

물리 계층의 다양성과 무선 랜의 성능에 미치는 영향

(Physical Layer Diversity and its Effects on the Performance of WLANs)

최 선 응[†] 박 기 흥^{**} 김 종 권^{***}

(Sunwoong Choi) (Kihong Park) (Chong kwon Kim)

요 약 오늘날 인프라 무선 랜은 많은 사용자들이 사용하는 중요한 인터넷 접속 기술이다. 지금까지 무선 랜에 관한 연구들은 물리 계층의 채널 다양성으로 인하여 발생하는 모델링 부정확성에 대해 충분히 고려하지 않고, MAC 프로토콜의 향상 및 분석 그리고 시뮬레이션을 통한 성능 평가에만 초점을 맞추어 왔다. 본 논문에서는 계층 상호 간의 의존성의 중요성에 주목하는 새로운 시각으로 IEEE 802.11 무선 랜의 특성을 고찰한다. 실제 무선 랜 시스템 상에서 실험을 수행하여 물리 계층에서 발생하는 불평등성을 관찰하였다. 그리고, 그것이 노드들 간의 혼잡 수준을 떨어뜨리는 역할을 하여 경쟁 기반의 MAC 처리율이 혼잡 상태에서도 서서히 감소하는 것을 보인다. 반면에 노드들 간의 공평성과 노드 처리율의 안정성은 시스템 입력 로드가 특정 수준을 넘으면 크게 저하되는 것을 보인다. 이와 같은 결과를 통하여, 처리율을 높이기 위해 링크 계층에서 제어를 할 필요성은 작은 반면에, 공평한 자원 분배나 서비스의 품질을 보장하기 위해서는 트래픽 제어가 필요하다는 것을 알 수 있다. 시스템의 성능 평가를 위하여 시뮬레이션과 실험을 병행하였다.

키워드 : 무선 랜, 물리 계층 다양성, 실험 vs. 시뮬레이션

Abstract Wide spread 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 sufficient consideration for modeling inaccuracies stemming from inter-layer dependencies, including physical layer diversity, that significantly impact performance. We take a fresh look at IEEE 802.11 WLANs, and using experiment, simulation, and analysis demonstrate its surprisingly agile performance traits. Contention-based MAC throughput degrades gracefully under congested conditions, enabled by physical layer channel diversity that reduces the effective level of MAC contention. In contrast, fairness and jitter significantly degrade at a critical offered load. This duality obviates the need for link layer flow control for throughput improvement but necessitates traffic control for fairness and QoS. We use experimentation and simulation in a complementary fashion, pointing out performance characteristics where they agree and differ.

Key words : Wireless LAN, physical layer diversity, experimentation vs. simulation

1. 서 론

캠퍼스 망, 엔터프라이즈 망, 상용 핫스팟(hotspot) 등에서 널리 사용되는 IEEE 802.11 무선 랜 [1]은 유무

선 망이 통합되어 가고 있는 오늘날, 인터넷의 중요한 구성요소가 되었다. 1970년대의 ALOHA [2]와 이더넷 [3]의 경우와 마찬가지로, 1990년대 후반 등장한 무선 랜의 특성을 이해하기 위한 많은 연구들이 진행되었다. 무선 랜에 관한 대표적인 연구들로는 IEEE 802.11 CSMA/CA의 성능 분석 [4,5], 공평성을 제공하는 스케줄링 방법 [6,7], 실제 동작 중인 무선 랜의 트래픽 측정 및 분석 [8-10] 등이 있다. 1980년대 CSMA/CD를 사용하는 이더넷의 성능에 관한 많은 논쟁이 있었지만 [11], 그러한 논쟁은 스위칭 기술의 개발과 더불어 자취

· 이 논문은 2005년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

† 정 회 원 : 삼성전자 통신연구소 연구원
schoi@popoeye.snu.ac.kr

** 정 회 원 : Purdue Univ. 전산학과 교수
park@cs.purdue.edu

*** 종신회원 : 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 교수
ckim@popoeye.snu.ac.kr

논문접수 : 2005년 3월 30일

심사완료 : 2005년 8월 5일

를 감추었다. 그에 비해, 무선 랜에서는 스위치를 통하여 간섭(interference)이나 충돌(contention)을 지역화하는 것이 불가능하다. 이와 같이 유선 망과는 다른 무선 랜의 특성으로 인하여, 무선 랜의 성능은 채널 접근 시에 발생할 수 있는 프레임 간의 충돌에 크게 영향을 받게 된다.

본 논문에서는 오늘날 대부분의 무선 랜이 동작하는 핫스팟 환경에서의 성능에 초점을 맞춘다. 이러한 환경에서는 충돌(contention)에 기반을 둔 다중 접속 방법의 성능이 주요한 관심사가 된다. [4,5]에서는 IEEE 802.11 DCF의 성능을 모델링하고 있는데, 시스템 입력 로드(offered load)가 증가함에 따라 시스템의 MAC 처리율이 크게 저하되는 것으로 설명하고 있다. 그러나, 이 결과는 물리 계층의 채널 다양성(diversity) (또는 다중 사용자 다양성 (multiuser diversity) [12,13]으로 불리는)이 MAC 계층의 성능에 미치는 효과가 반영되어 있지 않다는 것을 지적하고자 한다. 이러한 물리 계층의 채널 다양성은 충돌 기반의 다중 접속 시스템의 성능에 큰 영향을 미치게 된다.

본 논문에서는 시스템 입력 로드나 무선 노드의 개수가 증가함에 따라 혼잡 경쟁 방식에 기반을 두고 있는 DCF 시스템의 처리율 (throughput)이 기존에 알려진 바와 다르게, 서서히 감소하는 것을 보인다. 이러한 현상은 물리 계층의 채널 다양성이 MAC 계층의 혼잡 정도를 감소시키는 역할을 수행하여 발생한다. 따라서, MAC 성능 저하를 막기 위하여 링크 계층에서 플로우 제어를 수행하는 최근에 제안들 [14,15]의 필요성을 의심하게 한다.

시스템 처리율이 시스템 입력 로드가 증가하더라도 서서히 감소하는 것과 달리, 무선 노드 간의 MAC 계층의 처리율 공평성 (fairness)은 특정 시스템 입력 로드를 기점으로 크게 저하된다. 물리 계층의 불평등성은 MAC 계층의 처리율 분배를 지속적으로 불평등하게 만든다. 또한 처리율의 안정성도 시스템 입력 로드에서 크게 변화하는 것을 보인다. 낮은 시스템 입력 로드에서는 각 노드의 처리율이 거의 일정한 수준을 유지하지만, 시스템 입력 로드가 특정 임계값을 넘어서면 시간에 따라 크게 변화하게 된다. 따라서, 트래픽 제어를 통하여 시스템이 포화 상태로 진입하지 못하게 하는 것이 처리율의 공평성과 안정성 향상에 도움이 될 수 있다.

이후의 구성은 다음과 같다. 다음 장에서는 시뮬레이션 환경과 실험 환경에 대하여 기술한다. 3장에서는 IEEE 802.11 DCF의 처리율 특성에 대하여 논하고, 4장에서는 공평성과 안정성 측면에서 DCF의 성능에 대하여 논한다. 마지막으로, 결과에 대한 토의로 결론을 맺는다.

2. 시스템 모델

2.1 인프라 무선 랜 환경

본 논문에서는 무선 호스트를 서비스하는 IEEE 802.11 인프라 무선 랜 접속 망 (access network)으로 구성된 유무선 통합 IP 네트워크를 고려한다. 그림 1은 그러한 네트워크 시스템의 구성 요소를 보여 준다. 특히, 본 논문에서는 무선 접속 망의 특성에 초점을 맞춘다. 네트워크 시스템은 아령 모양의 네트워크로 모델링 하였다. 무선 호스트들이 n 개가 있고, 각 무선 호스트는 AP를 통하여 인터넷에 접근할 수 있다. AP는 라우터와 연결되어 있고, 다시 라우터는 n 개의 유선 호스트와 연결되어 있다.

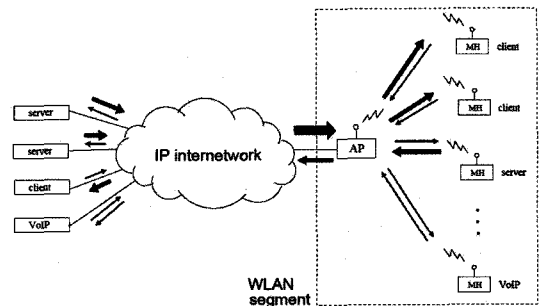
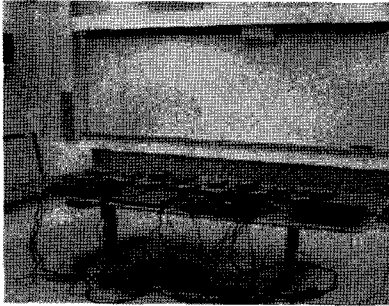


그림 1 IEEE 802.11 인프라 무선 랜을 포함하는 유무선 통합 IP 네트워크

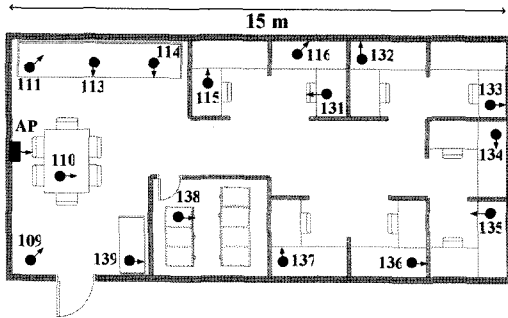
2.2 실험 환경

그림 1과 유사한 실험 환경을 구축하기 위하여, IEEE 802.11b를 지원하는 Enterasys RoamAbout R2 AP [16]와 리눅스 2.4.7-10이 설치된 Dell Inspiron 8100 노트북을 케이블로 연결하였다. 무선 랜 영역은 16대의 Compaq/HP 3800 시리즈와 두 대의 3600 시리즈의 iPAQ PDA로 구성되어 있다. 각 PDA는 64 MB의 메모리가 장착되어 있고, Familiar 리눅스 v0.7.2가 설치되어 있다. 그림 2(a)는 하드웨어 구성 요소를 보여 주고 있다. 각 PDA는 PCMCIA 자켓을 이용하여 Enterasys RoamAbout 802.11b PC 카드를 장착하고 있다. AP와 PDA의 데이터 전송 속도는 11 Mb/s로 고정하였고, RTS/CTS와 전송 세기 제어는 사용하지 않았다. 무선 채널은 최소한의 잡음을 갖는 주파수를 선택하였다. 그리고, 무선 채널의 상태와 MAC 계층에서의 전송 과정을 관찰하기 위하여 최신의 상업 무선 랜 분석 프로그램인 WildPackets Airopeek NX [17]을 이용하였다.

이 논문의 실험은 전산과 건물 내의 실내 사무실 환경에 초점을 두었다. 그림 2(b)는 PDA의 배치도이다. 각 포켓 PC의 위치, 안테나 방향, 그리고 AP를 보여 주고 있다. 또한, 신호의 세기와 그에 따른 성능에 미치는



(a)



(b)

그림 2 (a) iPAQ PDA와 Enterasys RoamAbout R2 AP (b) AP의 위치와 각 PDA의 위치 및 안테나 방향을 보여 주는 실내 사무실 실험 환경

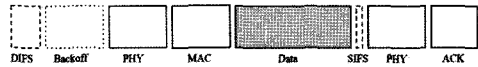
거리의 영향을 최소화하기 위하여 그림 2(a)와 같이 모든 PDA를 탁자 위에 모아 놓은 경우도 비교 실험하였다.

2.3 시뮬레이션 환경

그림 1과 같은 아령 형태의 유무선 무선 랜 토폴로지를 실험하기 위해서 ns-2.27 [18]을 사용한다. 구름 형태의 IP 네트워크는 하나의 라우터로 대체되었다. 유선 링크의 대역폭은 100 Mb/s로, 라우터와 AP 사이 링크의 지연은 1 msec, 유선 호스트와 라우터 사이 링크의 지연은 10 msec로 지정하였다. IEEE 802.11 데이터 프레임의 전송 속도는 11 Mb/s로 지정하였고, ACK 프레임의 전송 속도는 2 Mb/s로 지정하였다. 기본적으로 10⁻⁶의 BER (Bit Error Rate)을 가정하였다. 그 밖의 IEEE 802.11b 관련 파라미터 값은 그림 3(a)에 요약되어 있다. 이 값들에서 하나의 무선 노드가 얻을 수 있는 최대의 성능을 계산할 수 있다. 프레임의 데이터 크기를 L이라고 하고, 백오프(backoff) 구간의 길이를 T_{BO}라고 하면, 하나의 프레임 전송을 마치기 위하여 필요한 시간은 50+T_{BO}+192+(224+8L)/11+10+192+112/2 (μs)이 된다. 그림 3(b)는 DCF 프레임과 ACK의 전송 과정을 보여 준다. 만일 백오프 구간을 무시한다면, L = 1000

slot time	20 μs
SIFS	10 μs
DIFS	50 μs
CWmin	31
CWmax	1023
physical preamble	144 bits
physical header	48 bits
ACK frame	112 bits
MAC header + CRC	224 bits

(a)



(b)

그림 3 (a) IEEE 802.11b 파라미터 값 (b) DCF 프레임과 ACK 전송 스케줄

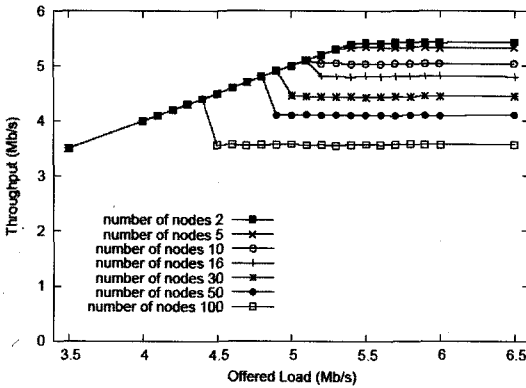
bytes의 프레임을 전송하는데 약 1.25 msec가 걸리는 것을 알 수 있다. 따라서 최대 성능을 6.4 Mb/s 임을 알 수 있고, 이러한 이론적 최대값은 프레임의 크기에 따라 변하게 된다. 백오프를 통하여 낭비되는 시간을 고려한다면 이론적으로 하나의 노드가 얻게 되는 성능은 5.136 Mb/s이다. ns 시뮬레이션을 통하여 얻은 값은 5.117 Mb/s이고, iPAQ 실험을 통하여 측정된 값은 5.155 Mb/s이다. 두 경우 모두 이론적으로 계산된 값과 유사하다. 그리고 2~4개의 무선 노드가 있는 경우에는, 둘 이상 노드가 동시에 프레임 전송을 시도하여 충돌로 인한 무선 채널 자원 낭비가 있을 수 있음에도 불구하고, 백오프 카운터 값을 각 노드가 동시에 줄여 나갈 수 있는 이득이 더 커서 전체 성능이 높아진다.

3. DCF의 처리율(throughput)

먼저, DCF의 처리율에 관하여 논의를 시작한다. 지금까지 DCF는 시스템이 혼잡한 정도 (시스템 입력 로드나 노드의 개수)가 증가함에 따라 시스템의 MAC 처리율이 크게 저하되는 것으로 여겨져 왔다. ns 시뮬레이션을 통하여 성능 평가를 시작하고, 실제 무선 랜 시스템 상에서의 실험을 통하여 물리 계층의 채널 다양성과 그것이 성능에 미치는 영향에 대하여 살펴 본다.

3.1 등거리 DCF 처리율 (시뮬레이션)

AP를 중심으로 무선 노드들이 반지름 10m의 원주 위에 일정한 간격으로 대칭적으로 위치하는 경우를 고려한다. 이와 같이 같은 거리에 대칭적으로 무선 노드들을 배치함으로써, DCF의 경쟁을 최대화할 수 있다. 그 외의 다른 배치 방법도 다음 장에서 고려하였다.



(a)

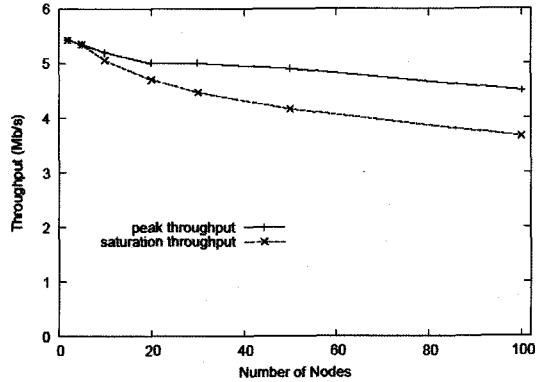
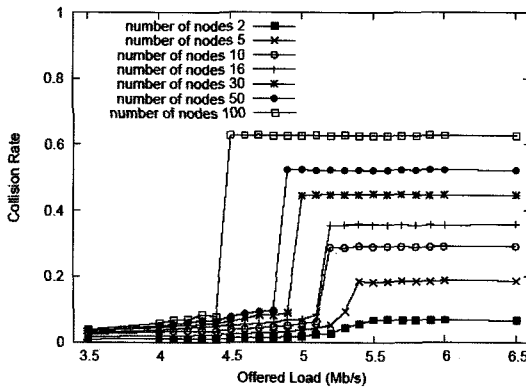


그림 5 무선 노드의 개수에 따른 DCF 최고 시스템 처리율과 포화 상태의 시스템 처리율



(b)

그림 4 (a) 2~100개의 무선 노드에 시스템 입력 로드 에 따른 IEEE 802.11 DCF의 시스템 처리율 (b) DCF의 충돌 확률

그림 4(a)는 2~100 개의 무선 노드가 존재할 때, 시스템 입력 로드 에 따라 DCF의 성능이 어떻게 변하는 지를 보여 준다. 시스템 입력 로드는 일정한 속도로 생성되는 CBR (constant bit rate) 트래픽으로 구성되었다. 단, 특정 동기화 현상을 방지하기 위하여 패킷을 생성하는 시간 간격에 10%의 범위에서 확률적인 변화를 주었다. 하나의 시뮬레이션은 200초 동안 지속되고, 그 시간은 10개의 무선 노드가 포화 상태에서 약 18만 개의 프레임 을 전송할 수 있는 정도의 길이이다. 앞으로 제시될 실제 실험 결과들도 200초 동안 수행하여 얻은 값이다.

먼저, 노드가 2개나 5개 노드일 때의 시스템 처리율이 노드가 하나일 때의 처리율인 5.117 Mb/s 보다 높은 것을 볼 수 있다. 그리고, 시스템 입력 로드가 증가함에 따라 시스템 처리율은 포화 상태에 도달할 때까지 선형으로 증가하고 있다. 포화 상태에 도달하는 순간 시스템의 처리율은 증가를 멈추고, 오히려 감소하는 모습

을 보이고 있다. 그림 4(b)에서는 이와 같이 포화 상태에 도달하는 순간 프레임의 충돌 확률이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다.

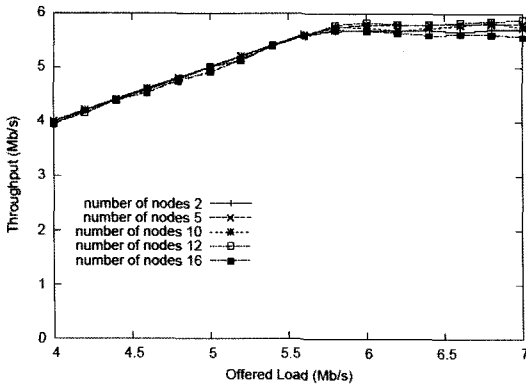
노드의 개수가 많아짐에 따라, 시스템 처리율의 최고 값과 포화 상태에서의 시스템 처리율이 모두 감소하고 그 둘 간의 상대적인 차이는 커진다. 무선 노드의 개수가 증가함에 따라 DCF의 최고 시스템 처리율과 포화 상태 시스템 처리율이 모두 감소하는 것을 그림 5에서 확인할 수 있다. 최고 시스템 처리율은 전반적으로 서서히 감소하는데, 포화 상태에서의 시스템 처리율은 보다 빠르게 감소하였다. 16개의 노드가 있는 경우의 성능을 2개의 노드가 있는 경우와 비교하면, 최고 성능은 5.9% 감소한 반면 포화 상태의 성능은 11.4% 감소하였다. 노드가 50개 있는 경우에는 각각 11.4%와 24.2% 감소하였다.

[4]의 분석에서는 포화 상태에서의 시스템 처리율을 달성 가능한 시스템의 평형 상태 성능 척도로 사용하였다. 하지만, 앞으로 제시되는 바와 같이 물리 계층에서의 다양성이 존재하는 상황에서는 포화 상태에서의 시스템 처리율이 높아져, 최고 시스템 처리율과의 차이가 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

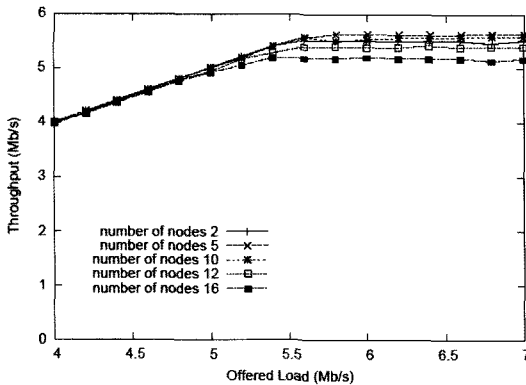
3.2 물리 계층의 채널 다양성 (실험)

다수 사용자 다양성 [12,13]과 유사한 형태인 물리 계층의 채널 다양성은 혼잡도가 높은 상황에서 DCF의 성능 저하를 줄이는 역할을 한다.

그림 6(a)는 그림 2(b)에서 기술된 사무실 환경에서 실험을 하여 측정된 802.11 DCF의 시스템 처리율 그래프이다. 2~16대의 iPAQ PDA를 놓고, 시스템 입력 로드를 4Mb/s에서부터 7Mb/s까지 변화시켰다. 전송 프로토콜로는 UDP를 사용하였다. 그림 4(a)의 등거리 DCF 성능 시뮬레이션의 결과와 비교할 때 두 가지 차이점을 발견할 수 있다. 첫째, 전반적으로 시스템 처리율이 향상된 것을 볼 수 있다. 시뮬레이션 결과가 4.816~5.432



(a)



(b)

그림 6 (a) 사무실 환경에서 2, 5, 10, 12, 16대의 iPAQ PDA에 시스템 입력 로드를 변화시키면서 얻은 IEEE 802.11 DCF의 시스템 처리율 (b) 테이블 환경에서 얻은 DCF 시스템 처리율

Mb/s 정도였던 데 비하여, 실험 결과는 5.7~5.876 Mb/s 임을 볼 수 있다. 둘째, 최고 시스템 처리율과 포화 상태에서의 시스템 처리율 사이의 차이가 확연히 감소하였다. 예를 들어 16 노드의 성능을 비교하면, 시뮬레이션 결과에서는 5.9% 정도의 차이가 있었지만, 실제 실험 결과에서는 0%라고 말할 수 있다.

그림 6(b)는 그림 2(a)와 같은 테이블 환경에서 실험하여 얻은, 시스템 입력 로드 에 따른 DCF 시스템 처리율 그래프이다. 사무실 환경의 결과와 비교할 때, 무선 노드들의 위치가 근접되어 있기 때문에 물리 계층의 채널 다양성이 줄어들어 그 효과도 줄어들 것을 볼 수 있다.

그림 7은 사무실 환경, 테이블 환경, 등거리 시뮬레이션에서 얻은 무선 노드의 개수에 따른 포화 상태에서의 802.11 DCF의 시스템 처리율을 비교한다. 10개와 16개의 노드의 경우에서 사무실 환경과 시뮬레이션 결과 사

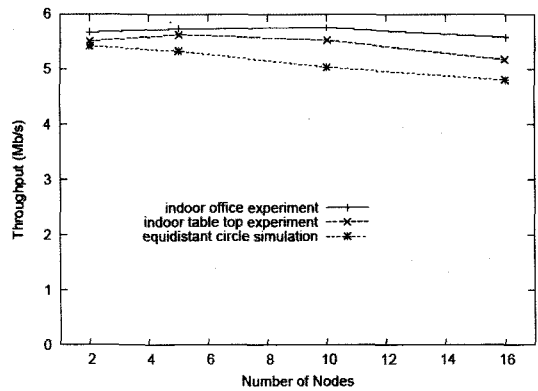


그림 7 사무실 환경, 테이블 환경, 등거리 시뮬레이션에서 얻은 무선 노드의 개수에 따른 포화 상태에서의 802.11 DCF 시스템 처리율 비교

이에 1Mb/s (20%) 정도의 성능 차이를 볼 수 있다. 이러한 결과는 물리 계층의 다양성이 미치는 영향을 보여주고 있다. 오직 하나의 무선 노드가 시스템에 존재할 경우에는 시뮬레이션 결과와 실험 결과 모두 5.1~5.2Mb/s 사이의 유사한 결과를 관찰할 수 있다.

일반적으로, 다수 사용자 다양성은 무선 노드가 움직이거나 시간에 따라서 변화하는 무선 채널의 특성에 따라 발생한다. 그리고, 시스템 처리율을 최대화하기 위해서는 특정 순간에 최대의 채널 상태를 갖는 사용자들 서비스를 받는다. 인프라 무선 랜 환경에서는 대부분의 사용자들이 자주 움직이지 않고, 물리 계층의 채널 다양성이 위치에 따른 영향을 지속적으로 보이게 된다. 다시 말해서, 유리한 사용자는 계속해서 유리하고, 불리한 위치에 있는 사용자는 계속해서 불리한 대우를 받게 된다.

그림 8(a)는 사무실 환경에서 시스템에 시스템 입력 로드 에 따라서 8대의 무선 노드들이 각각 취하는 처리율을 보여 주고 있다. 여러 번의 실험에 걸쳐서 채널의 다양성에 대한 우열이 유지되고, 그것이 각자 노드의 처리율 차이로 반영되는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 처리율에서의 우열은 사무실 환경에서의 전파 전달 메커니즘에 의하여 결정되기 때문에 노드의 위치에 따라 좌우된다. 밀폐된 공간에서 시그널의 세기의 분포가 변한다는 것은 잘 알려져 있고[19-21], 지속성, 민감성, 높은 변화율과 같은 특성은 무선 라디오 전파의 카오스적인 특성 [22]을 사용하여 이론적으로 설명 가능하다.

DCF는 이와 같은 물리 계층의 채널 다양성을 두 가지 방식으로 이용한다. 첫째, 두 개의 프레임 동시에 수신하면 일반적으로 충돌이 발생하여 두 프레임 모두 성공적으로 수신할 수 없지만, 만일 두 프레임의 전파의 세기가 차이가 크게 난다면 더 큰 세기로 수신한 프레

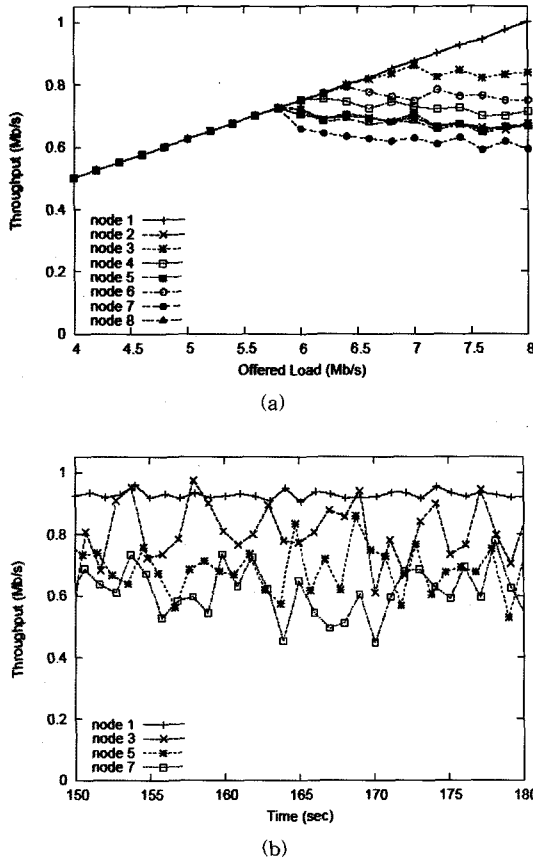


그림 8 (a) 사무실 환경에서 8대의 iPAQ PDA 간의 지속적인 채널 다양성과 그로 인한 처리율의 계층화 (b) 시스템 입력 로드가 7.4 Mb/s일 때 4대의 노드 간의 시간에 따른 지속적인 처리율의 계층화

임을 성공적으로 디코딩할 수 있다. 둘째, 전파의 세기가 약한 노드는 전송이 성공적으로 이루어지지 않았기 때문에, 지수적인 백오프(backoff) 과정을 경험하게 된다. 이와 같은 혼잡 제어 방식은 전파의 세기가 강한 노드의 우선권을 더욱 강화하는 기능을 하게 된다. 이와 같은 DCF의 불평등성을 강화하는 특성으로 인하여, 그림 8(a)에서 보는 바와 같이 시스템 입력 로드가 증가하여 프레임의 충돌율이 증가함에 따라 전파의 세기가 강한 노드의 처리율은 더욱 증가하게 된다. 이와 같이 강한 신호를 같은 노드를 더욱 빈번하게 서비스하는 DCF가 다수의 사용자 다양성을 이용하는 스케줄링의 원칙 [23]에 비추어 볼 때, 시스템 전체의 처리율은 증가시킬 수 있다. 그림 8(b)는 8대의 PDA 중 4대의 처리율이 시간에 따라 변화하는 모습을 30초 동안 그런 것이다. 물리 계층의 채널 다양성이 시간에도 관계없이 계속 유지되는 것을 볼 수 있다.

3.3 거리 차이가 있을 경우의 DCF 처리율 (시뮬레이션)

NS-2의 CMU 무선 확장 모듈에서, 캡처 효과 (capture effect)는 SIR (signal-to-interference ratio) 값을 기준으로 구현되었다. 이번 장에서는 거리에 따른 캡처 효과의 특징을 식별할 수 있도록 4가지의 노드 배치 방법을 더 고려한다. “직선” 배치 방법은 AP를 시작으로 해서 각 노드를 일직선 상에 1m 간격으로 배치시킨다. “근거리 랜덤” 배치 방법은 노드를 반지름 10m의 원 내에 임의로 배치시키고, 원의 중심에 AP를 배치하는 방법이다. “원거리 랜덤” 배치 방법은 노드들을 반지름 10m의 원 내에 임의로 배치시키고 AP를 원의 중심에서 20m 거리에 배치시키는 방법이다. “점” 배치 방법은 AP를 포함하여 모든 노드를 한 점에 위치시킨다. 그림 9는 다섯 가지 배치 방법에 대해 시뮬레이션을 통하여 얻은 무선 노드의 개수에 따른 DCF의 처리율을 보여 준다. “직선” 배치 방법이 가장 최고의 처리율을 보이고, “근거리 랜덤” 배치 방법이 그에 가까이 근접하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 거리를 기준으로 구현된 채널 다양성이 “직선” 배치일 때 가장 크고, “원거리 랜덤” 배치가 그 다음이라는 사실에서 유추할 수 있다. “원거리 랜덤”의 경우 AP와 무선 노드들 사이의 거리가 멀어져 거리에 따른 채널 다양성이 효과를 나타내지 못한다. 그리고, “점”과 “원” 배치 방법은 채널 다양성이나 그에 따른 DCF의 불평등한 채널 접근 경쟁이 없기 때문에, “원거리 랜덤”과 비슷한 처리율을 보이고 있다.

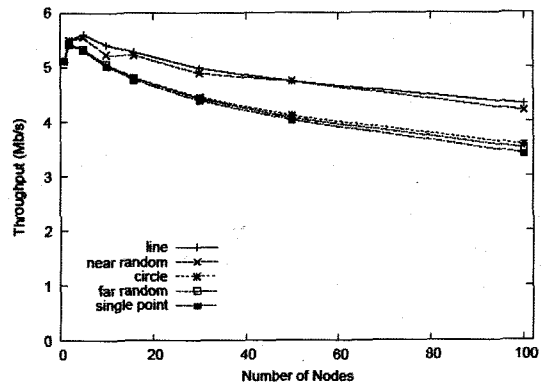


그림 9 “직선”, “근거리 랜덤”, “원거리 랜덤”, “점”, “원” 배치 방법으로 시뮬레이션 했을 때 얻어지는 무선 노드의 개수에 따른 DCF의 처리율

4. DCF의 평등성(fairness)과 처리율의 변화(jitter)

이 장에서는, DCF의 평등성과 성능 변화율이 시스템 입력 로드에 따라 어떠한 영향을 받는지에 대해 논의한다.

4.1 DCF 평등성

그림 10은 2~100 대의 무선 노드를 원형으로 배치한 시뮬레이션에서 시스템 입력 로드에서 합수로서 무선 노드 중 최소 처리율과 최대 처리율의 비를 보여 준다. 그림 4(b)에서 특정 시스템 로드를 기점으로 충돌율이 급격히 증가하는 것과 마찬가지로 노드들의 처리율의 평등성이 특정 시스템 로드를 기점으로 급격히 나빠지는 것을 볼 수 있다.

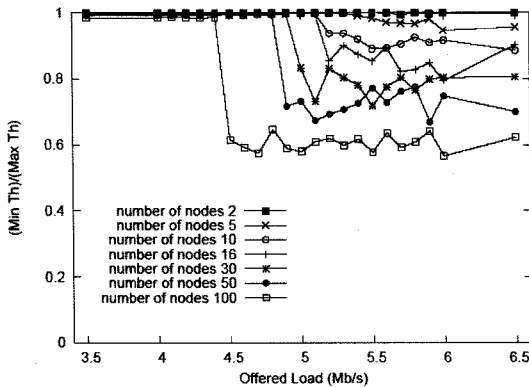
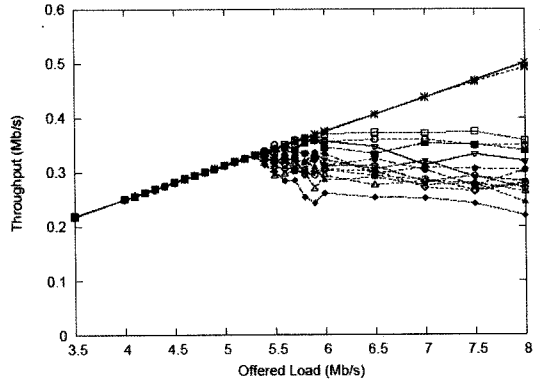
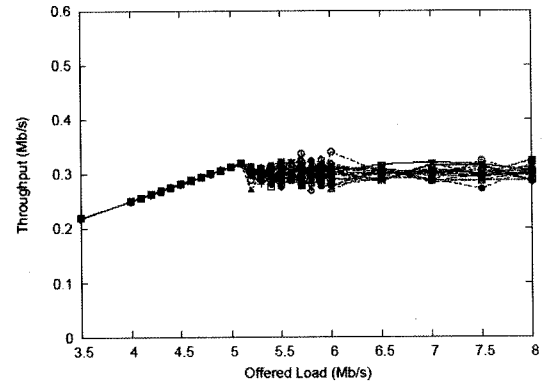


그림 10 등거리 원형 배치 방법에서 2~100대의 무선 노드들에 대하여 시스템 입력 로드에서 따른 DCF의 평등성 시뮬레이션 결과

물리 계층의 채널 다양성에 의해 성능 저하가 완화되는 처리율과 달리, 불평등성은 DCF에 의하여 더 증폭된다. 그러한 성질은 16대의 무선 노드들을 일직선으로 배치한 상태에서 시스템의 로드를 증가시키면서 각 노드의 처리율을 그린 그림 11(a)에서 잘 관찰된다. 포화 상태로 진입하기 전까지는 처리율의 할당이 전반적으로 공평하다. 그러나, 충돌율이 크게 증가되는 포화 상태에 진입해서는 각 노드들이 얻는 처리율이 지속적으로 불평등한 것을 볼 수 있다. 가장 낮은 처리율과 가장 높은 처리율 사이의 비를 불평등성의 척도로 볼 때, 그 값이 계속해서 증가하는 것을 볼 수 있다. DCF는 다수 사용자 다양성에 의하여 야기되는 불평등성을 보다 크게 하는 “부익부 빈익빈” 효과를 가져온다. 선형 배치에서 다양성은 거리에 따른 SIR capture 효과에서 기인한다. 16대의 무선 노드를 AP에서 같은 거리에 놓고 시뮬레이션하여 지속적인 다수 사용자 다양성을 제거하였을 때, DCF가 보이는 불평등성을 그림 11(b)에서 볼 수 있다. 물리 계층의 불평등성이 없는 상황에서는, MAC 처리율 분배에서 발생하는 불공평성의 정도가 상대적으로 적은 것을 볼 수 있다. 그리고, 매 시뮬레이션 (또는 시스템 입력 로드) 마다 각 노드 간의 우열이 변화하는 것으로 볼 때, 불평등성이 지속적이지 않다는 것을 알 수 있다.



(a)



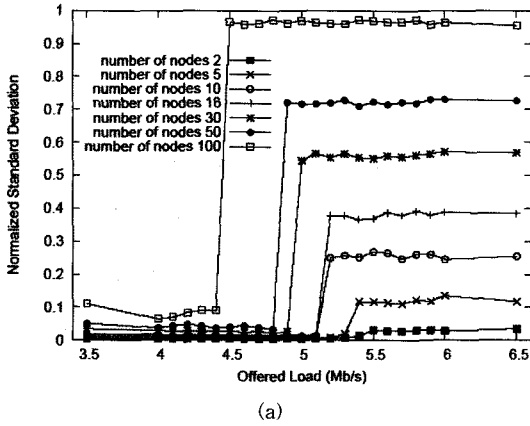
(b)

그림 11 (a) 16대의 노드를 직선 배치했을 때, 시스템 입력 로드에서 따른 각 노드의 처리율 (b) 16대의 노드를 원형으로 배치했을 때 결과

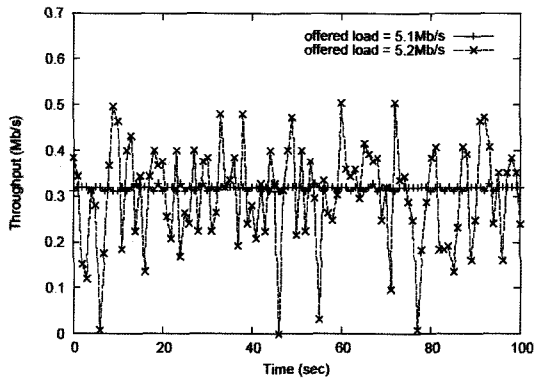
4.2 DCF 처리율의 변화

다음으로, 시스템 입력 로드에서 따라서 시스템의 처리율이 시간에 따라 얼마나 심하게 변화하는 지 고찰한다. 시간에 따라 처리율이 변화하는 정도를 하나의 척도로 표현하기 위하여 정규화된 표준 편차를 사용한다. 실시간 멀티미디어와 같이 서비스의 품질을 보장 받기를 원하는 응용 프로그램을 서비스하기 위해서는 처리율의 안정성이 중요하다.

그림 12(a)는 2~100 대의 무선 노드가 등거리 배치되어 있을 때, 시스템 로드에서 따라 처리율의 시간에 따른 정규화된 표준 편차를 보여주고 있다. 충돌율이 급격히 증가하고, 공평성이 급격히 저하되는 지점에서 처리율의 시간에 따른 변화도 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 인프라 무선 랜을 포화 상태 영역에서 동작시킨다면, 시스템의 처리율은 저하되는 않으나 처리율의 시간에 따른 변화는 크게 증가하기 때문에 VoIP (Voice-over-



(a)



(b)

그림 12 (a) 원형 배치에서 DCF 처리율의 시간에 따른 변화 (정규화된 표준 편차) (b) 포화 상태로 진입하는 시점을 결정짓는 시스템 입력 로드의 임계값보다 약간 낮은 시스템 입력 로드(5.1 Mbps)와 약간 높은 시스템 입력 로드(5.2 Mbps)에서 노드 처리율의 시간에 따른 변화

IP)나 멀티미디어 스트리밍 응용 프로그램을 지원하기에는 어려움이 따른다.

그림 12(b)는 16대의 무선 노드가 있을 때, 포화 상태로 진입하는 시점을 결정짓는 시스템 입력 로드의 임계값보다 약간 낮은 시스템 입력 로드 (5.1 Mbps)와 약간 높은 시스템 입력 로드 (5.2 Mbps)에서 노드 처리율이 시간에 따라 어떻게 변화하는지를 보여 주고 있다. 처리율의 분산과 지연과 같은 측면에서는 성능이 시스템 입력 로드의 특정 임계값을 기준으로 급격하게 저하되는 것을 알 수 있다.

4.3 트래픽 제어

[14]과 [15]에서는 시스템 입력 로드가 높은 포화 상태에서 CSMA/CA의 성능이 저하되는 것을 완화시키기

위하여 링크 계층에서 속도를 제어하는 방법을 제안하였다. 본 논문에서는 인프라 무선 랜에서 무선 노드의 개수가 매우 많은 경우가 아니라면, 물리 계층의 채널 다양성의 영향으로 인하여 DCF의 처리율이 크게 저하되지 않는 것을 보였다. 그러나, 공평성과 처리율의 변화를 측면에서는 포화 상태에서 많은 문제가 발생하는 것을 알았다. 따라서 링크 계층에서 802.11 MAC 계층으로 전달하는 트래픽의 속도를 제어함으로써, 공평성을 크게 향상시키고 처리율의 변화를 줄일 수 있다. IEEE 802.11 DCF의 시스템 입력 로드와 처리율 사이의 돔(dome) 모양의 관계 그림(그림 4(a) 참조)을 보면, 점근적으로 안정적이고 효율적인 PI 제어기를 만드는 것이 어렵지 않다는 것을 알 수 있다.

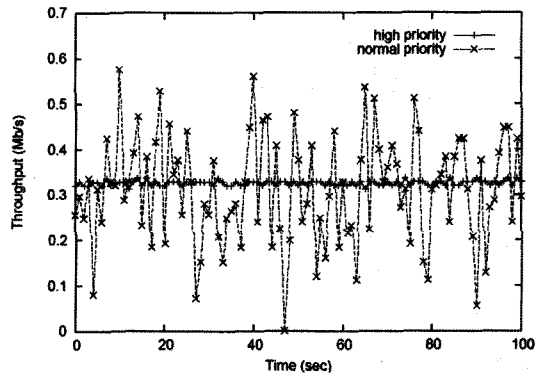


그림 13 IEEE 802.11e EDCA를 사용했을 때 포화 상태에서 우선 순위가 높은 트래픽과 일반 트래픽이 경험하는 시간에 따른 처리율의 변화

그리고, IEEE 802.11e에서 제공하는 MAC 접근에 우선 순위를 사용한다면, 처리율의 변화를 크게 감소시킬 수 있다. 그림 13은 IEEE 802.11e EDCA를 사용했을 때, 포화 상태에서 우선 순위가 높은 트래픽과 일반 트래픽이 경험하는 처리율이 시간에 따라 변화하는 것을 보여 주고 있다. EDCA에서 제공하는 우선 순위 메커니즘에 의하여 우선 순위가 높은 트래픽의 경우 포화 상태에서도 상당히 안정적인 처리율을 획득하는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 물리 계층에 존재하는 채널 다양성과 그러한 물리적 불평등성이 MAC 계층의 특성에 어떠한 영향을 미치는 지에 대하여 고찰하였다. 물리 계층의 채널 다양성으로 인하여 DCF 시스템의 처리율은 시스템 입력 로드가 증가하거나 경쟁 노드의 개수가 증가하

라도 서서히 감소하는 반면에, 노드 간 처리율의 공평성이나 안정적인 처리율 제공은 특정 시스템 입력 로드를 넘어서는 순간 크게 훼손되는 것을 보았다. 본 논문에서 고찰한 물리 계층 채널 다양성은 향후 무선 랜 연구의 기초로 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] IEEE 802.11 part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, Aug. 1999.

[2] N. Abramson. The Aloha system—another alternative for computer communications. In *Proc. Fall Joint Comput. Conf. AFIPS Conf.*, pp. 281–285, 1970.

[3] R. Metcalfe and D. Boggs. Ethernet: distributed packet switching for local computer networks. *Communications of the ACM*, 19(7):395–404, 1976.

[4] G. Bianchi. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18(3):535–547, 2000.

[5] F. Cali, M. Conti, and E. Gregori. IEEE 802.11 protocol: Design and performance evaluation of an adaptive backoff mechanism. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18(9):1774–1786, 2000.

[6] S. Lu, T. Nandagopal, and V. Bharghavan. A wireless fair service algorithm for packet cellular networks. In *Proc. ACM MobiCom '98*, pp. 10–20, 1998.

[7] N. Vaidya, P. Bahl, and S. Gupta. Distributed fair scheduling in a wireless LAN. In *Proc. ACM MobiCom '00*, pp. 167–178, 2000.

[8] A. Balachandran, G. Voelker, P. Bahl, and P. Rangan. Characterizing user behavior and network performance in a public wireless LAN. In *Proc. ACM SIGMETRICS '02*, pp. 195–205, 2002.

[9] D. Kotz and K. Essien. Analysis of a campus wide wireless network. In *Proc. ACM MobiCom '02*, pp. 107–118, 2002.

[10] D. Tang and M. Baker. Analysis of a local area wireless network. In *Proc. ACM MobiCom '00*, pp. 1–10, 2000.

[11] D. Boggs, J. Mogul, and C. Kent. Measured capacity of an Ethernet: myths and reality. In *Proc. ACM SIGCOMM '88*, pp. 222–234, 1988.

[12] R. Knopp and P. Humblet. Information capacity and power control in single cell multiuser communications. In *Proc. ICC '95*, 1995.

[13] D. Tse. Optimal power allocation over parallel Gaussian channels. In *Proc. International Symposium on Information Theory*, 1997.

[14] H. Kim and J. Hou. Improving protocol capacity with model based frame scheduling in IEEE 802.11 operated WLANs. In *Proc. ACM MobiCom '03*, pp. 190–204, 2003.

[15] C. Yuen and P. Marbach. Service differentiation in random access networks. Technical Report CSRG-472, Computer System Research Group, University of Toronto, Jul. 2003.

[16] <http://www.enterasys.com/wireless/>

[17] AiroPeek NX, WildPackets, Inc. <http://www.wildpacket.com/>

[18] The network simulator-ns 2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

[19] I. Cuinas and M. Sanchez. Measuring, modeling, and characterizing of indoor radio channel at 5.8GHz. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 50(2): 526–535, 2001.

[20] S. Kjesbu and T. Brunsvik. Radiowave propagation in industrial environments. In *26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, volume 4, pp. 2425–2430, 2000.

[21] R. Tingley and K. Pahlavan. Space time measurement of indoor radio propagation. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 50(1):22–31, 2001.

[22] S. Sridhar, D. Hogenboom, and B. Willemsen. Microwave experiments on chaotic billiards. *J. Stat. Phys.*, 68(239), 1992.

[23] M. Grossglauser and D. Tse. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks. In *Proc. IEEE INFOCOM '01*, pp. 1360–1369, 2001.

최 선 응



1998년 서울대학교 전산과학과 학사
 2000년 서울대학교 전산과학과 석사
 2005년 서울대학교 전기, 컴퓨터공학부 박사. 2005년~현재 삼성전자 통신 연구소 연구원. 관심분야는 무선 네트워크, 자원 관리, 성능 평가

박 기 흥



1988년 서울대학교 경영학과 학사. 1990년 미국 South Carolina 대학교 전산학과 석사. 1996년 미국 Boston 대학교 전산학과 박사. 1996년~현재 미국 Purdue 대학교 전산학과 교수. 관심분야는 QoS, 트래픽 모델링, 네트워크 보안

김 중 권

정보과학회논문지 : 정보통신
 제 32 권 제 4 호 참조