

IEEE 802.11 무선 랜에서의 네트워크 코딩 성능 분석

Throughput Analysis of Network Coding in IEEE 802.11 Wireless LAN

장 보 경 · 송 영 아* · 김 정 근

Bo Kyung Jang · Young Ah Song* · Jeong Geun Kim

요 약

무선 애드 혹(ad hoc) 네트워크에서 전송 효율을 향상시킬 수 있는 방법으로 네트워크 코딩(network coding)이 많은 주목을 받고 있다. 본 논문에서는 IEEE 802.11 무선 랜에 네트워크 코딩을 적용하였을 때, 수율(throughput) 성능을 예측할 수 있는 분석 모델을 제안하고자 한다. 이 모델에서는 모든 무선 노드들이 선형 토폴로지(topology)로 네트워크를 구성하고 있고, 양단에 위치한 두 개의 소스 노드들이 패킷을 발생시키고, 중간 노드들은 네트워크 코딩을 수행하면서 패킷을 전달하는 역할을 하게 된다. 제안하는 분석 모델은 궁극적으로 각 노드별 수율의 비선형 방정식 형태로 귀결되며, 이 방정식의 해를 통해서 단대단(end-to-end) 수율을 계산하게 된다. 본 논문에서 제안한 분석 모델의 정확성을 검증하기 위하여, 다양한 모의 실험을 수행하였으며, 분석 모델을 통한 수율 예측치가 시뮬레이션 결과와 상당히 일치함을 확인할 수 있었다.

Abstract

Network coding has recently emerged as an effective solution for multicast and broadcast communications in wireless ad hoc networks. In this paper, we propose a throughput performance model for IEEE 802.11 wireless networks with network coding. Specifically, we consider IEEE 802.11 DCF protocol and linear topology in which traffic sources are located at both ends and intermediate nodes act as relays performing network coding. The proposed analytic model has the form of nonlinear equations in terms of throughput of each node. The solution of the nonlinear equations thus correspond to the end-to-end throughput. Extensive simulation experiments have been performed to validate accuracy of the proposed model. Numerical results show that the results of the proposed analytic model agree fairly well with the corresponding simulation results.

Key words : Network Coding, Wireless Ad-Hoc Networks, Wireless LAN

I. 서 론

무선 애드혹 네트워크(ad-hoc network)는 기반망의 도움 없이 무선으로 연결되어 있는 노드로 구성된 네트워크이다^[1]. 이러한 네트워크는 유선망을 구성하기 어렵거나 망을 단기간 사용되는 경우에 적합하

며, 노드의 이동에 제약이 없고, 유선망과 기지국이 필요 없으므로 빠른 망 구성과 저렴한 비용의 장점이 있다^[1]. 무선 애드혹 네트워크에서 각 노드는 패킷을 생성하고, 수신하는 호스트(host) 역할 뿐만 아니라, 패킷의 중계 노드(relay node)의 역할도 수행함으로써 멀티 홉(multi-hop) 통신이 가능하게 한다^[1].

「이 논문은 2009년도 경희대학교 연구년 지원에 의한 결과임.」

경희대학교 전자전파공학과(Department of Electronics and Radio Engineering, Kyung Hee University)

*한국정보통신기술대학 이동통신설비과(Department of Mobile Telecommunication, Korea Information & Communication Polytechnic College)

· 논문 번호 : 20110620-055

· 교신저자 : 김정근(e-mail : jg_kim@khu.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2011년 8월 12일

에드혹 네트워크의 멀티홉 전송의 특징에 의해서 다양한 형태로 성능의 제약을 갖게 되는데, 한 노드가 매체를 선점한 경우, 전송 범위 내에 있는 다른 노드들의 전송이 지연될 뿐만 아니라, 같은 노드로부터 발생한 동일한 플로우(flow)를 구성하는 패킷들도 전송 지연이 발생하게 된다. 이러한 간섭을 플로우내 간섭(intra-flow interference)이라 하는데, 플로우의 수율(throughput)을 저하시키는 원인이 된다. 더욱이 네트워크 내에 다수의 플로우(flow)가 존재하는 경우, 수율의 급격한 감소를 가져올 수 있다. 이러한 무선 에드혹 네트워크에서의 전송 효율 문제를 개선시키고자 다양한 시도가 있어 왔는데, 그 중에서 최근에 네트워크 코딩에 대한 관심이 크게 대두되고 있다^{[3],[4]}.

네트워크 코딩(network coding)은 멀티캐스트(multicast)와 같은 일 대 다수 통신의 네트워크 수율을 증가시키기 위해 제안된 기법이다^[3]. 중계 노드가 무선 네트워크의 브로드캐스트(broadcast) 특성을 이용하여 한 번의 전송에 다수의 패킷을 인코딩(encoding)하여 전송하는 기술로, 최근 네트워크 코딩을 적용하여 무선 에드혹 네트워크의 성능을 개선하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있다^{[4],[6]}. 참고문헌 [4], [5]에서는 선형 토폴로지 상에서 물리 계층에서 네트워크 코딩을 적용한 연구를 수행하였다. 참고문헌 [6]에서는 두 포아송(poisson) 플로우에 대한 동기화 프로세스의 네트워크 코딩 성능 분석을 수행하였다. 참고문헌 [7]은 Slotted Aloha 기법이 적용된 선형 토폴로지의 네트워크 코딩 성능 분석 모델을 수립하였다.

본 논문에서는 가장 보편적으로 사용되고 있는 무선 랜 프로토콜인 IEEE 802.11 DCF(Distributed Coordination Function)^[2]에 네트워크 코딩을 적용하였을 때 얻을 수 있는 이득이 어느 정도인지를 분석하기 위해서 분석 모델을 수립하고, 이를 바탕으로 수율 이득을 정량적으로 분석하는 것을 주요 목적으로 설정하였다. 네트워크 코딩에 대한 학계의 관심과 무선 에드혹 네트워크의 중요성에 비추어, 본 연구는 의미 있는 시도가 판단되며, 본 논문의 결과로 나오게 될 분석 모델은 네트워크 코딩이 적용된 무선 랜 시스템에 대한 통찰을 제공할 수 있을 것이라 기대된다. 네트워크 코딩이 적용된 무선 에드혹 네트워크의 단대단(end-to-end) 수율에 대한 이론적인

성능 분석 모델에 관한 연구는 아직 수행된 바 없는 새로운 시도가 판단된다.

제안하는 분석 모델은 참고문헌 [8]의 모델을 확장한 것으로, 참고문헌 [8]에서는 고려하지 않은 네트워크 코딩 부분이 분석 모델에 포함되어 있다. 특히, 네트워크 코딩이 적용된 IEEE 802.11 무선 랜의 basic access mode와 RTS/CTS mode에 대해 분류하여 분석 모델을 구성하였고, 노드의 채널 사용 상태를 이웃 노드와 히든 노드의 상태로 표현하여 플로우내 간섭이 단대단 수율 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 제안한 분석 모델의 정확성을 평가하기 위하여 다양한 모의 실험을 수행하였으며, 네트워크 코딩의 이득이 어느 정도인지를 계산하고, 이를 네트워크 코딩이 적용되지 않은 IEEE 802.11 DCF 프로토콜의 성능과 비교 분석을 수행하였다.

II. 시스템 모델

본 논문에서 제안하는 성능 분석 모델은 선형 토폴로지를 갖는 무선 에드혹 네트워크의 양단에 위치한 노드의 단대단 수율(즉, 단위 시간당 성공적인 패킷 전송량)을 계산하기 위한 것이다. 본 논문에서 고려하는 시스템 모델의 특징을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 그림 1과 같이 n 개의 노드가 이웃 노드와 체인 형태로 무선으로 연결되어 있는 선형 토폴로지를 갖는다.
- (2) 양 끝에 위치한 노드만이 패킷을 생성하고 패킷을 전송한다. 즉, 선형 토폴로지의 양 끝에 위치한 노드가 패킷의 source/sink의 역할을 한다.
- (3) 모든 노드는 한 홉의 전송 범위(transmission range)를 갖고 두 홉의 캐리어 감지 범위(carrier sensing range)를 갖는다. 즉, 한 홉 이내의 노드 간에만 데이터 전송이 가능하고, 두 홉 이내의 어떠한 노드의 전송이든 감지(carrier

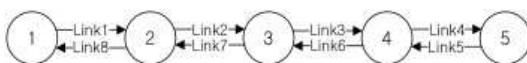


그림 1. n 홉 선형 토폴로지; 양방향 플로우
Fig. 1. n -hop linear topology with bidirectional flow.

sensing)할 수 있다는 의미이다.

- (4) 송신 노드와 수신 노드 사이에 위치한 노드는 자신의 패킷을 발생하지 않고 전송을 중계하기만 한다.
- (5) 양 끝에 위치한 송신 노드는 항상 전송할 패킷을 가진다고 가정한다.
- (6) 캐리어 감지 범위 내의 노드와 발생하는 충돌은 무시할 수 있을 정도로 확률이 낮다고 가정한다.
- (7) 이상적인 채널 환경을 가정한다. 즉, 전송에러는 없다. 충돌만이 전송 실패를 일으키는 요인이 된다.
- (8) 모든 노드는 자신이 패킷을 전달해야 하는 목적지를 알고 있다. 즉, 라우팅 정보는 각 노드에서 시스템의 시작 전에 설정된다.

III. 성능 분석

본 논문에서는 그림 1과 같이 IEEE 802.11 무선 랜^[2]에서 n 개의 노드가 선형 토폴로지를 구성하고 있는 경우를 고려하였다. 양단에 위치한 소스(source) 노드에서 반대 방향의 끝에 위치한 목적지 노드까지 패킷이 네트워크 코딩이 되어 전달되는 상황에서 단대단(end-to-end) 수율을 예측할 수 있는 분석 모델을 구성하는 것이 본 연구의 주요 목적이다. 일반적으로 단대단 수율은 경로를 구성하는 각 링크의 수율의 최소값과 같게 된다^{[8],[11]}. 그러므로, 단대단 수율 분석을 위해서는 각 링크의 수율 계산이 필수적이다.

수율 분석의 편의성을 위해, 각 노드의 관점에서 채널의 상태를 분류하는 것이 유용하다^[8]. 노드 i 의 관점에서 링크 i 의 상태를 self time x_i , busy time y_i , idle time z_i 의 세 가지 상태로 분류할 수 있고, 각 상태의 의미는 다음과 같다.

- (1) Self time(x_i): 노드 자신이 패킷을 전송하기 위해 사용한 채널 시간의 비율을 나타내며, 여기에는 성공적인 전송과 충돌이 발생한 전송이 모두 포함된다.
- (2) Busy time(y_i): 채널이 다른 노드의 전송으로 인해 채널이 사용 중으로 감지되어 노드가 채널을 사용할 수 없는 시간의 비율을 나타낸다.
- (3) Idle time(z_i): 채널이 어떤 노드에 의해서도 사

용되지 않은 시간의 비율이다. 즉, 노드가 패킷 전송을 위해 자신의 백오프 카운터를 줄이는 데 사용된 시간을 나타낸다.

전체 시간에 대해서 x_i, y_i, z_i 를 고려했을 때 z_i 는 링크에 자기 자신이나 이웃 노드의 패킷 전송이 존재하지 않는 시간의 비율이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다^[8].

$$z_i = 1 - x_i - y_i \quad (1)$$

다음 단계로 IEEE 802.11 DCF 프로토콜의 채널 상태와 패킷을 전송할 확률을 연관시킨다. IEEE 802.11 DCF 기반의 무선 랜에서 노드는 패킷을 전송하기 전에 먼저 채널을 감지하고 만약 채널이 사용 중인 것으로 판단되면, 임의로 선택한 백오프 카운터(backoff counter)의 시간만큼 기다린 뒤 전송을 시도한다^[2]. 이 백오프 카운터는 채널이 사용 중이 아니라고 감지할 때 하나씩 줄일 것이고, 이 백오프 카운터가 0이 될 때 전송을 시작한다^[2]. 즉, IEEE 802.11 DCF 프로토콜에서 채널이 idle할 때 백오프 카운터를 줄이는 동작은 충돌이 발생하거나, 패킷을 성공적으로 전송하거나 채널이 사용 중이라고 판단되는 것과는 관계없이 독립적으로 수행된다. z_i 가 평균 idle 슬롯 타임을 나타내고, $G(\gamma)$ 가 매 idle 슬롯마다 패킷을 전송을 시도할 확률을 의미한다면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_i = z_i \times G(\gamma_i) \times ((1 - \gamma_i) T) \quad (2)$$

여기서 γ_i 는 노드 i 의 전송이 다른 노드의 전송과 충돌이 발생할 확률이고, T 는 평균 전송 시간이다. $G(\gamma)$ 는 참고문헌 [10]에서 제시한 식으로써 다음과 같다.

$$G(\gamma) = \frac{1 + \gamma + \gamma^2 + \dots + \gamma^k}{b_0 + \gamma b_1 + \gamma^2 b_2 + \dots + \gamma^k b_k} \quad (3)$$

위 식은 각 노드가 전송하는 패킷과 다른 노드의 패킷과의 충돌 발생 확률과 이진 백오프(binary exponential backoff) 알고리즘^[2]에 의해서 노드들이 각 시간 슬롯에서 패킷을 전송할 확률을 연관시킨다. 여기서 γ 는 충돌 확률, b_k 는 k 번째 재전송시 평균 백오프 슬롯의 크기를 나타낸다^[10].

IEEE 802.11 DCF 프로토콜에서는 히든 터미널

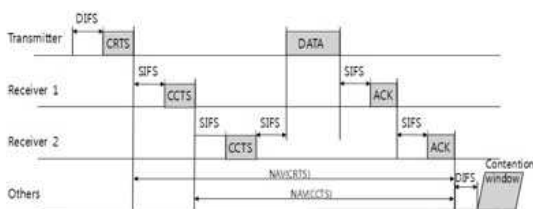


그림 2. CRTS/CCTS 모드 프레임 전송 순서도
Fig. 2. Frame transmission sequence for CRTS/CCTS.

(Hidden terminal) 문제를 해결하기 위해서 RTS/CTS 제어 프레임을 사용한다^[2]. 네트워크 코딩이 사용되는 경우에는, 기존의 히든 터미널 문제와는 다른 문제가 발생하는데, 네트워크 코딩으로 인코딩 패킷은 수신 노드의 수가 1개 이상이므로 히든 터미널로부터 보호받기 위해서는 대상이 되는 수신 노드 모두가 일종의 CTS와 같은 메시지를 보내야 한다. 이러한 목적으로 본 연구에서는 새로운 신호인 CRTS/CCTS 프레임 교환을 고려하였다. 즉, 네트워크 코딩된 패킷을 전송하기 위해서 소스 노드는 CRTS 프레임을 전송하게 되고, CRTS 프레임 수신을 통해서 자신이 수신 노드임을 아는 노드의 경우에는 CCTS 프레임을 전송하게 하는 것이다.

CRTS/CCTS 모드에서의 패킷 전송은 다수의 수신 노드가 존재하며, 각 수신 노드가 송신 노드에 동시 응답하게 되므로 CCTS와 ACK 메시지 보낼 때 알고리즘에 따라 충돌을 막기 위해 차례로 전송하게 된다. CRTS/CCTS 모드 역시 RTS/CTS 모드와 마찬가지로 패킷 전송 실패 시 걸리는 시간이 성공했을 경우에 비해 매우 짧다. 다음 그림은 CRTS/CCTS 모드에서 프레임 전송 순서도를 나타낸다.

E_i 를 링크 i 의 수율이라 했을 때, 충돌이 발생할 확률 γ_i 와 self time x_i 를 이용해서 E_i 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_i = x_i \times \frac{(1-\gamma_i)T_s}{1-\gamma_i T_s + \gamma_i T_c} \times \frac{T_{payload}}{T_s} \times R_b \quad (4)$$

여기서 전송 성공시 사용되는 되는 시간 T_s 와 실패 시 사용되는 시간 T_c 는 다음과 같이 주어진다^[9].

$$T_s = DIFS + T_{crt_s} + SIFS + T_{cct_s} + SIFS + T_{cct_s} + SIFS + T_{packet} + SIFS + T_{ack} + SIFS + T_{ack}$$

$$T_c = DIFS + T_{crt_s} + SIFS + T_{cct_s} + SIFS + T_{cct_s}$$

또한, 위의 식에서 $T_{payload}$ 는 오버 헤드를 제외한 순수 데이터량을 전송하는 데 사용되는 시간이며, R_b 는 패킷 전송률을 나타낸다. 식 (4)로부터 단대단 수율 E_i 를 구하기 위해서는 self time x_i 를 알아야 하며 x_i 는 충돌이 발생할 확률 γ_i 와 idle time z_i 를 이용해서 구할 수 있다. 노드 i 의 관점에서 채널 busy time은 이웃 노드들의 self time의 합이다. 네트워크 코딩이 적용된 802.11 프로토콜에서의 채널 busy time은 네트워크 코딩을 하지 않는 노드들의 채널 사용 시간과 코딩된 패킷을 전송하는 시간의 합으로 나타낼 수 있고, 플로우 내 간섭을 고려하면 다음과 같은 근사식으로 나타낼 수 있다.

$$\left| \bigcup_{j \in v(i)} S_j \right| = \sum_{j \in v(i)} |S_j| + \sum_{l \in \kappa(i)} |S_l| - \sum_{m, n \in v(i)} |S_m \cap S_n| \quad (5)$$

여기서 S_i 는 노드 i 의 관점에서 채널 사용 시간을 나타내며, $v(i)$ 는 이웃노드들의 집합이고, $\kappa(i)$ 는 이웃노드들 중 네트워크 코딩을 사용하는 노드들의 집합을 나타낸다. 따라서 busy time y_i 는 자신을 제외한 캐리어 감지 범위 안의 노드들이 네트워크 코딩이 적용된 데이터를 전송하는 채널 사용 시간과 그렇지 않은 시간의 합에 노드들이 데이터를 동시에 전송하는 시간을 제외시켜 나타낼 수 있다. 본 성능 분석 모델에서는 성능 분석의 용이성을 위해 세 개 이상의 노드가 동시에 전송하는 경우는 고려하지 않는다. 채널 busy time을 다른 노드들의 self time으로 나타내면,

$$y_i = \sum_{\substack{j \in v(i) \\ j \neq k(i)}} x_j + \frac{\sum_{k, l \in k(i)} (x_k + x_l)}{2} - \sum_{\substack{m \cup n: \\ n \in v(i), \\ m \notin v(n)}} \frac{x_m x_n}{1 - \sum x_c} \quad (6)$$

여기서 x_c 는 이웃 노드들의 self time을 의미한다. 채널 idle time은 전체 시간에 self time x_i 와 busy time y_i 를 제외한 시간과 같으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_i = \left(1 - x_i - \sum_{\substack{j \in v(i) \\ j \neq k(i)}} x_j - \frac{\sum_{k, l \in k(i)} (x_k + x_l)}{2} + \sum_{\substack{m \cup n: \\ n \in v(i), \\ m \notin v(n)}} \frac{x_m x_n}{1 - \sum x_c} \right) \quad (7)$$

다음으로 노드의 패킷 전송이 충돌로 인해 실패할 확률에 대해 고려한다. 선형 토폴로지에서 충돌이 발생할 경우는 다음과 같이 설명할 수 있다. 그림 1을 고려하였을 때, 노드 4가 노드 5에게 네트워크 코딩된 혹은 그렇지 않은 패킷을 전송할 때 노드 2는 채널이 사용 중이라고 판단하지만, 노드 1은 채널이 사용되지 않고 있다고 판단한다. 이것은 노드 4가 노드 1의 캐리어 감지 범위 밖에 있지만, 노드 2의 감지 범위 안에 존재하기 때문이다. 따라서 노드 1은 채널이 사용 중이지 않다고 판단하고 자신의 백오프 카운터를 줄이고 패킷을 노드 2에게 전송할 것이다.

이때 노드 4가 패킷을 노드 5에 전송 중이라면 노드 2는 채널이 사용 중이라 판단하고, 노드 1에게 수신한 패킷에 대한 수신응답을 전송하지 않을 것이다. 결과적으로 노드 1은 충돌이 발생했다고 판단하여 경쟁 윈도우(contention window)^[2] 크기를 두 배로 늘리고 재전송을 수행할 것이다.

정리하면 본 성능 분석 모델에서 사용하는 선형 토폴로지에서 충돌이 발생하는 경우는 수신 노드부터 두 홉 떨어진 히든 노드(Hidden node)의 패킷과 전송노드의 CRTS 프레임 간에 발생한다. 수신 노드로부터 한 홉이 떨어져 있는 노드와 2홉이 떨어져 있는 노드들 간의 SIR(Signal-to-Interference Ratio)이 10 이상이기 때문에, 수신 노드는 전송 노드가 히든 노드보다 먼저 전송을 시작한다면 캡쳐 현상이 발생하여 충돌 현상이 일어나는 것을 피할 수 있다.

CRTS와 패킷 프레임의 전송 성공시 소요 시간에 대한 비율을 $a=T_{crt}/T_s$ 와 $b=T_{packet}/T_s$ 라 하면, 노드 i 의 전송이 노드 j 의 전송과 충돌로 인해 실패할 확률은 다음과 같다.

$$\gamma_{ij} = \frac{(a+b)x_j}{1 - \sum x_c} \tag{8}$$

여기서 x_c 는 노드 i 와 노드 j 모두에게 이웃인 노드의 self time이다. 이제 채널 idle time을 x_i 나타낸 식 (7), 식 (3)에 대입하고, 식 (8)을 이용하면 채널의 self time으로 이루어진 식을 만들 수 있다.

$$x_i = \left(1 - x_i - \sum_{\substack{j \in v(i) \\ j \notin k(i)}} x_j - \frac{\sum_{k,l \in k(i)} (x_k + x_l)}{2} + \sum_{\substack{m \in (n) \\ n \in v(i) \\ m \notin v(n)}} \frac{x_m r_n}{1 - \sum x_c} \right) \times \alpha \tag{9}$$

where, $\alpha = G(\gamma_i) \times ((1 - \gamma_i T_c + \gamma_i T_c))$

결과적으로 n 개의 노드가 있는 토폴로지에서 z 와 γ 를 이용하여 각 링크의 상태를 self time x_i 에 관한 식으로 나타냄으로써 $2(n-1)$ 개의 수식과 $2(n-1)$ 개의 미지수로 나타낼 수 있으므로 수치 해석을 사용해서 해를 구할 수 있다. 예를 들어 그림 1과 같은 양 방향 플로우가 존재하는 선형 토폴로지를 고려했을 때, 노드 2, 3, 4는 네트워크 코딩을 적용할 수 있으므로 각 노드의 링크가 사용하는 채널 시간 비율을 식 (9)에 대입하여 각 링크의 용량을 구할 수 있다. 이 경우, 각 노드로부터 양 방향 플로우에 대한 링크를 link 1, ..., link 8로 나타내고, 전송하는 채널 시간의 비율을 x_1, \dots, x_8 로 정의한다. 각 링크의 용량을 위의 수식에 대입하여 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} x_1 = (1 - x_1 - \frac{x_2 + x_3 + x_7 + x_8}{2} - x_6)G(\gamma_1)((1 - \gamma_1)T_s + \gamma_1 T_c) \\ x_2 = (1 - x_1 - x_2 - \frac{x_3 + x_4 + x_6 + x_7}{2} - x_5)G(\gamma_2)((1 - \gamma_2)T_s + \gamma_2 T_c) \\ x_3 = (1 - x_1 - x_3 - \frac{x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 + x_8}{2} - x_5)G(\gamma_3)((1 - \gamma_3)T_s + \gamma_3 T_c) \\ x_4 = (1 - x_2 - \frac{x_2 + x_3 + x_7 + x_8}{2} - x_4 - x_5)G(\gamma_4)((1 - \gamma_4)T_s + \gamma_4 T_c) \\ x_5 = (1 - x_2 - \frac{x_3 + x_4 + x_6 + x_7}{2} - x_5)G(\gamma_5)((1 - \gamma_5)T_s + \gamma_5 T_c) \\ x_6 = (1 - x_1 - \frac{x_2 + x_3 + x_4 + x_6 + x_7 + x_8}{2} - x_5 - x_6)G(\gamma_6)((1 - \gamma_6)T_s + \gamma_6 T_c) \\ x_7 = (1 - x_1 - \frac{x_2 + x_3 + x_4 + x_6 + x_7 + x_8}{2} - x_5 - x_7)G(\gamma_7)((1 - \gamma_7)T_s + \gamma_7 T_c) \\ x_8 = (1 - x_1 - \frac{x_3 + x_4 + x_6 + x_7}{2} - x_8)G(\gamma_8)((1 - \gamma_8)T_s + \gamma_8 T_c) \end{cases} \tag{10}$$

여기서 임의의 노드의 패킷 전송이 실패하는 경우는 노드 1에서 2로 패킷 전송이 노드 4에서 5로의 패킷 전송과 충돌하는 것과 반대로 노드 5에서 노드 4로의 전송이 노드 2에서 1로의 패킷 전송과 충돌하는 경우이다. 나머지 노드들은 모든 노드와 서로 캐리어 감지 범위 내에 있어 히든 노드 문제로 인한 충돌이 발생하지 않는다. 그러므로 각 링크의 채널 사용 시간은 다음과 같은 관계가 있다고 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} x_1(1 - \gamma_1) = x_2 = x_3 = x_4 \\ x_5(1 - \gamma_5) = x_6 = x_7 = x_8 \end{cases} \tag{11}$$

여기서 임의의 노드의 패킷 전송이 실패하는 경우는

노드 1에서 2로 패킷 전송이 노드 4에서 5로의 패킷 전송과 충돌하는 것과 반대로 노드 5에서 노드 4로의 전송이 노드 2에서 1로의 패킷 전송과 충돌하는 경우이다. 나머지 노드들은 모든 노드와 서로 캐리어 감지 범위 내에 있어 히든 노드 문제로 인한 충돌이 발생하지 않는다. 여기서 충돌이 발생할 경우는 이웃 노드인 노드 2와 노드 3이 전송하지 않고 있을 때, 노드 4가 노드 5로 CRTS나 DATA 패킷을 전송할 때와 그 반대의 경우이므로, 충돌 확률은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \gamma_1 = \frac{(a+b)x_4}{1-x_2-x_3} \\ \gamma_5 = \frac{(a+b)x_8}{1-x_6-x_7} \end{cases} \quad (12)$$

위의 식 (12)을 식 (11)에 대입하고 정리하면 각 링크의 채널 사용 시간을 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{cases} x_1 = (1-x_1 - \frac{x_2+x_3+x_7+x_8}{2} - x_6)G(\gamma_1)((1-\gamma_1)T_s + \gamma_1T_c) \\ x_2 = x_1(1-\gamma_1) \\ x_3 = x_1(1-\gamma_1) \\ x_4 = x_1(1-\gamma_1) \\ x_5 = (1-x_2 - \frac{x_3+x_4+x_6+x_7}{2} - x_5)G(\gamma_5)((1-\gamma_5)T_s + \gamma_5T_c) \\ x_6 = x_5(1-\gamma_5) \\ x_7 = x_5(1-\gamma_5) \\ x_8 = x_5(1-\gamma_5) \end{cases} \quad (13)$$

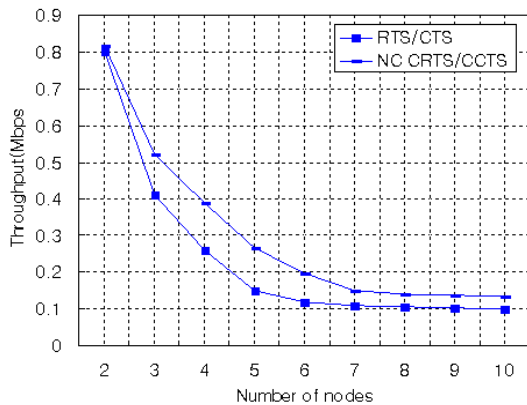


그림 3. CRTS/CCTS, RTS/CTS 모드에서 홉 수 증가에 따른 단대단 수율

Fig. 3. End-to-end throughput versus number of nodes.

위의 식들을 수치해석으로 풀어내면 각 노드의 임의의 슬롯에 전송할 확률과 전송한 패킷이 다른 노드가 전송한 패킷과 충돌할 확률을 각각 구할 수 있다^[8]. 그리고 나서 그 해들을 식 (10)에 대입하면, 우리는 단대단 수율 성능을 이론적 성능 분석 모델을 이용해서 구할 수 있다.

IV. 모의 실험 및 결과 분석

그림 3은 노드의 수를 2에서 10까지 증가시키면서, IEEE 802.11 DCF 프로토콜의 RTS/CTS 모드와 네트워크 코딩이 적용된 CRTS/CCTS 모드에서의 시뮬레이션 결과값을 비교한 것이다. 결과에서 볼 수 있듯이 CRTS/CCTS 모드와 RTS/CTS 모드를 비교했을 경우, 노드의 수가 3일 때 25 % 정도 높은 수율을 볼 수 있고, 모든 노드에 걸쳐 네트워크 코딩이 적용된 프로토콜의 성능이 높은 것을 확인할 수 있다. 또한, 노드의 수가 6 이상일 때부터는 두 모드 모두에서 성능의 차이가 거의 없는 것을 볼 수 있다. 노드 수가 증가함에 따라서 주변 노드와의 간섭이 증가하기 때문에 수율이 급격히 감소하게 되고, 이때 발생한 병목 링크가 전체 경로의 단대단 수율을 결정한다. 두 개의 비교 시스템 모두 충분히 수율이 떨어진 상황에서 네트워크 코딩의 효과는 그다지 크지 않다고 판단된다.

본 연구에서 가정하대로 캐리어 감지 범위가 2 홉이므로, 범위 내에 존재하는 노드의 수가 5가 되고, 결과적으로 홉 밖에 존재하는 노드들의 동시전송이 있게 되므로 단대단 수율의 변화가 거의 없게 된다. 노드의 수가 늘어날수록 단대단 수율 성능이 현저하게 떨어지는 것을 알 수 있다. 하지만 노드의 수가 계속해서 증가하더라도 최소의 수율은 보장이 되는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 참고문헌 [9]에서 노드 수가 아주 많더라도 최소로 보장 수율이 존재한다는 것을 밝힌 결과와도 일치한다.

그림 4는 네트워크 코딩이 적용된 IEEE 802.11 DCF 프로토콜의 CRTS/CCTS 모드에서의 시뮬레이션 결과와 본 논문에서 제안한 양적 분석 모델을 사용해서 구한 결과를 비교한 것이다. 그림 4에 나타나 있는 바와 같이 홉 수 증가에 따른 수율 예측치와 시뮬레이션 결과치를 비교해본 결과, 본 논문에서

V. 결 론

본 논문은 네트워크 코딩이 적용된 무선 랜의 단대단 수율 성능을 분석 모델을 제안하고, IEEE 802.11 DCF 프로토콜과 네트워크 코딩이 적용된 기존의 분석 모델에 대한 분석을 수행하였다. 기존의 RTS/CTS 모드과 유사한 CRTS/CCTS 모드의 알고리즘을 제안하여 네트워크 코딩에서의 클리어링 기법에 대한 시뮬레이션을 수행하였고, 결과를 통해서 이론적 성능 모델의 효용성을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제안한 성능 분석 모델은 양적 분석 모델로서 전체 채널 사용 시간을 노드의 상태에 따라 나누고 플로우 내에 최소 링크 용량을 단대단 수율로 결정하는 방식이다. 본 논문에서 제안하는 성능 분석은 네트워크 코딩을 적용한 무선 네트워크의 성능 분석에서 간단하고 정확한 결과를 제공하는 것을 볼 수 있다. 하지만 네트워크 토폴로지가 커짐에 따라 수식이 복잡해지는 점이 있고 또한, 다양한 트래픽에 대한 연구가 필요할 것이다.

참 고 문 헌

[1] C. E. Perkins, *Ad Hoc Networking*, Addison-Wesley, 2001.
 [2] IEEE 802.11-1997: Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications.
 [3] R. Ahlswede, N. Cai, S. Li, and R. Yeung, "Network information flow", *IEEE Transactions in Information Theory*, vol. 46, no. 4, pp. 1204-1216, Jul. 2000.
 [4] S. Katti, D. Katabi, W. Hu Hariharan, and R. Medard, "The importance of being opportunistic practical network coding for wireless environments", in *Proc. Allerton Conference*, 2005.
 [5] K. Lu, Y. Qian, H. -H. Chen, and S. Fu, "WiMAX networks: From access to service platform", *IEEE Network*, vol. 90, no. 2, pp. 38-45, 2008.
 [6] Y. Ma, W. Li, P. Fan, and X. Liu, "Queuing model and delay analysis on network coding", in *Proc. IS-CIT 2005*, pp. 112-115, 2005.
 [7] D. Umehara, T. Hirano, S. Denno, M. Morikura,

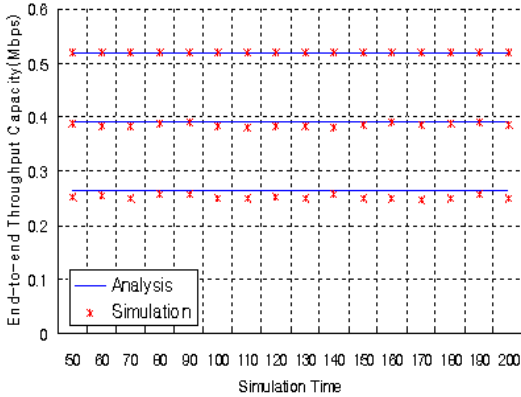


그림 4. CRTS/CCTS 모드에서 수율 예측치와 시뮬레이션 결과치 비교

Fig. 4. Difference between analytic model and simulation.

표 1. CRTS/CCTS 모드에서 홉 수 증가에 따른 수율 예측치와 시뮬레이션 결과치 비교

Table 1. Comparison between analysis and simulation for CRTS/CCTS.

	2	3	4	5	6
분석 모델 이론치	0.81	0.521	0.399	0.276	0.208
모의 실험	0.81	0.521	0.397	0.271	0.196
정확도 (%)	0	0	0.5	1.8	6.1

제안한 결과와 시뮬레이션 결과가 대체로 일치함을 볼 수 있다. 더 많은 홉 수에 대한 성능 분석은 매우 낮은 수율 결과를 갖게 되므로 성능 분석의 정확성에 크게 영향을 미치지 못하기에 다루지 않기로 한다. 표 1에서는 그림 4의 결과를 수치적으로 보다 자세히 분석하기 위해서 정확도를 보여주고 있다.

본 성능 분석 모델의 계산 복잡도는 노드의 수가 증가할수록 커지지만, 이론적 성능 분석 모델을 사용해서 단대단 성능을 구하는 것은 간단하게 수행할 수 있다. 그러나 기존의 IEEE 802.11 DCF 프로토콜의 성능 분석에 비해 네트워크 코딩이 적용된 CRTS/CCTS의 성능 분석 모델은 그 복잡도가 더욱 커지는 것을 볼 수 있었다. 따라서 토폴로지나 트래픽에 관계없이 복잡도는 낮추고 정확도는 더욱 높일 수 있는 성능 분석 모델에 대한 더 많은 연구가 필요할 것이다. 또한, 구한 성능 분석의 결과가 유일한 해임을 증명하는 과정 또한, 필요할 것이다.

and T. Sugiyama, "Wireless network coding in slotted ALOHA with two-hop unbalanced traffic", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27, no. 5, pp. 647-661, Jun. 2009.

[8] Y. Gao, D. -M. Chio, and J. C. S. Lui, "Determining the end-to-end throughput capacity in multi-hop networks: methodology and applications", in *Proc. of SIGMETRICS: Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer System*, vol. 34, no. 1, pp. 154-161, 2006.

[9] G. Bianchi, "Performance analysis of IEEE 802.11 distributed coordination function", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 535-547, Mar. 2001.

[10] A. Kumar, E. Altman, D. Miorandi, and M. Goyal, "New insights from a fixed point analysis of single cell IEEE 802.11 WLANs", in *Proceedings of the IEEE Infocom*, vol. 3, pp. 1550-1561, Mar. 2005.

[11] P. C. Ng, S. C. Liew, "Throughput analysis of IEEE 802.11 multi-hop ad-hoc networks", *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 15, no. 2, Apr. 2007.

장 보 경



2009년 2월: 경희대학교 전자공학과 (공학사)
 2011년 2월: 경희대학교 전자전파공학과 (공학석사)
 2011년 3월~현재: 현대디지털테크연구소 연구원
 [주 관심분야] 무선 네트워크

김 정 근



1990년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)
 1992년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학석사)
 2000년 3월: University of Arizona (공학박사)
 2000년 3월~2003년 2월: Qualcomm 연구원
 2003년 3월~현재: 경희대학교 전자전파공학과 교수
 [주 관심분야] 무선 네트워크, 통신 시스템

송 영 아



1990년 2월: 전남대학교 전산통계학과 (이학사)
 2000년 2월: 건국대학교 정보통신공학과 (공학석사)
 2007년 2월: 경희대학교 정보통신대학원 (공학박사)
 2003년 3월~현재: 한국정보통신기술대학 전자이동통신설비과 교수
 [주 관심분야] 이동 통신, 무선 네트워크