메시지를 보내는 fully loaded된 경우의 시나리오에서, 소스 노드에서 목적지 노드까지의 경로의 최대값을 t_{max} 라고 나타내면, 각 노드(N)가 ATIM 메시지를 목적지 노드까지 보내는 단계에서 발생하는 최대 메시지는 Nt_{max} 가 된다.

또한, ATIM-ACK 메시지는 ATIM 메시지를 받은 목적지 노드들(N)이 최대값 t_{max} 를 가지고 ATIM 메시지를 보낸 소스 노드에게 응답함으로 이 과정에서 Nt_{max} 의 최대 메시지가 발생한다. 마지막으로, 소스 노드(N)가 ATIM-RES 메시지를 목적지 노드까지 보낼 때, Nt_{max} 의 최대 메시지가 발생 한다. 따라서 유니캐스트 과정에서 발생하는 최대 메시지는 $3Nt_{max}$ 가 된다.

IP 계층에서 브로드캐스트 전송 기법을 요구하는 메시지가 생성되면, 각 노드(N)가 모든 노드 (N)에 브로드캐스트를 통해 ATIM-BRD 메시지를 전송함으로, N^2 개의 최대 메시지가 발생한다. 따라서 TMMAC의 메시지 복잡도($f(N)_{TMMAC}$)는 N^2+3Nt_{max} 이다 .

3.4 SMACS

SMACS는 그림 4와 같이 4개의 메시지 생성 단계를 가진다. 첫 번째 단계에서는 invitor(N)가 invitation 메시지(Type I)를 자신의 one-hop 이웃 노드에게 전송하며, 이 때 발생하는 최대 메시지는 N이다. 두 번째 단계에서는 invitor의 one-hop 이웃 노드들이 invitor(N)에게 메시지(Type II)를 전송하



n_{max} : The maximum value of one hop neighbors of a node

그림 4. SMACS 프로토콜의 동작 순서도

며, invitor의 one-hop 이웃 노드의 최대값을 n_{max} 로 표시하면, 이 때 발생하는 최대 메시지는 Nn_{max} 가 된다. 세 번째 단계에서, invitor는 타임 슬롯 프레임의 스케줄 정보가 담긴 Type III 메시지를 자신의 one-hop 이웃 노드에게 전송하며, 이 때 발생하는 최대 메시지는 N 이다. 네 번째 단계에서, 선택된 이웃 노드만 Type IV 메시지를 invitor에게 전송하며, 이 때 N 개의 최대 메시지가 발생한다. 따라서 SMACS은 $3N+Nn_{max}$ 의 메시지 복잡도($f(N)_{SMACS}$)를 가진다.

3.5 TDMA based MAC

TDMA based MAC은 그림 5와 같이 3개의 메시지 생성 단계를 가진다.

첫 번째 단계에서 모든 노드(N)가 자신의 id, 배터리 레벨, 위치 정보를 가진 refresh 메시지를 gateway에게 전송(v_{max})함으로 Nv_{max} 의 최대 메시지가 발생한다. 두 번째 단계에서 gateway가 inactive 노드(N)들에게 refresh-based rerouting 메시지를 전송(u_{max})하며, 이 때, Nu_{max} 의 최대 메시지가 발생한다. 세 번째 단계에서, gateway는 event-triggered rerouting 메시지를 노드(N)에게 전송(u_{max})함으로 발생하는 최대 메시지는 Nu_{max} 이다. 따라서 TDMA based MAC의 메시지 복잡도($f(N)_{TDMA based MAC}$)는 $Nv_{max}+2Nu_{max}$ 이다.

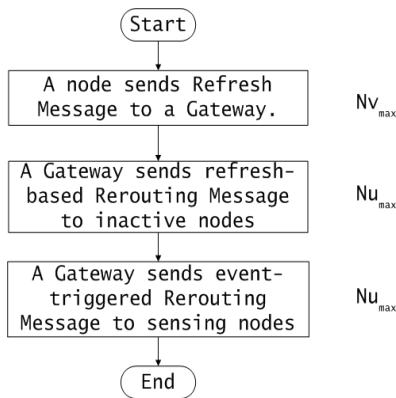


그림 5. TDMA based MAC 프로토콜의 동작 순서도

3.6 TRAMA

그림 6과 같이 TRAMA의 첫 번째 단계는 neighbor protocol(NP) 단계이다. 이 때 노드(N)는 NP 메시지를 자신의 one-hop 이웃노드에게 전송한다. 노드와 자신의 이웃 노드들은 NP 메시지를 랜덤하게 전송하기 때문에 전송 중 패킷 충돌 가능성이 있다.

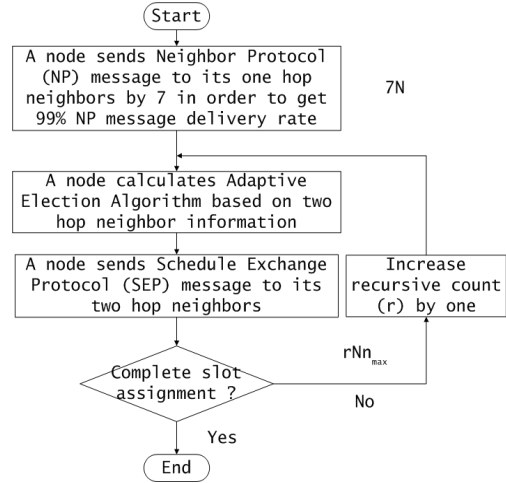


그림 6. TRAMA 프로토콜의 동작 순서도

따라서 99%의 패킷 전송 성공률을 획득하기 위하여 NP 메시지를 7번 반복하여 전송한다. 이 때 $7N$ 의 최대 메시지가 발생한다.

두 번째 단계에서는 NP 단계에서 획득한 이웃 노드 정보를 이용하여 각 노드는 two-hop 노드까지의 브로드캐스트 스케줄링을 결정한다. 이 때 각 노드는 adaptive election algorithm(AEA) 알고리즘을 적용하여 브로드캐스트 스케줄링을 수행하며, 외부적으로 발생하는 메시지는 없다. 세 번째 단계에서는 브로드캐스트 스케줄링에 따라 각 노드(N)는 schedule exchange protocol(SEP) 메시지를 two-hop 이웃 노드(n_{max})까지 전송한다.

클러스터 내의 모든 노드에게 타임 슬롯을 할당하지 못할 경우, AEA 결정 과정과 SEP 전송 과정이 반복된다. 즉 노드의 이동성 등에 의해 새롭게 구성되는 노드와 노드의 이탈에 의해 타임 슬롯을 할당할 필요가 없을 때, 이러한 반복 과정이 계속 될 가능성이 있다.

반복 횟수를 r 이라고 표현하면, 세 번째 단계에서 발생하는 최대 메시지는 rNn_{max} 가 되고, n_{max} 은 two-hop 이웃 노드에게 SEP 메시지가 전송되기 위해 릴레이에 참가하는 one-hop 이웃 노드의 최대 수이다. 따라서 TRAMA의 메시지 복잡도 ($f(N)_{TRAMA}$)는 $7N+rNn_{max}$ 이다.

IV. 실험 및 고찰

4.1 실험

TDMA ad hoc MAC 프로토콜들 사이의 메시지

복잡도를 비교, 분석하기 위해 1km²의 네트워크 영역에 랜덤하게 배치된 노드에서 각 프로토콜의 복잡도를 실험하는 컴퓨터 기반 시뮬레이터를 개발하였다. Discrete-event 시뮬레이터 특성을 가지는 Matlab을 사용하여 다양한 네트워크 토폴로지를 생성하였다. Dijkstra shortest path 알고리즘이 소스 노드와 목적지 노드, 헤드와 노드 사이의 유니캐스트 경로(t,u,v)의 메시지 복잡도를 계산하는 데 사용되었다.

노드의 전송 반경(transmission range)에 따라 네트워크 토폴로지내의 클러스터 구성 노드 수가 변화되고, 네트워크에서 제일 많은 노드 수로 구성된 클러스터에서 프로토콜의 복잡도가 분석되었다.

[7]에서 제안된 adaptive dynamic backbone(ADB) 알고리즘을 사용하여, 개발된 시뮬레이터의 성능을 검증하였다. 100, 125, 150, 및 175의 노드 수를 랜덤하게 발생시켜서, 전송 반경에 따른 네트워크의 토폴로지를 구성한다. 제일 큰 클러스터에서 ADB 알고리즘을 수행한 결과, [7]의 실험 결과와 1%이하의 오차가 발생하였다.

시뮬레이션에서 노드는 순서도의 과정을 따라, 각 프로토콜의 동작 절차를 수행한다. 프로토콜 동작 순서도의 개별 단계는 노드가 메시지를 생성할지, 특정 과정을 반복할지, 다른 과정으로 분기할지 또는 동작을 정지할지 여부와 같은 일반적인 결정을 주며, if~then 구조를 사용하여 개발되었다.

프로토콜은 각각의 단계가 자체적인 메시지 복잡도를 가진 일련의 구분된 명확한 절차로 구성되기 때문에 각각의 단계에서 측정된 메시지 복잡도를 더하여 그림 7과 8의 그래프에 표시하였다.

실험에서 노드의 전송 반경은 100m를 사용하였고, 노드의 개수는 50개에서 250개까지 변화시켰다. 각 프로토콜은 구성 노드 수의 증감에 따라 최대치(upper bound)와 simulation의 두 개의 그래프로 확장성이 표현되면서, 다른 프로토콜과 성능이 비교 분석되었다.

BMA에서 다양한 랜덤 네트워크 토폴로지서 발생하는 경로를 중에서 u_{max} , v_{max} 값으로 구성된 복잡도가 최대치 그래프로 표현되고, 다양하게 변화하는 u , v 값들의 평균값이 simulation 그래프로 표현되었다. TMMAC에서는 50:50의 비율로 IP 계층에서 유니캐스트 패킷과 브로드캐스트 패킷이 발생하였다. TRAMA에서 반복 횟수(τ)는 3이 사용되었다.

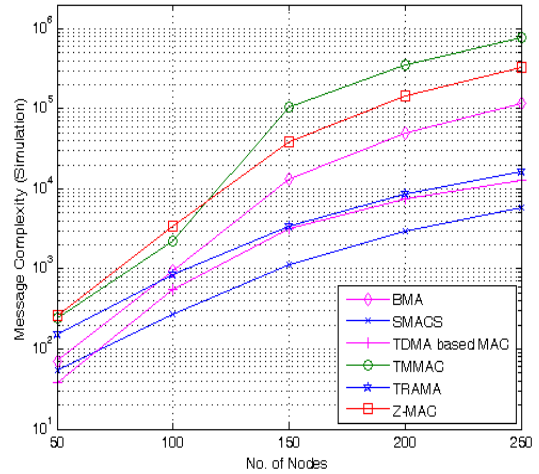


그림 7. 메시지 복잡도 비교 (Simulation)

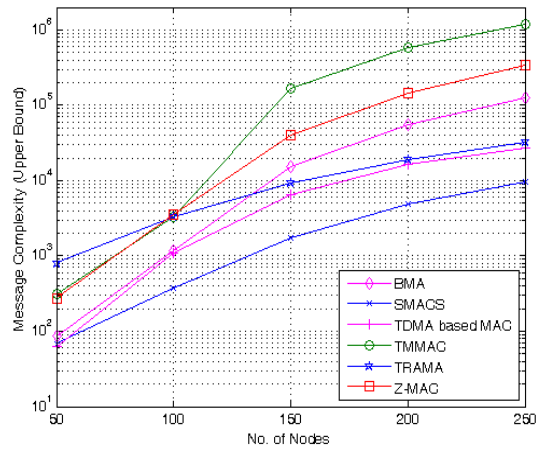


그림 8. 메시지 복잡도 비교 (Upper Bound)

4.2 고찰

그림 7에서와 같이 6개의 TDMA ad hoc MAC 프로토콜 중에서 노드 수가 70개 미만일 경우, TDMA based MAC 프로토콜이 가장 낮은 메시지 복잡도를 보였다. 70개 이상일 경우에는 SMACS가 가장 낮은 복잡도를 보였다. 130개 이전까지는 ZMAC 프로토콜이, 130개 이상의 노드로 구성된 네트워크에서 TMMAC가 가장 높은 복잡도를 보였다.

그림 7에서 브로드캐스트 N^2 항목을 가지는 BMA, Z-MAC, TMMAC에서 복잡도의 차이는 변수 u , v , τ 에 의해서 나타나는 유니캐스트에 의해 나타났다. 네트워크의 노드 수가 250에 가까이 갈수록, 유니캐스트의 경로의 길이(τ)가 길어진다. 따라서 N^2 항목의 브로드캐스트 복잡도를 가지면서, 더불어 소스 노드에서 목적지 노드까지의 경로의 구성 노드 개수를 의미하는 τ 변수의 유니캐스트 동작을 가지고

있는 TMMAC(N^2+3Nt_{max})의 복잡도 추이 현상이 N^2 항목과 u, v 변수를 가지는 BMA 프로토콜과, N^2 항목만을 가지는 Z-MAC 프로토콜보다 급격히 증가함을 볼 수 있으며, 이러한 현상은 TMMAC가 가장 높은 복잡도를 나타내는 주된 원인으로 분석된다.

Z-MAC($N+2w_{max}N+2N^2$)에서, 브로드캐스트 항목인 $2N^2$ 의 복잡도에 대한 영향력이 다른 항목보다 크기 때문에, two-hop 이웃 노드에 의한 $2w_{max}N$ 항목의 영향력은 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 Z-MAC 프로토콜은 노드 수의 확장에 따라 복잡도도 일정한 비율로 증가함으로 확장성에 대한 특정한 노드 구간을 발췌할 수 있는 장점을 가지고 있지 않다. 즉, 노드 수에 관계없이 일정한 복잡도 상승을 가짐으로 일정 노드 크기 구간의 확장성을 발췌하기 어렵다.

BMA($N^2+N u_{max}+N v_{max}$), TMMAC($N^2+3N t_{max}$)의 유니캐스트 전송 과정에서, 네트워크의 노드 수가 커질 때, $u_{max}, v_{max}, t_{max}$ 의 값은 N 에 수렴함을 알 수 있다. 세 항목 중, t_{max} 의 값이 제일 먼저 N 에 수렴한다. 이러한 현상으로 네트워크의 노드 수가 커질 때, 모든 소스 노드에서 목적지 노드까지의 유니캐스트 전송의 $N t_{max}$ 복잡도가 각 노드(N)가 모든 노드(N)에게 전송하는 N^2 브로드캐스트 복잡도에 근접함을 알 수 있다.

따라서 N^2 항목을 가지고 있는 프로토콜(BMA, TMMAC, Z-MAC)의 확장성을 비교하면, N^2 항목과 u_{max}, v_{max} 항목을 가진 BMA와 N^2 항목과 t_{max} 항목을 가진 TMMAC 프로토콜은 노드 수의 증가에 따라 복잡도가 특정 노드 수 이상에서 지수(exponential) 함수 형태로 증가하는 경향을 가짐을 알 수 있다. 하지만, N^2 항목만을 가진 Z-MAC은 노드 수의 증가에 따라 복잡도가 선형적으로 상승하였다.

BMA와 TMMAC가 노드수가 작을 때에는 낮은 복잡도를 가지고, 특정 노드 수 이상일 때, 기하급수적인 복잡도 상승을 가짐으로, 노드 수가 작은 범위에서 확장성의 장점을 가진다고 할 수 있다.

N^2 항목과 u_{max}, v_{max} 항목을 가진 BMA의 경우가 N^2 항목과 t_{max} 항목을 가진 TMMAC의 경우보다 확장성의 장점을 가진다. 그림 8에서는 각 프로토콜의 메시지 최대치(upper bound)를 나타내었다.

표 1은 전체 네트워크 노드 수가 50, 100, 150, 200, 250개일 때, SMACS 프로토콜의 메시지 복잡도를 기준으로 5개의 프로토콜의 메시지 복잡도 증감에 대한 백분율을 나타낸다.

표 1. 메시지 복잡도의 백분율 비교 (SMACS 기반)

Overhead (%)	50	100	150	200	250
TRAMA	175	207.9	199.1	187.7	183.4
TDMA based MAC	-31.2	104.0	177.8	152.4	124.5
TMMAC	340	712	9187	11858	13218
BMA	29.6	244.9	1092.9	1564.3	1901.7
Z-MAC	378.2	1152.4	3326.2	4715.2	5659.1

표 2. 각 프로토콜의 메시지 복잡도 요약

$f(N)_{BMA}$	$f(N)_{Z-MAC}$	$f(N)_{TMMAC}$
$N^2+N u_{max}+N v_{max}$	$N+2w_{max}N+2N^2$	$N^2+3N t_{max}$
$f(N)_{SMACS}$	$f(N)_{TDMA \text{ based MAC}}$	$f(N)_{TRAMA}$
$3N+N n_{max}$	$N v_{max}+2N u_{max}$	$7N+rN n_{max}$

표 2에 제시된 바와 같은 메시지 복잡도 분석에서, TDMA based MAC, SMACS, 그리고 TRAMA에는 N^2 항목이 존재하지 않기 때문에 TMMAC, BMA, 그리고 Z-MAC보다 낮은 복잡성을 가지는 것으로 유추할 수 있다. N^2 항목은 패킷을 하나의 노드에서 모든 노드로 전달하는 메커니즘을 모든 노드가 수행할 때 발생하는 항목으로 네트워크 부하를 많이 야기하는 동작이다.

따라서 제한된 무선 네트워크 자원을 효과적으로 공유하려면 프로토콜 개발 과정에서, 가능하면 하나의 노드에서 모든 노드로 전달되는 메커니즘이 모든 노드에서 수행되는 동작 단계를 피해야 됨을 알 수 있다.

채널 재사용 빈도가 높아지는 프로토콜은 스케줄링된 타임 슬롯이 충돌하지 않도록 하는 기능을 가져야 한다. 이러한 엄격한 스케줄링을 구현하기 위해 높은 메시지 교환은 필수 요건이다. 즉 프로토콜이 우수한 성능을 유지하기 위해서는 높은 컨트롤 오버헤드가 필요하다. 여기서, 네트워크의 무선 자원의 효율 공유와 프로토콜이 우수한 성능(채널 재사용 빈도를 높이는 것) 사이에는 적절한 조화가 필요함을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 TDMA ad hoc MAC 프로토콜들의 메시지 복잡도 분석을 실시하였다. 최악 경우의 시나리오에 대한 시뮬레이션을 실시하여 프로토콜들

간의 메시지 복잡도를 분석한 결과, 네트워크 노드 수가 커질 때, 모든 소스 노드에서 목적지 노드까지의 유니캐스트 전송의 복잡도가 각 노드가 모든 노드에게 전송하는 브로드캐스트 복잡도와 근접한 복잡도를 가짐을 확인하였다. 이러한 결과를 이용하여 모든 소스 노드에서 목적지 노드까지의 유니캐스트 전송을 모든 소스 노드에서 헤드 노드까지의 유니캐스트 전송 등으로 전환하여 복잡도를 낮출 수 있는 방법을 제시하였다.

이러한 확장성 연구는 프로토콜 개발 시 효율적인 네트워크 자원 관리를 위한 컨트롤 오버헤드의 적절한 사용에 대한 연구 기반이 될 수 있다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

[1] I. Rhee, A. Warrier, M. Aia, J. Min, and M.L. Sichitiu, "Z-MAC: A Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks," *IEEE/ACM Transactions on 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] K. Arisha, M. Youssef, and M. Younis, "Energy-Aware TDMA-Based MAC for Sensor Networks," *IEEE IMPACCT*, pp. 21-40, 2002.

[4] 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.

[5] V. Rajendran, K. Obraczka, and J.J. Garcia-Luna-Aceves, "Energy-Efficient, Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks," *Wireless Networks*, 2006, vol. 12, no. 1, pp. 63-78, Feb. 2006.

[6] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, and G.J. Pottie, "Protocols for selforganization of a wireless sensor network," *IEEE Personal Communications*, vol. 7, iss. 5, pp. 16-27, Oct. 2000.

[7] 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.

김 상 철 (Sang-Chul Kim)

중신회원



2005년 12월 미국 오클라호마 주립 대학교 Electrical & Computer Eng., 공학박사

1994년 3월~2000년 7월 삼성 SDS, 삼성 테크윈 시스템 엔지니어

2006년 3월~현재 국민대학교 컴퓨터공학부 조교수

<관심분야> 디지털 유무선 통신공학, ITS, 로봇 그룹핑 제어