

Wi-Fi 메쉬 네트워크를 위한 다중 채널 스케줄링 MAC (MCS-MAC) 프로토콜

준회원 무 악 단*, 양 재 영**, 정회원 주 아 봉***, 종신회원 정 한 유****

A Multi-Channel Scheduling MAC (MCS-MAC) Protocol for Wi-Fi Mesh Networks

Ledan Wu*, Jae-Young Yang** *Associate Members*, Yafeng Zhou*** *Regular Member*,
Han-You Jeong**** *Lifelong Member*

요 약

IEEE 802.11 물리/MAC 계층을 기반으로 무선 다중 홉 연결을 제공하는 Wi-Fi 메쉬 네트워크는 RFID 시스템과 무선 센서 네트워크를 위한 네트워크 인프라로 최근 각광받고 있다. 그런데, 현재의 IEEE 802.11 기술의 경쟁 기반 MAC 프로토콜은 빈번한 프레임 충돌(Collision)과 자원 미사용(Idle)으로 인해 Wi-Fi 메쉬 네트워크가 제공하는 용량(Capacity)을 충분하게 활용하지 못하는 실정이다. 본 논문에서는 Wi-Fi 메쉬 네트워크의 수율을 최대화하기 위한 다중 채널 스케줄링 MAC (MCS-MAC) 프로토콜을 제시한다. MCS-MAC 프로토콜은 IEEE 802.11 무선 채널의 특징인 이차적 간섭 모형(Secondary Interference Model) 하에서 프레임 충돌이 없이 최대 기중치를 가지는 링크들을 활성화하여 Wi-Fi 네트워크의 수율을 극대화하는 특징을 가지고 있다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 MCS-MAC 프로토콜이 기존에 알려진 동적 MAC 프로토콜들에 비해 최소 세 배 이상 수율을 향상할 수 있음을 보인다.

Key Words : Wi-Fi 메쉬 네트워크, 채널접근제어, 다중 채널 스케줄링 MAC 프로토콜, 분산기반 링크 활성화 이차적 간섭 모형

ABSTRACT

A Wi-Fi mesh network providing multi-hop wireless connections based on IEEE 802.11 PHY/MAC technology has recently received a significant attention as a network infrastructure that interconnects RFID systems and wireless sensor networks (WSNs). However, the current IEEE 802.11 contention-based MAC protocol cannot fully utilize the network capacity due to either frame collisions or unused network resources. In this paper, we propose a novel multi-channel scheduling MAC (MCS-MAC) protocol for Wi-Fi mesh networks. Under the secondary interference model of Wi-Fi mesh networks, the MCS-MAC protocol can maximize the network throughput via activation of collision-free links that has a maximal link weight. Through the simulations, we show that the throughput of the MCS-MAC protocol is at least three times higher than that of existing MAC protocols in Wi-Fi mesh networks.

※ 이 논문은 2011년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구임(지역거점연구단육성사업/차세대물류IT기술연구사업단)

* 부산대학교 물류IT학과 (wugah@naver.com), ** (주)홈플러스 정보서비스&OM본부 (jaeyoung.yang@homplus.co.kr),

*** 부산대학교 정보컴퓨터공학부 (flyzyf@pusan.ac.kr),

**** 부산대학교 차세대물류IT기술연구사업단 (hyjeong@pusan.ac.kr), (° : 교신저자)

논문번호 : KICS 2011-10-486, 접수일자 : 2011년 10월 20일, 최종논문접수일자 : 2012년 1월 10일

I. 서론

IEEE 802.11 PHY/MAC 기술을 기반으로 무선 다중 홉(Hop) 연결을 제공하는 Wi-Fi 메쉬 네트워크(Wi-Fi Mesh Networks)는 항만 물류 환경과 공공 네트워크 등에서 수집하는 RFID 태그 정보 및 센싱 정보를 전달하기 위한 비용 효율적인 네트워크 인프라 기술로 각광받고 있다^{[1][2]}. Wi-Fi 메쉬 네트워크는 무선으로 넓은 지역을 서비스할 수 있어 구축 비용이 적고, 자가 구성(Self-Organization) 및 자가 치유(Self-Healing) 기능으로 인해 네트워크 장애에 강한 특징을 가지고 있다.

그림 1에서 보인 바와 같이, Wi-Fi 메쉬 네트워크는 IEEE 802.11 PHY/MAC 기반 무선 링크로 상호 연결된 다수의 메쉬 라우터(Mesh Router)들로 구성된다[1]-[4]. 메쉬 라우터들은 RFID 리더 혹은 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network: WSN) 등의 메쉬 클라이언트(Mesh Client)들이 생성하는 정보들을 메쉬 게이트웨이(Mesh Gateway)로 전달하는 역할을 담당한다. 메쉬 게이트웨이에서 수신된 태그 및 센싱 정보들은 기존 네트워크 인프라를 경유하여 RFID/WSN 미들웨어(Middleware)에 저장된다. 요약하면, Wi-Fi 메쉬 네트워크 기술은 메쉬 클라이언트들이 생성한 태그 및 센싱 정보들을 RFID/WSN 미들웨어로 전달하는 효율적인 무선 네트워크 인프라 기술이다.

본 논문에서는 Wi-Fi 메쉬 네트워크의 설계에 있어 중요한 문제 중의 하나인 메쉬 라우터들의 무선 매체 접근제어(Medium Access Control: MAC) 프로토콜 설계 문제를 해결하고자 한다. Wi-Fi 메쉬 네트워크의 MAC 프로토콜 설계에 있어 가장 큰 문제점 중의 하나는 무선 채널에서 발생하는 프레임 충돌(Frame Collision)로 인한 수율 저하이다^{[1][2]}. Wi-Fi 메쉬 네트워크에서 프레임 충돌을 막기 위해서는 프레임을 교환하는 두 메쉬 라우터들과 인접한 모든 이웃 메쉬 라우터들의 프레임 송/수신을 제한해야 하는데, 이를 이차적 간섭 조건(Secondary Interference Constraint)이라 한다. 경쟁 기반의 IEEE 802.11 CSMA/CA MAC 프로토콜은 숨은/노출(Hidden/Exposed) 단말 문제로 인해 Wi-Fi 메쉬 네트워크의 수율을 크게 저하시키는 문제점이 있다^{[5][7]}.

이와 같은 문제점들을 해결하기 위하여 다양한 스케줄링 MAC 프로토콜들이 제시되었다^{[8][9]}. 논문 [8]의 저자들은 제한 조건을 가진 큐잉(Queueing) 시스템에서 수율을 최대화하는 스케줄링 알고리즘을 최초

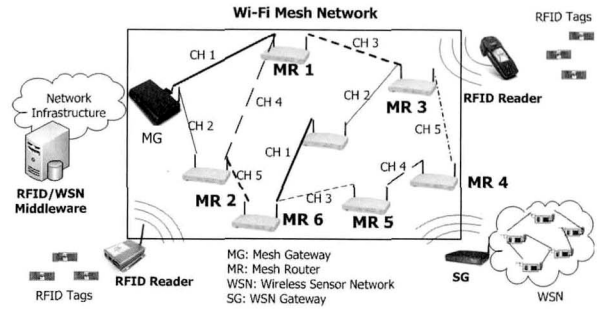


그림 1. RFID/WSN 시스템을 위한 Wi-Fi 메쉬 네트워크
Fig. 1. Wi-Fi mesh network for RFID/WSN systems

로 제시하였고, 수학적으로 이를 증명하였다. 논문 [9]에서는 극대 가중치 매칭(maximal weight matching) 기반의 분산 스케줄링 알고리즘이 무선 다중 홉 네트워크의 수율을 최대화할 수 있는 네트워크 토폴로지의 특징으로 로컬 풀링(Local Pooling) 조건을 도출하였다. 최근에 제안된 다수의 스케줄링 MAC 프로토콜들은 논문 [9]의 극대 가중치 알고리즘을 확장하여 무선 다중 홉 네트워크의 수율을 최대화하였다.

본 논문에서는 Wi-Fi 메쉬 네트워크를 위한 다중 채널 (Multi-Channel) 스케줄링 MAC (MCS-MAC) 프로토콜을 제시한다. 우선, 다중 채널 환경에서 이차적 간섭 조건을 만족하는 극대 가중치 매칭을 도출하기 위한 분산 다중 채널 링크 활성화 (Distributed Multi-Channel Link Activation: DMCLA) 알고리즘을 설계한다. DMCLA 알고리즘은 논문 [10]에서 제안한 DLA 알고리즘을 다중 채널 환경으로 확장한 알고리즘이다. 본 논문에서는 다중 채널 환경에서 채널 간 전환 시에 가중치를 계산하는 방법을 제시한다. Wi-Fi 메쉬 네트워크에서 DMCLA 알고리즘을 IEEE 802.11 표준 MAC 프로토콜 상에 효율적으로 오버레이(Overlay)하기 위한 파이프라인 (Pipeline) 방식의 프레임 구조를 설계한다. 각 채널에서의 프레임은 극대 가중치 매칭을 수행하는 제어 구간과 실제 데이터를 전달하는 프레임 전달 구간으로 나누어진다. 제안하는 프레임 구조는 다중 채널 환경에서 제어 구간을 파이프라인 화하여 효율적으로 프레임들을 전달할 수 있다. 마지막으로 논문 [10]에서 제시한 적응적 프레임 전달 구간 알고리즘을 다중 채널 환경으로 확장하여, 트래픽 부하에 상관없이 높은 수율과 낮은 지연 시간을 갖는 MCS-MAC 프로토콜을 설계한다. 다수의 Wi-Fi 메쉬 네트워크 토폴로지에서 수행한 시뮬레이션 결과를 통해 MCS-MAC 프로토콜이 기존에 알려진 Wi-Fi 메쉬 네트워크 MAC 프로토콜들에 비해 수율을 세 배 이상 향상할 수 있음을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선, Wi-Fi 메쉬 네트워크를 2 장에서 소개한다. 3 장에서는 다중 채널 환경에서 극대 가중치 매칭을 결정하는 DMCLA 알고리즘을 제시한다. 4 장에서는 다중 채널 환경에 적합한 프레임 구조를 제시하고, 적응적으로 프레임 전달 구간의 길이를 조절하는 MCS- MAC 프로토콜을 제시한다. 5장에서는 다양한 Wi-Fi 메쉬 네트워크 토폴로지에서 수행한 시뮬레이션 결과에 대해 토의하고, 6장에서 본 논문의 결론을 제시한다.

II. Wi-Fi 메쉬 네트워크

본 논문에서는 N 개의 메쉬 라우터와 L 개의 IEEE 802.11 무선 링크로 이루어진 Wi-Fi 메쉬 네트워크를 가정한다. IEEE 802.11 무선 링크는 IEEE 802.11 물리 계층 표준이 제공하는 C 개의 무선 채널들 중 하나를 사용하여 프레임을 전달한다. 예를 들어, 메쉬 라우터들 간의 무선 연결을 위해 5 GHz 대역에서 동작하는 IEEE 802.11a 기술을 사용하고 ($C = 12$), 메쉬 클라이언트와 메쉬 라우터 간의 무선 연결을 위해 2.4 GHz 대역에서 동작하는 IEEE 802.11b/g 기술을 사용함으로써 무선 네트워크 인프라를 제공할 수 있다^{[1]-[4]}.

일반적으로 IEEE 802.11 PHY/MAC 계층이 구현된 통신 인터페이스를 라디오(Radio)라고 정의한다. Wi-Fi 메쉬 네트워크의 두 메쉬 라우터 간에 프레임을 성공적으로 전달하기 위해서는 두 메쉬 라우터가 상호의 전송 영역 안에 위치해야 하고, 공통의 채널에서 동작하는 라디오를 가지고 있어야 한다. 본 논문에서는 모든 메쉬 라우터들이 무선 채널의 개수만큼의 라디오를 가지고 있다고 가정한다.

Wi-Fi 메쉬 네트워크에서 프레임 충돌을 방지하기 위해서는 송신 메쉬 라우터와 수신 메쉬 라우터에 인접한 모든 이웃 메쉬 라우터들의 프레임 전송이 제한되어야 한다. 이러한 이차적 간섭 조건으로 인해 동시에 프레임 전송이 가능한 무선 링크들은 서로 최소 두 홉(Hop) 이상 떨어져 있어야 한다. 그림 1에서는 다섯 개의 무선 채널을 사용하여 프레임 충돌 없이 통신 가능한 예를 보였다. 그림에서 동일한 무선 채널을 사용하는 링크들은 최소 두 홉 이상 떨어져 있는 것을 확인할 수 있다.

임의의 두 메쉬 라우터 간의 통신 연결을 플로우(Flow)라고 정의한다. 본 논문에서는 Wi-Fi 메쉬 네트워크의 플로우 개수를 F 로 나타낸다. 출발지 메쉬

라우터 s_f 와 목적지 메쉬 라우터 d_f 를 연결하는 플로우 $f = (s_f, d_f)$ 는 고정 최단 경로(Fixed Shortest Path) R_f 를 따라 프레임을 전달한다고 가정한다. 또한, 각각의 메쉬 라우터는 목적지 별로 큐(Queue)를 관리함을 가정한다. 본 논문에서는 $Q_{n,d}$ 를 메쉬 라우터 n 의 내부에 있는 목적지 메쉬 라우터 d 로 향하는 프레임들이 큐에 쌓여있는 개수를 나타낸다. 이를 기반으로 송신 메쉬 라우터 i 와 수신 메쉬 라우터 j 를 연결하는 무선 링크 $l = (i, j)$ 의 가중치 ω_l 를 다음과 같이 정의한다^{[8]-[10]}.

$$\omega_l = \max_{\forall d_f: l \in R_f} (Q_{i,d_f} - Q_{j,d_f}) \quad (1)$$

직관적으로 볼 때, (1)의 가중치 정의는 무선 링크의 송신 메쉬 라우터에 쌓여 있는 프레임의 수 Q_{i,d_f} 와 수신 메쉬 라우터에 쌓여 있는 프레임 수 Q_{j,d_f} 의 차이가 최대가 되는 플로우들에게 높은 가중치를 할당함을 알 수 있다.

위와 같은 가중치 정의로부터 무선 다중 홉 네트워크에서의 스케줄링 문제는 주어진 간섭 조건을 만족 하면서 가중치의 합을 극대화하는 무선 링크들의 부분 집합을 찾는 문제로 귀결된다^[9]. 논문 [11]에서는 CDMA 기술과 같이 일차적 간섭 조건(Primary Interference Constraint)을 만족하는 네트워크에서 분산적으로 극대 가중치 매칭을 구하는 알고리즘을 제시하였다. 그러나 Wi-Fi 메쉬 네트워크처럼 이차적 간섭 조건을 만족하는 경우에는 충돌 그래프(Conflict Graph)를 활용하여 극대 가중치 매칭을 구하는 방법이 널리 사용되고 있다^{[8],[12]}. 그러나, 충돌 그래프를 구성하기 위해서는 네트워크 토폴로지와 모든 링크의 가중치 정보를 알고 있어야 하기 때문에, 분산적으로 동작하는 Wi-Fi 메쉬 네트워크에서 이를 구현하는 것이 매우 어렵다. 따라서, 다음 장에서는 이차적 간섭 조건 하에서 2-홉(Hop) 이내의 링크 가중치 정보만을 공유하여 극대 가중치 매칭을 결정하는 새로운 분산 기반 알고리즘인 DMCLA 알고리즘을 제시한다.

III. DMCLA 알고리즘

본 장에서는 다중 채널 Wi-Fi 메쉬 네트워크에서 극대 가중치 매칭 문제를 해결하는 DMCLA 알고리즘을 제안한다. 3.1 절에서는 각각의 채널에서 동작하

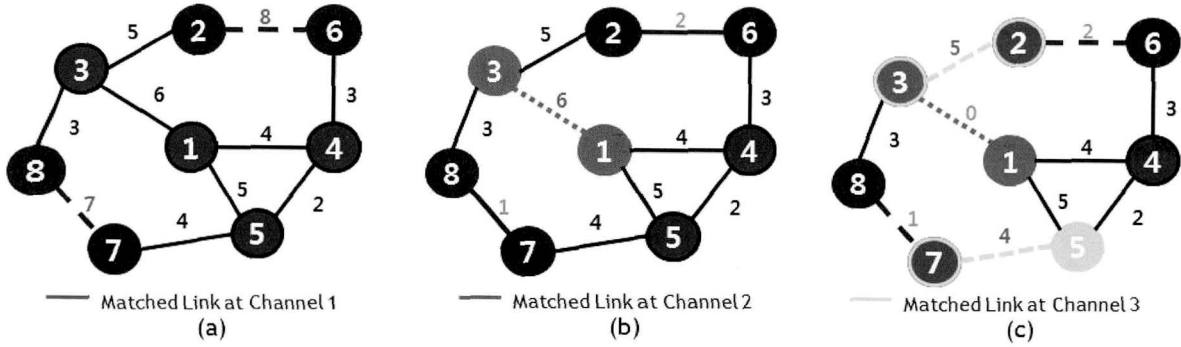


그림 2. DMCLA 알고리즘의 예($C=3, K=3$): (a) 채널 1의 매칭, (b) 채널 2의 매칭, (c) 채널 3의 매칭
 Fig. 2. Example of DMCLA algorithm ($C=3, K=3$): (a) matching in CH 1, (b) matching in CH2, and (c) matching in CH 3.

는 DLA 알고리즘의 기본 원리를 요약하고, 3.2 절에서는 DMCLA 알고리즘에서 채널 간 전환 시에 필요한 가중치 계산 방법을 제시한다.

3.1 DLA 알고리즘 [10]

DLC 알고리즘의 주요 아이디어는 이차적 간섭 조건 하에서 무선 링크 l 이 두 홉 이내에서 최대의 가중치를 가지면, 링크 l 과 연결된 두 메쉬 라우터들은 자율적으로 해당 링크를 매칭에 포함시킬 수 있다는 점이다. DLA 알고리즘은 무선 채널의 방송(Broadcasting) 특징을 활용하여 인접한 메쉬 라우터들 간의 메시지 교환만을 통해 최대 가중치 매칭을 결정한다. 구체적으로 DLA 알고리즘은 다음의 세 단계를 걸쳐 최대 가중치 매칭을 결정한다.

1) **가중치 공유**: 각각의 메쉬 라우터는 직접 연결된 링크들의 가중치 값을 계산하기 위해서, 각각의 목적지 별 큐에 쌓여 있는 프레임의 개수를 모든 인접한 메쉬 라우터들에게 방송하여 공유한다. 그 후, 수식 (1)을 활용하여 직접 연결된 링크들의 가중치 정보를 계산하고, 이를 다시 한 번 모든 인접한 메쉬 라우터들과 공유한다. 이를 통해, 각각의 메쉬 라우터들은 두 홉 이내에 존재하는 모든 링크들의 가중치 정보를 공유하게 된다.

2) **3 단계 링크 매칭**: 가중치 공유 단계를 거치게 되면 모든 메쉬 라우터들이 두 홉 이내의 최대 가중치 링크를 결정할 수 있게 되므로, 최대 가중치 링크와 연결된 메쉬 라우터들은 Probe/Grant/ Accept 메시지를 교환하여 해당 링크를 매칭에 포함시킨다.

3) **간섭 링크들의 비활성화**: 3 단계 링크 활성화에서 Probe/Grant/Accept 메시지를 엿듣는 (Overhearing) 메쉬 라우터들은 불필요한 간섭을 미연에 방지하기 위해서 자신들이 매칭에 참여할 수 없음을 인접한 메쉬 라우터들에게 알려야한다. 이를 위해 Idle 메시지

를 방송하여 직접 연결된 모든 링크들을 비활성화한다.

위의 절차는 두 홉 이내에 있는 최대 가중치 링크들을 매칭에 포함시킬 수 있으나, 이것이 항상 최대 가중치 매칭이 되는 것은 아니다[10]. 이를 해결하기 위해 위의 절차를 m 번 반복적으로 수행하여 최대 가중치 매칭을 찾을 수 있도록 한다.

3.2 DMCLA 알고리즘

3.1 절에서 설명한 DLA 알고리즘은 단일 채널에서 이차적 간섭 조건을 만족하는 최대 가중치 매칭을 구하는 알고리즘이다. 그림 2 (a)는 단일 채널의 매칭 결과를 보여준다. 그림에서 매칭에 포함된 링크를 제외한 모든 링크는 간섭을 피하기 위하여 비활성화되어 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 단일 채널을 사용할 경우, Wi-Fi 메쉬 네트워크 전체 수율이 낮아지는 경향을 확인할 수 있다.

본 절에서는 IEEE 802.11 표준에서 제시하는 다수의 무선 채널들을 효과적으로 활용하기 위해 다중 채널 Wi-Fi 메쉬 네트워크 환경에서 최대 가중치 매칭을 결정하는 DMCLA 알고리즘을 제시한다.

DMCLA 알고리즘에서는 특정 채널에서 최대 가중치 링크들을 매칭에 포함시키면 해당 채널들의 가중치를 적절하게 차감해야 한다. 만약, 링크 l 을 활성화하여 K 개의 프레임을 전달할 경우, 링크 l 의 가중치는 수식 (1)에 의해 $2K$ 만큼 감소시켜야 한다. 그러나, 채널 전환 시에 모든 물리적 간섭은 소멸하게 되므로 그림 2 (b)에서와 같이 채널 1에서 활성화된 링크들만 가중치를 차감하고 DLA 알고리즘을 적용하면 메쉬 라우터 1과 3 사이의 링크를 활성화시킬 수 있다. 이를 다시 반복하면 그림 2 (c)에서 보인 바와 같이 추가적으로 두 개의 링크를 더 활성화시켜 5 개의 링크를 동시에 사용하여 프레임을 전달할 수 있다.

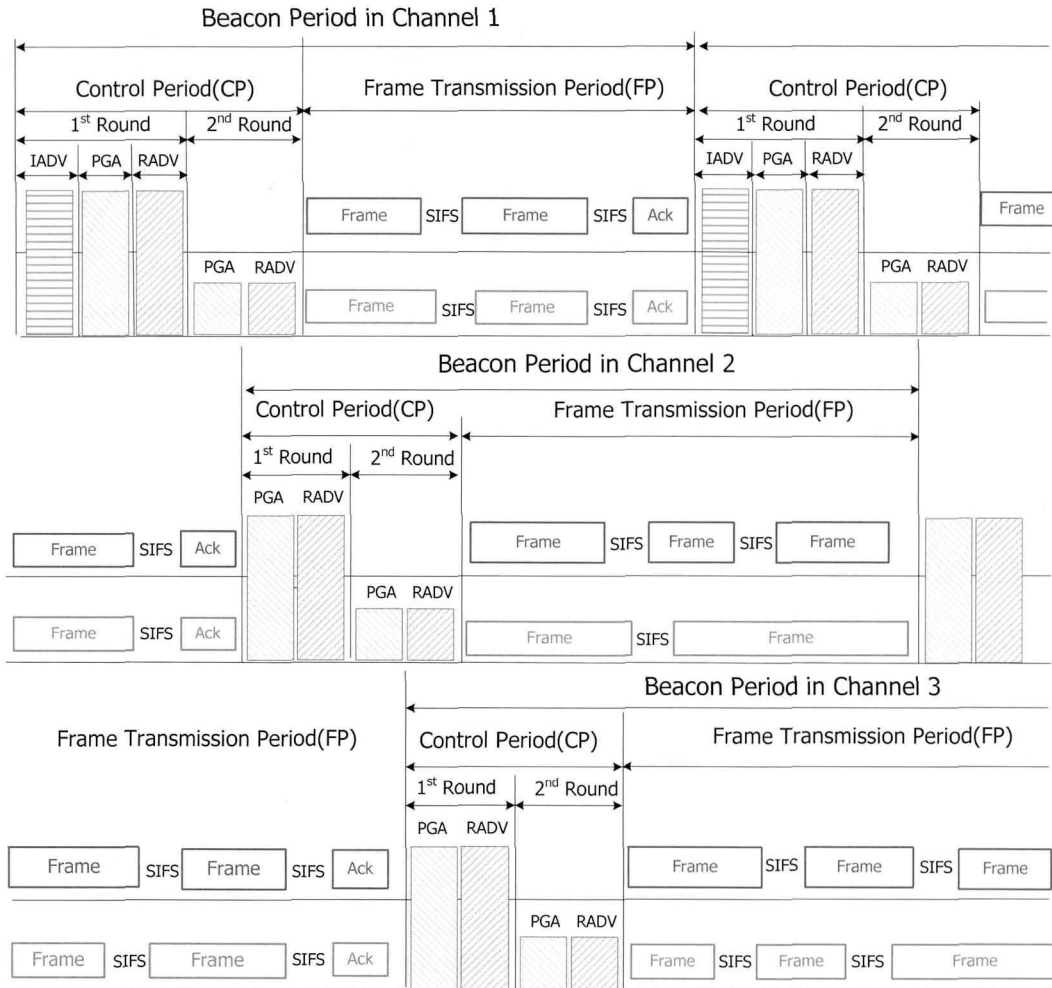


그림 3. MCS-MAC 프로토콜 프레임 구조 ($C=3, m=2$)
 Fig. 3. Frame architecture of MCS-MAC protocol ($C=3, m=2$)

본 절에서는 다중 채널 환경에서 극대 가중치 매칭을 구하는 DMCLA 알고리즘을 제시하였다. 그러나, DMCLA 알고리즘을 Wi-Fi 메쉬 네트워크에 적용하기 위해서는 DMCLA 알고리즘의 제어 메시지들을 IEEE 802.11 PHY/MAC 프로토콜에 오버레이시킬 수 있어야 한다. 다음 장에서는 DMCLA 알고리즘을 IEEE 802.11 PHY/MAC 프로토콜에 오버레이하기 위한 설계 방법을 제시한다.

IV. MCS-MAC 프로토콜

그림 3에서는 MCS-MAC 프로토콜의 프레임 구조를 도시하였다. 그림에서 각 채널은 연속되는 비컨(Beacon) 구간으로 구성된다. 비컨 구간은 IEEE 802.11s 저전력 모드(Power Save Mode)를 확장하여 설계한다[1][2]. 각각의 비컨 구간은 제어 구간(Control Period)과 프레임 전달 구간(Frame

Transmission Period)으로 나누어진다. 제어 구간에서 모든 메쉬 라우터들이 DMCLA 알고리즘을 통해 극대 가중치 매칭을 결정하고, 이를 기반으로 극대 가중치 매칭에 포함된 메쉬 라우터들만이 프레임 전달 구간에 프레임을 전송하고, 나머지 메쉬 라우터들은 대기 모드로 전환한다.

4.1 제어 구간

3 장에서 설명한 바와 같이 DMCLA 알고리즘은 가중치 공유, 링크 매칭, 그리고 간섭 링크의 비활성화라는 단계들을 걸쳐 극대 가중치 매칭을 결정한다. 각 단계에서 교환하는 제어 메시지들은 별도의 IEEE 802.11 MAC 프레임을 정의하거나, 데이터 프레임의 페이로드(Payload)에 포함시켜 설계할 수 있다. 본 절에서는 제어 구간에서 각 단계들을 설계하는 방법에 대하여 설명한다.

그림 3의 제어구간에서 극대 가중치 매칭은 채널 1

에서부터 순차적으로 진행된다. 채널 1의 IADV 구간은 가중치 공유를 위한 메시지들을 IEEE 802.11 표준 MAC 프로토콜을 사용하여 방송하는 구간이다. IADV 구간 내에서 모든 메쉬 라우터들은 큐에 있는 프레임의 개수와 링크의 가중치 정보를 방송한다. IEEE 802.11 표준 MAC 프로토콜에서는 방송 메시지에 대하여 확인(Acknowledgement) 프레임을 전송하지 않도록 정의한다^{[11][13]}. 그러나, DMCLA 알고리즘에서 방송 메시지의 성공적인 전달은 극대 가중치 매칭을 구하는데 필수적이므로 모든 방송 메시지에 대하여 확인 프레임을 전달하도록 수정하였다[10].

IADV 구간 이후에 이어지는 PGA 구간은 3단계 링크 매칭을 통해 극대 가중치 매칭을 결정하는 구간이다. 이 구간에서 교환되는 Probe/Grant/Accept 메시지는 점대점(Point-to-Point) 메시지로 특정 이웃메쉬 라우터에 전달한다.

PGA 구간에서 무선 채널의 방송 특징으로 해당 메시지를 엿듣는 모든 인접한 메쉬 라우터들은 간섭을 방지하기 위하여 직접 연결된 모든 링크들을 비활성화시켜야 한다. RADV 구간에서 메쉬 라우터들은 Idle 메시지를 IEEE 802.11 MAC 프로토콜을 사용하여 방송함으로써, 직접 연결된 간접 링크를 비활성화시킨다.

앞에서 언급한 것처럼, 극대 가중치 매칭을 구하기 위해서는 위의 절차를 반복해서 수행해야 한다. 그림 3에서는 $m=2$ 인 경우의 프레임 구조를 보여준다. 이때, 두 번째 절차의 PGA 구간이 지나면 채널 1의 극대 가중치 매칭이 결정된다. 이 때, 다음 채널(채널 2)의 극대 가중치 매칭을 진행하여 파이프라인 방식으로 프레임을 전달함으로써 수율을 최적화할 수 있다. 예를 들어, 그림 3에서 채널 1이 제어 구간에서 극대 가중치 매칭을 결정하고 있는 동안에 채널 2와 3은 이전에 결정된 극대 가중치 매칭을 기반으로 프레임을 계속 전달함으로써 수율을 향상한다.

또한, 채널 간 전환시에 현 채널에서 매칭에 포함된 링크들은 3.2 절에 따라 $2K$ 만큼 가중치를 조정하고 나머지 링크들에 대해서는 현재의 가중치를 그대로 유지하면, 가중치를 공유하기 위한 IADV 구간을 생략할 수 있다. 빈번한 방송 메시지 전송으로 인해 제어 구간 내에서 가장 큰 시간을 점유하는 IADV 구간을 생략함으로써, Wi-Fi 메쉬 네트워크의 수율을 더욱 향상시킬 수 있다.

4.2 프레임 전달 구간

제어 구간에서 프레임 충돌이 없는 링크들을 결정

하면 프레임 전달 구간에서는 이들 링크 상에 프레임을 실제로 전달하는 역할을 담당한다. 그림 3은 MCS-MAC 프로토콜의 프레임 전달 구간에 IEEE 802.11n의 프레임 결합(Frame Aggregation) 방식을 적용하여 수율을 최대화한 예를 보여준다[13]. 그림에서 각각의 PHY 프레임들은 SIFS 간격으로 전송한다. 마지막 프레임 전달 후 SIFS 시간이 흐르면 지연 확인(Delayed Ack) 프레임을 통해 프레임 전달의 성공 여부에 관한 피드백을 제공한다.

제어 구간의 길이가 고정되어 있기 때문에 MCS-MAC 프로토콜의 최대 수율을 결정하는 가장 중요한 파라미터는 프레임 전달 구간의 길이이다. 만일, 프레임 전달 구간의 길이가 너무 작은 경우에는 제어 구간의 상대적 오버헤드가 매우 커지므로 MCS-MAC 프로토콜의 수율이 낮아진다. 반면, 프레임 전달 구간의 길이가 매우 큰 경우 일부 프레임 전달 구간동안 프레임 전송이 일어나지 않게 되어 불필요한 프레임 전달 지연 시간이 증가하게 된다. 따라서, 외부 트래픽 부하에 따라 적응적으로 프레임 전달 구간의 길이를 조절하는 알고리즘이 필요하다.

논문 [10]에서는 단일 채널 환경에서 적응적 프레임 전달 구간 길이 결정 알고리즘을 제시하였다. 이 알고리즘의 주요 아이디어는 Wi-Fi 메쉬 네트워크의 평균 링크 사용률을 일정 수준으로 유지하도록 하는데 있다. 그런데, 다중 채널 환경에서는 채널 1과 나머지 채널들의 제어 구간이 다르기 때문에 논문 [10]의 알고리즘을 적용하는데 어려움이 있다. 본 논문에서는 이 문제를 해결하기 위해 [14]의 분할상환비용(Amortized Cost) 개념을 도입한다. 즉, 채널 1에서는 두 홉 이내에 있는 모든 링크들의 가중치 값을 공유를 위해 IADV 구간만큼의 추가적인 비용이 발생하지만 나머지 채널에서는 이미 공유된 가중치 정보를 재사용할 수 있으므로, 결과적으로 IADV 구간의 분할상환비용이 $1/C$ 만큼 줄어들게 되는 것이다. 본 논문에서는 분할상환비용을 기반으로 제어 구간의 오버헤드를 구하고, 이를 논문 [10]에서 제시한 알고리즘을 적용하여 적응적인 프레임 전달 구간의 길이를 최종적으로 결정한다.

V. 시뮬레이션 결과 및 토의

본 장에서는 다양한 Wi-Fi 메쉬 네트워크 토폴로지 에서 이벤트 기반 시뮬레이션을 수행하고, 그 결과를 분석하여 MCS-MAC 프로토콜의 성능을 검증해보기로 한다. $400\text{ m} \times 400\text{ m}$ 의 정사각형 영역에 전송 거리

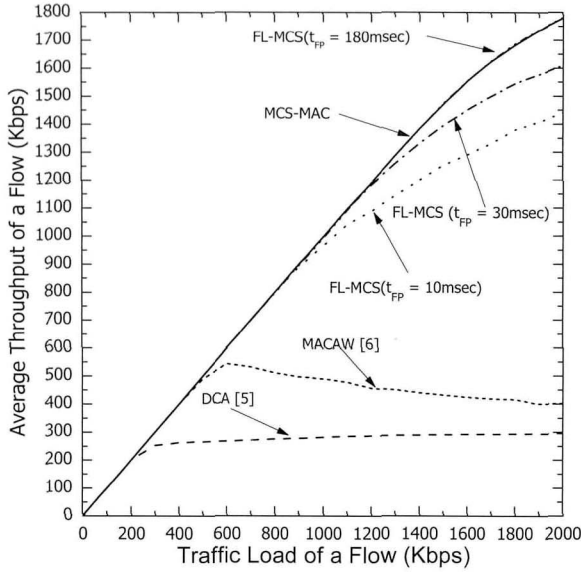


그림 4. 플로우(Flow)의 평균 수율
Fig. 4. Average throughput of flows

가 180 m인 메쉬 라우터 30 개를 임의의 위치에 배치한 Wi-Fi 메쉬 네트워크 토폴리지를 20 개를 시뮬레이션을 위해 생성한다. 각각의 토폴리지에서 임의의 출발지와 목적지 쌍을 가지는 플로우 50 개를 선정하여 외부 트래픽을 인가한다. 각각의 플로우에서 생성하는 프레임의 길이는 시카고 Equinix 데이터 센터에서 실제 측정된 IP 패킷 길이를 기반으로 생성하였다 [15].

본 논문에서는 IEEE 802.11a 표준 기반의 Wi-Fi 메쉬 네트워크를 고려한다. IEEE 802.11a 표준에서 사용 가능한 12개의 채널 중 실외용 채널의 개수가 4 개이므로 $C=4$ 로 설정한다. Wi-Fi 메쉬 네트워크 시뮬레이션에서 물리/MAC 계층 파라미터들은 IEEE 802.11a 표준을 따라 결정하였다[4]. 또한, DMCLA 알고리즘에서 절차 반복 회수 m 을 4로 설정하였다. 프레임 구조에서 IADV, PGA, RADV 구간의 길이는 각각 21 msec, 0.11 msec, 2.5 msec이다. 적응적 프레임 임 구간 길이 알고리즘에서 일정하게 유지하는 평균 링크 사용률은 0.45이다.

본 논문에서는 MCS-MAC 프로토콜의 성능 비교를 위해 Wi-Fi 네트워크의 동적 MAC 프로토콜들인 DCA(Dynamic Channel Assignment)[5] 프로토콜과 다중 채널 MACAW[6] 프로토콜도 함께 시뮬레이션하였다. 또한, 적응적 프레임 전달 구간 길이 알고리즘의 성능 비교를 위해 프레임 전달 구간 길이(t_{FP})가 일정한 Fixed-Length MCS (FL-MCS) MAC 프로토콜을 함께 시뮬레이션하였다. 모든 시뮬레이션 결과는

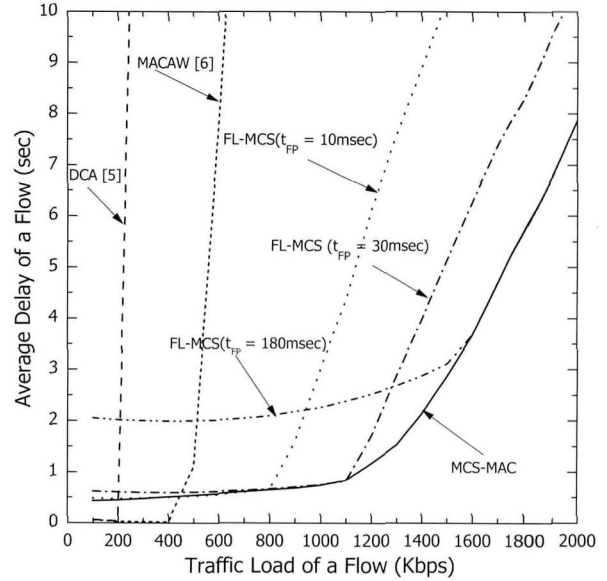


그림 5. 플로우(Flow)의 평균 지연 시간
Fig. 5. Average latency of flows

20 개의 Wi-Fi 메쉬 네트워크에서 수행한 시뮬레이션을 통해 얻은 값들의 평균으로 도시한다.

그림 4에서는 각 플로우들의 평균 수율을 트래픽 부하에 따라 도시하였다. 그림에서 DCA 프로토콜의 수율이 가장 빠르게 정체되는 것을 알 수 있고, 그 다음으로 다중 채널 MACAW 프로토콜의 수율이 정체를 확인할 수 있다. 기존의 동적 MAC 프로토콜에 비해 MCS-MAC 프로토콜은 항상 높은 수율을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 FL-MCS 프로토콜은 프레임 전달 구간의 길이가 증가함에 따라 플로우의 평균 수율이 증가함을 볼 수 있다. 마지막으로, MCS-MAC 프로토콜이 $t_{FP} = 180\text{msec}$ 인 FL-MCS 프로토콜과 더불어 최대의 수율을 얻을 수 있음을 보였다. 특히, 기존의 동적 MAC 프로토콜과 비교할 때 최대 수율을 세 배 이상 증가할 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 5에서는 각 플로우들의 평균 지연 시간을 트래픽 부하에 따라 도시하였다. 그림에서 트래픽 부하가 낮은 경우 ($< 300\text{Kbps}$)에는 기존의 동적 MAC 프로토콜들이 보다 나은 지연 시간 성능을 보인다. 그러나, 이들 프로토콜은 수율이 증가함에 따라 지연 시간이 급격하게 증가하여 확장성(Scalability)이 부족한 단점이 있다. 반면, FL-MCS 프로토콜은 프레임 전달 구간의 길이가 증가함에 따라 낮은 부하에서의 지연 시간은 상대적으로 증가하지만, 보다 큰 트래픽 부하에 더욱 잘 적응하는 것을 볼 수 있다. 마지막으로, MCS-MAC 프로토콜은 모든 트래픽 부하에 대하여 FL-MCS 프로토콜보다 낮은 지연시간 성능을 나타냄

을 확인할 수 있다. 그림 4와 5의 결과를 종합해볼 때, MCS-MAC 프로토콜이 RFID/WSN 시스템에서 생성한 태그 및 센싱 정보를 RFID/WSN 미들웨어로 전달하는 Wi-Fi 메쉬 네트워크의 성능을 최적화할 수 있는 MAC 프로토콜임을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 RFID/WSN 시스템에서 정보 전달을 위한 안정적이고 비용 효율적인 네트워크 인프라로 널리 사용되는 Wi-Fi 메쉬 네트워크를 위한 MCS-MAC 프로토콜을 설계하였다. 다중 채널 환경에서 분산적으로 극대 가중치 매칭을 결정하는 DMCLA 알고리즘을 개발하였고, 이를 IEEE 802.11 표준 MAC 프로토콜에 오버레이하는 파이프라인 기반의 프레임 구조를 제시하였다. 또한, 분할상환비용 개념을 기반으로 트래픽 부하에 적응적으로 대응하는 프레임 전달 구간 길이 알고리즘을 제시하였다. 다양한 Wi-Fi 메쉬 네트워크의 토폴로지에 대하여 수행한 시뮬레이션 결과를 통해, 향후 대규모의 RFID/WSN 시스템의 정보 전달을 지원하기 위한 Wi-Fi 메쉬 네트워크의 MAC 프로토콜로 MCS-MAC 프로토콜이 가장 적합함을 보였다. 향후, MCS-MAC 프로토콜을 확장하여 IEEE 802.11 PHY의 다중 전송을 환경에 적용하기 위한 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

[1] I. F. Akyildiz and X. Wang, *Wireless Mesh Networks*, John-Wiley & Sons 2009.
 [2] Y. Zhang, J. Luo, H. Hu, *Wireless Mesh Networking*, Auerbach Publications, 2007.
 [3] IEEE 802.11 Working Group, "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications," 1997.
 [4] IEEE 802.11 Working Group, "IEEE 802.11a- 1999 high speed physical layer in the 5 GHz band," 1999.
 [5] S.-L. Wu, C.-Y. Lin, Y.-C. Tseng and J.-P. Sheu, "A new multi-channel MAC protocol with on-demand channel assignment for multi-hop mobile ad hoc networks," in *I-SPAN* 2000.
 [6] V. Bharghavan, A. Demers, S. Shenker and L. Zhang, "MACAW: A media access protocol for wireless LANs," in *ACM SIGCOMM'94*,

London, UK, 1994.
 [7] J. So and N. Vaidya, "Multi-channel MAC for ad hoc networks: handling multi-channel hidden terminal using a single transceiver", in *ACM MobiHoc'04*, pp. 222-233, 2004.
 [8] L. Tassiulas and A. Ephremides, "Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio networks," *IEEE Trans. Automat. Cont.*, vol. 37, no. 12, pp. 1936-1948, Dec. 1992.
 [9] A. Brzezinski, G. Zussman, and E. Modiano, "Distributed throughput maximization in wireless mesh networks via pre-partitioning," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 16, no. 6, pp. 1406-1419, Dec. 2008.
 [10] Jae-Young Yang, Ledan Wu, Yafeng Zhou, and Han-You Jeong, "A Distributed Throughput-Maximal Scheduling MAC Protocol in Wi-Fi Mesh Networks," *ICTC'11*, Seoul, 2011.
 [11] J.-H. Hoepman, "Simple distributed weighted matching," Oct. 2004, eprint cs.DC/0410047
 [12] K. Jain, J. Padhye, V. N. Padmanabhan, and L. Qiu, "Impact of interference on multi-hop wireless network performance," *ACM Mobicom'03*, 2003.
 [13] Y. Xiao, "IEEE 802.11n: Enhancements for higher throughput in wireless LANs," *IEEE Wireless Comm.*, pp. 82-91, Dec. 2005.
 [14] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, and R. L. Rivest, *Introduction to Algorithms*, The MIT Press, 1996.
 [15] CAIDA, "Packet size distribution between Internet links in 1998 and 2008," online available: http://www.caida.org/research/traffic-analysis/pkt_size_distribution/graphs.xml

무 약 단 (Ledan Wu)



준회원

2010년 2월, 부산대학교 정보
컴퓨터공학과 학사
2010년 3월~현재, 부산대학교
물류IT학과 석사과정
<관심분야> 무선 메쉬 네트워
크

양 재 영 (Jae-Young Yang)

준회원



2009년 2월, 부산외국어대학교 컴퓨터공학과 학사
2011년 2월, 부산대학교 물류 IT학과 석사
2011년 3월~현재, (주)홈플러스 정보서비스&OM본부
<관심분야> 무선 메쉬 네트워크, 자동차 네트워크, 테

이터베이스

주 아 봉 (Yafeng Zhou)

정회원



2004년 7월 중국 Si Chuan Univeristy 컴퓨터공학과 학사
2007년 7월 중국 Chong Qing University 컴퓨터공학과 석사
2007년 9월~현재 부산대학교

정보컴퓨터공학과 박사과정

<관심분야> 무선 메쉬 네트워크

정 한 유 (Han-You Jeong)

중신회원



1998년 2월 서울대학교 전기공학부
2000년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
2005년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
2005년 3월~2007년 7월 삼성전자 정보통신총괄 책임

연구원

2008년 1월~8월, 미네소타대학교 박사후연구원

2008년 9월~현재, 부산대학교 차세대물류IT기술연구사업단 조교수

<관심분야> 자동차 네트워크, 무선 메쉬 네트워크, 광통신망