

# IEEE 802.11 무선랜에서 캡처 효과를 고려한 Fair MAC 알고리즘

## (A Fair MAC Algorithm under Capture Effect in IEEE 802.11 DCF-based WLANs)

정지웅<sup>\*</sup>      최선웅<sup>\*\*</sup>      김중권<sup>\*\*\*</sup>  
(Jiwoong Jeong)      (Sunwoong Choi)      (Chong-kwon Kim)

**요약** 802.11 무선랜의 편리함으로 인해 무선랜의 광범위한 보급은 WiFi가 오늘날 인터넷 접근 기술에서 없어서는 안 될 부분이 되었다. 인터넷 접근 망의 연구는 단대단 성능에 지대한 영향을 미치는 중요한 역할을 함에도 불구하고 과거 연구는 캡처 효과(capture effect)로 기인한 오작동에 대한 충분한 고려 없이 MAC 프로토콜의 성능향상, 분석, 또는 시뮬레이션 평가를 수행해 왔다. 또한, 캡처 효과는 무선 환경에서 빈번하게 발생하고 있으며 노드 간에 불평등을 초래하는 것으로 알려져 왔다. 그래서, 우리는 그러한 불평등한 환경 하에서 형평성(fairness)을 제공할 수 있는 Fair MAC 알고리즘을 제안한다. 또한, 노드 간에 형평성을 유지함과 동시에 시스템 전체 처리율(throughput)을 최대화되도록 한다. 시뮬레이션 결과는 제안된 Fair MAC 알고리즘이 처리율 감소 없이 형평성을 달성하는 것을 보여 준다.

키워드 : Capture 효과, 802.11, 무선랜, 형평성, DCF

**Abstract** Widespread deployment of infrastructure WLANs has made Wi-Fi an integral part of today's Internet access technology. Despite its crucial role in affecting end-to-end performance, past research has focused on MAC protocol enhancement, analysis, and simulation-based performance evaluation without sufficiently considering a misbehavior stemming from capture effect. It is well known that the capture effect occurs frequently in wireless environment and incurs throughput unfairness between nodes. In this paper, we propose a novel Fair MAC algorithm which achieves fairness even under physically unfair environment. While satisfying the fairness, the proposed algorithm maximizes the system throughput. Extensive simulation results show that the proposed Fair MAC algorithm substantially improves fairness without throughput reduction.

Key words : Capture effect, 802.11, Wireless LANs, Fairness, DCF

### 1. 서론

IEEE 802.11[1,2]은 오늘날 무선랜의 표준으로 가장 널리 사용되고 있다. IEEE 802.11 MAC은 경쟁 기반의 DCF(Distributed Coordination Function)와 풀링 기반의 채널 접속 방식인 PCF(point coordination function)으로 이루어져 있다. 대부분의 무선랜 장치들은 데이터를 전송할 때 단순성과 효율성 때문에 단지 DCF 만을 채택하고 있다.

무선랜 환경에서 둘 이상의 전송이 동시에 발생했을지라도 수신 신호의 세기에 따라, 즉, SINR (Signal to Interference and Noise Ratio)의 차이에 따라 가장 센 파워의 신호는 수신된다는 것은 익히 알려진 사실이다 [3-5]. 이러한 현상을 캡처 효과라고 한다. 실제 시스템 상에서 캡처 효과의 빈번한 발생은 처리율 성능에 많은

\* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원 사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2010-(C1090-1011-0004)

<sup>\*</sup> 학생회원 : 서울대학교 컴퓨터공학부  
jwjeong@popeye.snu.ac.kr

<sup>\*\*</sup> 종신회원 : 국민대학교 전자공학부 교수  
schoi@kookmin.ac.kr

<sup>\*\*\*</sup> 종신회원 : 서울대학교 컴퓨터공학부 교수  
ckim@popeye.snu.ac.kr

논문접수 : 2009년 12월 8일

심사완료 : 2010년 6월 27일

Copyright©2010 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 받고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 정보통신 제37권 제5호(2010.10)

이득을 줄 수 있다. 본래 캡처 효과는 둘 이상의 프레임이 전송된 상황에서 발생한다. 이때, 다른 신호에 비해 강하게 수신된 프레임을 수신 가능하게 함으로써 충돌로 인한 피해를 완화시키는 효과를 보여준다. 또한, 다중 홉 네트워크에서는 병렬적인 전송을 가능하게 함으로써 공간적 재사용성(spatial reuse)을 높이게 되는 효과를 보여줌으로써 네트워크 성능을 향상시킬 수 있게 한다.

무선랜 환경에서 DCF를 사용했을 때 캡처 효과의 발생은 노드들 간에 불평등(unfairness) 현상을 유발할 수 있다. 그림 1은 노드 A와 B는 송신자이고 C는 수신자인 캡처 효과가 발생하는 망구조를 보여준다. 노드 A와 C의 거리는 1m이고 노드 B와 C의 거리는 4m이다. 이러한 경우에 A와 B가 동시에 전송을 시도하였을 때 C에서는 A에서 전송된 신호를 상대적으로 강하게 느낄 것이고, 수신 가능하게 된다. 다시 말해서, 노드 A가 전송한 프레임은 캡처 된다. 따라서, A가 전송한 모든 프레임은 노드 C에서 성공적으로 수신될 것이고, 노드 A의 CW(Contention Window) 크기는 CW의 초기값( $CW_{min}$ )으로 설정 될 것이다. 노드 B의 프레임은 충돌을 경험하게 되기 때문에 노드 B는 BEB(Binary Exponential Backoff)를 수행하게 되고 노드 B의 CW 크기는 증가하게 된다. 결국, 다음 채널 접근 시에도 노드 A보다 더 큰 CW에서 랜덤 백오프를 수행하게 되므로 A와 B간에 채널 접근함에 있어서 더욱 불평등함을 초래하게 된다.

본 논문에서는 무선랜 환경에서 발생하는 캡처 효과에 의한 노드들 간의 불평등 문제를 해결하는 동시에 캡처 효과로 인해서 전체 처리율이 향상될 수 있다는 점을 충분히 활용하는 알고리즘을 제안한다. 문제를 해결하기 위해 제어 이론 기반 알고리즘을 제시한다. 제어 이론을 활용하여 캡처 효과가 방해(disturbance) 요소로 작용하는 시스템을 원하는 목표 참조(target reference) 값으로 제어한다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 크게 세 단계로 나누어 볼 수 있다. 먼저, 우리는 노드들 간에 형평성을 달성할 수 있는 제어 참조(control reference)

를 발견한다. 다음으로 결정된 제어 참조를 이용해서 캡처 효과가 발생했을 때 효과적으로 대응할 수 있는 알고리즘을 개발한다. 제어이론을 바탕으로 피드백된 정보를 활용한 Fair MAC 알고리즘을 디자인한다. 마지막으로 캡처 효과로 인한 네트워크 전체 성능 향상을 달성하기 위해서 제안된 알고리즘의 최적화된 목표 참조 값을 유도한다. 한편, 제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위해서 ns-2 시뮬레이션을 이용해서 형평성과 처리율 측면에서 좋은 성능을 나타냄을 검증한다.

본 논문의 구조는 다음과 같다. 1장의 서론에 이어 2장에서는 관련 연구를 설명하고 3장에서는 캡처 효과로 인한 불평등 문제를 설명한다. 4장에서는 Fair MAC 알고리즘을 제안한다. 5장에서는 제안된 MAC의 성능을 평가하고, 마지막으로 6장에서 결론을 도출한다.

## 2. 관련 연구

논문 [6]에서는 802.11a와 802.11b에서 각각의 전송 데이터율(data rate)에 따른 SINR 임계값을 제공한다. SINR 값은 캡처 효과가 일어나는데 있어서 중요한 기준을 제공한다. 즉, 강한 신호(strong signal)와 약한 신호(weak signal), 노이즈, 그밖에 간섭들의 합이 비가 해당 SINR 임계값보다 커야 캡처 효과가 일어나고 수신자에서 정상적으로 프레임을 디코딩(decoding) 할 수 있다. 논문 [3]에서는 실제 802.11 무선랜에서 캡처 효과가 빈번하게 일어나고 있으며 실제 약한 신호가 강한 신호보다 특정 시간 내에서 먼저 수신되더라도 정상적으로 캡처 효과가 일어남을 보여준다. 또한, 각각의 약한 신호와 강한 신호에 따라 노드들 간에 불평등한 성능을 나타낼 수 있음을 보여준다. [7]에서는 실제 네트워크 장비에서 상당한 시간차이로 두 신호가 오더라도 물리 계층(PHY)에서 프레임 캡처가 일어났음을 알리는 표시(indication)를 PLME(Physical Layer Management Entity)로 보냄으로써 정상적으로 프레임을 수신할 수 있는 방법을 제안한다.

802.11 무선랜에서 많은 MAC 관련 연구들이 진행되어 왔다. 특히, [8]과 [9] 논문은 이어진 후속 연구에 많은 영향을 주었다. Bianchi는 802.11 MAC의 BEB 행동을 관찰하여 마코브 체인으로 성능을 분석하였고, 노드의 개수가 주어졌을 때 최적화된 CW 값을 제시하였다. Cali는 시스템 전체 행동을 관찰하여 p-지속(persistent) CSMA에 근거한 MAC 프로토콜을 제안하였고, 제안한 MAC이 최적화된 성능을 낼 수 있는 전송 확률  $p$ 를 구하였다. [10]에서는 Bianchi 모델을 확장하여 가중치 형평성(weighted fair)을 제공하는 방법을 제안하였다. Yang [11]은 유틸리티 함수(utility function)에 근거한 MAC 알고리즘을 제안하였다. 하지만, GCA

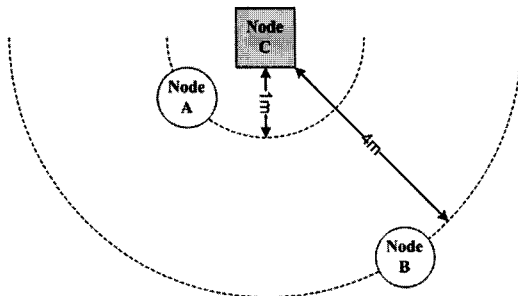


그림 1 캡처 효과 발생 예

는 유틸리티 함수의 입력 값이 되는 각각의 클래스에 속한 노드의 개수를 알아야만 한다. [12]에서 Idle sense 라는 알고리즘이 제안되었다. Idle sense는 측정된 연속된 아이들(idle) 시간의 길이에 따라서 적절한 아이들 값이 되도록 AIMD 방식을 이용하여 CW 값을 조절한다. 하지만, Idle sense는 모든 노드들이 서로 다른 채널 환경에 있음에도 동일한 아이들 시간의 길이를 관찰하기 때문에 노드 간에 채널 환경에 의한 불평등 현상이 발생할 수 있다. MFS[13]는 플루이드 모델을 이용하여 직접적으로 CW값을 조절하지 않고 링크 계층 큐로부터 디큐되는 데이터 율을 조절하는 방법을 채택했다. Hu[14]는 MCC라는 MAC 알고리즘을 제안하였다. MCC 역시 디큐잉 율을 조절하는 방법을 채택하였고 비율적인 형평성(proportional fair)을 제공할 수 있는 방법을 제안하였다.

논문 [4]의 저자들은 EDCA 파라미터[2]들을 (즉, TXOPlimit, AIFS) 이용하여 캡처 효과 문제 해결을 시도하였다. 하지만, 단순한 파라미터 조합을 통하여 문제 해결을 시도하였고, 적응적이고 효율적인 알고리즘 개발은 향후 과제로 남겼다. 본 논문에서는 캡처 효과가 발생하는 환경에서 적응적이고 효율적인 알고리즘을 제안한다.

### 3. 캡처 효과로 인한 불평등

실제로 802.11 무선랜에서 캡처 효과는 시스템 전체 성능을 향상시키는 긍정적인 특성이 있는 반면에 각각의 노드들 간에 처리율 성능 상에 심각한 불평등을 초래할 수 있는 부정적 특성을 갖는다. 그림 2는 AP로부터 각각 1m, 4m 거리에 노드 4개씩을 배치한 후 300초 동안 실행한 ns 시뮬레이션 결과이다. 그림 2에서 AP로부터 1m 거리에는 노드 1, 2, 3과 4(클래스 1)를 배치하였고, 4m 떨어진 거리에는 노드 5, 6, 7과 8(클래스

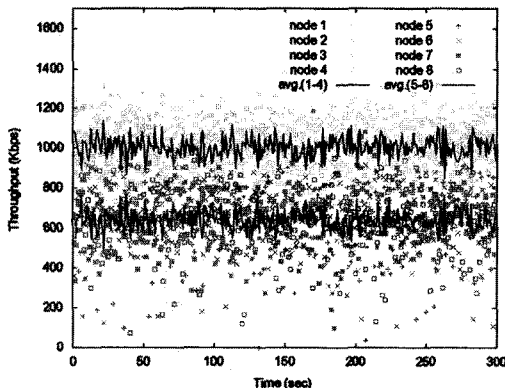


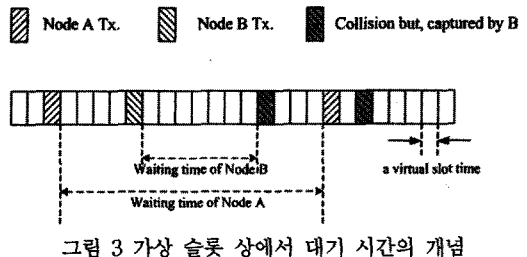
그림 2 시간에 따른 각 노드의 처리율 변화량

2)을 배치하였다.

그림 2로부터 클래스 1에 속한 노드들과 클래스 2에 속한 노드들 간에 처리율 성능 면에서 불평등이 존재함을 보여준다. 클래스 1에 속한 노드들, 즉 캡처 이득(capture gain) 노드들은 클래스 2에 속한 노드들에 비해 더 작은 CW 크기를 유지하고 더 많은 채널 접근을 하게 된다. 예를 들어, 캡처 이득 노드는 그렇지 못한 노드들이 전송한 프레임과 충돌이 났을 때 수신측(AP)에서는 항상 캡처 이득 노드가 전송한 프레임을 수신하게 된다. 그런 다음 캡처 이득 노드는 수신자로부터 ACK 프레임을 수신하고 CW 값을  $CW_{min}$ 으로 초기화하여 다음 전송을 위해 채널에 접근한다. 한편, 이득 없는(no gain) 노드는 충돌이 발생했으므로 현재 CW 값을 두 배하여 실패한 프레임 전송을 다시 시도한다. 이러한 이유로 인해서 캡처 효과는 노드들 간에 불평등 현상을 더욱 심화시킨다.

### 4. 피드백을 이용한 Fair MAC 알고리즘

본 장에서 우리는 캡처 효과나 채널 에러가 빈번하게 발생하는 환경에서 적응적으로 대응할 수 있는 피드백에 근거한 Fair MAC 알고리즘을 제안한다. 널리 알려진 것처럼 캡처 효과는 시스템 전체 성능을 높여주는 긍정적인 면이 있는 반면에 노드들 간에 처리율 성능에서 불평등 문제를 발생시킨다. 따라서, 우리는 캡처 효과로 인해서 발생하는 불평등 문제를 해소하고 전체 시스템의 처리율을 최대화할 수 있는 알고리즘을 제안하는 것이 최종 목적이 된다. Fair MAC 알고리즘이 효율적으로 동작하기 위해 적절한 제어 참조가 요구된다. 따라서, 여러 가지 후보 제어 참조들 중에서 요구 사항을 만족시킬 수 있는 적절한 제어 참조를 선정해야만 한다. 그런 다음 우리는 제안된 알고리즘을 제어 이론 [15,16]에 근거해서 적응적 MAC 알고리즘을 개발한다. 마지막으로 보다 좋은 시스템 성능을 발휘할 수 있는 적절한 제어 참조의 범위를 결정한다.



#### 4.1 제어 참조 결정

제안된 알고리즘의 형평성을 달성하기 위해서 우리는

가장 의미 있는 제어 참조를 발견해야만 한다. 무선 환경의 상태를 관찰할 수 있는 몇 가지 후보 참조들이 있다. [12]에서는 저자들은 제어 참조로 무선 매체 상에서 관찰된 두 비지(busy) 슬롯 사이에 연속된 아이들 슬롯의 평균 개수,  $E[idle]$ ,를 사용하였다. 그림 3을 예로 들면,  $E[idle]$ 은 인접한 두 비지 슬롯 사이에 관찰되는 아이들 슬롯의 개수, 즉 4, 7, 3, 1 슬롯의 평균값 3.75 슬롯이다.

그림 4는 캡처 이득 노드(클래스 1)와 이득 없는 노드(클래스 2)들이 관찰한  $E[idle]$ 을 보여준다. 다시 말해서, 캡처 이득 노드는 강한 신호 노드(strong signal node)이고 이득 없는 노드는 약한 신호 노드(weak signal node)이다. 그림 2과 비교해 볼 때 캡처 효과에 의해서 서로 불평등한 처리율을 보여줌에도 불구하고 그림 4에서는 강한 신호 노드와 약한 신호 노드에 관계 없이 동일한 값을 관찰한다. 이러한 이유는 두 노드가  $E[idle]$  값을 얻기 위해 동일한 무선 매체를 관찰하기 때문이다. 그러므로, Fair MAC 알고리즘을 위한 제어 참조로 적절하지 못하다.

$E[idle]$ 은 적절한 제어 참조가 아니기 때문에 우리는 평균 대기 시간(waiting time)이라는 새로운 제어 참조를 도입한다. 대기 시간은 이전 성공 전송부터 다음 성공 전송까지 기다린 가상 슬롯(virtual slot)의 개수를 말한다. 그림 3에서 노드 A는 이득 없는 노드이고 노드 B는 캡처 이득 노드라고 하자. 그림 3의 세 번째 전송 시도, 즉, 노드 A와 노드 B가 동시에 전송을 시도한 경우, 노드 B는 캡처 효과에 의해서 전송이 성공하는 반면 노드 A는 전송이 실패하게 된다. 결국, 노드 B는 노드 A와 동시에 전송을 시도하더라도 성공적으로 전송하므로, 평균적으로 노드 A 보다 더 짧은 평균 대기 시간을 경험하게 될 것이다. 그림 3의 예에서 A의 대기 시간은 16 슬롯, B의 대기 시간은 7 슬롯이다.

그림 5는 각각 캡처 이득 노드와 이득 없는 노드들의

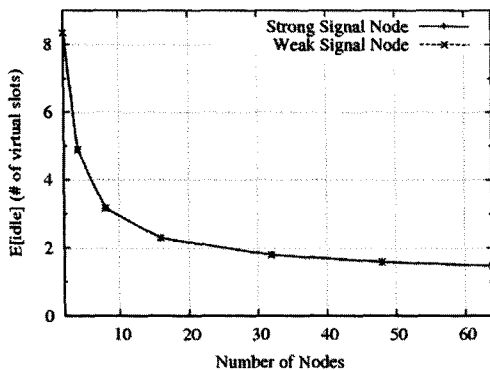


그림 4 두 비지 슬롯 간에 발생한 아이들 슬롯의 평균 개수

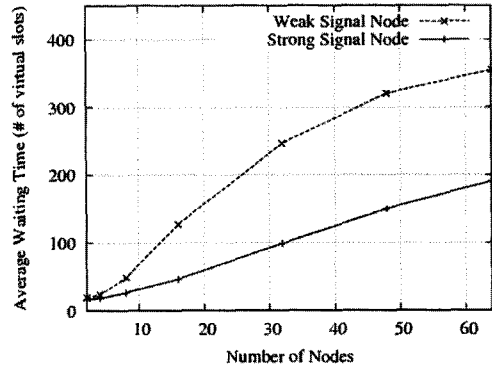


그림 5 두 성공적인 전송 간에 발생한 가상 슬롯의 평균 개수

평균 대기 시간을 보여준다. 캡처 이득 노드와 이득 없는 노드들은 서로 다른 평균 대기 시간을 경험하는 것을 알 수 있다. 따라서, 우리는 평균 대기 시간을 제안된 알고리즘을 위한 제어 참조 값으로 사용할 것이다. 모든 노드의 평균 대기 시간을 동일하게 유지하도록 CW 값을 제어한다면 모든 노드들의 성능이 공평해 질 수 있을 것이다.

#### 4.2 피드백에 근거한 제어 시스템 디자인

본 절에서 우리는 802.11 무선 랜에서 새로운 피드백 정보에 근거한 Fair MAC 알고리즘을 제시한다. 우선 분석의 편의를 위하여 각 노드들이 각자가 경험하는 캡처 효과의 정도에 따라서 M개의 클래스로 나누어진다고 가정한다. 클래스 i에 속하는 노드의 전송 시도와 클래스 j(>i)에 속하는 노드의 전송 시도가 동시에 발생하면, 항상 클래스 i의 전송이 성공한다. 예를 들어서, 하나의 BSS(Basic Service Set) 내에 3개의 클래스(M=3)가 있다고 하자. 클래스 1에 속한 노드가 전송할 때 클래스 2 또는 클래스 3에 속한 노드들이 전송하더라도 AP는 항상 클래스 1의 전송을 성공적으로 수신한다. 또한, 클래스 2에 속하는 노드가 전송할 때 클래스 3 노드들이 동시에 전송하더라도, 클래스 2의 전송이 항상 캡처 이득을 얻는다. 같은 클래스에 속하는 노드들은 모두 같은 캡처 효과를 겪는다. 모든 노드들의 전송 파워는 같은 값으로 고정되어 있다고 가정하면 일반적으로 수신자에서 AP까지 거리에 따라서 클래스로 나누어진다. 클래스 1에 속한 노드들은 AP로부터 가장 가까운 거리에 있는 노드들이 될 것이고, 클래스 M에 속한 노드들은 가장 먼 위치에 놓여있을 것이다.

그림 6은 본 논문에서 제안하는 제어 시스템의 전체 블록 다이어그램을 보여준다. 시스템은 크게 두 부분(즉, Fair MAC과 Plant)으로 구성되며 각 부분에 대한 개괄적인 설명은 다음과 같다. (그림 6에서 사용된 값에

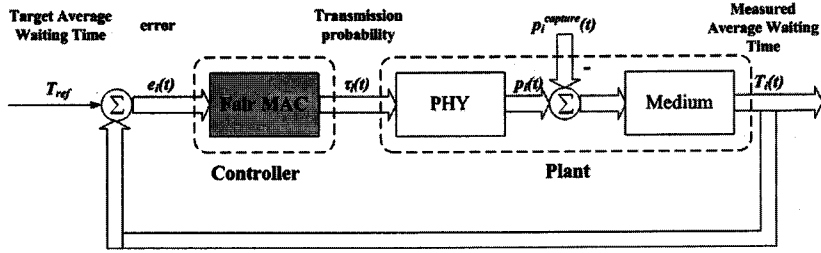


그림 6 제안된 Fair MAC의 상태 블록 다이어그램

대한 자세한 유도는 논문 [8-10] 등을 참조한다.)

Fair MAC (feedback based controller): 측정된 대기 시간,  $T_i(t)$ 과 목표(target) 대기 시간,  $T_{ref}$ 의 차이,  $e_i(t)$ 를 이용하여 CW값,  $W_i(t)$ 를 결정하고 이 값에 기반 하여 채널 접근 확률(channel access probability),  $\tau_i(t)$ 를 얻는다.

Plant: 플랜트(Plant)는 무선랜에서 MAC 계층을 제외한 물리 계층과 무선 매체에서의 상호 작용을 모델링한 것이다. 각 노드의 물리 계층의 인터페이스에서 전송될 프레임은 다른 노드와 동시에 전송이 발생할 확률,  $p_i(t)$ 을 가지고 무선 매체 상으로 전송된다. 이 때, 실제 무선 매체에서 캡처 효과가  $p_i^{capture}(t)$ 의 확률로 발생하여 형평성 제어를 하는데 있어서 방해 요인(disturbance)으로 작용한다. 그런 다음, 각 노드는 매체로부터  $T_i(t)$ 를 측정해서 Fair MAC으로 피드백을 한다.

각 노드들은 무선 매체에 접근하기 위해서 각각의 채널 접근 확률을 갖는다. 또한, 논문 [8-10]에 따르면 각 노드들에 대한 채널 접근 확률은 평균 백오프 값의 역수와 같고 평균 백오프 값은 CW 크기의 절반에 해당한다. 논문 [8-10]으로부터 시간  $t$ 에서 클래스  $i$ 에 속한 노드의 채널 접근 확률  $\tau_i(t)$ 는 다음과 같다.

$$\tau_i(t) = \frac{2}{W_i(t) + 1} \tag{1}$$

식 (1)에서 제시된 채널 접근 확률은  $W_i(t)$ 에 따라서 값이 결정된다. 그래서, 우리가 제안한 Fair MAC 알고리즘은 각 노드 간에 형평성을 달성하기 위해 시스템으로부터 측정된 대기 시간과 목표 대기 시간과의 차이,  $e_i(t)$ 에 의존해서 시간  $t$ 에서 클래스  $i$ 에 속한 노드의 CW 크기,  $W_i(t)$ 를 제어하는데 그 식은 다음과 같다.

$$W_i(t) = e_i(t) + \beta \cdot W_i(t-C) \tag{2}$$

where  $e_i(t) = \alpha \cdot (T_{ref} - T_i(t-C))$

$e_i(t)$ 는 시간  $t$ 에서 클래스  $i$ 의 목표 제어 참조와 측정된 값의 차이이다. 목표 제어 참조와 측정된 값은 각각 목표 대기 시간,  $T_{ref}$ 과 측정된 대기 시간,  $T_i(t)$ 를 말한다.  $C$ 는 조절 인터벌이다.  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 조절 파라미터이다.

시간  $t$ 에서 클래스  $i$ 의 측정된 대기 시간인  $T_i(t)$ 는 기하분포를 따르기 때문에 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$T_i(t) = \tau_i(t)(1 - (p_i(t) - p_i^{capture}(t))) \sum_{s=1}^{\infty} s \cdot [1 - \tau_i(t)(1 - (p_i(t) - p_i^{capture}(t)))]^s = \frac{1}{\tau_i(t)} \cdot \frac{1}{(1 - (p_i(t) - p_i^{capture}(t)))} - 1 \tag{3}$$

여기서,  $p_i(t)$ 는 시간  $t$ 에서 클래스  $i$ 의 전송과 동일한 슬롯에 다른 전송이 발생할 확률이고,  $p_i^{capture}(t)$ 는 시간  $t$ 에서 클래스  $i$ 의 전송이 캡처 효과에 의해서 캡처 이득을 얻을 확률이다.

확률  $p_i(t)$ 는 시스템에서 전송이 발생하지 않거나 단 하나의 전송만이 발생하는 확률을 제외한 것이고 아래 식과 같이 정리된다.

$$p_i(t) = 1 - \prod_{l \in S_{k,M}, k \neq i} (1 - \tau_k(t))^{N_k} (1 - \tau_i(t))^{N_i - 1} \tag{4}$$

여기서,  $N_i$ 는 클래스  $i$ 에 속하는 노드의 개수이다. 노드의 총 개수는  $N$ 이다.

캡처 이득을 얻을 확률,  $p_i^{capture}(t)$ 는 클래스  $i$ 에 속하는 노드가 전송을 시도했을 때 그보다 낮거나 같은 클래스의 노드들은 전송을 하지 않고, 높은 클래스의 노드는 하나 이상 전송을 시도하는 확률과 같기 때문에 아래 식과 같이 유도된다.

$$p_i^{capture}(t) = \begin{cases} \prod_{l \in S_{k,i}} (1 - \tau_k(t))^{N_k} (1 - \prod_{j \in S_{k,M}} (1 - \tau_j(t))^{N_j}) (1 - \tau_i(t))^{N_i - 1} & \text{if } i \neq M \\ 0 & \text{if } i = M \end{cases} \tag{5}$$

### 4.3 목표 참조 값의 범위

4.2절에선 공평한 성능을 얻기 위한 MAC 알고리즘을 제시했다. 본 절에선 시스템 전체 처리율을 최대화시킬 수 있는 적절한  $T_{ref}$  값을 구하고자 한다. 실제로 각각의 망구조에 대해서 최대 성능을 얻기 위한 최적화된  $T_{ref}$ 를 얻기란 현실적으로 어려운 일이다. 왜냐하면, 각각의 노드들은 모든 망구조 정보를 정확히 알아야 하기 때문이다. 즉, 송신자로부터 수신자까지의 거리, 각각의 노드간의 캡처 효과가 발생하는 정도 등을 정확하게

알아야 한다는 것이다. 이러한 것이 불가능하기 때문에 우리는 적절한  $T_{ref}$ 을 얻기 위해 상한(upper bound)와 하한(lower bound)을 정하고 그 범위 내에서 토폴로지에 관계없이 가장 좋은 성능을 낼 수 있는 목표 참조값을 찾는다.

직관적으로, 캡처 효과가 전혀 발생하지 않을 때 ( $M=1$ )의  $T_{ref}$  값이 상한 값이 될 것이다. 반면에, 클래스의 개수와 노드의 개수가 같을 때 ( $N=M$ 이고  $N_i=1$ )의  $T_{ref}$  값이 하한 값이 될 것이다. 다시 말해서 각 클래스에 각각 단 한 개의 노드만이 존재하는 상태를 의미한다.

4.3.1  $T_{ref}$ 의 상한 값

식 (3)으로부터  $M=1$ 이고  $p_i^{capture}=0$ 일 때  $T_{ref}$  값은 다음과 같이 정리된다.

$$T_{ref} = \frac{1}{\tau_i} \cdot \frac{1}{(1-\tau_i)^{N_i-1}} - 1 \quad (6)$$

$M=1$ 이기 때문에  $N_i=N$ 이고 위 식 (6)에 논문 [10]에서의 제시된 최적화된 채널 접근 확률(즉,  $\tau = 1/N\sqrt{T_F^*/2}$ )을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$N\sqrt{T_F^*/2} \cdot \frac{1}{(1-\frac{1}{N\sqrt{T_F^*/2}})^{N-1}} - 1 = \frac{(N\sqrt{T_F^*/2})^N}{(N\sqrt{T_F^*/2}-1)^{N-1}} - 1 \quad (upper) \quad (7)$$

여기서,  $T_F^*=T_F/\sigma$ ,  $T_F$ 는 충돌이 발생했을 때 걸린 시간이고  $\sigma$ 는 단위 슬롯 시간이다.

4.3.2  $T_{ref}$ 의 하한 값

논문[10]으로부터 성공 확률과 식 (5)를 이용하여 캡처 효과가 있는 경우에 성공 확률은 다음과 같다.

$$P_i^{succ} = N_i \tau_i (1-\tau_i)^{N_i-1} \prod_{1 \leq k < i} (1-\tau_k)^{N_k} \quad (8)$$

각 노드의 처리율이 동일하게 되도록 하기 위해서, 다시 말해서 각 노드 간에 형평성을 달성하기 위해서 각 노드의  $P_i^{succ}$  값은 모두 같아야 한다. 따라서, 다음과 같은 등식을 얻을 수 있다.

$$P_1^{succ} = P_2^{succ} = P_3^{succ} = \dots = P_M^{succ} \quad (9)$$

식 (8)을 식 (9)에 대입해서 정리하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\tau_{i+1} = \frac{\tau_i}{1-\tau_i} \quad (10)$$

식 (10)을 논문 [8]의 시스템에서 전송이 발생할 확률,  $P_{tr}$ 에 대입해서 정리하면 아래와 같은 식을 얻는다.

$$P_{tr} = 1 - \prod_{1 \leq k \leq M} (1-\tau_k) = N \cdot \tau_1 \quad (11)$$

$i$  번째 클래스에 대한 정규화된 시스템 처리율,  $S_i$ 는  $i$  번째 클래스가 성공한 전송에서 유효한 데이터 시간을

시스템에서 전송이 발생한 시간과 발생하지 않은 전체 시간으로 나눈 비율과 같고 아래식으로 정리된다.

$$S_i = \frac{P_i^{succ} L}{(1-P_{tr})\sigma + \sum_{1 \leq k \leq M} P_k^{succ} T + (P_{tr} - \sum_{1 \leq k \leq M} P_k^{succ}) T_F} \quad (12)$$

$T=T_F$ 라 가정하고 식 (10), (11)을 식 (12)에 대입하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$S_i = \frac{\tau_i L}{(1-N\tau_1)\sigma + N\tau_1 T} \quad (13)$$

식 (13)에서  $\tau_1$ 을 최대화하는 값이  $S_i$ 를 최대가 되게 한다. 한편, 저서 [17]로부터 시스템 안정화 조건인  $\rho$ (시스템 이용률) $<1$ 을 이용하면 다음과 같은 부등식을 얻을 수 있다.

$$P_{tr} = N \cdot \tau_1 < 1 \Rightarrow \tau_1 < \frac{1}{N} \quad (14)$$

따라서, 식 (13)과 (14)로부터  $\tau_1$ 이  $1/N$ 에 가장 가까운 값일 때  $S_i$ 이 최대이다. 이 값을 식 (3)에 대입하면 아래식과 같은 하한 값을 얻을 수 있다.

$$T_{ref} = N - 1 \quad (lower) \quad (15)$$

4.3.3  $T_{ref}$  값에 대한 평가

식 (7)과 (15)로부터 다음의 적절한  $T_{ref}$ 의 범위를 얻는다.

$$N-1 < T_{ref} \leq \frac{(N\sqrt{T_F^*/2})^N}{(N\sqrt{T_F^*/2}-1)^{N-1}} - 1 \approx N-1 < T_{ref} \leq N\sqrt{T_F^*/2} - 1 \Rightarrow T_{ref} = N \cdot K - 1 \text{ where } 1 < K \leq \sqrt{T_F^*/2} \quad (16)$$

우리는 식 (16)의 범위 내의  $T_{ref}$ 에 따라서 성능이 어떻게 변경되는지 알아볼 필요가 있다. 따라서, 우리는 캡처 효과가 빈번하게 일어나는 경우( $M=10$ ), 적당히 발생하는 경우, 캡처 효과가 거의 발생하지 않을 경우 ( $M=1$ )일 때 각각에 대해서 전체 노드 개수를 변경시키면서 전체 처리율을 평가한다.

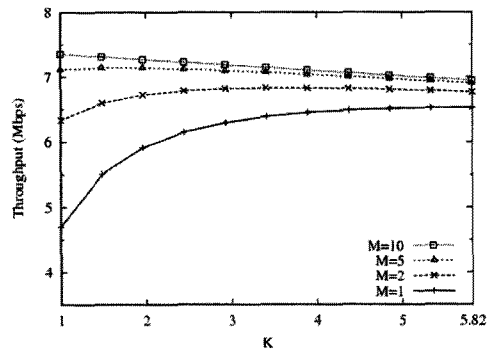


그림 7 전체 노드개수가 10일 때  $K$ 에 따른 처리율 변화

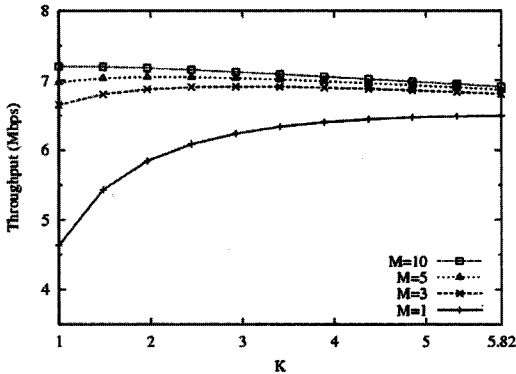


그림 8 전체 노드개수가 30일 때 K에 따른 처리율 변화

그림 7과 8은 노드의 개수가 각각 10과 30일 때 K의 함수로써 전체 처리율의 변화를 보여준다. 캡처 효과가 발생하는 환경( $M > 1$ )에서 전체 처리율은 K가 증가함에 따라 조금 감소한다. 한편, 캡처 효과가 발생하지 않을 때( $M = 1$ ), K는 전체 시스템 처리율 상에서 큰 영향을 미치게 된다. 특히, K가 4보다 작을 때, 시스템 처리율을 급격하게 감소한다. 따라서, 망구조에 상관없이 사용하기 위한 적절한 K는 4에서 5.82에 해당된다.

4.4 프로토콜 구현 시 고려해야할 사항

본 절에서는 제안된 알고리즘을 구현함에 있어서 고려해야 할 부분에 대해 논의한다. 제안된 MAC 알고리즘이 시스템 처리율 측면에서 좋은 성능을 얻기 위해서는 현재 시스템에서 활성화된 노드의 개수를 알아야 한다.

제안된 알고리즘은 두 가지 모드로 동작이 가능하다. 하나는 마치 802.11e QAP[2]에서 트래픽 양이나 현재 활성화된 노드의 개수를 명시적으로 알려주는 방법을 이용하는 중앙집중식 모드가 있을 수 있다.

다른 또 하나의 방법은 분산 모드를 고려할 수 있다. 분산 모드에서는 활성화된 노드의 개수를 추정하기 위해 시스템 총들 확률,  $P_{coll}$ 를 측정해야 한다. 시스템에 있는 모든 노드들이 동일한 총들 확률을 관찰할 수 있도록 하기 위해 캡처 효과로 인해 성공한 데이터 프레임에 대한 ACK의 프레임 컨트롤 필드에 비축된 서브타입(reserved subtype)인 1001을 사용하여 마킹을 한다. 이 마킹된 ACK을 받거나 엿들은 노드들은  $T_{ref}$ 를 계산할 때 현재 전송된 데이터 프레임은 총들이라고 간주하여  $P_{coll}$ 을 계산한다. 아래 식 (17)은 논문 [21]로부터 얻은 활성화된 노드의 개수 추정하는 식이다. 계산된 시스템 총들 확률 값을 아래 식 (17)에 대입하여 노드의 개수를 추정한다.

$$\hat{N} = \sum_{1 \leq k \leq M} N_k = 1 + \frac{\log(1 - P_{coll})}{\log\left(\frac{T_{ref\_current}}{T_{ref\_current} + 1}\right)} \quad (17)$$

여기서,  $T_{ref\_current}$ 는 현재 사용 중인  $T_{ref}$  값이고  $P_{coll}$ 은 시스템 관점에서의 총들 확률이다.

이러한 ACK 마킹 방법은  $P_{coll}$ 을 계산할 때 캡처 효과로 인한 방해 요인을 배제할 수 있도록 한다. [7]에서는 캡처 효과가 발생할 때  $PHY\_CAPTURE.ind$ 이라는 표시를 PLME로 전달함으로써 캡처 효과가 발생함을 인지할 수 있다. 이 발명 [7]은 ACK 마킹 방법을 현실화시킬 수 있는 기술이다.

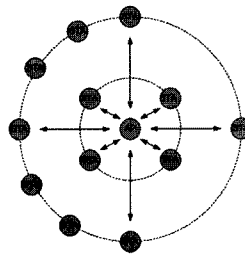


그림 9 링형 망구조

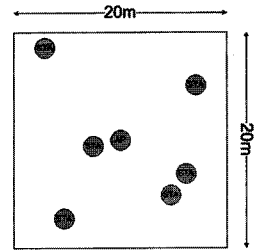


그림 10 랜덤 망구조

5. 성능 평가

본 장에서 우리는 ns-2 시뮬레이터를 이용하여 제안된 알고리즘의 형평성 및 전체 처리율 측면에서 성능을 검증한다. 제안된 Fair MAC 알고리즘은 DCF, Idle Sense와 성능 비교를 한다. Fair MAC을 위한 적절한  $\alpha, \beta$ 를 얻기 위해 많은 시뮬레이션을 수행했으며 각 파라미터에 대해 오버셋(overshoot)과 안정화 시간(settling time)에 대해서 평가를 하였다. 이 결과로부터 Fair MAC 알고리즘은 적절한 파라미터 값으로  $\alpha=0.5, \beta=1$ 을 사용하며 K=5를 사용한다. 논문 [12]에서 Idle Sense를 위해  $\epsilon$ 값으로 0.001과 0.01 값을 사용하였고  $1/\alpha = 1.2$ 를 사용하였다. Idle Sense의 참조 값,  $n^{target}$ 은 5.68을 사용하였다. 트래픽은 UDP상에서 CBR을 발생시켰고, 사용된 망구조는 그림 9와 10에서와 같이 링 구조와 랜덤 구조를 사용하였다. 링형 망구조에서 내부 원에 있는 노드들(캡처 이득 노드들)은 AP와 1m의 거리를 유지하였고 외부 원에 있는 노드들(이득 없는 노드들)은 AP와 4m 거리에 떨어져 있다.

5.1 처리율과 처리율 비(Throughput Ratio)

먼저 DCF, Idle Sense, Fair MAC 간에 처리율과 처리율 비를 비교 검증한다. 여기서 실험은 그림 9와 같은 링형 구조에서 수행하였고 노드 개수를 2개에서 32개까지 변경 시키면서 실험을 수행하였다.

그림 11은 DCF, Idle Sense, Fair MAC에 대한 전체 처리율을 보여준다. 그림으로부터 제안된 Fair MAC은 다른 프로토콜에 비해 항상 좋은 처리율 성능을 보여준다. Idle sense는 DCF보다 낮은 성능을 보이는데 그 이

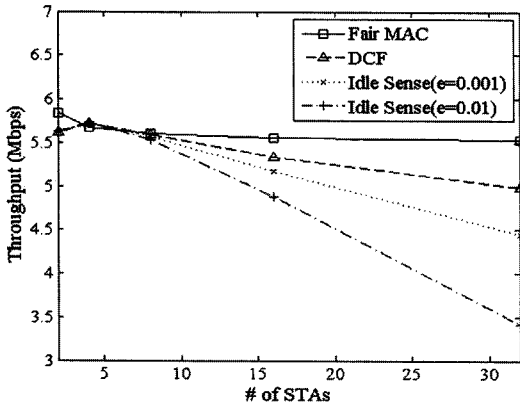


그림 11 DCF, Idle sense, 및 Fair MAC간에 전체 처리율 비교

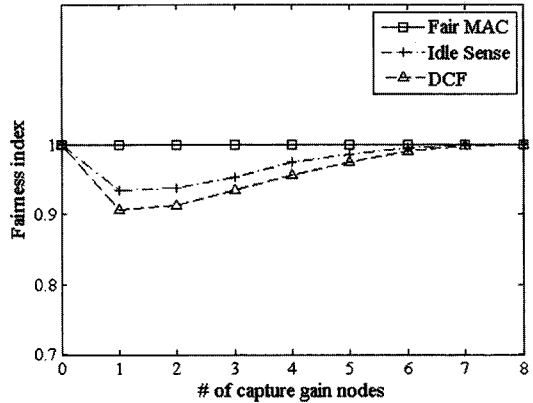


그림 13 제인 형평성 인덱스(Jain fairness index)

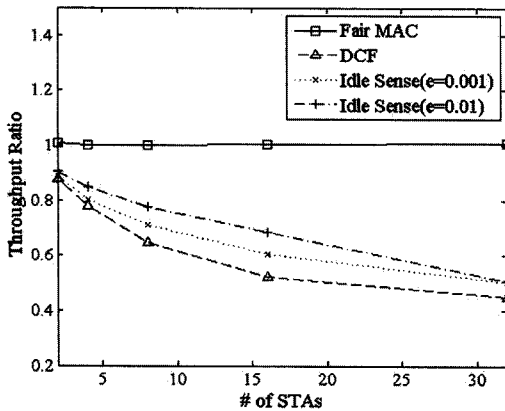


그림 12 캡처 이득 노드와 이득 없는 노드 간에 처리율 비

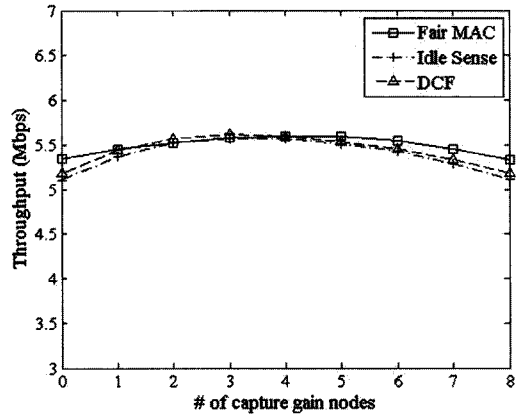


그림 14 전체 처리율

유는 DCF는 캡처 효과로 인해 캡처 이득 노드들이 더 작은 CW 값을 갖도록 하여 처리율을 높이는 반면에 Idle sense는 이러한 현상을 고려치 않은 제어 참조 값으로 CW를 조절하기 때문이다.

그림 12는 각 알고리즘 간에 캡처 이득 노드와 이득 없는 노드 간에 처리율 비를 보여준다. 그림에서 Fair MAC은 노드 개수와 관계없이 항상 1을 유지한다. DCF는 Idle sense보다 더 큰 처리율 비의 차이를 보이는데 그 이유는 DCF에서는 BEB 인해서 이득 없는 노드들은 더 큰 CW 값을 갖게 되고 이로 인해서 불평등 정도가 더욱 심각해진다.

### 5.2 형평성

본 절에서는 형평성의 성능 비교를 위해 제인 형평성 인덱스를 이용하여 성능 검증을 수행한다. 전체 노드의 개수를 8개로 고정시키고 캡처 이득 노드를 0에서 8개로 변경시키면서 관찰을 했다. 다시 말해서, 수신자로부터 1m 거리에 있는 노드 개수를 0에서부터 8개까지

변경시켰다. 나머지 노드들은 4m의 거리에 위치시켰다. 그림 13은 각 노드의 노드 당 처리율을 이용해서 형평성 인덱스를 보여주는 그림이다. 그림 13에서 캡처 이득 노드가 1개일 때 가장 불공평함을 보여준다. 그림 14는 그림 13과 같은 상태에서의 전체 처리율을 보여준다. 형평성 인덱스는 아래와 같다.

$$F_j(\text{fairness index}) = \frac{(\sum_{i=1}^N \gamma_i)^2}{N \sum_{i=1}^N \gamma_i^2}$$

여기서,  $N$ 은 전체 노드의 개수이고,  $r_i$ 는 노드  $i$ 에 대한 노드 당 처리율이다.

### 5.3 랜덤 페이로드

본 절의 실험은 서로 다른 크기로 데이터 프레임을 송신했을 때 제안된 방법이 여전히 형평성을 유지하는 지에 대한 결과를 보여준다. 그림 15는 각 노드가 페이로드 크기를 1초마다 랜덤하게 500, 1000, 1500 바이트 중에서 하나를 선택하여 전송하도록 하였고, 노드 개수를 2에서 32개까지 증가시키면서 그런 형평성 인덱스를



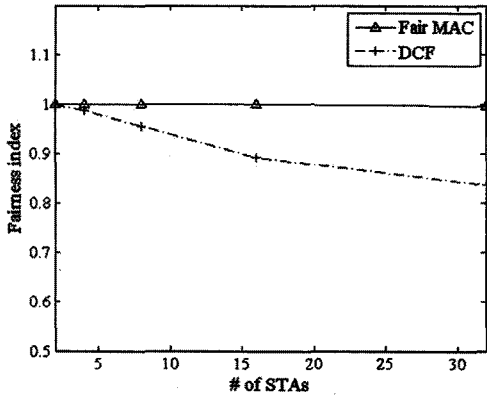


그림 15 랜덤 페이로드 크기로 전송되었을 때 성공적인 프레임 전송 개수의 형평성 인덱스

보여준다. 각 노드의 데이터 크기가 다르기 때문에 형평성 인덱스에서  $r_i$  값으로 노드 당 처리율을 사용하는 대신에 각 노드의 성공된 전송 프레임 개수를 사용하였다. 그림 15에서 노드 개수가 증가할수록 DCF는 형평성이 감소하는 반면 Fair MAC은 형평성을 유지하고 있음을 알 수 있다.

5.4 랜덤 망구조

그림 16과 17은 랜덤 망구조(그림 10)에서 노드 개수를 2에서 32개까지 증가시키면서 관찰한 형평성 인덱스와 전체 처리율을 변화를 보여준다. 그림 16에서 Fair MAC은 노드 개수에 관계없이 항상 형평성을 잘 유지하는 반면에 DCF는 노드 개수가 증가함에 따라서 더욱 불평등해 짐을 알 수 있다. 그림 17은 랜덤 망구조에서 얻은 전체 처리율 결과를 보여준다. Fair MAC은 노드 개수에 관계없이 항상 좋은 성능을 보여준다. 결국, Fair MAC은 토폴로지에 관계없이 형평성을 잘 유지함과 동시에 전체 처리율 면에서도 좋은 성능을 갖는 것을 보여준다.

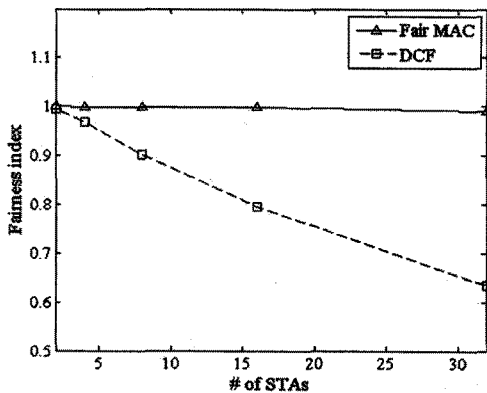


그림 16 랜덤 망구조일 때 형평성 인덱스

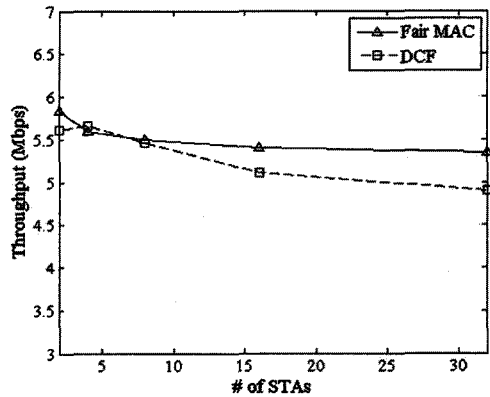


그림 17 랜덤 망구조일 때 전체 처리율 비교

6. 결론 및 향후 과제

우리는 본 논문에서 캡처 효과가 빈번하게 발생하는 환경에서 각 노드들 간에 채널 접근 측면에서 불평등 문제가 발생함을 확인하였다. 하지만, 캡처 효과는 시스템 측면에서 봤을 때 전체 처리율을 향상시키는 좋은 특성을 갖고 있다. 따라서, 우리는 이러한 캡처 효과를 잘 활용해서 전체 처리율을 향상시키면서 노드들 간에 채널 접근 측면에서 형평성을 달성하는 MAC 알고리즘을 제안한다.

형평성을 달성하기 위해서 우리는 피드백에 근거한 형평성 제어 알고리즘을 제안한다. 전체 처리율 측면에서 좋은 성능을 나타내기 위해서 적당한 목표 참조 ( $T_{ref}$ ) 값을 얻어야 한다. 하지만, 실제 환경에서 최적화된 제어 참조 값을 얻기란 쉽지 않다. 그래서, 우리는 좋은 성능을 얻을 수 제어 참조 값의 범위를 구하고 이 범위 내에서 평가를 해서 최적의 성능을 보이는 값을 선택한다.

우리는 제안된 알고리즘을 ns-2 시뮬레이션을 통해서 다른 MAC 알고리즘과 비교 검증한다. 실험 결과에서 Fair MAC 알고리즘은 노드 개수, 토폴로지 등에 관계없이 형평성을 유지함을 보여주었고, 전체 시스템 처리율도 최대값에 가까운 값을 얻었다.

향후 과제로 우리는 실제 무선랜 카드 장비에 제안된 MAC 알고리즘을 구현해서 실제 무선랜 시스템 환경에서도 좋은 성능을 보이는지 검증할 계획이다.

참고 문헌

[1] Std. 802.11-1999, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, ANSI/IEEE Std. 802.11, 1999.  
 [2] IEEE Std. 802.11e, Supplement to Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Medium Access Control (MAC) Quality of Service (QoS) Enhancements, IEEE

- Std. 802.11e-2005, 2005.
- [3] A. Kochut, A. Vasan, A. Shankar, and A. Agrá-wala, "Sniffing out the correct Physical Layer Capture model in 802.11b," in *Proc. IEEE ICNP'04*, 2004.
- [4] S. Ganu, et. al., "Methods for restoring MAC layer fairness in IEEE 802.11 networks with physical layer capture," in *Proc. ACM REALMAN'06*, 2006.
- [5] S. Han, T. Nandagopal, Y. Bejerano and H. Choi, "Analysis of Spatial Unfairness in Wireless LANs," in *Proc. IEEE INFOCOM'09*, 2009.
- [6] J. Yee and H. Pezeshki-Esfahani, "Understanding wireless lan performance trade-offs," *Communication system Design*, Nov 2002.
- [7] J. Boer and et al, "Wireless LAN With Enhanced Capture Provision," U.S. Patent 5987033, Nov. 1999.
- [8] G. Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.18, no.3, pp.535-547, Mar. 2000.
- [9] F. Cali, M. Conti, and E. Gregori, "Dynamic Tuning of the IEEE 802.11 Protocol to Achieve a Theoretical Throughput Limit," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.8, no.6, pp.785-799, Dec. 2000.
- [10] D. Qiao and K. Shin, "Achieving efficient channel utilization and weighted fairness for data communications in IEEE 802.11 WLAN under the DCF," in *Proc. IEEE IWQoS'02*, 2002.
- [11] Yaling Yang, Jun Wang and Robin Kravets, "Distributed Optimal Contention Window Control for Elastic Traffic in Wireless LANs," in *Proc. IEEE INFOCOM'05*, 2005.
- [12] Martin Heusse, Franck Rousseau, Romaric Guillier, Andrzej Duda, "Idle Sense: An Optimal Access Method for High Throughput and Fairness in Rate Diverse Wireless LANs," in *Proc. ACM SIGCOMM'05*, 2005.
- [13] H. Kim and J. C. Hou, "Improving protocol capacity with model based frame scheduling in IEEE 802.11-operated WLANs," in *Proc. ACM MOBICOM'03*, 2003.
- [14] C. Hu and J. C. Hou, "A novel Approach to Contention Control in IEEE 802.11e-Operated WLANs," in *Proc. IEEE INFOCOM'07*, 2007.
- [15] G.F. Franklin, J.D. Powell, A. Emami-Naeini, "Feedback Control of Dynamic Systems," fourth ed., Addison-Wesley.
- [16] Chi-Tsong Chen, "Linear System Theory and Design," third ed., Oxford Univ. Press, 1999.
- [17] L. Kleinrock, "Queueing Systems, Volume I: Theory," Wiley-Interscience, 1975.
- [18] M. Heusse, F. Rousseu, G. Berger-Sabbatel, and A. Duda, "Performance Anomaly of 802.11b," in *Proc. IEEE INFOCOM'03*, 2003.
- [19] B. Sadeghi, V. Kanodia, A. Sabharwal, and E. Knightly, "Opportunistic Media Access for Multirate Ad Hoc Networks," in *Proc. ACM MOBICOM'02*, 2002.
- [20] I. Tinnirello and S. Choi, "Temporal Fairness Provisioning in Multi-Rate Contention-Based 802.11e WLANs," in *Proc. IEEE WoWMoM'05*, 2005.
- [21] G. Bianchi and Ilenia Tinnirello, "Kalman Filter Estimation of the Number of Competing Terminals in an IEEE 802.11 Network," in *Proc. IEEE INFOCOM'03*, 2003.
- [22] Eun-Chan Park and et al., "Analysis and design of the virtual rate control algorithm for stabilizing queues in TCP networks," *Elsevier Computer Networks*, vol.44, no.1, pp.17-41, Jan. 2004.



정지웅

2002년 동국대학교 컴퓨터공학과 학사. 2004년 서울대학교 전기, 컴퓨터공학부 석사. 2004년~현재 서울대학교 전기, 컴퓨터공학부 박사과정. 관심분야는 무선랜, 센서넷 등에서 자원관리 및 성능평가



최선웅

1998년 서울대학교 전산학과 학사. 2000년 서울대학교 전산학과 석사. 2005년 서울대학교 전기, 컴퓨터공학부 박사. 2005년~2007년 삼성전자 통신 연구소 연구원. 2007년~현재 국민대학교 전자공학부 조교수. 관심분야는 무선 네트워크, 네트워크 자원 관리, 시스템 성능 평가



김종권

1981년 서울대학교 산업공학과 학사. 1982년 미국 조지아 공과대학교 산업공학과 석사. 1987년 미국 일리노이 대학교 전산학과 박사. 1984년~1987년 IBM 산호세 연구소 연구조원. 1987년~1991년 미국 Bellcore 통신 연구소 연구원. 1991년~현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 교수. 관심분야는 차세대 인터넷, 초고속 라우터, 이동통신