
OFDMA 시스템의 ARQ기반 멀티캐스트 방법

김 성 원*

ARQ-based Multicast for OFDMA Systems

Sung Won Kim*

요 약

한 노드에서 다수의 노드로 데이터를 전달하는 one-hop 통신에 사용되는 매체접속제어(MAC)는 멀티캐스트 기반의 데이터 통신을 사용하는 것이 매우 효율적이다. 유니캐스트와 달리 멀티캐스트에서는 모든 노드들과의 통신에서 우수한 품질을 얻기 위해서는 여러 노드들과의 서로 다른 무선 채널환경과 노드 이동성에 따른 무선 채널환경 변화에 대응할 수 있어야 한다. 하지만, IEEE 802.11에서는 다수개의 노드들과 RTS, CTS, ACK을 교환하는 방법이 정의되어 있지 않아서 신뢰성 있는 멀티캐스트를 지원하지 않고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 몇 가지 MAC 계층 프로토콜들이 제안되었다. 하지만, 신뢰성 있는 멀티캐스트를 구현하기 위해서는 추가적인 오버헤드가 필요하며, 이 오버헤드로 인해서 시스템 성능이 저하하게 된다. 본 논문에서는 OFDMA 시스템에서 신뢰성 있는 멀티캐스트를 구현하기 위해 필요한 오버헤드를 줄이기 위하여 계층통합적(cross-layer) 설계기법을 제안한다. 제안된 오버헤드와 시스템 성능간의 관계를 분석하는 방법도 제안한다.

ABSTRACT

Multicast-based data communication is an efficient communication scheme in wireless networks where the Media Access Control (MAC) layer is based on one-hop broadcast from one source to multiple receivers. Compared with unicast, multicast over wireless channel should handle varying channel conditions of multiple users and user mobility to achieve good quality for all users. However, IEEE 802.11 does not support reliable multicast due to its inability to exchange RTS/CTS and ACK with multiple recipients. Thus, several MAC layer protocols have been proposed to provide reliable multicast. For the reliable multicast, an additional overhead is introduced and it degrades the system performance. In this paper, we propose a cross-layer design to reduce the control overhead for reliable multicast in OFDMA systems. We present an analytical formulation of the system throughput associated with the overhead.

키워드

multicast; MAC; cross-layer; OFDMA

I. 서 론

멀티캐스트(multicast)란 단일한 주소로 전달될 수 있는 다수개의 노드들에게 데이터를 한 번에 전송하는 방법이다. 유선에서의 멀티캐스트와 달리 무선에서의 멀

티캐스트는 위치에 상관없이 한 번의 전송으로 다수의 노드들에게 공통의 정보를 전달할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점은 제한된 무선 자원의 낭비를 줄일 수 있게 한다. 따라서 무선 멀티캐스트는 그룹 통신에서 대역폭을 효율적으로 사용할 수 있게 해 준다. 이러한 특징으로

인해서 원격 회의, 재난 구호, 전시 통신 등과 같이 특정 목적의 그룹통신에 멀티캐스트가 많이 적용되고 있다 [1]. 이러한 다양한 그룹통신 응용분야에서는 정확한 데이터 전달과 제한 시간 내에 데이터가 전달되어야 하는 요구 조건이 있다.

멀티캐스트를 구현하기 위해서 공통적으로 사용되는 설계방법은 네트워크 계층에서 구현하는 것이다 [2][3]. 이러한 프로토콜들은 IEEE 802.11 [4]의 매체접속 제어(MAC)에 기반하고 있다. 이처럼 네트워크 계층에서만 설계된 멀티캐스트는 무선 네트워크 환경에서 신뢰성을 구현하기 어려운 문제가 있다. 트리기반(tree-based) 프로토콜에서는 트리내의 한 노드가 멀티캐스트 패킷을 전달받지 못하면, 그 하위의 모든 자식 노드들이 패킷을 전달받지 못하게 된다. 반면, 그물망기반(mesh-based) 프로토콜은 그물망을 통하여 멀티캐스트 패킷을 전달하므로 각 노드들은 여러 개의 상위 노드들로부터 패킷을 전달받게 되므로 트리기반 프로토콜의 이러한 문제를 해결할 수 있다. 그러나 그물망 기반 프로토콜은 중복된 패킷전달로 인하여 대역폭 사용이 비효율적이며, 중복 수신된 패킷을 구별할 수 있는 방법이 있어야 한다.

프로토콜 스택의 기능적 측면에서 보면, 무선 네트워크에서 신뢰성을 제공하기에 적절한 계층은 MAC 계층이다. 유선 네트워크에서는 에러가 거의 없는 링크(link)를 사용하여 TCP와 같이 점대점 간의 신뢰성을 구현할 수 있다. 하지만 무선 네트워크에서는 에러가 많은 링크를 사용하므로 각 홉(hop)에서 에러 복구를 실행하여야 한다. 무선 네트워크에서 MAC 계층에 이러한 에러 복구 기능을 추가하면 유니캐스트(unicast)의 성능을 향상시킬 수 있다. 멀티캐스트 통신에서도 이러한 에러 복구기능으로 성능을 향상시킬 수 있다.

무선 네트워크에서 많이 사용되는 802.11 표준에서 정의된 MAC 계층은 RTS, CTS, DATA, ACK을 사용하여 에러 복구기능을 제공하지만, 유니캐스트에서만 정의되고 있으며 멀티캐스트에서는 이러한 신뢰성 제공 방법이 정의되어 있지 않다. 즉, 이 표준에서는 멀티캐스트나 브로드캐스트(broadcast) 데이터를 전송할 경우에는 에러 복구과정 없이 한 번의 전송으로 끝나게 된다. 최근에는 이러한 문제를 해결하기 위하여 MAC 계층에서 신뢰성을 제공하는 방법이 많은 관심을 받고 있다. 신뢰성 있는 멀티캐스트와 관련하여 FEC (Forward

Error Correction)와 ARQ(Automatic Repeat reQuest)[5]-[8]의 두가지 기본적인 방법이 존재하고 있다. FEC에서는 에러복구를 위하여 추가적인 정보가 전송되며 수신 노드에서 전송해야 할 피드백정보는 필요하지 않다. 이러한 FEC의 장점은 사용되는 노드수가 증가하여도 적용이 가능하다는 것이다. FEC의 단점으로는 부호화와 복호화를 위한 추가 오버헤드가 필요하며 송신 노드는 데이터가 신뢰성 있게 전달되었는지를 확인할 수 없다. ARQ에서는 에러 복구를 위하여 재전송 기법이 사용되며 수신 노드는 피드백정보를 제공한다. ARQ의 장점은 완전한 신뢰성을 제공한다는 점이다. ARQ의 단점으로는 사용되는 노드수가 증가할 경우, 피드백정보도 증가하여 효율성이 떨어지는 것이다. 이처럼 신뢰성을 위한 재전송 기법의 사용은 과도한 오버헤드를 발생시켜서 혼잡(congestion)을 발생시키며, 심한 경우에는 입력 데이터양의 증가로 시스템이 정지하는 문제도 발생하게 된다.

본 논문에서는 OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access)가 사용되는 무선 애드혹(ad hoc) 네트워크에서 ARQ를 사용하는 신뢰성있는 멀티캐스트를 구현하는 방법을 제안한다. 이러한 ARQ 방법에서 발생할 수 있는 과도한 오버헤드의 문제를 해결하기 위하여 MAC 계층과 PHY 계층사이의 계층통합적 설계 기법[9]-[11]을 적용한다. 즉, MAC 계층의 오버헤드를 PHY 계층의 OFDMA 사용으로 최소화 하는 것이다. 또한, 제안된 멀티캐스트 방법에 대한 수학적 분석모델을 제시한다. 성능평가를 통하여 제안된 방법이 제안된 오버헤드를 가지고도 우수한 신뢰성을 구현할 수 있음을 보인다.

II. 관련 연구

ARQ 기반의 멀티캐스트 프로토콜들은 IEEE 802.11 DCF(Distributed Coordinatin Function)의 RTS/CTS/DATA/ACK 방법을 확장하거나 변형하여 신뢰성을 제공하고 있다. DCF에서 RTS와 CTS는 무선 채널을 예약하기 위하여 사용하며, ACK은 DATA 패킷이 정확하게 수신되었음을 알리기 위하여 사용된다.

멀티캐스트에서 신뢰성을 위하여 RTS/CTS나 ACK을 사용하게 되면, 다수의 노드들에서 동시에 전송된

CTS나 ACK 패킷들이 충돌하는 문제가 발생한다. LBP (Leader Based Protocol)[8]에서는 수신 노드들에 의해서 선택된 하나의 리더(leader)가 CTS와 ACK을 송신 노드에게 보내게 되어, CTS나 ACK이 충돌하는 문제를 해결하고 있다. LBP가 복수개의 노드들이 CTS나 ACK을 전송하는 문제는 해결하였으나, 수신노드들 중에서 리더를 선택하고 유지하는 방법은 제안되지 않고 있다. 또한, 리더이외의 노드들 중 일부가 멀티캐스트 패킷을 수신하지 못했을 경우, 손상된 패킷을 복구하지 못하는 문제가 있다.

ARQ 기반의 신뢰성 있는 멀티캐스트를 구현하기 위해서 복수개의 RTS, CTS, ACK을 사용하는 방법으로 BMW(Broadcast Medium Window)[12]와 BMMM(Batch Mode Multicast MAC)[13]이 제안되었다. BMW에서는 one-hop 거리에 있는 각각의 이웃노드들과 RTS/CTS/DATA/ACK을 사용하는 유니캐스트를 사용하여 신뢰성을 구현한다. 하지만 BMW는 경쟁구간이 존재하며, 이로 인해서 DATA 패킷의 지연시간이 매우 길어지는 문제가 있다. BMMM에서는 경쟁구간으로 인해서 지연시간이 길어지는 문제를 해결하기 위하여 유니캐스트의 경쟁구간을 제거하였다. 하지만, 노드수가 증가할 경우 두 방법 모두 RTS, CTS, ACK과 같은 오버헤드가 급격히 증가하는 문제를 가지고 있다.

ARQ 기반의 데이터 전송에 필요한 오버헤드를 줄이는 방법으로 MMP(Multicast aware MAC Protocol)[6]가 제안되었다. 송신노드는 하나의 MRTS (Multicast RTS)를 전송한 후, 모든 수신노드에서 복수개의 CTS가 수신되기를 기다린다. 복수개의 CTS가 모두 수신된 후, 송신노드는 DATA 패킷을 전송한 후, 모든 수신노드에서 복수개의 ACK이 수신되기를 기다린다. 이러한 복수개의 CTS와 ACK이 충돌하는 것을 방지하기 위하여, 수신노드들은 미리 정해진 순서에 따라서 CTS와 ACK을 보내게 된다. MMP에서는 복수개의 RTS를 하나의 RTS로 변경하여 오버헤드를 줄이기는 하였으나, 여전히 복수개의 CTS와 ACK로 인한 오버헤드가 존재하고 있다. 이러한 오버헤드는 노드수가 증가하면 따라서 증가하게 되어, 시스템 성능을 저하시키는 문제를 가지고 있다.

III. 제안된 멀티캐스트 기법

3.1 제어패킷

현재까지 제안된 무선 네트워크에서 사용되는 신뢰성 있는 멀티캐스트 기법들은 심각한 오버헤드 증가로 인한 시스템 성능저하의 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 계층 간 통합설계기법을 적용한 신뢰성 있는 멀티캐스트 방법을 제안한다. 제안된 방법은 오버헤드를 줄이기 위하여 OFDMA 기법을 사용한다. OFDMA에서 각 서브캐리어(sub-carrier)는 서로 직교(orthogonal)하며 OFDM 심벌(symbol)을 전송한다[14]-[16]. 그림 1은 OFDMA의 주파수 영역 할당의 예를 보여준다.

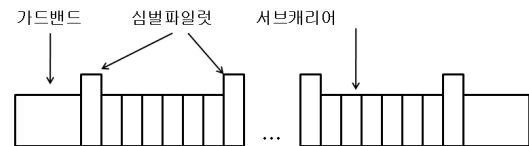


그림 1. OFDMA의 서브채널 할당 예
Fig. 1 Subchannel assignment in OFDMA

제안하는 방법에서는 CTS와 ACK 패킷에 하나의 OFDM 심벌을 추가한다. 추가된 심벌에서 각 노드가 사용할 서브캐리어 위치는 사전에 미리 중복되지 않도록 할당된다. 멀티캐스트 멤버(member)노드 중 하나가 one-hop 거리에서 RTS 패킷을 수신하게 되면 CTS 패킷의 추가된 심벌에서 미리 정해진 서브캐리어 위치에 OFDM 심벌을 할당한다. 할당되는 OFDM 심벌은 1 이나 -1 중 하나로 변조된 BPSK(Binary Phase-Shift Keying) 신호가 된다. RTS 패킷이 성공적으로 수신되면 서브캐리어의 BPSK 신호를 1로 설정한다. 반대로 BPSK 신호 -1은 RTS 패킷이 제대로 수신되지 않았음을 나타내게 된다. 만약 수신 멤버노드가 RTS 패킷의 MAC 헤더를 복조하지 못하여 RTS 패킷을 인식하지 못하는 경우에는 BPSK 심벌을 생성하지 않는다. 각 멤버노드가 성공한 수신을 알리기 위해서 생성한 BPSK 심벌은 자신에게 할당된 하나의 서브캐리어에만 할당하므로 다른 서브캐리어는 비어 있게 된다. 이러한 BPSK 심벌들이 모두 모여서 하나의 CTS 패킷을 형성하게 된다. 모든 멤버노드는 RTS 패킷 수신 후, SIFS 기간 동안 기다린 후 동

시에 BPSK 심벌을 전송하게 된다. 이때 BPSK 심벌들은 서로 다른 서브캐리어에 위치하고 있으므로 충돌이 발생하지 않는다. 이렇게 생성된 CTS 패킷은 송신 노드에 전달된다. 송신 노드는 각 서브캐리어로 전달된 BPSK 심벌을 보고 RTS 패킷의 수신 성공여부를 판별하게 된다.

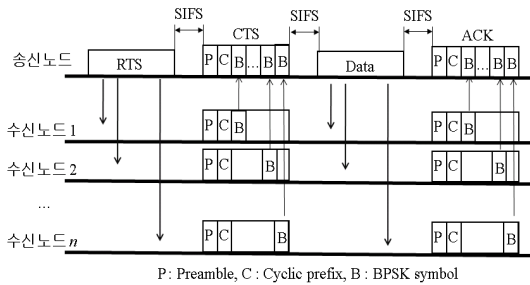


그림 2. 복수개의 OFDM 심벌 전송 예
Fig. 2 Multiple OFDM symbols transmission

제안된 기법의 동작 예는 그림 2에서 볼 수 있다. 그림에서 송신노드는 멀티캐스트 멤버노드 들인 수신노드 1 번부터 수신노드 n번까지 RTS 패킷을 멀티캐스트 한다. 모든 수신노드들은 자신에게 할당된 위치에 있는 서브캐리어에 OFDM 심벌을 전송한다. 이렇게 전송된 OFDM 심벌들은 하나의 패킷으로 합쳐져서 송신노드에 CTS 패킷으로 전달된다. 그림에서 전체적인 패킷전송 순서는 시간단위로 나타내어 졌으나, OFDM 심벌들은 주파수 단위로 표시되었다. 만약 수신노드 중 하나가 RTS 패킷을 수신하지 못한 경우에는 OFDM 심벌을 전송하지 않는다. 송신노드는 CTS 패킷을 수신한 후, 각 서브캐리어에 있는 OFDM 심벌을 판별한다. OFDM 심벌이 없거나, BPSK 심벌 -1이 있는 서브캐리어에 해당하는 수신노드는 RTS 패킷을 받지 못한 경우에 해당한다. 이러한 경우에는 RTS 패킷을 재전송하게 된다.

CTS 패킷에 있는 모든 서브캐리어가 BPSK 심벌 1을 나타내는 경우에는 RTS 패킷이 모두 정확히 수신된 경우에 해당하므로, 송신노드는 멀티캐스트 데이터 패킷을 전송하게 된다. ACK 패킷의 생성은 CTS 패킷 생성 방법과 동일하다. 즉, 송신노드가 전송한 데이터 패킷을 정확히 수신하면, 수신노드는 자신에게 할당된 서브캐리어에 OFDM 심벌을 전송하게 된다. ACK 패킷이 생성되는 예가 그림 2에 설명되어 있다. 제안된 기법의

OFDM 심벌은 기존에 제안되었던 기법들(BMW, BMMM, MMP 등)이 사용하는 CTS나 ACK와 같은 역할을 한다. 즉, 제안된 기법에서는 복수개의 CTS와 ACK의 크기를 OFDM 심벌을 사용하여 크기를 줄인 것이다.

모든 멤버노드들 간의 시간 동기화가 완전하게 이루어지지 않고, 전파지연시간도 틀리므로 여러개의 OFDM 심벌이 하나의 CTS나 ACK 패킷으로 합쳐질 때 시간오차(time offset)문제가 발생하게 된다. 이러한 시간오차 문제는 cyclic prefix를 지연 확산분포(delay spread profile)보다 길게 하여 해결할 수 있다[14]-[16].

3.2 서브캐리어 할당 기법

서브캐리어 할당은 멀티캐스트 리더(ML)에 의해서 관리된다. 멀티캐스트 그룹은 하나의 ML을 선별한다. 어떤 노드가 멀티캐스트 그룹에 가입하고자 할 때는 MJREQ(Multicast Join REQuest) 패킷을 브로드캐스트 한다. 이렇게 전송된 MJREQ를 ML이 수신하게 되면, 요청한 노드에게 비어있는 서브캐리어중 하나를 할당해 준다. 할당된 서브캐리어 정보를 요청한 노드에게 알려주기 위하여 ML은 MJACK(Multicast Join ACKnowledge) 패킷을 전송한다. MJACK 패킷 내부에는 할당된 서브캐리어에 대한 정보가 포함되어 있다. 이때, 같은 멀티캐스트 그룹 내에서 각 노드에게 할당되는 서브캐리어는 다른 노드에게 할당된 서브캐리어와 겹치지 않도록 한다.

ML이 없는 경우에는 MJACK이 전송되지 않는다. 이처럼 MJACK이 일정시간동안 전송되지 않는 경우에는, MJREQ를 전송한 노드가 해당하는 멀티캐스트 그룹의 새로운 ML이 된다.

ML이 멀티캐스트 그룹을 떠나고자 하거나 리더 역할을 그만두고자 할 때는, MLREQ(Multicast Leader REQuest) 패킷을 그룹내의 한 노드에게 전송한다. 만약 이 패킷을 받은 노드가 MLACK(Multicast Leader ACKnowledge) 패킷을 응답하면, 이 노드가 새로운 ML이 된다. 일정 시간 이후에도 MLACK 응답이 없으면, ML은 다른 노드에게 MLREQ를 전송하고 MLACK을 기다린다. 이러한 과정은 새로운 ML이 선택될 때까지 계속된다.

IV. 성능 분석

4.1 시스템 모델

현재까지 제안된 신뢰성 있는 멀티캐스트 방법 중 가장 우수한 성능을 보이는 MMP와 제안된 기법의 성능을 비교한다. MMP에서는 멀티캐스트 데이터 전송을 할 때, 복수개의 CTS와 ACK을 순차적으로 전송한다. 성능 분석을 위하여 [17]-[19]에서 제안된 방법을 사용한다.

시스템의 노드 갯수는 N 으로 한다. 최대 처리량 (throughput)을 분석하기 위하여 각 노드는 전송할 패킷이 항상 있다고 가정한다. 즉, 각 노드의 전송 큐에 패킷이 항상 있는 포화상태를 가정한다. R 개의 멤버 노드를 가진 멀티캐스트 그룹을 가정한다. 또한 채널 환경은 에러가 없는 이상적인 경우를 가정한다. 제안된 기법과 MMP간의 상대적인 성능향상 정도를 비교하므로 이러한 가정은 유효하다. 한 노드의 캐리어 센스(carrier sense) 범위에 있는 노드수는 n 으로 둔다. 캐리어 센스 범위에 있는 n 개의 노드 중에서 같은 멀티캐스트 그룹에 속한 노드수는 r 로 둔다. 이때 r 은 n 보다 작거나 같게 된다.

MAC 계층은 IEEE 802.11 규격을 따르며, 자세한 동작은 다음과 같다. 백오프(backoff) 크기는 경쟁 윈도우(W) 크기에 의해서 결정된다. 즉, W 의 초기 값은 W_{min} 으로 할당되고, $[0, W-1]$ 범위의 값 중에서 임의로 선택된 수만큼의 슬롯 시간(σ)동안 백오프하게 된다. 전송이 실패할 때마다 W 값은 두 배씩 증가하며 최댓값은 W_{max} 를 넘지 않는다. 백오프 단계를 i 로 놓으면, i 백오프 단계의 W 값은 $W_i = 2 \times W_{i-1}$ 이 된다. 이때 i 는 1에서 m 까지의 값을 가지며, W_{max} 는 $2mW_{min}$ 와 같은 값이 된다.

백오프 타임 카운터가 하나씩 감소할 때 마다 시간변수 t 의 값도 1씩 증가한다. t 와 $t+1$ 사이의 시간 간격을 카운터 타임 슬롯이라 정의한다. 채널이 사용 중인 상태로 감지되면, 백오프 타임 카운터 값은 감소를 중지하므로, 카운터 타임 슬롯이 1 감소하는 시간도 따라서 길어질 수 있다.

노드가 어떤 카운터 타임 슬롯에 패킷을 전송할 확률은 τ 로, 전송된 패킷이 충돌할 확률은 p 로 정의한다. 백오프 타임 카운터가 0이 되면 패킷이 전송되므로, 패킷 전송확률 τ 는 다음과 같다[17][18].

$$\tau = \frac{2}{1 + W_{min} + p W_{min} \sum_{j=0}^{m-1} (2p)^j} \quad (1)$$

RTS, CTS, DATA, ACK, SIFS, DIFS의 경과시간을 각각 T_{RTS} , T_{CTS} , T_{DAT} , T_{ACK} , T_{SIFS} , T_{DIFS} 로 표시한다. 데이터 패킷전송에 필요한 모든 소요시간(데이터 패킷 전송시간, 제어 패킷 전송시간, SIFS 등)을 T_{tx} 로 표시한다. 제안된 기법의 T_{tx} 는 다음과 같다.

$$T_{tx} = T_{RTS} + T_{CTS} + T_{DAT} + T_{ACK} + 3T_{SIFS} + T_{DIFS} \quad (2)$$

MMP는 r 개의 CTS와 ACK을 필요로 하므로 T_{tx} 는 다음과 같다.

$$T_{tx} = T_{RTS} + r \times (T_{CTS} + T_{ACK} + 2T_{SIFS}) + T_{DAT} + T_{SIFS} + T_{DIFS} \quad (3)$$

데이터 패킷 충돌에 의해서 낭비되는 시간도 데이터 패킷 전송 소요시간인 T_{tx} 와 같다. RTS 충돌에 의해서 낭비되는 시간은 T_{tx} 보다는 작으며, RTS와 CTS 전송시간의 합이 되며 다음과 같다.

$$T_{col} = T_{RTS} + T_{CTS} + T_{SIFS} + T_{DIFS} \quad (4)$$

4.2 상태 확률과 카운터 타임 슬롯

송신 노드를 a , 수신노드를 β 로 한다. a 의 캐리어 센스 범위에 있는 노드 중 하나를 γ 로 한다. a 가 상태 i 에 있을 확률을 P_i , 이때의 카운터 타임 슬롯 값을 T_i 로 한다.

임의의 카운터 타임 슬롯에서 a 가 전송을 하지 않을 확률은 $1 - \tau$ 가 된다. 이때, a 의 캐리어 센스 범위에 있는 다른 모든 노드들이 전송을 하지 않을 확률은 $(1 - \tau)^n$ 이 된다. 이 상태에서는 a 와 a 의 캐리어 센스 범위의 모든 노드가 전송을 하지 않으므로, a 는 σ 시간동안 전송하지 않는 상태로 있게 된다. 이러한 a 의 상태를 상태 A 로 정의한다. 이 상태 확률 P_A 와 카운터 타임 슬롯 T_A 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_A &= (1 - \tau)^n, \\ T_A &= \sigma \end{aligned} \quad (5)$$

다음 상태를 **B**로 정의하고, 상태 **B**에서는 α 는 전송을 하지 않고, α 의 캐리어 센스 범위의 노드들 중 오직 하나의 노드만 전송하는 상태를 살펴보자. 이 경우에 히든 노드(hidden node)때문에 패킷 충돌이 발생할 수 있다. α 가 카운터 타임 슬롯에서 전송하지 않을 확률은 $1-\tau$ 이다. 이때, α 의 캐리어 센스 범위의 노드들 중 하나 이상의 노드가 전송할 확률은 $1-(1-\tau)^{n-1}$ 이다. 하나 이상의 노드가 전송하는 경우, 하나의 노드만이 패킷을 전송하는 확률은 다음과 같다.

$$P_1 = \frac{(n-1)\tau(1-\tau)^{n-2}}{1-(1-\tau)^{n-1}} \quad (6)$$

상태 **B** 확률은 다음과 같다.

$$P_B = (1-\tau) [1-(1-\tau)^{n-1}] P_1 = (n-1)\tau(1-\tau)^{n-1} \quad (7)$$

α 의 송신 가능범위를 a_{TX} 로 표시한다. α 의 캐리어 센스 범위에서 a_{TX} 를 제외한 범위를 a_{CS-TX} 로 표시한다. 일반적으로 캐리어 센스 범위는 송신 가능범위보다는 크다. γ 가 a_{TX} 에 있는 경우, γ 가 전송한 RTS를 통해서 패킷 전송시간을 알 수 있다. 그러므로 패킷 전송의 성공 여부에 관계없이 카운터 타임 슬롯은 T_{TX} 가 된다. 반면, γ 가 a_{CS-TX} 에 있을 때에는, γ 가 전송한 RTS 패킷을 인식하지 못하므로 패킷 전송시간을 알지 못하게 된다. 이 경우에는 RTS충돌이 발생하는 경우의 카운터 타임 슬롯은 TRTS가 되며, 데이터 패킷 충돌이 발생하는 경우의 카운터 타임 슬롯은 T_{TX} 가 된다. RTS 충돌 횟수와 모든 충돌횟수의 비를 w 라고 하면, 상태 **B**의 카운터 타임 슬롯은 다음과 같다.

$$T_B = P_{\alpha_{TX}} T_{TX} + P_{\alpha_{CS-TX}} \{(1-p) T_{TX} + p [w T_{RTS} + (1-w) T_{TX}]\} \quad (8)$$

여기서 $P_{\alpha_{TX}}$ 와 $P_{\alpha_{CS-TX}}$ 는 각각 γ 가 a_{TX} 에 있거나 a_{CS-TX} 에 있을 확률이다. w , $P_{\alpha_{TX}}$, $P_{\alpha_{CS-TX}}$ 의 값들은 적용하는 시스템에 의해서 달라지며, 해당하는 시스템 모델의 적절한 값을 사용한다.

상태 **C**는 α 는 전송하지 않고, α 의 캐리어 센스 범위의 노드들 중 두개 이상의 노드가 전송하는 경우이다. 상태 **C** 확률은 다음과 같다.

$$P_C = (1-\tau)[1 - (1-\tau)^{n-1}] (1 - P_1) \quad (9)$$

캐리어 센스 범위에서 두개 이상의 전송이 동시에 발생하므로, 상태 **C**에서의 카운터 타임 슬롯은 다음과 같다.

$$T_C = T_{RTS} \quad (10)$$

상태 **A, B, C**에서 α 는 카운터 타임 슬롯동안 전송하지 않는 상태이다.

상태 **D**에서 α 는 패킷을 전송하며, β 의 캐리어 센스 범위에 있는 노드들 중 하나 이상의 노드가 전송한다. α 가 전송할 확률은 τ 이며, β 의 캐리어 센스 범위에 있는 노드들 중 하나 이상의 노드가 전송할 확률은 $1-(1-\tau)^{n-1}$ 이다. 그러므로 상태 **D** 확률은 다음과 같다.

$$P_D = \tau [1-(1-\tau)^{n-1}] \quad (11)$$

이 상태에서는 패킷은 충돌하며 카운터 타임 슬롯은 다음과 같다.

$$T_D = T_{COL} \quad (12)$$

상태 **E**에서는 α 는 패킷을 전송하며, β 의 캐리어 센스 범위에 있는 노드들은 전송하지 않는다. β 의 캐리어 센스 범위에 있는 노드들이 전송하지 않을 확률은 $(1-\tau)^{n-1}$ 이다. 그러므로 상태 **E** 확률은 다음과 같다.

$$P_E = \tau (1-\tau)^{n-1} \quad (13)$$

이 상태에서는 패킷은 성공적으로 전송되며, 카운터 타임 슬롯은 다음과 같다.

$$T_E = T_{TX} \quad (14)$$

4.3 멀티홉 네트워크의 처리율

앞 절에서 제시된 분석모델로 부터 충돌확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p = 1-(1-\tau)^{n-1} \quad (15)$$

식 (1)과 (15)로부터 τ 와 p 를 얻을 수 있다. 카운터 타임 슬롯의 평균 길이 TCT는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$T_{CT} = P_{ATA} + P_{BTB} + P_{CTC} + P_{DTD} + P_{ETE} \quad (16)$$

하나의 노드에서 얻을 수 있는 MAC 계층의 처리율 s 는 다음과 같다.

$$s = \frac{\tau[1 - (1 - \tau)^{n-1}]T_{DAT}}{T_{CT}} \quad (17)$$

즉, 처리율 s 는 하나의 카운터 타임 슬롯 당 보낼 수 있는 평균 데이터 패킷의 수가 된다. 이때, 멀티홉 네트워크의 전체 MAC 계층 처리율 S 는 다음과 같다.

$$S = N \times s \quad (18)$$

표 1. 시스템 변수 값
Table. 1 System parameter values

변수	값
m	6
Wmin	16
Wmax	1024
SIFS	16 us
DIFS	34 us
슬롯타임	9 us
MAC header	272 bits
PHY header	46 bits
preamble	16 us
ACK	44 us
RTS	52 us
CTS	44 us
패킷 정보구간	8192 bits
채널 bit rate	6 Mbps

4.4 수치 결과

제안된 기법의 성능을 얻기 위해 사용된 시스템 변수들은 IEEE 802.11a 표준[20]과 표 1의 값을 사용하였다. 전송 범위는 250 m, 캐리어 센스 범위는 500 m로 설정한다.

그림 3과 그림 4는 캐리어 센스 범위에 있는 노드수 n 을 바꾸면서 확률 p 와 τ 를 구하는 예를 보여주고 있다.

그림에서는 p 와 τ 를 찾기 위해서 식 (1)과 (15)가 사용되고 있다. 그림 3에서는 서로 다른 n 값에 따라서 식 (1)과 (15)의 교점으로 구해진 p 와 τ 를 보여준다. 여기서 식 (1)은 n 값에 영향을 받지 않기 때문에 하나의 선으로 표시되고 있지만, 식(15)는 n 값에 영향을 받으므로, 서로 다른 선으로 표시되고 있다. 이러한 교점들을 모아 놓은 것이 그림 4에 나타나 있다. p 값은 노드수가 증가할수록 따라서 증가하고 있다. 이렇게 되는 이유는 노드수가 증가할수록 충돌확률도 증가하기 때문이다. 반대로 노드수가 증가할수록 τ 는 감소한다. 충돌확률이 증가할수록 노드의 백오프 기간이 길어지므로 전송확률이 줄어든기 때문이다.

그림 5는 제안된 기법과 MMP의 시스템 처리율을 보여준다. 캐리어 센스 범위의 노드수 r 은 상수값 5인 경우와 $n-2$ 의 가변인 경우를 모두 보여주고 있다. 전체 노드수 N 은 100으로 하였다. 캐리어 센스 범위의 노드수가 증가할수록 처리율은 감소한다. 그 이유는 식 (16)의 평균 카운터 타임 슬롯 TCT가 증가하면서 식 (18)의 시스템 처리율 S 에 영향을 미치기 때문이다. MMP에서는 r 이 상수일 때가 가변인 경우보다 큰 처리율을 나타낸다. 그 이유는 수신 노드수가 증가할수록 오버헤드도 따라서 증가하기 때문이다. 하지만, 제안된 기법에서는 r 에 상관없이 일정한 처리율을 나타낸다. 그 이유는 제안된 기법에서는 r 에 상관없이 하나의 CTS와 ACK 패킷을 사용하기 때문이다. 그러므로 제안된 기법은 멀티캐스트 노드수가 증가할수록 MMP보다 더욱 향상된 성능을 나타내게 된다.

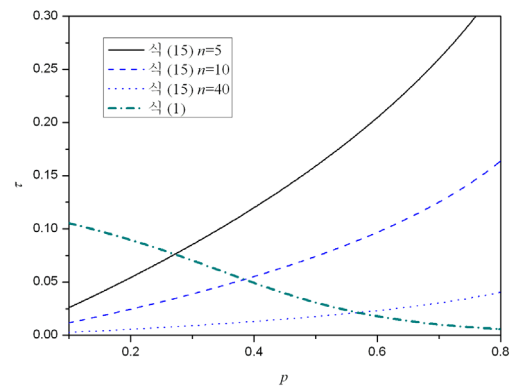
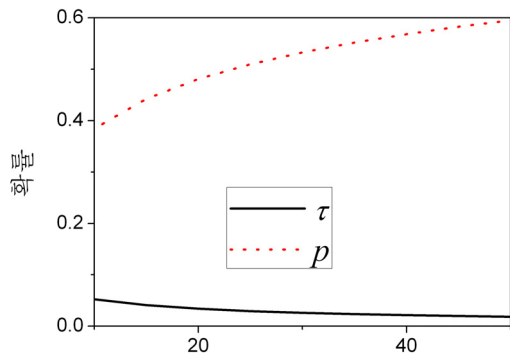
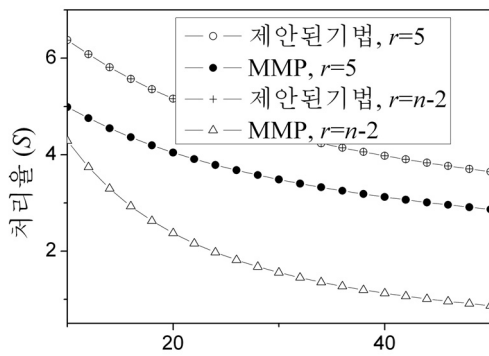


그림 3. 패킷 전송확률과 충돌확률
Fig. 3 Packet transmission and collision probabilities



캐리어 센스범위의 노드수 (n)

그림 4. 노드수에 따른 패킷 전송확률과 충돌확률
Fig. 4 Packet transmission and collision probabilities according to number of nodes



캐리어 센스 범위의 노드수 (n)

그림 5. 시스템 처리율
Fig. 5 System throughput

V. 결론

신뢰성 있는 멀티캐스트 전송을 위해서는 어느 정도의 오버헤드가 필요하다. 본 논문에서는 무선 네트워크 환경에서 신뢰성 있는 멀티캐스트에 필요한 오버헤드를 줄이기 위하여 계층통합적인 설계기법을 제안하였다. OFDMA를 MAC계층과 통합하여 오버헤드의 크기를 줄였다. 이렇게 줄여든 오버헤드로 인하여 시스템 성능 향상을 이루었다. 시스템 성능은 분석적인 방법과 수치 결과를 통하여 향상되었음을 보였다. 앞서 연구된 신뢰성 있는 멀티캐스트 방법과 비교하였을 때, 제안된 기

법은 멀티캐스트 노드수가 증가할수록 더욱 향상된 성능개선을 기대할 수 있다.

참고문헌

[1] J.-S. Park, M. Gerla, D. S. Lun, Y. Yi, and M. Medard, "Codecast: A network-coding-based ad hoc multicast protocol," *IEEE Wireless Commun. Mag.*, vol. 13, no. 5, pp. 76 - 81, Oct. 2006.

[2] U. T. Nguyen and J. Xu, "Multicast routing in wireless mesh networks: Minimum cost trees or shortest path trees?" *IEEE Commun. Mag.*, vol. 45, no. 11, pp. 72 - 77, Nov. 2007.

[3] D.-N. Yang and M.-S. Chen, "Efficient resource allocation for wireless multicast," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 7, no. 4, pp. 387 - 400, Apr. 2008.

[4] IEEE Std 802.11: 1999(E), Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Aug. 1999.

[5] C.-W. Bao and W. Liao, "Performance analysis of reliable MAC-layer multicast for IEEE 802.11 wireless LANs," in *Proc. IEEE ICC 2005*, May 2005, pp. 1378 - 1382.

[6] H. Gossain, N. Nandiraju, K. Anand, and D. P. Agrawal, "Supporting MAC layer multicast in IEEE 802.11 based MANETs: Issues and solutions," in *Proc. IEEE LCN 2004*, Nov. 2004, pp. 172 - 179.

[7] D. Towsley, J. kurose, and S. Pingali, "A comparison of sender-initiated and receiver-initiated reliable multicast protocols," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 15, no. 3, pp. 398 - 406, Apr. 1997.

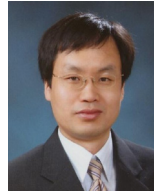
[8] J. Kuri and S. K. Kasera, "Reliable multicast in multi-access wireless LANs," *Wireless Networks*, vol. 7, no. 4, pp. 359 - 369, Aug. 2001.

[9] Q. Du and X. Zhang, "Cross-layer resource-consumption optimization for mobile multicast in wireless networks," in *Proc. IEEE WoWMoM 2006*, Jun. 2006, pp. 368 - 376.

[10] L. Lazos and R. Poovendran, "Cross-layer design for energy-efficient secure multicast communications in ad

- hoc networks,” in *Proc. IEEE ICC 2004*, Jun. 2004, pp. 47 - 54.
- [11] A. Mohamed and H. Alnuweiri, “Cross-layer optimization framework for rate allocation in wireless multicast,” in *Proc. IEEE MASS 2006*, Oct. 2006, pp. 1 - 10.
- [12] K. Tang and M. Garcia, “MAC reliable broadcast in ad hoc networks,” in *Proc. IEEE MILCOM 2001*, Oct. 2001, pp. 1008 - 1013.
- [13] M. T. Sun, L. Huang, A. Arora, and T. H. Lai, “Reliable MAC layer multicast in IEEE 802.11 wireless networks,” in *Proc. IEEE ICPP 2002*, Aug. 2002, pp. 527 - 536.
- [14] Z. Cao, U. Tureli, and Y.-D. Yao, “Deterministic multiuser carrierfrequency offset estimation for interleaved OFDMA uplink,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 52, no. 9, pp. 1585 - 1594, Sep. 2004.
- [15] S. Kaiser and W. A. Krzymien, “Performance effects of the uplink asynchronism in a spread spectrum multicarrier multiple access system,” *Eur. Trans. Commun.*, vol. 10, no. 4, pp. 399 - 406, 1999.
- [16] S. Kapoor, D. J. Marchok, and Y. F. Huang, “Adaptive interference suppression in multiuser wireless OFDM system using antenna arrays,” *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 47, pp. 3381 - 3391, Dec. 1999.
- [17] G. Bianchi, “Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 18, no. 3, pp. 535 - 547, Mar. 2000.
- [18] S. W. Kim, B. Kim, and Y. Fang, “Downlink and uplink resource allocation in IEEE 802.11 wireless LANs,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 54, no. 1, pp. 320 - 327, Jan. 2005.
- [19] T.-C. Hou, L.-F. Tsao, and H.-C. Liu, “Analyzing the throughput of IEEE 802.11 DCF scheme with hidden nodes,” in *Proc. IEEE VTC 2003-Fall*, Oct. 2003, pp. 2870 - 2874.
- [20] IEEE Std 802.11a-1999, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher-speed Physical Layer in the 5 GHz Band, Sep. 1999.

저자소개



김성원 (Sung Won Kim)

1990년 서울대학교
제어계측공학과 공학사

1992년 서울대학교
제어계측공학과 공학석사

2002년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 공학박사
2005년 ~ 현재 영남대학교 전자정보공학부 조교수
※ 관심분야: 무선 네트워크, 모바일 네트워크, 임베디드 시스템