

IEEE 802.11 무선랜의 성능 향상을 위한 하이브리드 MAC 프로토콜

최우용[†]

동아대학교 산업경영공학과

Hybrid MAC Protocol for Improving Performance of IEEE 802.11 Wireless LANs

Woo-Yong Choi

Department of Industrial and Management Systems Engineering, Dong-A University

The DCF (Distributed Coordination Function) and PCF (Point Coordination Function) are the basic MAC (Medium Access Control) protocols of IEEE 802.11 wireless LANs. According to the DCF, each node performs the exponential backoff algorithm before the transmission of its data frame. Each node doubles the backoff waiting time before the transmission of its data frame whenever it detects the transmission collision with other nodes. Therefore, as the number of the active nodes having the data frames to transmit increases, the overall MAC performance of the DCF decreases. On the other hand, according to the PCF, each node is granted the transmission opportunity by which the PCF transmission is possible without the collision with other nodes. Therefore, as the number of the active nodes increases, the MAC performance of the PCF increases. In this paper, considering the tradeoff of MAC performance between the DCF and PCF, a hybrid MAC protocol is proposed to enhance the performance of IEEE 802.11 wireless LANs.

Keywords: Wireless LAN, MAC, DCF, PCF, Throughput

1. 서론

IEEE 802.11 무선랜은 전세계적으로 가정, 회의장, 공항, 철도역, 병원 등의 사람들이 집중적으로 많이 모이는 핫스팟 지역에 설치되어 운용되고 있다. IEEE 802.11 무선랜은 임시망(ad hoc network) 혹은 인프라스트럭처망(infrastructure network)의 형태로 운용될 수 있으나 주로 AP(Access Point)가 존재하는 인프라스트럭처망의 형태로 운영되어 각 노드는 AP를 통하여 자신의 데이터를 인터넷 상의 원격 노드에게 데이터를 전송하거나 AP를 통하여 인터넷 상의 원격 노드로부터 데이터를 수신한다. IEEE 802.11 무선랜의 근간을 이루는 기술표준은 1997년에 발표되었으며 이 때 설계된 MAC(Medium Access Control) 프로토

콜인 DCF(Distributed Coordination Function)와 PCF(Point Coordination Function)가 이후에 발표된 프레임 애그리게이션 등을 이용한 새로운 MAC 프로토콜의 기초를 이룬다고 할 수 있다 (IEEE Std 802.11, 1997; IEEE Std 802.11e, 2005; IEEE Std 802.11n, 2009; Choi, 2014).

IEEE 802.11 무선랜 MAC 프로토콜인 DCF와 PCF를 통하여 IEEE 802.11 무선랜 내의 각 노드는 자신의 데이터를 전송할 때 다른 노드와 더불어 무선자원을 공평하게 사용할 수 있다. 그런데, DCF와 PCF는 각 노드에게 무선자원을 할당할 때 사용하는 방법이 매우 극단적으로 다르다. DCF에 따르면 각 노드는 자신의 데이터 전송시점을 스스로 결정하나 PCF에 따르면 AP가 각 노드의 데이터 전송시점을 결정한다. 그리고 DCF

본 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었습니다

[†] 연락저자 : 최우용 교수, 604-714 부산광역시 사하구 하단동 동아대학교 산업경영공학과 Tel : 051-200-7696, Fax : 051-200-7697,

E-mail : wychoi77@dau.ac.kr

2015년 2월 9일 접수; 2015년 3월 13일 수정본 접수; 2015년 3월 13일 게재 확정.

에 따르면 데이터 전송버퍼에 전송할 데이터가 없는 노드는 데이터 전송 시도를 하지 않으나 PCF에 따르면 전송버퍼에 전송할 데이터가 없는 노드도 AP에 의하여 데이터 전송기회가 주어진다.

DCF를 통하여 무선자원은 분산제어방법을 사용하여 할당 되는데 IEEE 802.11 무선랜 내의 각 노드는 독립적으로 무선채널의 상태를 파악하고 백오프 알고리즘(backoff algorithm)을 수행하여 자신의 데이터 전송시점을 결정한다. DCF에 따르면 IEEE 802.11 무선랜 내의 두 개 이상의 노드가 자신들의 데이터 전송시점을 동일하게 설정하여 데이터를 동시에 전송할 수가 있는데 이러한 전송충돌이 발생할 경우 데이터 전송에 참가한 어떠한 노드도 성공적으로 데이터를 전송할 수 없게 된다. 따라서 DCF를 통하여 각 노드가 자신의 데이터 전송시점을 결정할 경우 전송할 데이터를 가지고 있는 활성 노드가 증가할수록 IEEE 802.11 무선랜의 MAC 성능은 전송충돌로 인하여 나빠진다. 그리고 DCF의 백오프 알고리즘을 통하여 각 노드는 자신의 데이터 전송시점까지 기다려야 하는 백오프 대기시간을 계산하는데 백오프 대기시간은 전송충돌이 발생할 때마다 증가한다. 이러한 이유로 DCF를 IEEE 802.11 무선랜의 MAC 프로토콜로써 사용할 경우 전송할 데이터를 가지고 있는 활성 노드가 증가할수록 IEEE 802.11 무선랜의 MAC 성능은 나빠진다.

PCF를 통하여 무선자원은 중앙제어방법을 사용하여 할당 되는데 AP는 각 노드의 전송시점을 결정하여 각 노드에게 폴링 프레임(polling frame)으로 전송시점을 알려준다. AP는 각 노드에게 공평하게 데이터 전송기회를 부여하기 위하여 라운드 로빈 방식으로 각 노드에게 데이터 전송기회를 부여한다. 만약 AP로부터 폴링 프레임을 수신한 노드가 자신의 전송버퍼에 전송할 데이터를 가지지 않은 경우 널 프레임(null frame)을 AP에 전송하여 자신이 전송할 데이터를 현재 가지고 있지 않다는 사실을 AP에 통보한다. 따라서 IEEE 802.11 무선랜 내에 이러한 전송할 데이터를 가지지 않는 비활성 노드가 증가할수록 불필요한 폴링 프레임과 널 프레임의 전송으로 인하여 IEEE 802.11 무선랜의 MAC 성능은 나빠진다. 이상의 DCF와 PCF의 차이점을 표로써 정리하면 <Table 1>과 같다.

DCF와 PCF의 MAC 성능의 차이점을 이용하여 IEEE 802.11 무선랜의 전체적인 MAC 성능을 향상시키기 위하여 무선랜의 상태에 따라서 DCF와 PCF를 선택적으로 사용하는 방법을 Goliya(2003), Young, et al.(2006) 그리고 Choi(2011)에서 연구하였다. Goliya(2003)에서는 무선랜 내의 활성 노드의 개수에 따라서 DCF와 PCF를 선택적으로 사용하는 방법을 제안하였

으며 Young et al.(2006)에서는 활성 노드의 수와 연관된 전송 횟수, 전송충돌 횟수 등에 따라서 DCF와 PCF를 선택적으로 사용하는 방법을 연구하였다. 그리고 Choi(2011)에서는 DCF와 PCF를 각각 주기적으로 일정시간 동안 IEEE 802.11 무선랜의 MAC 프로토콜로 사용하고 그 MAC 성능을 측정하여 더 높은 MAC 성능을 가지는 프로토콜을 선택적으로 사용함으로써 MAC 성능을 향상시키고자 하였다. Siwamogsatham(2008)에서는 DCF와 PCF의 문제점 해결을 위하여 AP가 각 활성 노드에게 데이터 전송시 사용할 적절한 백오프 대기시간을 알려주어 가능하면 최대한 전송충돌이 발생하지 않도록 하였다. 그러나 AP가 실시간으로 각 노드의 활성 유무를 알기 어렵기 때문에 AP가 각 노드를 위하여 계산한 백오프 대기시간이 각 노드가 데이터를 전송하는 시점에서 효과적이지 않을 가능성이 존재하므로 무선랜의 실시간 트래픽 상태를 고려한 새로운 MAC 프로토콜의 개발이 필요하다.

IEEE 802.11 무선랜 내의 n 개의 노드 중에서 활성 노드의 개수가 1에 가깝거나 n 에 가까운 경우 DCF와 PCF 프로토콜의 성능 차이가 분명하기 때문에 DCF와 PCF 중 우수한 MAC 성능을 가지는 프로토콜을 선택적으로 사용하는 것이 MAC 성능 측면에서 많은 이점을 가진다. 그러나 무선랜 내의 n 개의 노드 중에서 활성 노드의 개수가 1에 가깝거나 n 에 가깝지 않고 중간 영역에 존재하는 경우 이러한 MAC 성능 상의 이점은 줄어들어 있는데 이러한 점을 보완하기 위하여 DCF와 PCF의 장점을 결합한 새로운 MAC 프로토콜을 개발할 필요가 있다.

본 논문에서는 IEEE 802.11 무선랜에서 전송충돌과 불필요한 폴링 프레임과 널 프레임의 전송으로 인한 MAC 성능 저하 문제를 효과적으로 해결하기 위하여 DCF와 PCF를 결합한 하이브리드 MAC 프로토콜을 제안하고자 한다. IEEE 802.11 무선랜 내의 노드를 일반적으로 여러 개의 클러스터로 나누고 각 클러스터별로 별도의 충돌 도메인을 구성하며 망의 실시간 상태에 따라서 무선랜을 구성하는 클러스터의 개수를 조절하고자 한다. 만약 IEEE 802.11 무선랜을 구성하는 클러스터가 한 개이면 본 논문에서 제안하는 하이브리드 MAC 프로토콜은 DCF와 동일하며 무선랜 내의 각각의 노드가 별도의 클러스터를 구성하면 본 논문에서 제안하는 하이브리드 MAC 프로토콜은 PCF와 동일하다. 무선랜의 실시간 트래픽 상태에 따라서 무선랜을 구성하는 클러스터의 개수를 조절하여 DCF와 PCF를 사용하는데 따른 전송충돌과 불필요한 폴링 프레임과 널 프레임의 전송문제를 효과적으로 해결할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 다음 장에서는 DCF와 PCF

Table 1. Differences of DCF and PCF

	DCF	PCF
Control Method	Distributed Control Method	Centralized Control Method
Performance	Higher Performance with Smaller Number of Active Nodes	Higher Performance with Larger Number of Active Nodes

를 결합한 새로운 하이브리드 MAC 프로토콜을 제안한다. 제 3장에서는 제안한 하이브리드 MAC 프로토콜에 의하여 IEEE 802.11 무선랜의 MAC 성능이 향상될 수 있음을 실험 결과로써 입증한다. 마지막으로 제 4장에서 결론을 맺는다.

2. 하이브리드 MAC 프로토콜

본 장에서 제안하는 하이브리드 MAC 프로토콜은 DCF와 PCF를 기반으로 개발되었는데 DCF와 PCF에 관한 자세한 설명은 IEEE Std 802.11(1997)에 있다. 본 논문에서는 IEEE 802.11 무선랜의 인프라스트럭처를 고려하는데 이 경우 무선랜 내의 모든 노드는 AP를 통하여 데이터를 전송하므로 AP는 자신이 노드로 전송한 데이터 프레임 중에서 노드로부터 ACK 프레임을 수신한 데이터 프레임 내의 페이로드(payload)의 비트 수와 자신이 노드로부터 성공적으로 수신한 데이터 프레임 내의 페이로드의 비트 수를 계산함으로써 무선랜의 쓰루풋을 측정할 수 있다(Choi, 2011).

IEEE 802.11 무선랜에서는 CFP(Contention Free Period)와 CP(Contention Period)가 시간 상에서 반복적으로 나타나며 CFP에서는 PCF가 MAC 프로토콜로 사용되며 CP에서는 DCF가 사용된다. 본 논문에서는 무선랜 내의 n 개의 노드를 m 개의 가능한 한 동일한 크기의 클러스터 C_1, C_2, \dots, C_m 으로 나누고 <Figure 1>과 같이 CP를 동일한 길이의 CP_1, CP_2, \dots, CP_m 으로 나누어 각 클러스터 i 를 별도의 독립된 시간영역인 CP_i 에 할당하여 DCF 프로토콜을 MAC 프로토콜로 사용 시 각 클러스터 별로 별도의 충돌 도메인을 구성하고자 한다. 만약 $m = 1$ 이면 CP에서 사용되는 MAC 프로토콜은 DCF와 동일하며 $m = n$ 이면 각 노드가 별도의 충돌 도메인을 구성하는 경우인데 이 경우 CP에서도 PCF가 MAC 프로토콜로 사용된다. 무선랜 내의 n 개의 노드를 m 개의 클러스터로 나눌 때 직전 repetition interval에서 데이터를 전송한 노드를 기준으로 활성 노드를 파악하여 가능하면 활성 노드가 m 개의 클러스터에 골고루 배치되도록 한다.

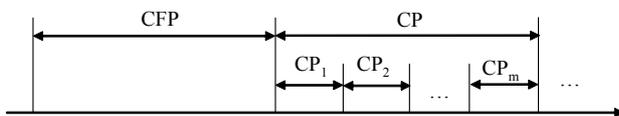


Figure 1. Repetition interval structure

본 장에서 제안하는 하이브리드 MAC 프로토콜을 위하여 CFP 내에서 AP가 각 노드에 전송하는 폴링 프레임에 클러스터 번호가 piggyback 되도록 폴링 프레임의 포맷을 변경할 필요가 있다. CFP 내에서 각 노드는 AP로부터 폴링 프레임을 수신할 때 폴링 프레임 내의 클러스터 번호를 자신의 새로운 클러스터 번호로 인식할 필요가 있다. 그리고 CP 내에서 각 CP_i 의 시작 시점에 AP는 announcement 프레임을 방송함으로써 클

러스터 i 를 위한 CP_i 가 시작됨을 알릴 필요가 있다.

IEEE 802.11 무선랜 내의 n 개의 노드를 m 개의 클러스터로 나눌 때 m 이 커지면 하나의 클러스터에 속한 노드의 개수가 작아지는데 그러면 클러스터 내의 노드 간의 전송충돌이 발생할 확률은 작아지는 반면 클러스터에 속한 어떤 노드도 전송할 데이터가 없으므로 인하여 클러스터에 할당된 CP 내의 시간영역이 아무런 데이터 전송이 이루어지지 않고 낭비될 가능성이 증가한다. 그리고 무선랜 내의 n 개의 노드를 m 개의 클러스터로 나눌 때 m 이 작아지면 하나의 클러스터에 속한 노드의 개수가 커지는데 그러면 클러스터에 속한 어떤 노드도 전송할 데이터가 없으므로 인하여 클러스터에 할당된 CP 내의 시간영역이 아무런 데이터 전송이 이루어지지 않고 낭비될 가능성은 작아지지만 클러스터 내의 노드 간의 전송충돌이 발생할 확률은 커진다.

클러스터의 개수 m 의 변화에 따른 노드 간의 전송충돌로 인한 bandwidth 손실과 데이터 전송시도가 없으므로 인한 bandwidth 손실 간의 tradeoff를 고려하여 IEEE 802.11 무선랜의 성능이 최대가 되도록 m 을 선정할 필요가 있다. 이를 위하여 본 논문에서는 m 을 1씩 변화시켜가며 무선랜의 쓰루풋을 AP가 주기적으로 측정하고 무선랜의 성능이 증가되는 방향으로 m 을 변화시킴으로써 무선랜의 상태를 고려한 최적의 m 이 사용되도록 하고자 한다. AP는 먼저 $m = 1$ 일 경우와 $m = 2$ 일 경우의 무선랜의 쓰루풋을 CP를 X 시간 동안 운영하여 측정하고 더 좋은 성능을 가지는 m 을 1과 2 중에서 선택하고 CP를 Y (일반적으로 $> X$) 시간 동안 운영하여 무선랜의 쓰루풋을 다시 측정한다. 그리고 현재 선택된 m 을 1만큼 랜덤하게 증가 혹은 감소시키고 CP를 X 시간 동안 운영하여 무선랜의 성능을 측정하고 최근의 두 개의 무선랜의 쓰루풋의 결과를 바탕으로 더 좋은 성능을 가지는 m 을 선택하고 다시 CP를 Y 시간 동안 운영하여 무선랜의 쓰루풋을 측정한다. 이와 같은 방법으로 AP는 최근의 두 개의 무선랜의 쓰루풋의 결과를 바탕으로 계속적으로 더 좋은 성능을 가지는 m 을 선택함으로써 무선랜의 상태에 따른 적절한 m 이 사용되도록 한다. 각 연속된 CP 간에는 CFP가 Z 시간 동안 존재하는데 이 동안에는 AP가 각 노드에게 폴링 프레임을 전송하면서 새로운 클러스터 번호를 알려준다. 그럼, IEEE 802.11 무선랜의 상태에 따라서 클러스터의 개수 m 을 적절하게 변화시키는 알고리즘을 다음과 같이 제안한다.

ALGORITHM

STEP 0 : AP는 $m = 1$ 일 경우와 $m = 2$ 일 경우에 대하여 각각 CP를 X 시간 동안 운영하고 그 쓰루풋을 측정하여 그 측정결과를 각각 T_0 와 T_1 에 저장하고 사용된 두 개의 m 의 값을 $m_0 = 1$ 과 $m_1 = 2$ 로 저장한다.

STEP 1 : 만약 $T_0 > T_1$ 이면 $m = m_0$ 로 하고 CP를 Y 시간 동안 운영하여 무선랜의 쓰루풋 측정결과를 T_0 에 저장하고 사용된 m 을 m_0 에 저장한다.

만약 $T_0 < T_1$ 이면 $m = m_1$ 로 하고 CP를 Y 시간 동안 운

영하여 무선랜의 쓰루풋 측정결과를 T_0 에 저장하고 사용된 m 을 m_0 에 저장한다.

STEP 2 : $m = n$ 이면 m 을 1만큼 감소시키고 $m = 1$ 이면 m 을 1만큼 증가시킨다. 그리고 그 이외의 경우 m 을 랜덤하게 1씩 증가 혹은 감소시킨다. 그리고 변화된 m 을 적용하여 CP를 X 시간 동안 운영하고 그 쓰루풋 측정결과를 T_1 에 저장하고 사용된 m 을 m_1 에 저장한다.
STEP 1로 돌아간다.

앞의 알고리즘에서 STEP 0에서는 무선랜 내의 n 개의 노드를 $m = 1$ 개와 $m = 2$ 개의 클러스터로 구성하여 CP에서의 MAC 성능을 측정한다. STEP 1에서는 최근에 측정된 두 개의 MAC 성능 결과를 비교하여 두 개 중 더 나은 MAC 성능을 가지는 클러스터의 개수 m 을 사용하여 무선랜 내의 n 개의 노드를 나누고 다시 MAC 성능을 측정한다. STEP 2에서는 현재 사용 중인 m 의 값을 랜덤하게 1씩 증가 혹은 감소시키고 무선랜 내의 n 개의 노드를 m 개의 클러스터로 구성하여 CP에서의 MAC 성능을 측정하고 다시 STEP 1로 돌아가도록 하여 계속적으로 m 의 값을 무선랜의 상태에 따라서 변화시킴으로써 무선랜의 성능을 최적화시키도록 한다.

IEEE 802.11 무선랜의 각 노드에는 DCF와 PCF 프로토콜이 구축될 수 있으나 이 중 DCF는 IEEE 802.11 무선랜의 규격외인 상 필수 구현 프로토콜이지만 PCF는 필수 구현 프로토콜이 아니다. 그러나 본 논문에서는 모든 노드에 DCF와 PCF 프로토콜이 구축되어 있다고 가정한다.

3. 시뮬레이션 결과

컴퓨터 시뮬레이션을 위하여 IEEE 802.11a 무선랜을 가정하며 한 개의 AP에 $n = 100$ 개의 노드가 무선으로 연결되어 각 노드는 자신의 전송버퍼에 전송할 데이터 프레임이 존재하는 경우 데이터 프레임을 AP에 전송하기 위하여 계속적으로 시도하며 AP는 전송할 데이터 프레임을 가지지 않는다고 가정한다. 각 노드의 데이터 프레임 전송률은 54Mbps이며 AP가 각 노드로부터 데이터 프레임을 성공적으로 수신하였을 경우 ACK 프레임을 basic rate의 최대치인 24Mbps로 전송한다. 각 노드가 DCF 프로토콜을 사용하여 데이터 프레임을 전송할 때 은닉 노드 문제(hidden node problem)는 존재하지 않으며 따라서 RTS(Request to Send) 프레임과 CTS(Clear to Send) 프레임의 전송은 불필요하다고 가정한다. 각 데이터 프레임의 전송 에러 발생 확률은 0.1%이며 ACK 프레임의 전송 에러는 발생하지 않는다고 가정한다. 그리고 각 데이터 프레임 내의 페이로드(payload)의 길이 $k = 2,000$ bits 혹은 $4,000$ bits라고 가정한다. 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램은 C코드로 작성되었으며 컴퓨터 시뮬레이션을 위하여 사용한 그 밖의 파라미터의 값은 <Table 2>와 같다.

AP는 총 5가지의 방식으로 CFP와 CP를 할당하는데 첫 번째

Table 2. Simulation parameters

Parameter	Value
SIFS	16ms
PIFS	25ms
DIFS	34ms
Time Slot	9ms
Backoff Max. Stage	7
PHY Header Trans. Length	24ms

방식은 AP가 CP만을 할당하며 각 노드는 DCF 프로토콜을 사용하여 AP로 데이터 프레임을 전송하도록 하는 방식이다. 두 번째 방식은 AP가 CFP만을 할당하며 각 노드는 PCF 프로토콜을 사용하여 AP로 데이터 프레임을 전송하도록 하는 방식이다. 세 번째 방식은 AP가 각 5초 길이의 CFP와 CP를 번갈아가며 할당하며 각 노드는 CFP에서는 PCF 프로토콜을 사용하여 AP로 데이터 프레임을 전송하도록 하며 CP에서는 DCF 프로토콜을 사용하여 AP로 데이터 프레임을 전송하도록 하는 방식이다. 네 번째 방식은 $U = 500$ ms, $V = 5$ seconds로 하여 Choi(2011)에서 제안한 방식을 사용하여 각 노드로 하여금 DCF와 PCF 프로토콜 중 하나의 프로토콜을 선택적으로 사용하여 데이터 프레임을 전송하도록 하는 방식이다. 마지막으로 다섯 번째 방식은 $X = 500$ ms, $Y = 5$ seconds, $Z = 500$ ms로 하여 본 논문의 제 2장에서 제안한 방식으로 각 노드로 하여금 데이터 프레임을 전송하도록 하는 방식이다.

<Figure 2>와 <Figure 3>에는 $n = 100$ 이고 $k = 2,000$ bits, $4,000$ bits의 경우에 대하여 5가지 방식의 노드 당 MAC 쓰루풋 측정 결과가 10가지의 활성 노드의 비율(10%, 20%, ..., 100%)에 대하여 나타나 있다. 각 측정 결과의 도출을 위하여 각 활성 노드에는 컴퓨터 시뮬레이션 초기에 10,000개 이상의 데이터 프레임이 전송버퍼에 도착되도록 하였으며 각 노드의 전송버퍼에 있는 모든 데이터 프레임이 성공적으로 전송될 때까지 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

성능 비교 분석 결과 $k = 2,000$ bits일 때 활성 노드의 비율이 50%에 가까워지면서 DCF와 PCF의 성능 차이가 작아지고 따라서 DCF와 PCF 프로토콜을 번갈아가면서 사용하는 것에 비한 Choi(2011)의 방법에 의한 성능 향상 효과가 미미해진다. 마찬가지로 $k = 4,000$ bits일 때 활성 노드의 비율이 40%에 가까워지면서 DCF와 PCF의 성능 차이가 작아지고 따라서 Choi(2011)의 방법에 의한 성능 향상 효과가 미미해진다. 본 논문의 제 2장에서 제안한 방식은 $k = 2,000$ bits이고 활성 노드의 비율이 50%일 때 Choi(2011)의 방법에 비하여 약 14%의 성능 향상을 가져오며 $k = 4,000$ bits이고 활성 노드의 비율이 40%일 때 Choi(2011)의 방법에 비하여 약 16%의 성능 향상을 가져온다. 활성 노드의 비율의 중간 영역을(30%, 40%, 50%)로 정의하면 본 논문의 제 2장에서 제안한 방식은 중간 영역에서 평균적으로 약 13%의 MAC 성능 향상을 가져온다.

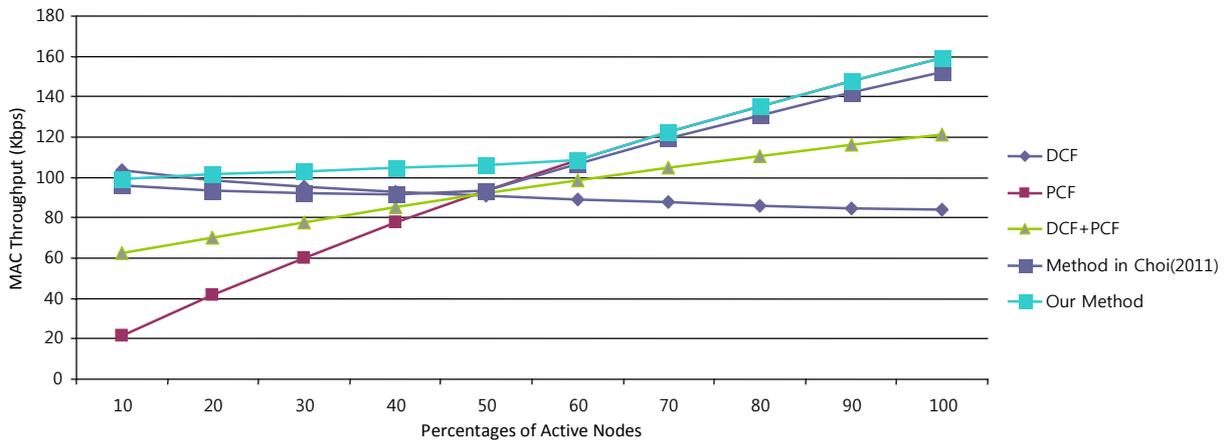


Figure 2. MAC throughput results when $k = 2,000$ bits

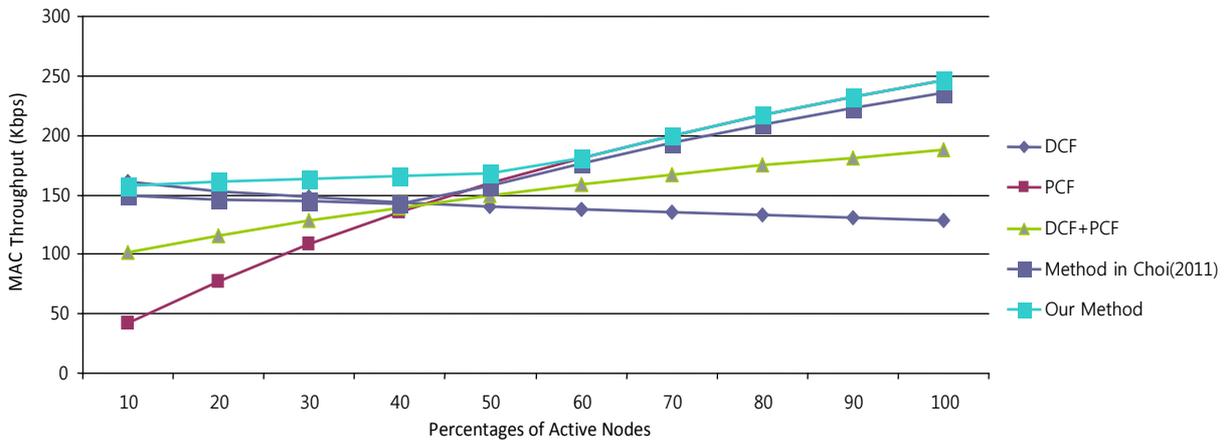


Figure 3. MAC throughput results when $k = 4,000$ bits

4. 결론

본 논문에서는 IEEE 802.11 무선랜의 기본적인 MAC 프로토콜인 DCF와 PCF 프로토콜의 장점을 결합한 새로운 하이브리드 MAC 프로토콜을 제안하였다. 제안한 하이브리드 MAC 프로토콜은 활성 노드의 비율이 중간 영역에 존재하는 경우 특히 효과적이며 실험 결과를 통하여 제안한 하이브리드 MAC 프로토콜이 활성 노드의 비율의 중간 영역에서 MAC 성능을 향상시킨다는 것을 보였다.

참고 문헌

Choi, W.-Y. (2011), MAC Performance Improvement by Selective Use of DCF and PCF Protocols for IEEE 802.11 Wireless LANs, *Journal of Korean Institute of Industrial Engineers*, 37(2), 89-95.

Choi, W.-Y. (2014), Optimal Frame Aggregation Level for Connectivity-Based Multipolling Protocol in IEEE 802.11 Wireless LANs, *Journal of Korean Institute of Industrial Engineers*, 40(5), 520-525.

Goliya, A. (2003), *Dynamic Adaptation of DCF and PCF Mode of IEEE 802.11 WLAN*, Master Thesis, Indian Institute of Technology.

IEEE Std 802.11 (1997), Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.

IEEE Std 802.11e (2005), Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer Specifications : Medium Access Control (MAC) Quality of Service (QoS) Enhancements.

IEEE Std 802.11n (2009), Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications : Enhancements for Higher Throughput.

Siwamogsatham, S. (2008), A Hybrid Coordination Function Scheme for WLANs, *International Journal of Hybrid Information Technology*, 1(3), 33-45.

Young, A. et al. (2006), Method and System for Improving Throughput over Wireless Local Area Networks with Mode Switching, United States Patent, Patent No. 6990116.