

MCS level이 전이중 통신 무선랜 시스템 성능에 미치는 영향 분석

김진기*, 김재현^o

Analysis the Effect of MCS Level on Full Duplex WLAN Performance

Jin-Ki Kim*, Jae-Hyun Kim^o

요 약

전이중 통신은 노드가 동일 주파수 대역에서 데이터를 동시에 송수신 할 수 있는 기술을 의미한다. 이와 같은 특성을 효율적으로 활용하기 위해서는 각각의 노드가 전이중 쌍 (FD pair) 을 매칭할 수 있는 확률인 전이중 쌍 확률을 알아야 한다. 기존의 논문에서는 이를 정확히 고려하지 않고 패킷 충돌 확률만 고려하였기 때문에 노드의 수가 증가함에 따라 네트워크 성능이 감소했다. 하지만 실제로는 노드의 수가 증가함에 따라 전이중 쌍 확률도 증가하여 네트워크 성능이 향상된다. 따라서 본 논문에서는 노드의 수와 MCS level에 따른 전이중 쌍 확률을 분석하고 전이중 쌍 확률이 네트워크 성능에 미치는 영향을 분석한다. 이를 위해 Riverbed modeler 기반의 시뮬레이터를 개발하였으며, 시뮬레이션 결과 노드의 수가 증가함에 따라 네트워크 성능이 향상되는 것을 확인하였다.

Key Words : Full duplex, WLAN, MAC, MCS level, FD pair

ABSTRACT

The full duplex (FD) communication refers to a technology that enables the nodes to transmit and receive the data at the same frequency band. In order to fully utilize the benefit of FD characteristic, it is essential to analyze the FD pair probability which enables each node to establish individual FD pair. Since the conventional studies only considered the packet collision probability, this resulted in degraded network performance as the number of nodes increases. However, the actual network performance was observed to improve due to the higher FD pair probability as the number of nodes increases. Therefore, we analyze the FD pair probability depending on changes in two variables, the number of nodes and MCS level. Then, we discuss the impact of the FD pair probability on the network performance. To evaluate network performance, the Riverbed modeler-based simulator is developed. As a result of simulation, the network performance has improved as the number of nodes increases.

I. 서 론

모바일 기기의 발전으로 단말의 수가 증가하고 대

용량 서비스 종류도 많아짐에 따라 네트워크 트래픽도 함께 증가하고 있다. 계속해서 증가하는 네트워크 트래픽을 수용하기 위한 기술 중 하나로서 전이중

* 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.(UD160070BD)

• First Author : Ajou University Department of Electrical and Computer Engineering, kjkocp@ajou.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Ajou University Department of Electrical and Computer Engineering, jkim@ajou.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201904-048-B-RN, Received April 16, 2019; Revised May 28, 2019; Accepted June 14, 2019

(Full Duplex, FD) 통신이 각광받고 있다. 전이중 통신은 동일한 주파수 대역에서 송신이나 수신 중 한 가지만 수행할 수 있는 반이중 (Half Duplex, HD) 통신과 달리 동일한 주파수 대역에서 송수신을 동시에 수행할 수 있다. 반이중 통신에서 송수신을 동시에 수행하면 자신의 송신 신호가 간섭으로 작용하는데, 이를 자기 간섭 (self interference) 라고 한다. 과거에는 자기 간섭으로 인해 동일 주파수 대역에서 동시에 송수신 하는 것이 불가능했지만, 현재는 자기 간섭 제거 (self interference cancellation) 기술이 발전함에 따라 전이중 통신을 사용할 수 있게 되었으며, 수중 네트워크 및 UAV 통신에서도 전이중 통신 적용을 위한 연구가 진행되고 있다^[1]-5]. 전이중 통신을 하기 위해서는 전이중 쌍을 맺어야 하는데, 이는 PT (Primary Transmitter), PR (Primary Receiver), ST (Secondary Transmitter), SR (Secondary Receiver)로 구성되며 그림 1과 같이 2가지 방식이 있다. PT와 SR이 동일한 노드인 경우를 대칭 전이중 쌍 (Symmetric FD pair), PT와 SR이 다른 노드인 경우를 비대칭 전이중 쌍 (Asymmetric FD pair) 라고 한다. 대칭 전이중 쌍의 경우 PT와 ST 모두 전이중 통신이 가능해야 매칭이 가능하며, 비대칭 전이중 쌍의 경우 ST만 전이중 통신이 가능해도 매칭이 가능하다. 하지만 비대칭 전이중 쌍에서 PT가 전송하는 신호가 SR에게 간섭으로 작용할 수 있기 때문에 전이중 통신을 하기 위해서는 SIR (Signal to Interference Ratio)이 임계값 (δ dB) 이상인 노드가 SR로 선택되어야 한다. 만약 PT가 데이터를 전송하고 있을 때, SIR이 임계값 이상인 노드가 없으면 전이중 통신이 불가능하다.

기존 반이중 통신에 비해 간섭의 영향이 더 커졌기 때문에 전이중 통신을 효율적으로 활용하기 위한 MAC 프로토콜 연구가 진행되고 있다^[6-10]. 먼저 [6]에서는 AP (Access Point)가 모든 전송을 스케줄링 하는 중앙 집중 방식의 MAC 프로토콜에 대한 연구를 수행하였다. 각각의 노드가 자신이 전송할 데이터의 크기나 간섭의 영향, 목적지에 대한 정보를 AP에게 전달하고, AP는 수집한 정보를 바탕으로 모든 전송을 스케줄링 한다. 그리고 스케줄링한 정보를 모든 노드

에게 전달하는 방식이다. [7]에서는 전이중 통신을 활용해 무선랜 환경에서 CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Detection) 방식으로 동작하는 MAC 프로토콜을 제안하였다. 반이중 통신에서는 데이터를 전송할 때 자기 간섭으로 인하여 채널 센싱이 불가능하다. 하지만 전이중 통신에서는 자기 간섭 제거 기술로 인해 데이터 전송과 동시에 채널 센싱이 가능하다. 이러한 특성을 활용하여 충돌을 감지하면 즉시 데이터 전송을 중지하는 MAC 프로토콜을 제안하였다. [8]에서는 각 노드의 SIR 정보를 알 수 있는 SIR MAP을 만들어 전이중 쌍을 매칭할 수 있는 MAC 프로토콜을 제안하였다. RTS/CTS (Request to Send/Clear to Send) 교환 절차를 통해 AP는 모든 노드의 SIR 정보를 수집할 수 있으며 이를 기반으로 SIR MAP을 만들고 간섭의 영향이 낮은 노드를 SR로 선택할 수 있다. [9]에서는 non-saturation 환경에서 MAC 프로토콜의 성능을 분석하였으며, [10]에서는 전이중 노드 비율에 따른 네트워크 성능을 분석하였다. 하지만 기존 연구들의 성능 분석 결과에서는 전이중 쌍 확률을 정확하게 반영하지 못했다. [9]에서는 전이중 쌍 확률을 특정 값으로 가정하고 성능 분석을 수행하였으며, [8]에서는 전이중 쌍 확률을 노드의 수와 관계없이, 고정된 값으로 성능 분석을 수행하였다. 그렇기 때문에 노드의 수가 증가함에 따라 충돌 확률이 증가하여 네트워크 성능이 저하되었다. 이와 달리 실제 네트워크에서는 노드의 위치, 개수, MCS level 등에 따라 전이중 쌍 확률이 달라지며, 네트워크 성능에 많은 영향을 준다. 따라서, 본 논문에서는 전이중 쌍 확률을 반영하여 무선랜 시스템에서 전이중 MAC 프로토콜의 성능을 분석한다. MCS level과 노드의 개수에 따른 전이중 쌍 확률을 분석하고, 충돌 확률의 증가로 인한 손실과 전이중 쌍 확률의 증가로 인한 이득을 비교하여, 네트워크 성능에 미치는 영향을 분석한다. 이를 위해 Riverbed modeler를 활용하여 시뮬레이터를 개발하고, 성능 분석을 수행한다. 본 논문은 다음의 순서로 구성된다. 2장에서는 시스템 모델에 대해 설명하고, 3장에서는 MAC 프로토콜의 동작 과정에 대해 설명한다. 4장에서는 시뮬레이션 결과를 분석하고 5장에서 결론을 맺는다.

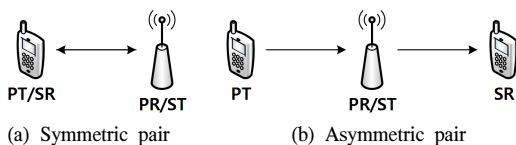


그림 1. 전이중 쌍의 종류
Fig. 1. The type of FD pair

II. 시스템 모델

본 논문에서는 하나의 AP와 N개의 노드가 있는 infrastructure 모드의 무선랜 시스템을 고려한다. 그리고 N개의 노드는 AP의 통신 영역 내에 랜덤하게 분

포하는 것으로 가정한다. 또한 AP만 자기 간섭 제거 기술을 적용하여 전이중 통신이 가능하고, 나머지 노드들은 빈이중 통신만 가능한 환경을 고려한다. 따라서 본 논문에서는 전이중 쌍을 매칭할 때, AP가 PR이자 ST가 되는 비대칭 전이중 쌍만 가능하다. AP와 노드 모두 이동성 없이 고정되어 있는 것으로 가정하며, 성능 분석의 편의를 위해 노드는 AP에게, AP는 모든 노드에게 항상 전송할 데이터를 가지고 있는 saturation 환경을 가정한다. 데이터는 AP와 노드 모두 MCS level에 따라 고정된 속도로 전송하여 동일한 시간에 데이터 전송이 완료된다. 해당 시스템에서 전이중 쌍이 될 수 있는 조건은 다음절에 설명한다.

2.1 전이중 쌍 조건

앞선 서론에서 언급했던 바와 같이 전이중 쌍을 매칭하기 위해서는 SR의 SIR 값이 SIR 임계값 이상이 되어야 한다. 비대칭 전이중 쌍에서는 AP가 SR에게 전송하는 신호의 세기가 수신 신호의 세기 (S)가 되며, PT가 AP에게 전송하는 신호의 세기가 간섭 신호의 세기 (I)가 된다. S 와 I 는 다음과 같다.

$$S = P_{AP} + G_{AP} - PL(d_{SR}), \quad (1)$$

$$I = P_{Node} + G_{Node} - PL(d_{Node}). \quad (2)$$

P_{AP}, P_{Node} 는 AP와 노드가 전송하는 신호의 세기, G_{AP}, G_{Node} 는 AP와 노드의 안테나 gain, $PL(d)$ 는 거리가 d 일 때, path-loss 값, d_{SR} 은 AP와 SR 사이의 거리, d_{Node} 는 PT와 SR 사이의 거리를 의미한다. 본 논문에서 고려한 path-loss 모델 $PL(d)$ 는 다음과 같다.

$$PL(d) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right). \quad (3)$$

λ 는 신호의 파장을 의미한다. SIR은 dB 단위로 계산했을 때, 수신 신호의 세기와 간섭 신호의 세기 차이로 나타낼 수 있으며, SR에서 SIR 값을 계산하면 다음과 같다.

$$SIR = P_{AP} + G_{AP} - PL(d_{SR}) - P_{Node} - G_{Node} + PL(d_{Node}). \quad (4)$$

AP와 노드가 전송하는 신호의 세기

(P_{AP}, P_{Node})나 안테나 gain (G_{AP}, G_{Node})의 경우 고려하는 시스템에 따라 고정된 값이므로 (4)의 수식에서 path-loss를 제외한 나머지 부분은 상수 값으로 표현이 가능하다. 따라서 SR이 전이중 쌍이 될 수 있는 조건은 다음과 같다.

$$PL(d_{Node}) - PL(d_{SR}) \geq \delta - C. \quad (5)$$

C 는 상수 값을 의미한다. 위의 수식에 (3)의 수식을 대입하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d_{Node}}{d_{SR}} \geq 10^{\frac{\delta - C}{20}}. \quad (6)$$

결과적으로, 전이중 쌍이 될 수 있는 조건은 AP와 SR 사이의 거리, PT와 SR 사이의 거리 비율에 따라 결정되며, (6)의 수식을 만족하는 영역을 전이중 쌍 영역이라고 한다. 그림 2는 PT와 AP 사이의 거리가 10m 일 때, 전이중 쌍 영역 (FD pair area)를 나타낸다. 만약 색으로 칠해져 있는 영역 (FD pair area) 안에 하나의 노드라도 존재한다면, PT는 전이중 쌍을 매칭하는 것이 가능하다. 노드가 랜덤하게 분포한다고 가정하면, 노드의 수가 많아질수록 전이중 쌍 영역 내에 노드가 존재할 확률이 높아지기 때문에 전이중 쌍 확률도 높아지게 된다.

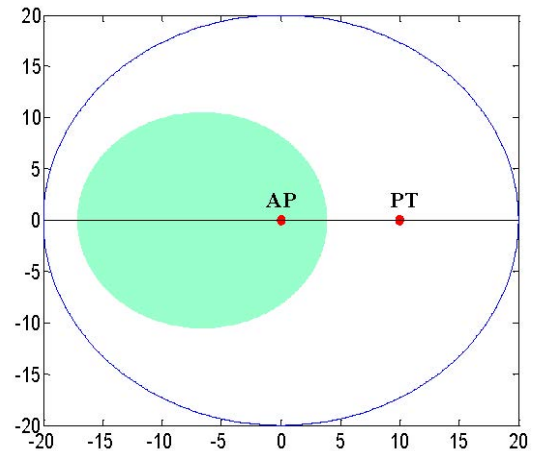


그림 2. 전이중 쌍 영역의 예시
Fig. 2. Example of FD pair area

III. 전이중 MAC 프로토콜

본 논문에서 고려하는 무선랜 시스템의 전이중 MAC 프로토콜은 CSMA/CA를 기반으로 동작한다. AP와 노드의 채널 경쟁에서 AP가 채널을 획득하게 되면 기존의 반이중 통신과 동일하다. AP가 데이터를 전송할 노드에게 RTS를 전송하고 RTS를 수신한 노드는 CTS로 응답한 뒤 데이터 전송이 이루어진다. 모든 노드는 반이중 통신만 가능한 시스템을 고려하였기 때문에 대칭 전이중 쌍은 불가능하다. 노드가 채널을 획득하는 경우는 전이중 쌍이 가능하다. 채널을 획득한 노드가 PT가 되며, AP는 PR이자 ST가 되어 SR을 선택해야 한다. 적절한 SR을 선택하기 위해서 AP는 전이중 쌍 표를 구성한다. 전이중 쌍 표는 PT와 전이중 쌍을 매칭할 수 있는 노드들의 정보를 가지고 있는 표로서, 그림 3은 전이중 쌍 표의 예시를 나타낸다. 어떤 노드가 PT가 되는지에 따라 전이중 쌍을 매칭할 수 있는 SR이 달라지며, AP는 전이중 쌍 표를 보고 적절한 SR을 선택하게 된다. 전이중 쌍 표는 [8]에서 제안된 SIR MAP과 같이 RTS/CTS 교환 절차를 통해 구성할 수 있다. 각각의 노드들은 다른 노드와 AP가 RTS/CTS 교환 절차를 진행하는 동안 overheard를 통해 패킷의 내용과 자신이 수신하는 신호의 세기를

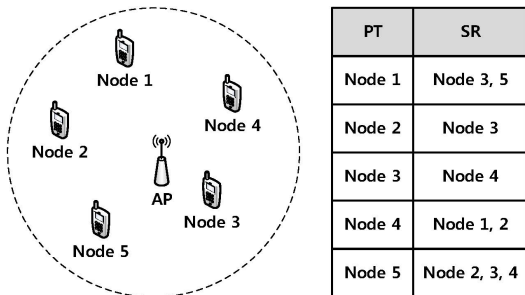


그림 3. 전이중 쌍 표의 예시
Fig. 3. Example of FD pair table

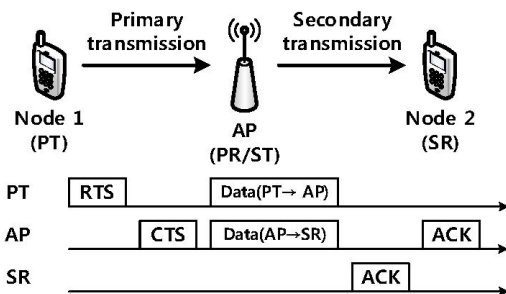


그림 4. 전이중 전송 절차
Fig. 4. FD transmission procedure

측정하여 SIR을 계산할 수 있다. 이 후 자신이 채널을 획득했을 때, AP에게 SIR 정보를 알려줌으로써 AP는 모든 노드의 SIR 정보를 수집할 수 있고, 이를 바탕으로 전이중 쌍 표를 구성할 수 있다. 전이중 전송 절차는 그림 4와 같이 진행된다. 채널을 획득한 노드가 AP에게 RTS를 전송하고 이를 수신한 AP는 전이중 쌍 표를 기반으로 PT와 전이중 쌍 매칭이 가능한 노드 중 하나를 SR로 선택한다. 이 후 AP는 CTS를 전송하는데, CTS는 RTS에 대한 응답 및 어떤 노드가 SR인지에 대한 정보도 포함하고 있기 때문에 PT와 SR 모두에게 동일한 CTS를 전송하게 된다. RTS/CTS 교환 절차가 완료되면 PT는 AP에게, AP는 SR에게 데이터를 전송하고 ACK까지 수신하면 전이중 전송 절차가 완료된다. ACK는 데이터 전송 방향의 역방향으로 전송하는데 동시에 전송하게 되면 PT가 수신해야 하는 ACK와 SR이 전송하는 ACK가 충돌이 발생할 수도 있다. 따라서 SR이 먼저 ACK를 AP에게 전송하고 AP가 이를 수신하면 PT에게 ACK를 전송한다.

표 1. MCS level에 따른 전송 속도 및 SIR 임계값

Table 1. Data rate and SIR threshold according to MCS level

MCS level	Data rate	SIR threshold
2	18 Mbps	10 ~ 11dB
3	24 Mbps	13 ~ 14dB
4	36 Mbps	18 ~ 19dB
5	48 Mbps	22 ~ 23dB
6	54 Mbps	24 ~ 25dB

표 2. 시스템 파라미터

Table 2. System parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
RTS size	20 bytes	CTS size	14 bytes
ACK size	14 bytes	Payload size	1500 bytes
DIFS	34 us	SIFS	16 us
Antenna gain	0 dBi (AP)	Tx power	20 dBm (AP)
	-2 dBi (Node)		15 dBm (Node)

IV. 성능 분석

4.1 시뮬레이션 환경

MCS level과 노드 개수에 따른 전이중 무선랜 시스템의 성능을 분석하기 위해 Riverbed modeler를 활용하여 시뮬레이터를 제작하였다. 시뮬레이션 파라미터는 IEEE 802.11 표준을 기반으로 설정하였다^[11]. 모든 노드는 AP 반경 20m 내에 랜덤하게 배치하였으며, 노드의 개수는 4개에서 40개까지 4개 단위로 증가시키며 시뮬레이션을 수행하였다. MCS level에 따른 데이터 전송 속도 및 SIR 임계값은 표 1과 같다^[12]. 경쟁 윈도우의 크기는 최소 16에서 최대 1024로 설정하였으며, 자기 간섭 제거는 110dB로 가정하였다^[3]. 본 논문에서는 AP만 전이중 통신이 가능한 환경을 가정하였기 때문에 자기 간섭 제거는 AP에만 적용하였다. 전이중 통신을 하기 위해서는 AP의 SIR 또한 임계값 이상이어야 한다. 이 때 신호의 세기는 PT가 전송하는 신호의 세기, 간섭의 세기는 AP가 전송하는 신호의 세기이므로, AP가 전송하는 신호의 세기에서 자기 간섭 제거만큼 감소시킨 후 SIR 값이 임계값 이상이 되는 노드만 PT가 될 수 있다. 그 외 다른 시스템 파라미터는 표 2와 같다^{[11],[13]}.

4.2 전이중 쌍 확률 및 충돌 확률 분석

그림 5는 노드 개수에 따른 전이중 쌍 확률을 나타낸다. 노드의 개수가 증가함에 따라 전이중 쌍 확률도 증가하는 것을 볼 수 있다. 전이중 쌍 영역 내에 하나의 노드라도 존재한다면 전이중 쌍 매칭이 가능하데, 노드의 개수가 증가할수록 전이중 쌍 영역 내에 노드가 존재할 확률이 높아지기 때문에 전이중 쌍 확률이 증가하게 된다. 노드의 개수와 반대로 MCS level은 높아질수록 전이중 쌍 확률이 감소한다. 표 1에서 확

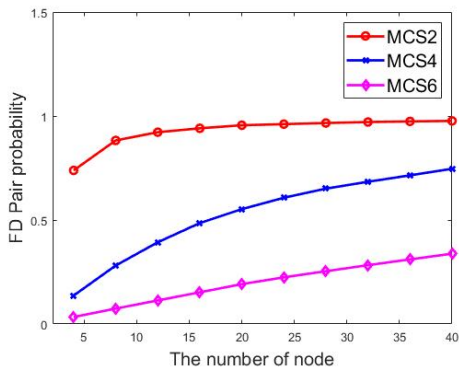


그림 5. 노드 개수에 따른 전이중 쌍 확률
Fig. 5. FD pair probability according to number of node

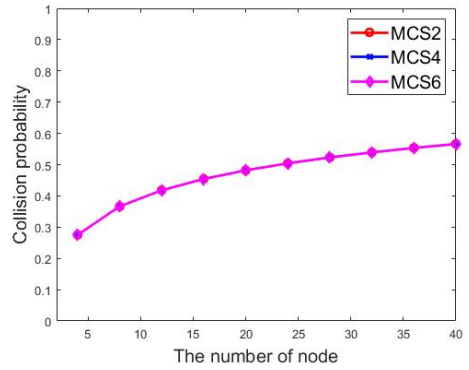


그림 6. 노드 개수에 따른 충돌 확률
Fig. 6. Collision probability according to number of node

인할 수 있는 것과 같이 MCS level이 높아질수록 SIR 임계값도 높아진다. 이는 전이중 쌍 영역이 좁아지는 것을 의미하기 때문에 전이중 쌍 확률이 감소하게 된다. 따라서 전이중 쌍 확률은 노드의 개수는 많을수록, MCS level은 낮을수록 높아진다. 충돌은 노드나 AP의 backoff counter가 동시에 0이 되는 경우에 발생하므로 충돌 확률은 그림 6과 같이 MCS level과는 상관 없으며 노드의 개수가 많을수록 증가하게 된다.

4.3 처리율 분석

그림 7은 노드 개수에 따른 saturation 처리율을 나타낸다. 기존의 연구들은 전이중 쌍 확률을 제대로 고려하지 않았기 때문에 노드의 개수가 증가함에 따라 충돌 확률의 증가로 처리율 성능이 감소했다. 하지만 전이중 쌍 확률을 정확히 반영하면 그림 7과 같이 노드의 개수가 증가할수록 처리율 성능이 향상된다. 전이중 쌍 확률이 증가하는 것과 비슷한 형태로 처리율 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 전이중 쌍 확률이 처리율 성능에 영향을 미친다는 것을 알 수

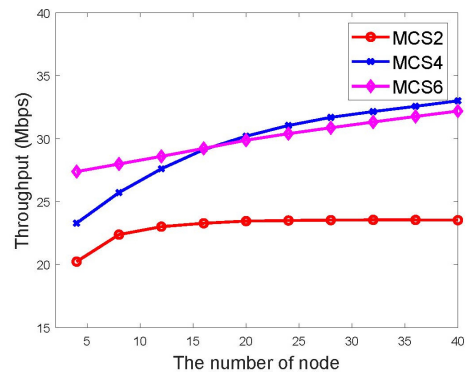


그림 7. 노드 개수에 따른 처리율
Fig. 7. Throughput according to number of node

있으며, 충돌 확률의 증가로 인한 손실보다 전이중 쌍 확률의 증가로 인한 이득이 더 큰 것을 알 수 있다.

또한 MCS level에 따른 성능을 보면 대체적으로 MCS level이 높을수록 더 높은 처리율 성능을 보이며 MCS level이 4와 6일 때는 전이중 쌍 확률과는 상관 없이 성능이 비슷하다. 이와 같은 결과가 나온 이유를 분석하기 위해 반이중 통신으로 인한 처리율과 전이중 통신으로 인한 처리율로 나누어 비교 분석하였다.

그림 8과 9는 각각 반이중 통신으로 인한 처리율과 전이중 통신으로 인한 처리율을 나타낸다. 두 결과 값을 더하면 그림 7과 동일하다. 반이중 처리율의 경우 MCS level이 높을수록 증가하고, 노드의 개수가 증가할수록 감소한다. 이는 MCS level이 높을수록 전이중 쌍 확률이 낮아지기 때문에 반이중 통신을 할 확률이 높아지고, 데이터 전송 속도도 높기 때문에 반이중 처리율이 더 높게 나타난다. 또한 노드의 개수가 증가함에 따라 전이중 쌍 확률이 증가하여 반이중 통신을 할 확률이 감소하고 충돌 확률은 증가하기 때문에 반이중 처리율이 감소하게 된다.

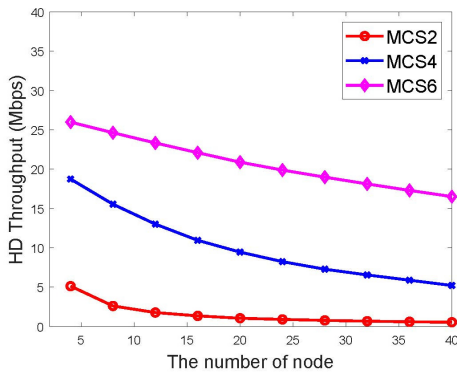


그림 8. 노드 개수에 따른 반이중 처리율
Fig. 8. HD throughput according to number of node

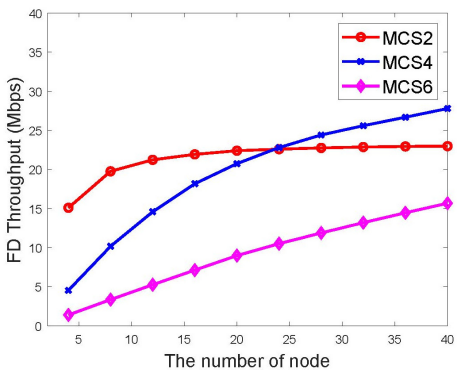


그림 9. 노드 개수에 따른 전이중 처리율
Fig. 9. FD throughput according to number of node

이와 달리 전이중 처리율의 경우 MCS level 낮을 때 전이중 통신이 더 많이 발생하기 때문에 전송 속도가 낮아도 전이중 처리율은 더 높게 나타난다. 하지만 노드의 개수가 증가함에 따라 전이중 쌍 확률도 증가하므로 노드의 개수가 많을 때는 MCS level 4의 전이중 처리율이 가장 높게 나타난다. MCS level 6의 경우 전송 속도는 빠르지만 전이중 쌍 확률은 매우 낮다. 따라서 전이중 통신보다는 반이중 통신이 많이 발생하여 전이중 처리율은 가장 낮게 나타난다.

V. 결 론

본 논문에서는 전이중 쌍 확률을 반영하여 무선랜 시스템에서의 전이중 MAC 프로토콜 성능을 분석하였다. Riverbed modeler를 활용하여 시뮬레이터를 제작하였으며 MCS level과 노드의 개수에 따른 전이중 쌍 확률을 분석하였다. 또한 충돌 확률과 전이중 쌍 확률이 네트워크 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 성능 분석 결과 노드의 개수가 증가함에 따라 전이중 쌍 확률과 충돌 확률 모두 증가하였으며, 기존 연구 결과와 달리 네트워크의 성능 또한 증가하였다. 따라서 충돌 확률로 인한 손실보다 전이중 쌍 확률로 인한 이득이 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 또한 MCS level이 높을수록 SIR 임계값이 높아져 전이중 쌍 확률이 낮았지만 데이터 전송 속도가 높기 때문에 네트워크 성능은 더 높은 것을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 MCS level이 고정된 환경에서 성능 분석을 수행했지만, 향후 다양한 MCS level이 존재하는 환경에서 노드의 거리에 따른 MCS level별 전이중 쌍 확률을 분석하고 그에 맞는 전이중 MAC 프로토콜에 관한 연구를 수행할 계획이다.

References

- [1] J. I. Choi, M. Jain, K. Srinivasan, P. Levis, and S. Katti, "Achieving single channel, full duplex wireless communication," in *Proc. ACM MobiCom*, pp. 1-12, Chicago, USA, Sep. 2010.
- [2] M. Jain, et al., "Practical, real-time, full duplex wireless," in *Proc. ACM Mobicom*, pp. 301-312, Las Vegas, USA, Sep. 2011.
- [3] E. M. Dinesh Bharadia and S. Katti, "Full duplex radios," in *Proc. ACM SIGCOMM*, pp. 375-386, Hong Kong, China, Aug. 2013.

- [4] C. Li, et al., "FDCA: A full-duplex collision avoidance MAC protocol for underwater acoustic networks," *IEEE Sensors J.*, vol. 16, no. 11, pp. 4638-4647, Jun. 2016.
- [5] L. Zhang, Q. Fan, and N. Ansari, "3-D drone-base-station placement with in-band full-duplex communications," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 9, pp. 1902-1905, Sep. 2018.
- [6] J. Y. Kim, O. Mashayekhi, H. Qu, M. Kazadiieva, and P. Levis, "*Janus: A novel MAC protocol for full duplex radio*," Stanford Univ. Comput. Sci., Stanford, CA, USA, Tech Rep., 2013.
- [7] Y. Liao, K. Bian, L. Song, and Z. Han, "Full-duplex MAC protocol Design and Analysis," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 7, pp. 1185-1188, Jul. 2015.
- [8] A. Tang and X. Wang, "A-Duplex: Medium access control for efficient coexistence between full-duplex and half-duplex communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 10, pp. 5871-5885, Oct. 2015.
- [9] K. H. Lee and J. Yoo, "Performance of the full-duplex mac protocol in non-saturated conditions," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 21, no. 8, pp. 1827-1830, Apr. 2017.
- [10] J. K. Kim and J. H. Kim, "Performance evaluation of WLAN environment according to the ratio of full duplex nodes," in *Proc. KICS Winter 2018*, pp. 761-762, Jeongseon, Korea, Jan. 2018.
- [11] IEEE 802.11ac-2013, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, *Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6GHz*, IEEE Std., Dec. 2013.
- [12] J. Lee, et al., "An experimental study on the capture effect in 802.11a networks," in *Proc. ACM WiNTECH*, pp. 19-26. Quebec, Canada, Sep. 2007.
- [13] IEEE P802.11, *TGax Simulation Scenarios*, Jul. 2015.

김진기 (Jin-Ki Kim)



2013년 2월 : 아주대학교 전자공학과 졸업
 2013년 3월~현재 : 아주대학교 전자공학과 석박사통합과정 <관심분야> 무선 MAC 프로토콜, IEEE 802.11, Full duplex 등

[ORCID:0000-0001-7630-6020]

김재현 (Jae-Hyun Kim)



1987년~1996년 한양대학교 전산과 학사 및 석/박사 졸업
 1997년~1998년 미국 UCLA 전기전자과 박사 후 연수
 1998년~2003년 Bell Labs, NJ, USA, 연구원
 2003년~현재 아주대학교 전자공학부 교수

<관심분야> QoE/QoS, 무선 MAC 프로토콜, IEEE 802.11/15, B5G 통신 시스템, 국방 기술네트워크, 위성시스템 등

[ORCID:0000-0003-4716-6916]