



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

# LAA와 WiFi 공존 성능 분석

Performance Analysis on Coexistence of LAA  
and WiFi

2018 년 8 월

서울대학교 대학원

전기정보공학부

박 태 준

# LAA와 WiFi 공존 성능 분석

Performance Analysis on Coexistence of LAA  
and WiFi

지도 교수 최 성 현

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함  
2018 년 8월

서울대학교 대학원  
전기정보공학부  
박 태 준

박태준의 공학석사 학위논문을 인준함  
2018 년 8월

위 원 장 박 세 응 (인)

부위원장 최 성 현 (인)

위 원 심 병 효 (인)

# 초 록

본 논문에서는 LAA와 WiFi 공존 시뮬레이터를 작성한 방법과 시뮬레이터를 활용하여 LAA와 WiFi 공존 성능을 확인한 것을 다룬다. 시스템 레벨 통신 시뮬레이터인 ns-3의 LTE 모듈 코드를 기반으로 3GPP release 13의 표준 동작을 지키는 LAA 모듈을 작성하였으며, 기존 ns-3에서 LTE와 WiFi 채널이 독립적으로 구현되어 있었으나 이를 수정하여 비면허대역에서 LAA와 WiFi간 통신 간섭이 있을 수 있도록 구현하였다. LAA와 WiFi 공존 성능 확인을 위해 LAA의 에너지 감지 임계값을 표준과 다르게 설정하며 어떤 영향이 있는지 실험하였으며, 그 결과 현재 LAA 에너지 감지 임계값이 WiFi의 에너지 감지 임계값과는 상이하여 비대칭적인 히든 문제가 발생하는 것을 확인하였다. LAA와 WiFi간 채널 접속 방식은 비슷하지만, 근본적인 통신 방식이 서로 달라 전통적인 비대칭적인 히든 상황에서 발생하는 문제 외에도 다른 현상이 있는 점을 발견하였으며 이 점을 본 논문에서 자세히 다루었다.

**주요어 :** LAA, WiFi, 공존, 에너지 감지 임계값

**학 번 :** 2012-23216

# 목 차

초 록.....	i
제 1 장 서 론.....	1
제 2 장 LAA의 동작 방식.....	2
제 1 절 채널 접속 방식.....	2
제 2 절 경쟁 윈도우 조절.....	3
제 3 절 무선 랜 채널 감지 기능.....	3
제 4 절 다수 반송파 전송 시 채널 접속 방식.....	4
제 3 장 LAA와 WiFi 공존 시뮬레이터의 구현.....	6
제 1 절 기존 ns-3의 문제점.....	6
제 2 절 채널 모델.....	6
제 3 절 LAA의 매체 접근 제어 모델.....	7
제 4 절 LAA의 물리 계층 모델.....	8
제 5 절 LAA 모듈의 구현.....	8
제 6 절 WiFi 모듈의 구현.....	12
제 4 장 LAA의 다수 채널 접속 방식에 따른 성능 분석.....	13
제 1 절 LAA 단일 링크 분석.....	13
제 2 절 LAA와 WiFi 공존 성능 분석.....	15
제 3 절 LAA간 채널 접속 방식에 따른 공존 성능 분석.....	19
제 5 장 LAA의 에너지 감지 임계값 변화에 따른 WiFi와의 공존 성능 분석.....	23
제 1 절 실험 환경.....	23
제 2 절 WiFi 네트워크는 항상 전송을 성공하는 환경.....	24
제 3 절 LAA 네트워크는 항상 전송을 성공하는 환경.....	34
제 6 장 결론.....	43
참고 문헌.....	44
Abstract.....	45
감사의 글.....	46

## 표 목차

표 1. 채널 접속 우선 계층에 따라 다른 LAA 파라미터 .....	3
표 2. 통신 기기간 거리에 따른 LOS 확률 ( $d$ 는 거리를 나타냄).....	6
표 3. LOS 여부에 따른 전파 손실 모델 ( $d$ 는 거리이며 단위는 $m$ , $f_c$ 는 중심 주파수이며 단위는 GHz 임).....	7
표 4. LOS 여부에 따른 음영 페이딩 효과 ( $N_0, N_1, N_2, N_3$ 는 정규 분포를 따르는 독립적인 랜덤 변수).....	7
표 5. LAA 단일 링크 실험 환경 변수 .....	13
표 6. LAA와 WiFi 공존 실험 환경 변수.....	16
표 7. LAA간 채널 접속 방식에 따른 공존 실험 환경 변수 .....	20

## 그림 목차

그림 1. 전송 전력 (PTX)에 따라 설정 가능한 에너지 감지 임계값 의 최대치 ( $X_{\text{Thresh}}$ ).....	4
그림 2. LAA 구현을 위한 반송파 결합 구현 요약도.....	9
그림 3. 상호 간섭 구현을 위해 LAA 채널에 WiFi 물리 계층을 등 록.....	11
그림 4. 상호 간섭 구현을 위해 WiFi 채널에 LAA 채널을 등록...	11
그림 5. LAA 단일 링크 실험 환경.....	13
그림 6. 채널 접속 방식 A1과 A2의 단일 링크 수율.....	14
그림 7. 채널 접속 방식 B1과 B2의 단일 링크 수율.....	14
그림 8. LAA와 WiFi 공존 실험 환경.....	15
그림 9. 채널 접속 방식 A1을 사용하는 LAA와 WiFi의 공존 환경 수율.....	16
그림 10. 채널 접속 방식 A2를 사용하는 LAA와 WiFi의 공존 환경 수율.....	17
그림 11. 채널 접속 방식 B1을 사용하는 LAA와 WiFi의 공존 환경 수율.....	17
그림 12. 채널 접속 방식 B2를 사용하는 LAA와 WiFi 공존 환경 수율.....	18
그림 13. LAA간 채널 접속 방식 공존 실험을 위한 eNB 배치 (같은 색으로 표기된 eNB는 동일한 채널 접속 방식을 사용함).....	19
그림 14. 비면허대역 수에 따른 채널 접속 방식 A1의 공존 성능	20
그림 15. 비면허대역 수에 따른 채널 접속 방식 A2의 공존 성능	21
그림 16. 비면허대역 수에 따른 채널 접속 방식 B1의 공존 성능	21
그림 17. 비면허대역 수에 따른 채널 접속 방식 B2의 공존 성능	21
그림 18. WiFi 네트워크는 항상 전송을 성공하는 환경.....	23
그림 19. LAA 네트워크는 항상 전송을 성공하는 환경.....	23
그림 20. eNB와 AP간 동시 전송 발생 시, UE의 SINR.....	24
그림 21. eNB와 AP간 동시 전송 발생 시, STA의 SINR.....	24

그림 22. eNB에서 받는 AP 전송 신호 세기 (흰색, 주황색, 빨간색 테두리는 LAA 에너지 감지 임계값을 각각 -62, -72, -82 dBm 으로 하였을 때 해당 임계값을 넘는 AP 신호가 eNB로 들어오는 최종 지점).....	25
그림 23. eNB에서 받는 STA 전송 신호 세기 (흰색, 주황색, 빨간색 테두리는 LAA 에너지 감지 임계값을 각각 -62, -72, -82 dBm 으로 하였을 때 해당 임계값을 넘는 STA 신호가 eNB로 들어오는 최종 지점).....	25
그림 24. AP에서 받는 eNB 전송 신호 세기 (흰색 테두리는 WiFi 에너지 감지 임계값인 -62 dBm을 넘는 eNB 신호가 AP로 들어오는 최종 지점) .....	26
그림 25. LAA 에너지 감지 임계값이 -72 dBm 일 때, LAA의 수율 (왼쪽 및 오른쪽 주황색 테두리는 LAA 에너지 감지 임계값을 넘는 STA과 AP의 신호가 들어오는 최종 지점을 각각 나타냄) .....	26
그림 26. LAA 에너지 감지 임계값이 -72 dBm 일 때, WiFi의 수율 (흰색 테두리는 eNB 신호가 WiFi의 에너지 감지 임계값을 넘는 최종 지점을 나타냄) .....	27
그림 27. LAA 에너지 감지 임계값이 -72 dBm 일 때, LAA의 채널 점유 시간.....	27
그림 28. LAA 에너지 감지 임계값이 -72 dBm 일 때, WiFi의 채널 점유 시간.....	28
그림 29. LAA 에너지 감지 임계값이 -72 dBm 일 때, LAA의 MCS 사용 통계.....	28
그림 30. LAA 에너지 감지 임계값이 -72 dBm 일 때, WiFi의 MCS 사용 통계.....	29
그림 31. LAA 에너지 감지 임계값이 -62 dBm 일 때, LAA 수율 (흰색 테두리는 LAA 에너지 감지 임계값을 넘는 STA과 AP의 신호가 들어오는 최종 지점을 나타냄).....	31
그림 32. LAA 에너지 감지 임계값이 -82 dBm 일 때, LAA 수율	

(왼쪽 및 오른쪽 빨간색 테두리는 LAA 에너지 감지 임계값을 넘는 STA와 AP의 신호가 들어오는 최종 지점을 각각 나타냄) .....	31
그림 33. LAA 에너지 감지 임계값이 -62 dBm일 때, LAA의 채널 점유 시간.....	32
그림 34. LAA 에너지 감지 임계값이 -82 dBm일 때, LAA의 채널 점유 시간.....	32
그림 35. LAA 에너지 감지 임계값이 -62 dBm일 때, LAA의 MCS 사용 통계.....	33
그림 36. LAA 에너지 감지 임계값이 -82 dBm일 때, LAA의 MCS 사용 통계.....	33
그림 37. eNB와 AP간 동시 전송 발생 시 UE의 SINR.....	34
그림 38. eNB와 AP간 동시 전송이 발생 시 STA의 SINR.....	34
그림 39. eNB에서 받는 AP 전송 신호 세기 (흰색, 주황색, 빨간색 테두리는 LAA 에너지 감지 임계값을 각각 -62, -72, -82 dBm으로 하였을 때 해당 임계값을 넘는 AP 신호가 eNB로 들어오는 최종 지점).....	35
그림 40. eNB에서 받는 STA 전송 신호 세기 (흰색, 주황색, 빨간색 테두리는 LAA 에너지 감지 임계값을 각각 -62, -72, -82 dBm으로 하였을 때 해당 임계값을 넘는 STA 신호가 eNB로 들어오는 최종 지점).....	35
그림 41. AP에서 받는 eNB 전송 신호 세기 (흰색 테두리는 WiFi 에너지 감지 임계값인 -62 dBm을 넘는 eNB 신호가 AP에 간섭을 미치는 최종 지점).....	36
그림 42. LAA 에너지 감지 임계값이 -72 dBm 일 때, LAA의 수율 (작은 주황색 테두리 및 긴 주황색 테두리는 LAA 에너지 감지 임계값을 넘는 STA와 AP의 신호가 들어오는 최종 지점을 각각 나타냄).....	36
그림 43. LAA 에너지 감지 임계값이 -72 dBm 일 때, WiFi의 수율 (흰색 테두리는 eNB 신호가 WiFi의 에너지 감지 임계값을 넘는	

최종 지점을 나타냄) .....	37
그림 44. LAA 에너지 감지 임계값이 -72 dBm 일 때, LAA의 채널 점유 시간.....	37
그림 45. LAA 에너지 감지 임계값이 -72 dBm 일 때, WiFi의 채널 점유 시간.....	38
그림 46. LAA 에너지 감지 임계값이 -72 dBm 일 때, LAA의 MCS 사용 통계.....	38
그림 47. LAA 에너지 감지 임계값이 -72 dBm 일 때, WiFi의 MCS 사용 통계.....	39
그림 48. LAA 에너지 감지 임계값이 -62 dBm 일 때, LAA의 수율 (작은 흰색 테두리 및 긴 흰색 테두리는 LAA 에너지 감지 임계값을 넘는 STA와 AP의 신호가 들어오는 최종 지점을 각각 나타냄).....	41
그림 49. LAA 에너지 감지 임계값이 -62 dBm 일 때, WiFi의 수율 (흰색 테두리는 eNB 신호가 WiFi의 에너지 감지 임계값을 넘는 최종 지점을 나타냄) .....	41
그림 50. LAA 에너지 감지 임계값이 -82 dBm 일 때, LAA의 수율 (작은 빨간색 테두리 및 긴 빨간색 테두리는 LAA 에너지 감지 임계값을 넘는 STA의 신호 및 AP의 신호가 들어오는 최종 지점을 각각 나타냄) .....	42
그림 51. LAA 에너지 감지 임계값이 -82 dBm 일 때, WiFi의 수율 (흰색 테두리는 eNB 신호가 WiFi의 에너지 감지 임계값을 넘는 최종 지점을 나타냄) .....	42

# 제 1 장 서 론

현재 LTE 네트워크는 면허대역을 활용하고 있으나 계속되는 트래픽 증가 등으로 인해 활용 가능한 대역을 더 필요로 하고 있는 실정이다. 이러한 수요를 맞추기 위해 여러 기술들이 연구 개발되고 있는 중이며, 3GPP에 의해 표준화된 기술인 Licensed-Assisted Access (LAA)도 그 중 하나이다. 해당 기술은 LTE를 기반으로 면허대역 뿐 아니라 비면허대역까지 활용하여 늘어나는 트래픽 수요를 맞추고자 한다.

LAA는 비면허대역에서의 새로운 통신 기술이기에 기존 비면허대역 통신 기술들인 ZigBee, Bluetooth, WiFi 등과 공존하였을 때 상호 영향을 주고 받으며 이로 인해 공존 성능의 열화가 생길 수 있다. 본 논문에서는 LAA와 WiFi간 공존에 대해 다루고자 하며, 이는 LAA와 WiFi 두 통신 기술 모두 데이터를 빠르게 전송하는 데에 목표를 두고 있어 기술 간 유사성이 높다고 판단하였기 때문이다.

본 논문에서는 새로운 통신 기술인 LAA에 대해 소개하고, LAA와 WiFi 공존 시뮬레이터 구현에 관한 내용에 대해 서술한다. 이후, 시뮬레이터를 이용하여 얻은 실험 결과들을 분석한 후 논문을 마무리한다.

## 제 2 장 LAA의 동작 방식

### 제 1 절 채널 접속 방식

LAA는 [1]의 Listen Before Talk (LBT) 규제를 지키는 비면허대역 채널 접속 방식을 사용한다. LBT 규제는 채널을 사용하기 전에 먼저 사용자가 있는지 확인하고, 사용자가 없다고 판단되면 채널을 사용할 수 있도록 하는 것을 골자로 하는 규제이다.

LAA 디바이스는 해당 규제를 지키기 위해 다음과 같은 채널 접속 방식을 채택하고 있다 [2]. 0 과 현재 경쟁 윈도우 값 사이의 정수를 임의로 뽑아 백오프 카운터에 해당 값으로 저장한 후 1 감소시킨다. defer duration 동안 채널이 비어있는 지 확인하여 비어있다고 판단되면, 이후 9 us 마다 채널이 비었을 경우 백오프 카운터 값을 1씩 감소시킨다. 백오프 카운터 값을 감소시키는 동안 채널이 비어있지 않다고 판단될 경우 다시 defer duration 동안 채널이 비었을 때까지 백오프 카운터 값을 그대로 두며, 채널이 defer duration 동안 비었다고 판단되면 백오프 카운터 값을 1 감소시킨 후, 9 us 마다 채널이 비었을 경우 백오프 카운터 값을 1씩 감소시킨다. 백오프 카운터 값이 0이 되었을 경우 해당 LAA 디바이스는 채널 접속이 가능하다.

채널 접속 우선 계층에 따라 한 번 채널에 접속하였을 때 사용할 수 있는 최대 시간이 다르며, 경쟁 윈도우 값의 최소 및 최대 값, defer duration도 달라지며, 이를 표 1로 정리하였다. 채널 접속 우선 계층 3과 4의 경우, 해당 채널을 다른 기술들이 사용하지 않는다고 판단될 경우에는 10 ms 최대 채널 점유 시간을 가질 수 있으며, 그렇지 않을 경우에는 8 ms의 최대 채널 점유 시간을 가진다.

표 1. 채널 접속 우선 계층에 따라 다른 LAA 파라미터

채널 접속 우선 계층	Defer duration (us)	경쟁 윈도우 최소값	경쟁 윈도우 최대값	최대 채널 점유 시간 (ms)	허용되는 경쟁 윈도우
1	25	3	7	2	{3, 7}
2	25	7	15	3	{7, 15}
3	43	15	63	8 or 10	{15, 31, 63}
4	79	15	1023	8 or 10	{15, 31, 63, 127, 255, 511, 1023}

## 제 2 절 경쟁 윈도우 조절

경쟁 윈도우 조절은 여러 사용자의 동시 채널 전송으로 인한 충돌 확률을 적절한 선에서 제어하고자 하는 것이 목표이다. LAA 시스템에서는 채널 점유 시간 중 기준 서브프레임의 Hybrid Automatic Repeat and reQuest (HARQ) 피드백의 NACK 비율을 기준으로 경쟁 윈도우를 조절한다. 첫 번째 서브프레임을 기준 서브프레임으로 하며, 첫 번째 서브프레임의 두 번째 슬롯부터 HARQ 피드백이 가능할 경우 그 다음 서브프레임까지도 기준 서브프레임으로 포함시킬 수 있다. NACK의 비율이 80% 미만일 경우에는 가장 작은 경쟁 윈도우를 다음 백오프에서 사용한다. 반면, NACK의 비율이 80% 이상일 경우에는 이전 경쟁 윈도우 값에 2배를 곱하고 1을 더한 값을 사용하게 된다. 이미 최대 경쟁 윈도우를 사용하고 있는 경우에는 그 값을 그대로 사용하며 연속하여 최대 경쟁 윈도우 값을  $K$ 번 사용했을 경우에는 다시 가장 작은 경쟁 윈도우 값을 사용할 수 있도록 할 수 있다.  $K$ 의 값은 1과 8 사이의 정수이며 서비스를 제공하는 오퍼레이터가 임의로 정할 수 있는 값이다.

## 제 3 절 무선 랜 채널 감지 기능

LAA는 채널이 비어있는지 판단하는 기준으로 에너지 감지 방식을 사용한다. 에너지 감지 임계 값을 넘으면 채널이 다른 사용자에게 의해 사용된다고 판단하는 것이다.

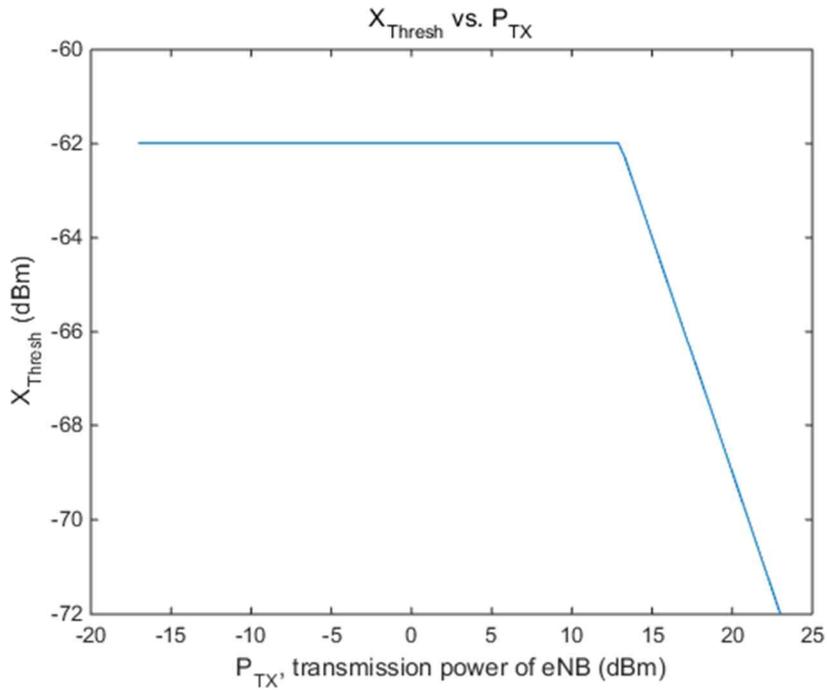


그림 1. 전송 전력 ( $P_{TX}$ )에 따라 설정 가능한 에너지 감지 임계값의 최대치 ( $X_{Thresh}$ )

그림 1과 같이 에너지 감지 임계 값의 최대치는 전송 전력의 크기에 영향을 받는다. 전송 전력 23 dBm 기준 에너지 감지 임계값의 최대치는  $-72$  dBm이며, 전송 전력이 낮아질수록 에너지 감지 임계값의 최대치는 더 높아지며, 13 dBm 이하의 전송 전력을 사용할 경우  $-62$  dBm으로 고정된다. 이 디자인으로 인해 다수의 통신 기기가 있는 환경에서 공간을 효율적으로 재사용할 수 있는데, 전송 전력이 낮은 디바이스는 주변 기기들에 미치는 영향이 낮아 에너지 감지 임계값을 높여 채널을 좀 더 적극적으로 사용할 수 있게 되고, 전송 전력이 높은 디바이스는 주변 기기들에 미치는 영향이 높아 에너지 감지 임계값을 낮추어 채널을 좀 더 보수적으로 사용하여 때문이다.

#### 제 4 절 다수 반송파 전송 시 채널 접속 방식

LAA eNodeB (eNB)는 다수의 반송파를 이용한 동시 전송이 가능하며, 이러한 채널 접속 방식은 크게 방식 A와 방식 B로 나뉜다. 방식 A는 각 채널별로 백오프 카운터의 값을 뽑아서 관리하고, 가장 먼저 백오프 카운터가 0이 되는 채널에서 전송을 하는 방식이다. 방식

B는 하나의 채널에서만 백오프 카운터의 값을 뽑아 관리하고 백오프 카운터의 값이 0이 되는 시점에 해당 시점으로부터 일정 기간동안 비어있다고 판단되는 채널들에서 동시 전송을 할 수 있는 방식이다. 방식 A와 방식 B는 경쟁 윈도우의 관리 방식 및 백오프 카운터 관리 방식에 따라 방식 A1, A2, B1, B2로 나누어진다.

채널 접속 방식 A1과 A2는 각 채널에서 백오프 카운터와 경쟁 윈도우를 관리한다는 점은 동일하다. 하지만, 방식 A1의 경우 각 채널간 백오프 카운터 값을 관리하는 것이 독립적으로 이루어지나, 채널 접속 방식 A2의 경우에는 백오프 카운터 값을 관리하는 것이 독립적으로 이루어지지 않고 서로의 영향을 받는다는 차이점이 있다. 채널 접속 방식 A1의 경우, 각 채널에서 경쟁 윈도우 값을 관리하고 각 채널의 경쟁 윈도우의 값을 이용하여 백오프 카운터의 값을 임의로 정하여 백오프를 진행한다. 채널 접속 방식 A2의 경우, 각 채널에서 경쟁 윈도우를 관리하나 백오프 카운터의 값을 임의로 정함에 있어 모든 채널의 경쟁 윈도우 값 중 가장 큰 값을 이용하며 모든 채널의 백오프 카운터 값을 모두 같은 값으로 설정하여 준다.

채널 접속 방식 B1과 B2는 하나의 채널에서만 백오프 카운터를 관리하며, 다른 채널들에서의 동시 전송은 백오프를 진행하는 채널에서 백오프 카운터가 0이 된 시점으로부터 직전 25 us 이상 비어있던 모든 채널들에 대해서 이루어질 수 있다는 점은 동일하다. 하지만, 채널 접속 방식 B1의 경우 모든 채널을 통틀어 하나의 경쟁 윈도우만을 관리하지만, 채널 접속 방식 B2의 경우에는 각 채널 별로 경쟁 윈도우를 관리한다는 차이점이 있으며, 이로 인해 경쟁 윈도우를 관리하는 방식에 차이가 생기게 된다. 채널 접속 방식 B1의 경우 각 채널의 HARQ 피드백은 각 채널의 경쟁 윈도우를 정하는 데 이용되나, 채널 접속 방식 B2의 경우 모든 채널의 HARQ 피드백을 이용하여 하나의 경쟁 윈도우를 정하게 된다.

## 제 3 장 LAA와 WiFi 공존 시뮬레이터의 구현

### 제 1 절 기존 ns-3의 문제점

기존 ns-3에는 LAA 프로토콜이 구현되어 있지 않으며, WiFi 모듈과 LAA 모듈의 베이스가 될 LTE 모듈이 독립적으로 구현되어 있어 상호 영향을 주고 받을 수 없어 LAA와 WiFi 공존 실험을 하기에 부적합하다.

본 장에서는 LAA와 WiFi 공존 실험을 위해 ns-3에 구현한 채널 모델, 매체 접근 제어 모델, 물리 계층 모델에 대해 설명한다. 이후, LAA 모듈을 어떻게 구현하였으며, 완성된 LAA 모듈과 기존 WiFi 모듈 간 상호 간섭을 어떻게 미칠 수 있도록 구현하였는지 설명한다.

### 제 2 절 채널 모델

채널 모델은 3GPP indoor-hotspot model에서 권고하는 것을 모두 따랐으며, 전파 손실 모델, 음영 페이딩 모델, 다중 경로 페이딩 모델을 모두 적용하였다. 수신 전력은 전송 전력에서 전파 손실 모델에 의해 나온 값을 빼 주고, 나머지 두 모델에서 나온 값들을 더해주고 전송단과 수신단의 안테나 이득을 각각 더해주면 얻을 수 있다.

전파 손실 모델을 적용하기 위해 통신 기기간 링크가 line-of-sight (LOS)가 형성되어 있는지, non-line-of-sight (NLOS)가 형성되어 있는지를 거리에 따라 확률적으로 정하며 LOS일 확률에 대한 식은 표 2와 같다. 이후, LOS인지 NLOS인지에 따라 서로 다른 전파 손실 모델을 적용하며, 거리와 중심 주파수에 따라 전파 손실이 결정되는 식을 사용하며, 이는 표 3과 같다.

표 2. 통신 기기간 거리에 따른 LOS 확률 (d는 거리를 나타냄)

통신 기기간 거리 (미터)	링크가 LOS일 확률
$d \leq 18$	1
$18 < d < 37$	$e^{-\frac{d-18}{27}}$
$d \geq 37$	0.5

표 3. LOS 여부에 따른 전파 손실 모델  
( $d$ 는 거리이며 단위는 m,  $f_c$ 는 중심 주파수이며 단위는 GHz 임)

시나리오	전파 손실 (dB)
LOS	$16.9 \log_{10} \frac{d}{1000} + 32.8 + 20 \log_{10} f_c$
NLOS	$43.4 \log_{10} \frac{d}{1000} + 11.5 + 20 \log_{10} f_c$

음영 페이딩 모델도 LOS인지 NLOS인지에 따라 다른 식을 적용하며, 이는 표 4와 같다.

표 4. LOS 여부에 따른 음영 페이딩 효과  
( $N_0, N_1, N_2, N_3$  는 정규 분포를 따르는 독립적인 랜덤 변수)

시나리오	음영 페이딩 효과 (dB)
LOS	$0.3 \cdot (-0.3974N_0 - 0.1486N_1 - 0.1836N_2 + 0.8568N_3 + 0.2287N_4)$
NLOS	$0.4 \cdot (-0.2739N_0 + 0.0313N_1 - 0.2136N_2 + 0.9372N_3 + 0N_4)$

다중 경로 페이딩 모델은 시뮬레이션 런타임으로 계속 계산을 하기에는 시뮬레이션 속도 저하가 심하기 때문에 미리 데이터 셋을 만들어두고, 그 값을 시뮬레이션 시간과 링크에 따라 다른 값을 불러오도록 구현하였다. 데이터 셋은 10초간에 대한 페이딩 값을 저장해 두었으며, 시간별로 그 다음 인덱스의 페이딩 값을 불러오도록 하였으며, 링크간 서로 다른 페이딩 효과를 얻도록 하기 위하여 시뮬레이션 시작 시, 각 링크별로 데이터 셋에서 시작하는 인덱스 값을 랜덤하게 선택하도록 하였다.

### 제 3 절 LAA의 매체 접근 제어 모델

스케줄러는 매 서브프레임마다 proportional fair 알고리즘을 채택하여 면허대역부터 비면허대역순으로 각 반송파별로 순서대로 스케줄링을 해 주도록 하였다.

## 제 4 절 LAA의 물리 계층 모델

표준에는 정의되어 있지 않지만, 채널 접속 후 데이터 전송까지 reservation signal이라는 더미 신호를 전송하도록 하여 같은 대역에서 동작하는 무선 통신 기기들이 해당 기간 동안 채널 접속을 할 수 없도록 하였다.

표준에 정의된 Partial subframe 을 도입하였다. Partial subframe은 적용되는 시점에 따라 initial partial subframe과 ending partial subframe으로 나뉜다. Initial partial subframe은 LAA가 사용할 수 있는 channel occupancy time (COT)의 앞 부분에 적용되는 기술로서 subframe의 중간인 0.5 ms부터 다음 subframe boundary까지 사용하는 것을 허용한다. 이를 통해 최대 1 ms였던 reservation signal overhead를 최대 0.5 ms로 줄일 수 있다. Ending partial subframe은 남은 COT가 1 ms 보다 작을 때 이를 활용할 수 있게 하는 기술이다. Ending partial subframe을 활용하여 최대 12 OFDM symbol을 전송할 수 있고 남은 COT에 따라 6, 9, 10, 11, 12 OFDM symbol 중 하나의 값을 선택하여 사용할 수 있다. Partial subframe은 기존 normal subframe에 비해 전송할 수 있는 data size가 작으며, 이에 따라 transport block error rate이 달라지며, 이를 모두 고려하여 시뮬레이터에 반영하였다.

## 제 5 절 LAA 모듈의 구현

LAA 모듈 구현은 멀티 채널을 통해 비면허대역 전송이 가능하도록 하는 반송과 결합 기술의 구현, LTE에는 없는 비면허대역 채널 접속 방식을 적용하기 위한 구현, WiFi와 LAA 전송이 상호간 영향을 미칠 수 있도록 하기 위한 구현, 서브프레임 단위보다 짧은 기간의 간섭을 처리할 수 있도록 한 구현으로 나눌 수 있다.

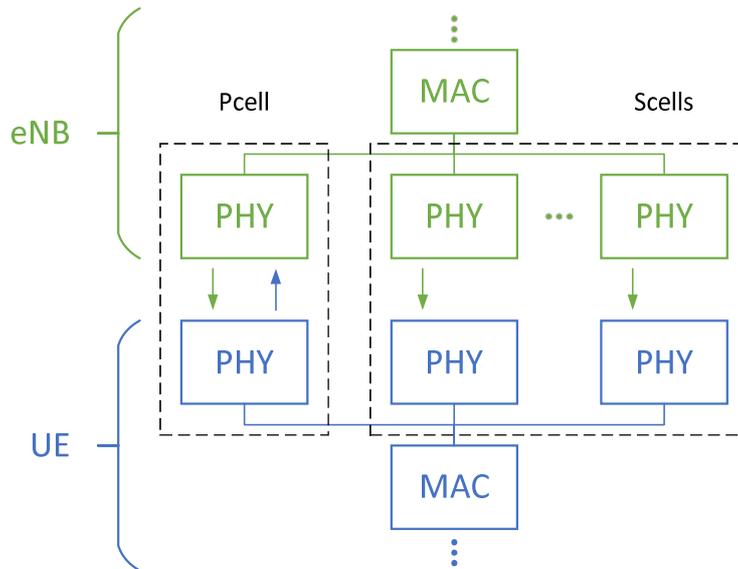


그림 2. LAA 구현을 위한 반송과 결합 구현 요약도

반송과 결합을 구현하기 위해 그림 2와 같이 물리 계층의 개수를 사용할 수 있는 채널의 수만큼 확장하였으며, 이를 제어하는 매체 제어 계층 또한 각 요소 반송과별로 전송 및 재전송을 제어할 수 있도록 확장하였다.

LAA의 채널 접속 방식을 적용하기 위해 eNB 객체에 LbtManager 객체를 추가하였으며, 해당 객체가 중심이 되어 임의 백오프 동작, partial subframe 사용 동작, 채널 예약 신호 사용 동작을 제어하도록 구현하였다.

LbtManager의 백오프 동작 관리는 임의 백오프 동작을 관리하는 부분과 백오프 동작을 돕기 위해 다른 계층들과 피드백을 주고 받는 부분으로 구성하였다. 백오프 카운터 값을 임의로 정한 후, 해당 채널이 계속 비어 있다고 가정했을 때 백오프가 끝나는 시점에 AccessTimeout 메시지를 호출하도록 스케줄하며, 해당 시점에 AccessTimeout 메시지가 불리면 UpdateBackoff 메시지가 호출되어 실제 채널 상태를 확인하여 백오프 카운터 값을 조절하고 백오프 카운터 값이 0이 될 때까지 AccessTimeout이 계속 불리는 순환 구조로 작성되어 있다. 임의 백오프를 진행하기 위해 현재 채널이 자신 또는 다른 사용자에게 의해 사용되는지 알아야 하며 이를 위해 물리 계층에 해당하는 LteSpectrumPhy 객체로부터 자신이 전송 중일 경우 및 에너지 임계 값을 넘는 에너지가 검출될 경우 각각 NotifyTx 메시지 및 NotifyMaybeCcaBusy 메시지가 호출되어 LbtManager에 해당 정보를

전달하도록 구현하였다. 또한 경쟁 윈도우 크기 업데이트를 위해 COT 내에서 기준 서브프레임이 되는 첫 번째 서브프레임의 HARQ 피드백 결과를 PFFfMacScheduler 객체의 TransferHarqFeedback 메시지를 호출하여 전달하도록 구현하였다. 매체 제어 계층에 존재하는 PFFfMacScheduler에서 Radio Link Control (RLC) 계층의 대기열이 비었을 경우, LbtManager 객체의 EndOfCot 메시지를 불러 채널 점유가 끝나는 것을 알려주고 전송이 끝나는 시간부터 다시 임의 백오프를 통한 채널 접속 재개를 할 수 있도록 구현하였다.

서브프레임의 첫 번째 슬롯에서 채널 접속 허가가 될 경우, 두 번째 슬롯만을 이용하여 전송이 가능한 initial partial subframe을 사용할 수 있도록 구현하였다. LbtManager는 매체 접근 제어 계층에 스케줄링을 요청하고 물리 계층에서는 새롭게 정의한 StartInitialPartialSubframe 메시지가 불러 두 번째 슬롯부터 데이터 전송이 가능하도록 구현하였다. COT내의 마지막 서브프레임에서는 6/12 ms, 9/14 ms, 10/14 ms, 11/14 ms, 12/14 ms 의 길이를 가진 ending partial subframe들중 MCOT를 최대한으로 활용할 수 있는 길이를 선택하도록 구현하였다. Ending partial subframe의 스케줄링 및 전송 시작 부분은 기존 LTE와 같이 서브프레임 시작 부분에 존재하며 전송 길이만 다르기 때문에 LteEnbPhy의 매 서브프레임의 시작부분에서 호출되는 StartSubframe 메시지를 재활용하였으며, 전송 길이가 다른 것을 구현하기 위해 StartEndParitialSubframe 메시지가 불리도록 구현하였다.

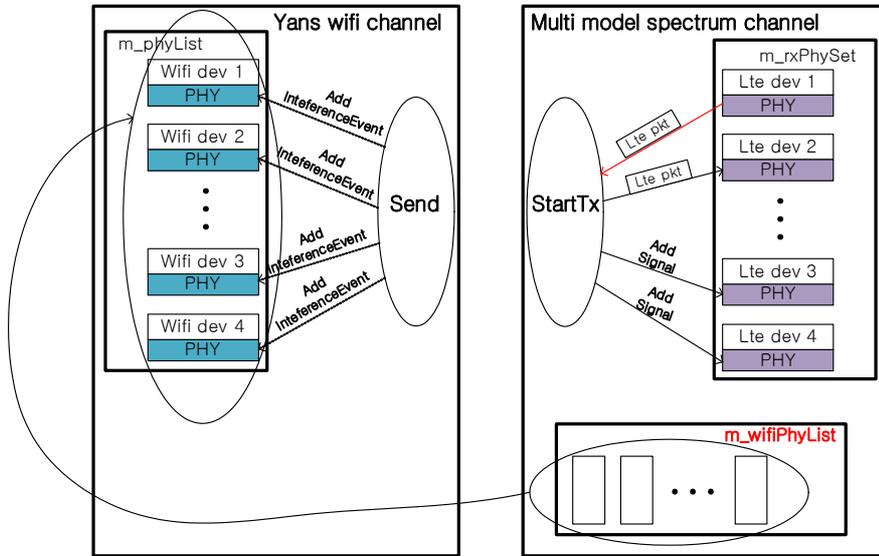


그림 3. 상호 간섭 구현을 위해 LAA 채널에 WiFi 물리 계층을 등록

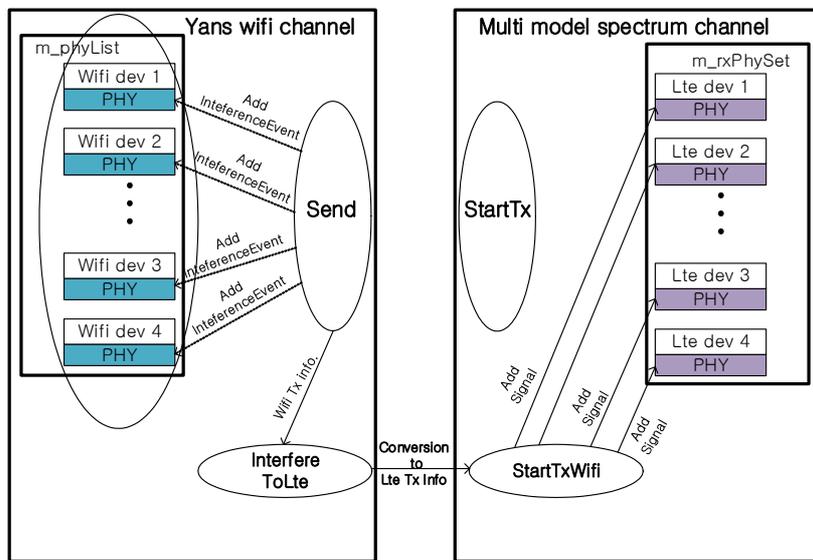


그림 4. 상호 간섭 구현을 위해 WiFi 채널에 LAA 채널을 등록

LAA 전송 신호가 WiFi에 영향을 미칠 수 있도록 하기 위해 그림 3과 같이 LAA의 채널에 WiFi 물리 계층들을 등록하여, LAA 전송이 일어났을 때 LAA 물리 계층에만 해당 신호를 전달하는 것뿐만 아니라

WiFi 물리계층에도 해당 신호를 전달하여 간섭을 미칠 수 있도록 구현하였다. WiFi 전송 신호가 LAA에 영향을 미칠 수 있도록 하기 위해 그림 4와 같이 WiFi 채널에 LAA 채널을 등록하여 WiFi 물리계층에서 전송 이벤트가 발생할 경우 LAA 채널에 이 정보를 전달하여 LAA 채널에 등록된 LAA 물리 계층들에 간섭을 미칠 수 있도록 구현하였다.

LAA 물리계층이 WiFi의 신호 및 LAA의 신호 등 서브프레임보다 짧은 신호를 수신 가능해짐에 따라 물리 계층이 이러한 짧은 신호를 처리할 수 있도록 구현하였다. 기존 LTE 모듈은 서브프레임 단위 이하의 간섭이 왔을 경우, 데시벨 단위의 Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR)의 시간 가중 평균값을 서브프레임을 대표하는 SINR인 effective SINR로 구하는 방식을 사용하였다. 데시벨 단위의 SINR 값은 지수를 대표하는 값이므로 이를 단순히 시간 가중 평균할 경우, 어떤 의미를 가지는 지 알 수 없으며, 어떤 논문을 참조하지도 않은 문제가 있는 구현이었다. 이를 수정하여 SINR이 다른 구간마다 Mutual Information를 구하고 이를 시간 가중 평균하도록 수정하였다.

## 제 6 절 WiFi 모듈의 구현

기존 ns-3에 구현된 WiFi는 부반송파가 구현되어 있지 않아 20 MHz 보다 좁은 부분 단위로 오는 간섭을 제대로 반영할 수 없었다. WiFi에 간섭을 미칠 수 있는 LAA 전송 신호는 20 MHz 채널을 나누어 사용하는 것이 가능하기 때문에 이를 반영할 수 있도록 WiFi의 부반송파 구현을 하였다. 총 52개의 부반송파를 구현하였으며, 실제 WiFi의 경우에는 간섭 신호가 파일럿 부반송파와 데이터 부반송파에 미치는 영향이 다를 수 있지만, 해당 구현에서는 52개의 부반송파가 모두 동등한 중요도를 가지고 있다고 가정하고 구현하였다. 전체 부반송파를 대표하는 effective SINR을 구하기 위해 각 부반송파별로 SINR-BER 커브를 이용하여 SINR에 따른 BER을 구하고, 각 부반송파별 BER을 산술평균하고 이를 다시 SINR-BER 커브의 역함수를 이용하여 effective SINR을 산출하였다 [3].

## 제 4 장 LAA의 다수 채널 접속 방식에 따른 성능 분석

본 장에서는 다수의 채널을 사용할 때 3GPP Release 13에 정의된 네 가지 채널 접속 방식의 성능을 수율 측면에서 비교한다.

### 제 1 절 LAA 단일 링크 분석

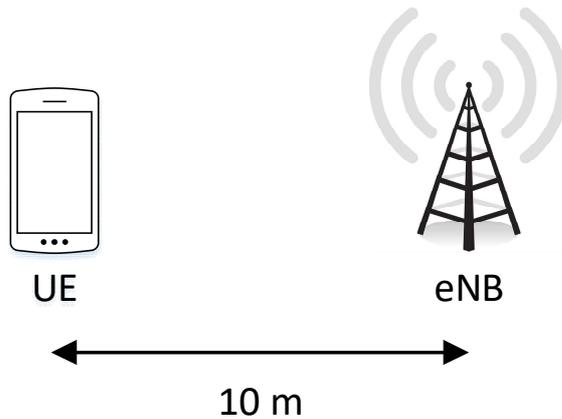


그림 5. LAA 단일 링크 실험 환경

간섭이 없는 상황에서 각 채널 접속 방식 간 성능을 비교하기 위해 그림 5와 같이 하나의 eNB와 하나의 UE가 10 m 떨어진 위치에 두고 비면허대역의 수를 늘려가며 실험을 진행한 후, 수율 성능을 확인하였다. 세부적인 실험 환경 변수는 표 5와 같다.

표 5. LAA 단일 링크 실험 환경 변수

환경 변수	값
LAA 전송 전력	23 dBm
LAA MCOT	4 ms
LAA 에너지 감지 임계값	-72 dBm
트래픽 모델	Saturated traffic model
전파 손실 모델	3GPP indoor hotspot model
시뮬레이션 시간	1초

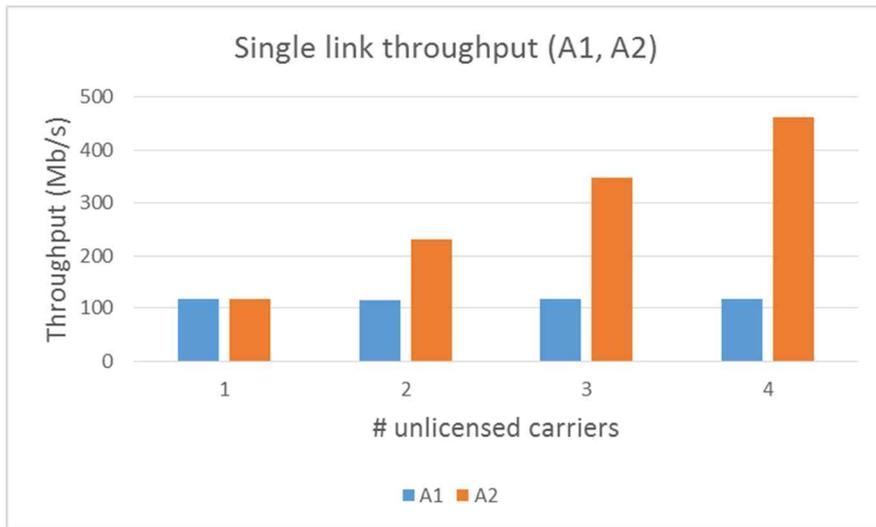


그림 6. 채널 접속 방식 A1과 A2의 단일 링크 수율

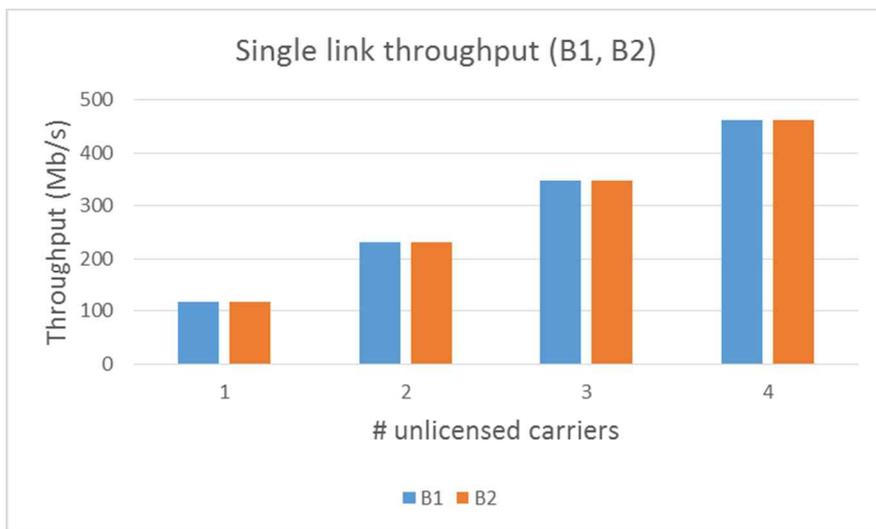


그림 7. 채널 접속 방식 B1과 B2의 단일 링크 수율

그림 6, 그림 7에서 채널 접속 방식 A1은 비면허대역의 개수와 상관없이 비슷한 성능을 보이는 것을 확인하였으며, 채널 접속 방식 A2, B1, B2는 비면허대역의 개수가 증가함에 따라 수율이 선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. 다수 채널을 통해 동시 전송을 얼마나 하는가에 따라 성능 차이가 발생하며, 채널 접속 방식 A1의 경우에는 간섭이 없는 상황이지만 각 채널 별 독립적인 임의 백오프를 진행하여 특정 채널에서 먼저 전송을 시작하면 나머지 채널에서는 전송을 하지 못하기 때문에 비면허대역의 수가 늘어나더라도 다수 채널을 통해 동시 전송을 하는 일이 거의 없었기 때문에 비면허대역 개수와 상관없이

비슷한 수율을 보이는 것이다. 채널 접속 방식 A2의 경우 백오프 카운터 값이 정해진 이후에는 채널 별로 독립적으로 관리하지만, 처음에 백오프 값을 뽑았을 때 다른 채널도 다 같은 값으로 세팅을 해 주는 동작이 있어 간섭이 없는 상황에서는 항상 모든 채널에서 백오프가 끝나는 시점이 같아 동시 전송이 가능하여 비면허대역 개수가 늘어남에 따라 선형적으로 수율이 증가하였다. 채널 접속 방식 B1, B2는 백오프를 하나의 채널에서만 진행하고, 다른 채널들이 백오프가 완료된 시점 기준 이전 일정 시간 동안 에너지 임계 값을 넘는 신호가 없으면 전송을 할 수 있기 때문에 간섭이 없는 단일 링크 환경에서는 비면허대역 개수가 늘어남에 따라 선형적으로 수율이 증가하였다.

## 제 2 절 LAA와 WiFi 공존 성능 분석

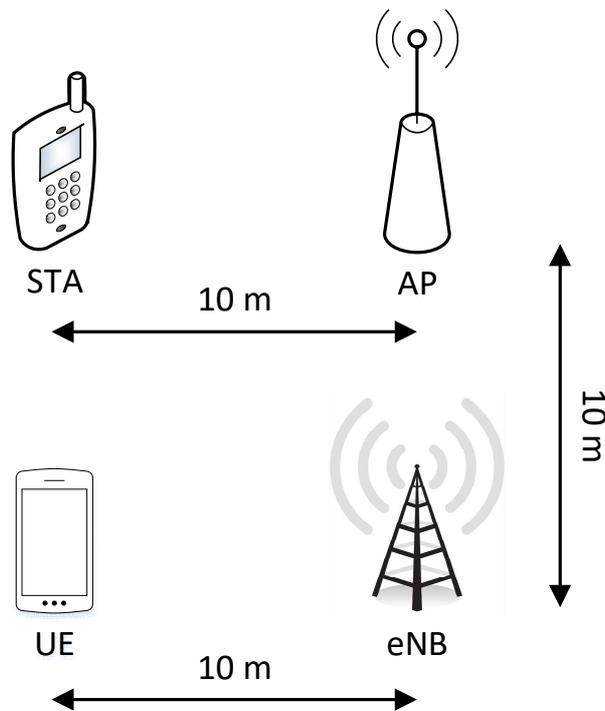


그림 8. LAA와 WiFi 공존 실험 환경

LAA와 WiFi간 공존 성능을 확인하기 위해 그림 8과 같이 AP와 STA 쌍 및 eNB와 UE 쌍을 각각 10 m 위치에 두고, WiFi가 사용하는 비면허대역의 수를 하나로 고정하고 LAA가 사용하는 비면허대역의 수를 하나에서 넷까지 조절하며 수율 성능을 확인해보았다. WiFi는 5

GHz 비면허대역 36번 채널을 고정적으로 사용하였으며, LAA는 36번 채널 및 사용하는 비면허대역 개수가 늘어날수록 다른 채널들도 사용하는 방식으로 실험을 진행하였다. 세부적인 실험 환경 변수는 표 6과 같다.

표 6. LAA와 WiFi 공존 실험 환경 변수

환경 변수	값
LAA 전송 전력	23 dBm
WiFi 전송 전력	23 dBm
LAA MCOT	4 ms
WiFi A-MPDU 시간 제한	4 ms
LAA 에너지 감지 임계값	-72 dBm
WiFi 에너지 감지 임계값	-62 dBm
트래픽 모델	Saturated traffic model
전파 손실 모델	3GPP indoor hotspot model
시뮬레이션 시간	1초

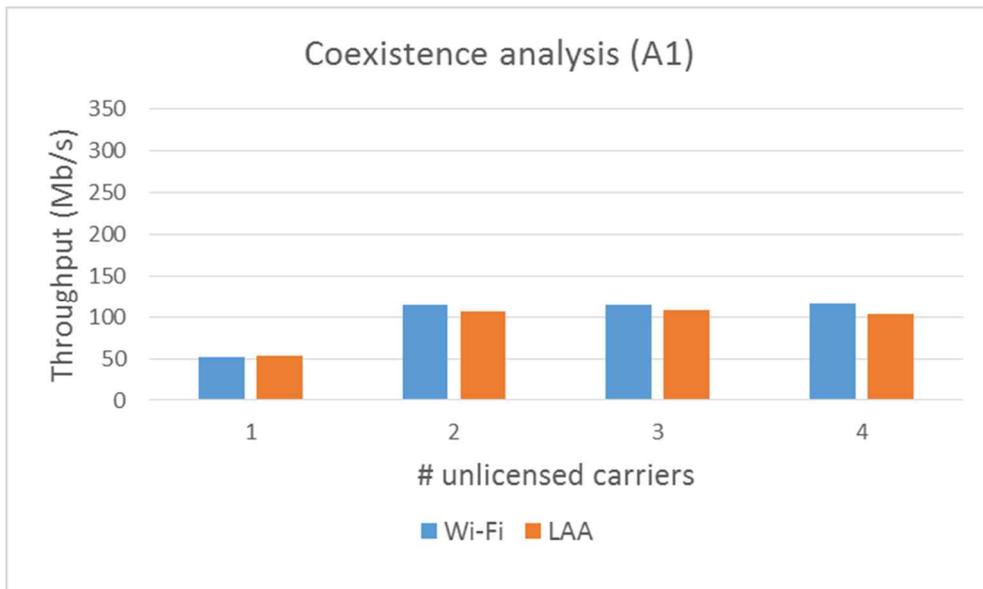


그림 9. 채널 접속 방식 A1을 사용하는 LAA와 WiFi의 공존 환경 수율

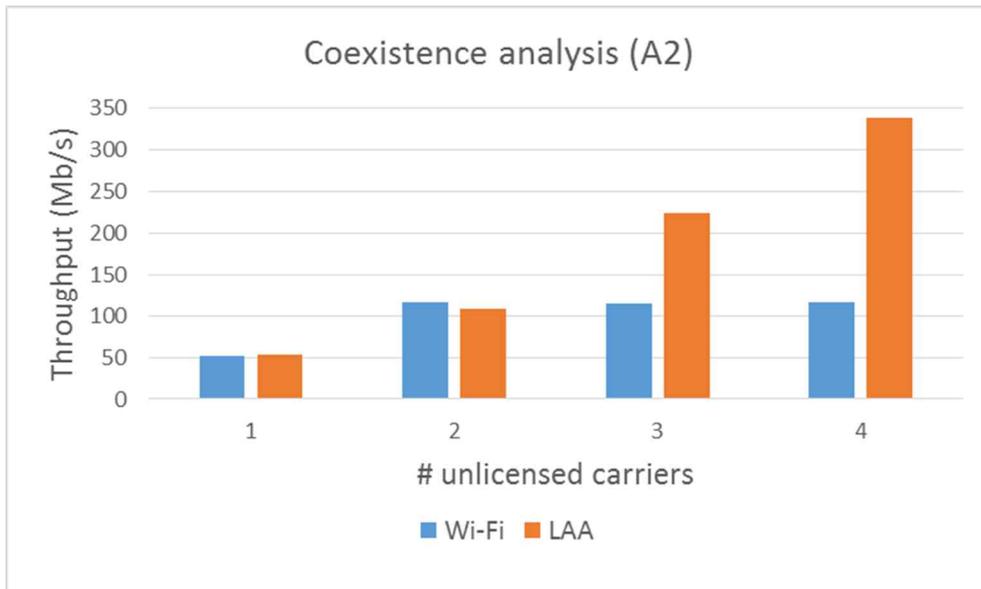


그림 10. 채널 접속 방식 A2을 사용하는 LAA와 WiFi의 공존 환경 수율

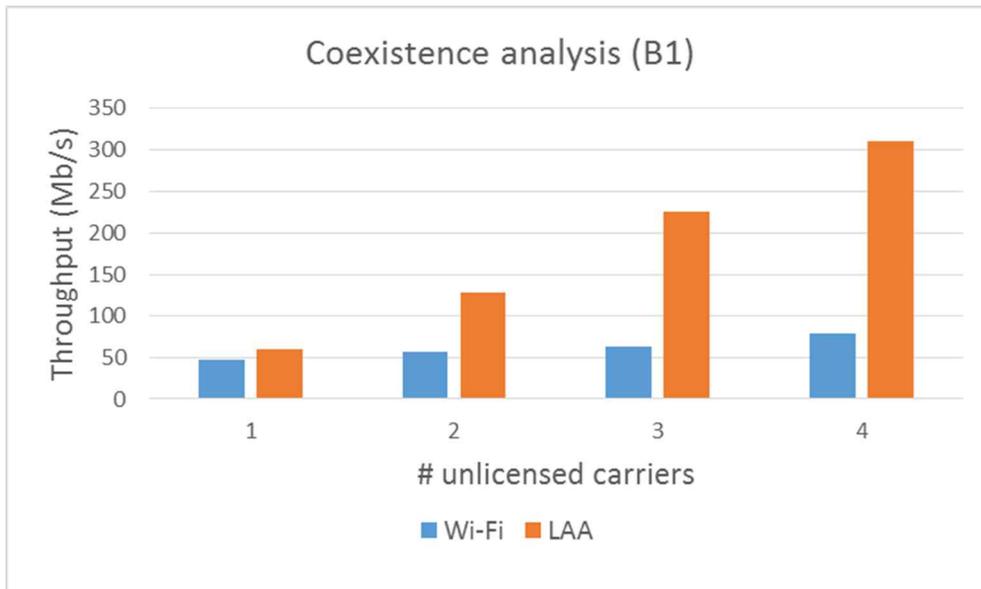


그림 11. 채널 접속 방식 B1을 사용하는 LAA와 WiFi의 공존 환경 수율

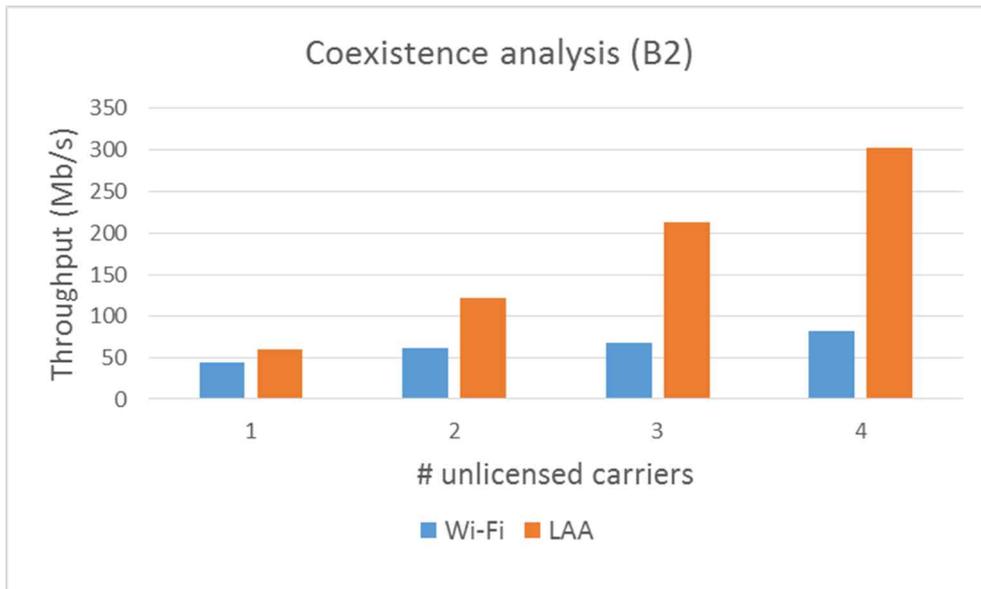


그림 12. 채널 접속 방식 B2를 사용하는 LAA와 WiFi 공존 환경 수율

그림 9에서 채널 접속 방식 A1과 Wi-Fi가 공존하는 경우 비면허대역의 개수가 한 개인 경우에는 LAA와 Wi-Fi 하나의 채널에서 경쟁을 하여 TDD 방식으로 채널을 나누어 쓰기 때문에 두 프로토콜 모두 최대 수율의 절반 이하의 성능을 보인다. LAA가 사용하는 비면허대역의 개수가 2개 이상일 경우 LAA와 WiFi 모두 하나의 채널을 사용할 때 낼 수 있는 최대의 수율을 내는 것을 확인하였다. LAA 채널 접속 방식 A1의 경우 단일 링크 실험에서 확인한 것과 같이 동시 전송이 잘 되지 않기 때문에 활용할 수 있는 비면허대역의 수가 증가하더라도 수율이 거의 일정하다. 비면허대역을 하나 사용하는 것에 비해 두 개를 사용할 수 있으면, WiFi가 36번 채널을 통해 주로 전송하게 되고, LAA는 다른 채널을 통해 주로 전송하게 되기 때문에 LAA와 WiFi 모두 하나의 채널을 사용할 때 낼 수 있는 최대의 수율에 근접한 성능을 보이게 된다. 채널 접속 방식 A2를 사용하는 LAA와 WiFi가 공존하는 경우 그림 10과 같이 LAA가 사용 가능한 비면허대역의 수가 늘어날수록 그 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 비면허대역의 수가 2개 이하인 경우에는 채널 접속 방식 A1과 비슷한 경향성을 가지는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 비면허대역을 두 개 사용할 경우, 36번 채널은 WiFi가 주로 사용하게 되고, 다른 나머지 채널을 LAA가 주로 사용하게 되기 때문에 LAA와 WiFi가 하나의 채널을 사용할 때 낼 수 있는 최대 수율에 가깝게

나오기 때문이다. LAA가 사용할 수 있는 비면허대역의 수가 3개 이상으로 늘어날 때, 채널 접속 방식 A2는 WiFi의 간섭이 있는 36번을 제외한 채널들에서 백오프 카운터가 항상 동시에 0이 되어 동시 전송을 하기 때문에 선형적으로 LAA의 수율 성능이 향상되었다. 채널 접속 방식 B1, B2의 경우 채널 접속 방식 A1, A2와는 달리 그림 11, 그림 12와 같이 LAA가 활용할 수 있는 비면허대역의 개수가 증가함에 따라 LAA 성능 및 WiFi 성능 모두 증가하는 경향이 있음을 확인하였다. LAA가 사용할 수 있는 비면허대역의 수가 늘어남에 따라 WiFi의 성능이 향상되는 이유는 채널 접속 방식 B1, B2의 경우 하나의 채널에서만 백오프를 진행하기 때문에 생기는 현상이다. 백오프를 진행하는 채널이 36번일 경우에는 WiFi와 경쟁하여 채널에 접속할 경우에는 모든 채널을 통해 전송하지만, 36번이 아닌 채널에서 백오프를 진행할 경우 36번 채널에 WiFi가 전송하고 있다면 36번 채널을 제외한 채널들을 통해 전송을 진행한다. LAA가 사용가능한 비면허대역의 수가 늘어날수록 36번 채널에서 백오프를 진행하는 비율이 줄어들며 이로 인해 WiFi가 36번 채널을 사용하는데 경쟁이 줄어 점점 하나의 채널을 독점하는 수율에 수렴하게 된다.

### 제 3 절 LAA간 채널 접속 방식에 따른 공존 성능 분석

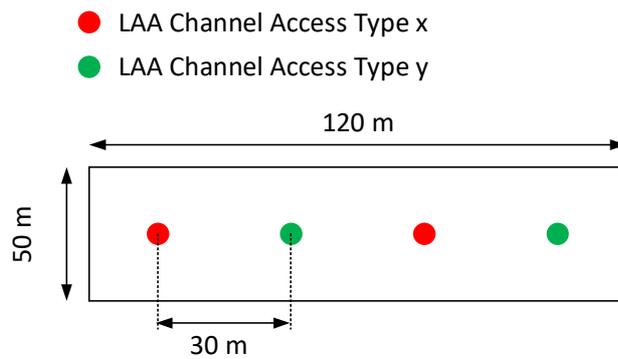


그림 13. LAA간 채널 접속 방식 공존 실험을 위한 eNB 배치 (같은 색으로 표기된 eNB는 동일한 채널 접속 방식을 사용함)

서로 다른 채널 접속 방식을 사용하는 LAA간 공존 성능을 확인하기 위해 그림 13과 같이 가로 120 m, 세로 50 m 건물 내에 네 대의 LAA eNB가 가로로 30 m씩 떨어져 존재하며, 색깔별로 하나의

LAA 채널 접속 방식을 적용하여 실험하였다. 해당 건물 내에 UE를 임의로 배치하였다. 배치한 UE들 중 5대는 빨간색으로 표시된 eNB들에 의해 서비스를 받고, 나머지 5대는 초록색으로 표시된 eNB들에 의해 서비스를 받으며, 각 UE는 서비스를 받을 수 있는 2 대의 eNB들 중 신호 세기가 더 큰 곳으로 접속하여 하향링크로 데이터 전송을 받도록 하였다. 이 때, 각 UE는 항상 전송을 받을 것이 있는 saturated traffic model을 사용하여 UE들의 평균 하향 링크 수율을 확인하였으며, 자세한 실험 환경 변수는 표 7와 같다.

표 7. LAA간 채널 접속 방식에 따른 공존 실험 환경 변수

환경 변수	값
LAA 전송 전력	23 dBm
LAA MCOT	4 ms
LAA 에너지 감지 임계값	-72 dBm
비면허대역 대역폭	20, 40, 60, 80 MHz
전파 손실 모델	3GPP indoor hotspot model
시뮬레이션 시간	1 초

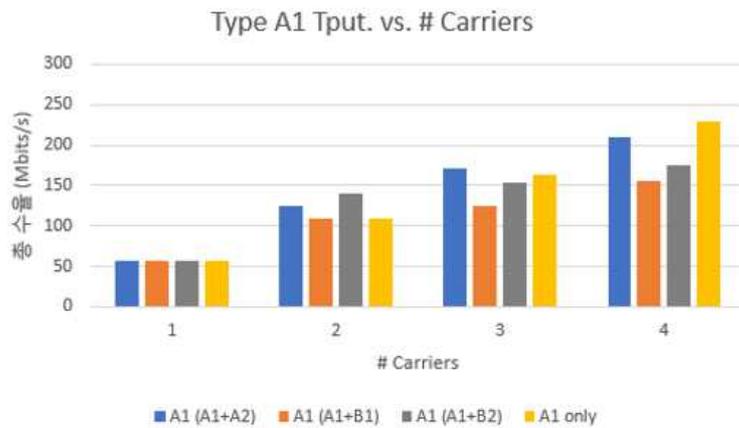


그림 14. 비면허대역 수에 따른 채널 접속 방식 A1의 공존 성능

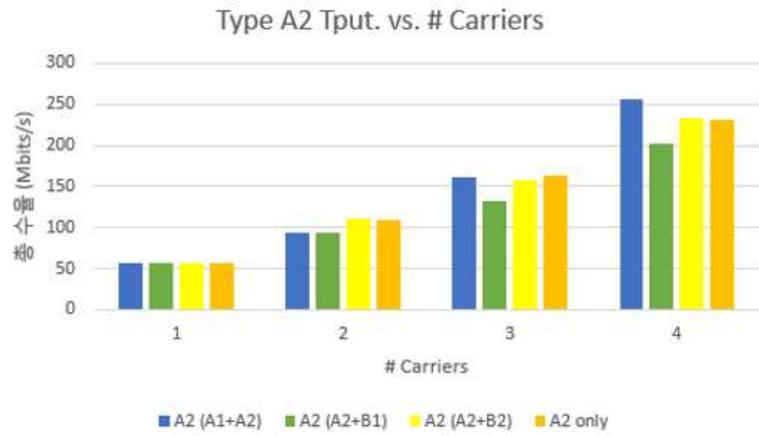


그림 15. 비면허대역 수에 따른 채널 접속 방식 A2의 공존 성능

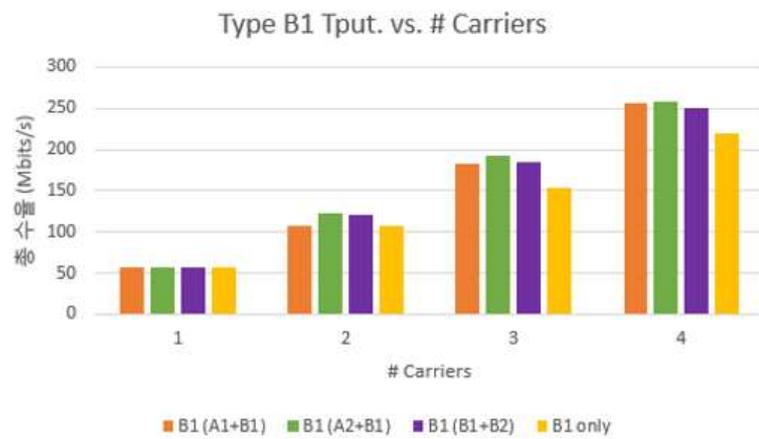


그림 16. 비면허대역 수에 따른 채널 접속 방식 B1의 공존 성능

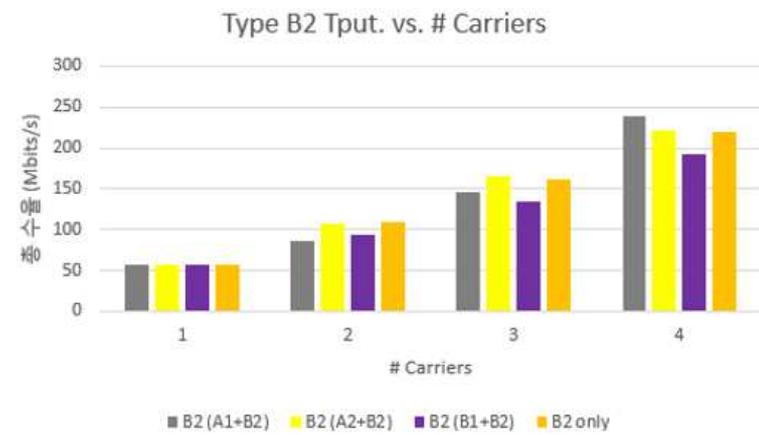


그림 17. 비면허대역 수에 따른 채널 접속 방식 B2의 공존 성능

그림 14, 그림 15, 그림 16, 그림 17은 각각 채널 접속 방식 A1, A2, B1, B2가 다른 채널 접속 방식과 공존할 때의 수율 성능을 나타낸다. 네 가지 채널 접속 방식은 전체적으로 가용할 수 있는 비면허대역 수가 늘어남에 따라 총 수율이 증가하였으며, 공존하는 채널 접속 방식 종류에 따라 조금씩 경향이 달랐다. 해당 결과들을 통해 볼 때 채널 접속 방식 B1, B2가 채널 접속 방식 A1, A2와 공존할 경우 좀 더 높은 수율을 얻으며, 이는 방식 A의 경우, 동시 전송이 일어날 확률이 상대적으로 방식 B보다 낮기 때문이라고 할 수 있다. 채널 접속 방식 A가 동시 전송을 하기 위해서는 백오프 카운터가 여러 채널에서 동시에 0이 되어야 하는 반면 채널 접속 방식 B의 경우에는 백오프가 끝난 시점에서 다른 채널들을 확인하였을 때 일정 시간만 점유되지 않았을 경우 동시 전송이 가능하기 때문이다.

## 제 5 장 LAA의 에너지 감지 임계값 변화에 따른 WiFi와의 공존 성능 분석

본 장에서는 LAA의 에너지 감지 임계 값을 변경하였을 때 WiFi와 공존에 어떤 영향이 있는지 분석한다.

### 제 1 절 실험 환경

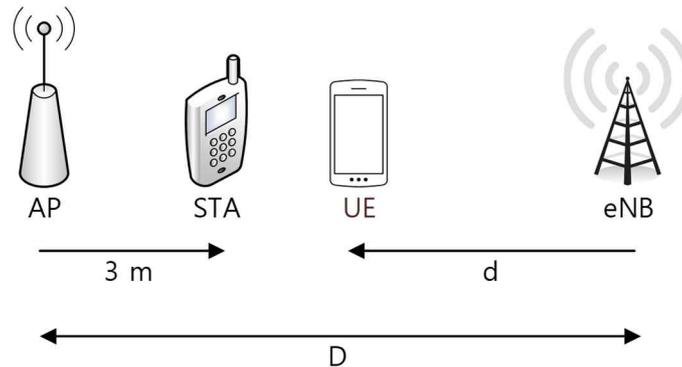


그림 18. WiFi 네트워크는 항상 전송을 성공하는 환경

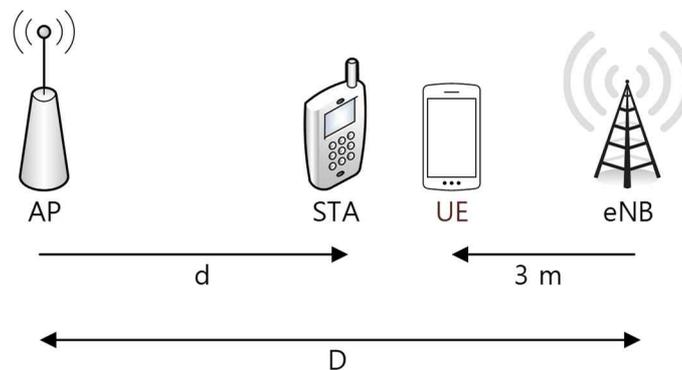


그림 19. LAA 네트워크는 항상 전송을 성공하는 환경

LAA의 에너지 감지 임계 값이 바뀔에 따라 WiFi와 공존에 어떤 영향을 미치는지 확인해보고자 그림 18, 그림 19와 같이 한 쪽 네트워크는 전송 실패가 없는 환경에서 다른 네트워크의 전송단과 수신단 사이의 거리를 조절하고, 또 두 네트워크의 하향 링크 전송단인 eNB와 AP간의 거리를 조절하였다. WiFi 네트워크는 항상 전송을 성공하는 환경을 만들기 위해 AP와 STA간 거리를 3 m로 두고 eNB와 UE간의 거리  $d$ 를  $-D/2$  부터  $D/2$  까지  $D/20$  간격으로 변화시켜가며

실험하였다. LAA 네트워크는 항상 전송을 성공하는 환경을 만들기 위해 eNB와 UE간 거리를 3 m 로 두고 AP와 STA간 거리  $d$ 를  $-D/2$  부터  $D/2$ 까지  $D/20$  간격으로 변화시켜가며 실험하였다. AP와 eNB간 거리인  $D$  또한 변화시키며 실험하였으며, AP와 eNB가 서로에게 미치는 신호 세기가  $-62$  dBm보다 강한 30 m 지점부터  $-82$  dBm이 넘어가는 시점인 120 m까지 10 m씩 변화시키며 실험하였다. 이 상황에서 LAA의 에너지 감지 임계값을 다양하게 변화시킴에 따라 어떤 성능 변화가 있는지 확인하였다. 본 실험에서는 분석을 위해 비면허대역 20 MHz 대역, 즉 하나의 채널만 사용하는 실험을 진행하였다.

## 제 2 절 WiFi 네트워크는 항상 전송을 성공하는 환경

AP와 eNB간 동시 전송이 일어났을 때 UE와 STA 의 SINR 및 eNB와 AP에서 각 노드로부터 오는 신호 세기에 대한 결과는 각각 그림 16, 그림 17, 그림 18, 그림 19, 그림 20과 같다.

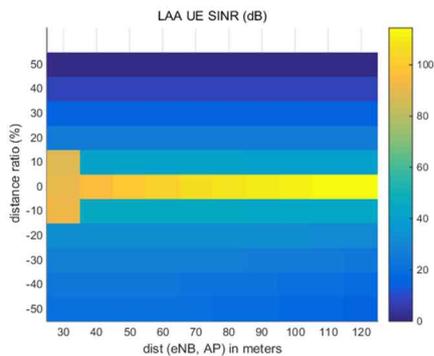


그림 20. eNB와 AP간 동시 전송 발생 시, UE의 SINR

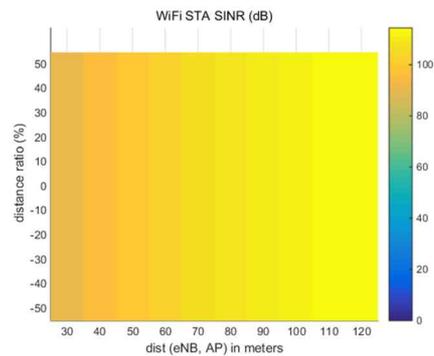


그림 21. eNB와 AP간 동시 전송 발생 시, STA의 SINR

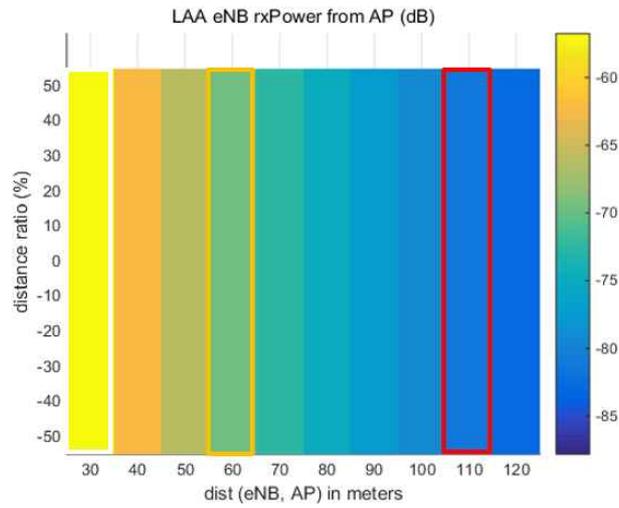


그림 22. eNB에서 받는 AP 전송 신호 세기 (흰색, 주황색, 빨간색 테두리는 LAA 에너지 감지 임계값을 각각 -62, -72, -82 dBm으로 하였을 때 해당 임계값을 넘는 AP 신호가 eNB로 들어오는 최종 지점)

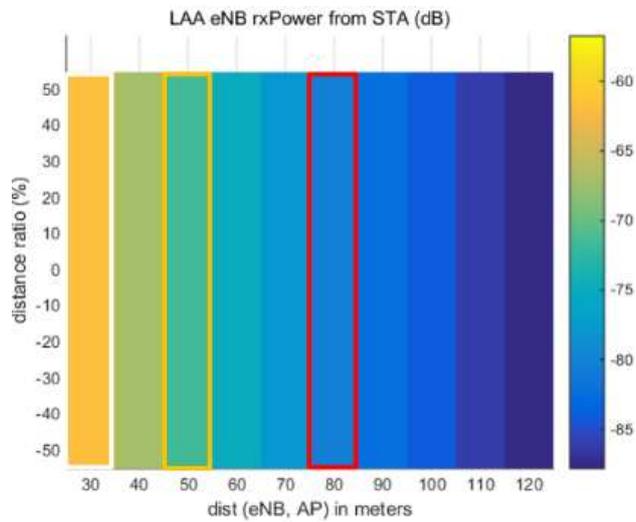


그림 23. eNB에서 받는 STA 전송 신호 세기 (흰색, 주황색, 빨간색 테두리는 LAA 에너지 감지 임계값을 각각 -62, -72, -82 dBm으로 하였을 때 해당 임계값을 넘는 STA 신호가 eNB로 들어오는 최종 지점)

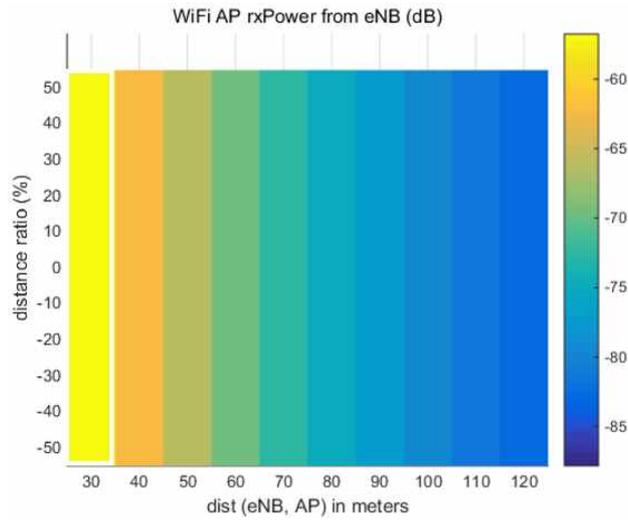


그림 24. AP에서 받는 eNB 전송 신호 세기 (흰색 테두리는 WiFi 에너지 감지 임계값인  $-62$  dBm을 넘는 eNB 신호가 AP로 들어오는 최종 지점)

표준과 같이 LAA의 에너지 감지 임계값이  $-72$  dBm일 때의 LAA와 WiFi의 수율 성능은 각각 그림 25, 그림 26과 같으며, AP와 eNB의 채널 시간 및 MCS 사용 통계는 그림 27, 그림 28, 그림 29, 그림 30과 같다.

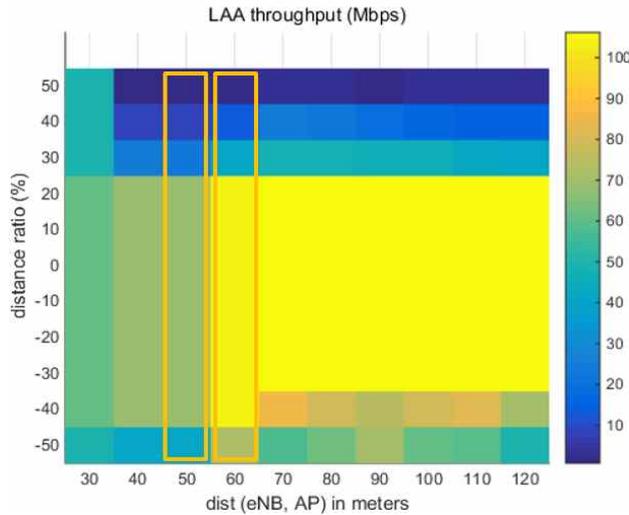


그림 25. LAA 에너지 감지 임계값이  $-72$  dBm 일 때, LAA의 수율 (왼쪽 및 오른쪽 주황색 테두리는 LAA 에너지 감지 임계값을 넘는 STA와 AP의 신호가 들어오는 최종 지점을 각각 나타냄)

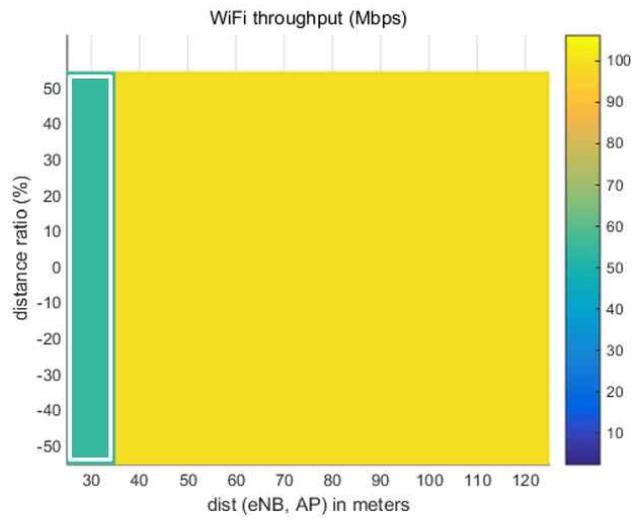


그림 26. LAA 에너지 감지 임계값이  $-72$  dBm 일 때, WiFi의 수율 (흰색 테두리는 eNB 신호가 WiFi의 에너지 감지 임계값을 넘는 최종 지점을 나타냄)

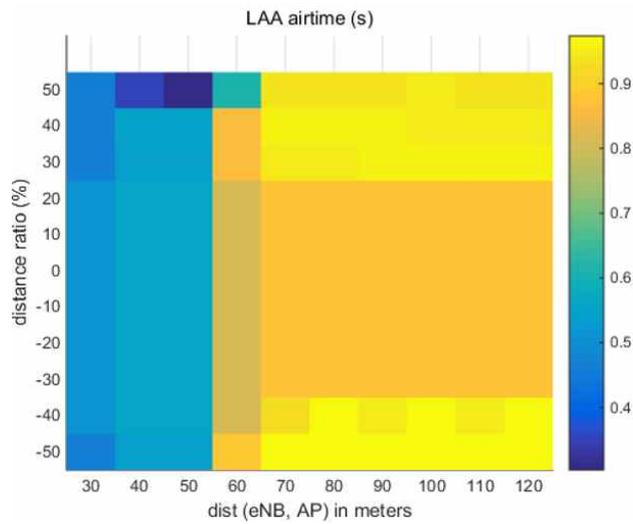


그림 27. LAA 에너지 감지 임계값이  $-72$  dBm 일 때, LAA의 채널 점유 시간

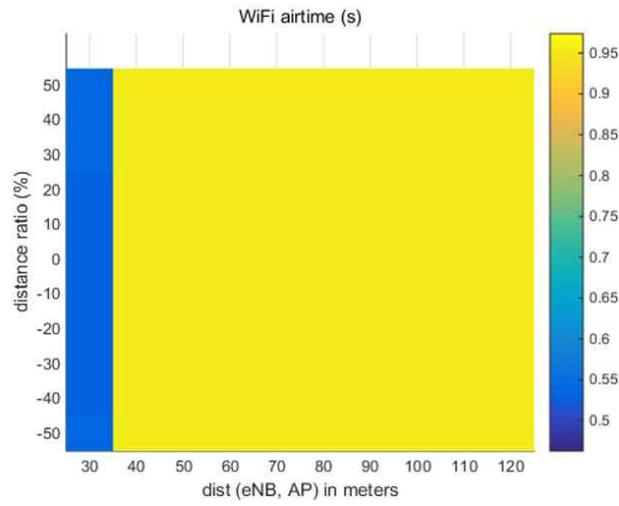


그림 28. LAA 에너지 감지 임계값이  $-72$  dBm 일 때, WiFi의 채널 점유 시간

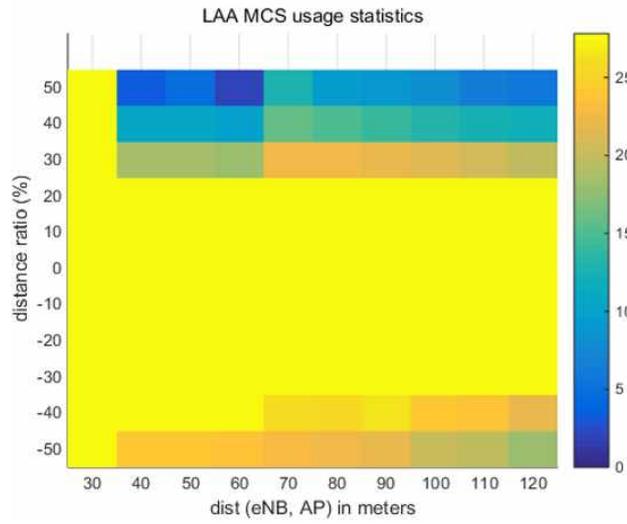


그림 29. LAA 에너지 감지 임계값이  $-72$  dBm 일 때, LAA의 MCS 사용 통계

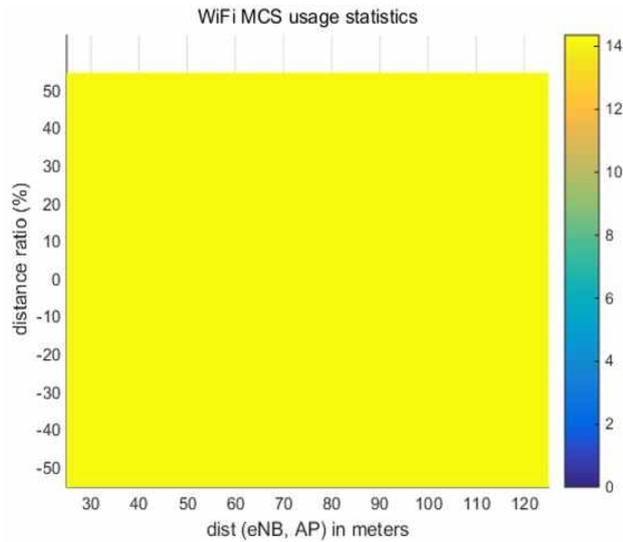


그림 30. LAA 에너지 감지 임계값이  $-72$  dBm 일 때, WiFi의 MCS 사용 통계

WiFi 네트워크의 수율, 채널 점유 시간 및 MCS통계가 eNB와 AP간 거리가 30 m인 지점을 제외하고는 같음을 확인할 수 있다. 이는 해당 환경들에서는 AP가 eNB 신호를 감지하지 못하여 eNB 전송 유무에 관계없이 채널을 계속 점유하기 때문이며, STA에 영향을 미치는 eNB 신호 세기가 AP로부터의 신호 세기보다 훨씬 작기 때문에 전송이 항상 성공하여 eNB가 WiFi 네트워크 성능에 전혀 영향을 미치지 못하기 때문이다. eNB와 AP간의 거리가 30 m 인 지점에서만 다른 지점들에 비해 수율 및 채널 점유 시간이 절반 정도가 되는데 이는 해당 환경에서는 AP에서 받는 eNB 신호 세기가 WiFi 에너지 감지 임계값인  $-62$  dBm보다 높아 AP와 eNB가 채널 점유를 절반씩 하기 때문이다.

LAA 네트워크의 수율, 채널 점유 시간 및 MCS 통계는 특징적인 네 가지 구간으로 구분하여 설명할 수 있겠다. 첫 번째 구간은 eNB와 AP간 거리가 30 m인 구간으로 서로의 신호 세기가 에너지 감지 임계값을 넘어 채널을 절반씩 점유하는 구간이다. 서로 가장 높은 MCS로 전송을 진행하며, 각 네트워크가 약 절반씩의 채널을 점유하고 이로 인해 각 네트워크는 점유 시간과 MCS에 해당하는 전송 속도에 비례하는 수율을 얻는 것을 확인할 수 있었다. 두 번째 구간은 eNB가 받는 AP와 STA의 신호 세기는 LAA 에너지 감지 임계값인  $-72$  dBm을 넘으나 AP가 받는 eNB의 신호 세기는 WiFi의 에너지 감지 임계값인  $-62$  dBm을 넘지 않는 구간이다. 해당 구간에서는 AP는 eNB의 전송에 상관없이 계속 전송하기 때문에 LAA eNB는 UE가

가까운 거리에 있지 않은 경우에는 전송 충돌이 일어나면 SINR이 가장 높은 MCS를 사용하기에는 좋지 않은 상황이기 때문에 낮은 MCS로 전송을 하게 된다. 이로 인해 LAA 네트워크의 채널 점유 시간 및 수율 모두 WiFi 네트워크의 채널 점유 시간 및 수율보다 낮아지게 된다. 세 번째 구간은 eNB가 받는 AP의 신호 세기는 LAA 에너지 감지 임계값인  $-72$  dBm을 넘으나 STA의 신호 세기는 LAA 에너지 감지 임계값인  $-72$  dBm을 넘지 못하며, AP가 받는 eNB의 신호 세기는 WiFi 에너지 감지 임계값인  $-62$  dBm을 넘지 않는 구간이다. 해당 구간에서는 이전 구간보다 eNB와 UE 거리가 모든 위치에서 멀어져 UE가 eNB로부터 받는 신호 세기가 낮아지지만 오히려 수율 및 채널 점유 시간이 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 이전 구간에서는 eNB가 AP의 하향링크 전송 및 STA의 ACK 전송까지 감지한 후, 백오프 카운터 값을 낮추었지만, 이 구간부터는 STA으로부터 수신되는 신호의 세기가 eNB의 에너지 감지 임계값을 넘지 않기 때문에 AP의 하향링크 전송이 끝나자마자 백오프 카운터 값을 낮추기 때문이다. AP와 eNB가 채널 점유 경쟁 시, eNB의 백오프 카운터 값이 0이 먼저 되는 경우가 더 많아져 채널 점유 시간이 증가하고, 이로 인해 수율도 증가하였다. 마지막 네 번째 구간은 LAA 네트워크와 WiFi 네트워크간 서로의 신호 세기가 각 네트워크의 에너지 감지 임계값을 넘지 않는 구간이다. 이 구간에서는 서로의 전송 유무와 관계 없이 전송을 진행한다. WiFi 네트워크의 경우, AP와 STA간 거리가 가까워 전송 실패가 없어 수율이 계속 높이 유지되는 반면, LAA의 경우 WiFi 네트워크와 비슷한 채널 점유 시간에도 불구하고 eNB와 UE간 거리가 멀어 WiFi 네트워크로부터의 간섭 및 노이즈가 eNB 신호에 비해 큰 영향을 미치는 경우 낮은 MCS를 사용하여 수율은 높지 않음을 확인하였다.

LAA 에너지 감지 임계값을 표준과 달리  $-62$  dBm 및  $-82$  dBm로 정했을 때의 LAA 네트워크의 수율, 채널 점유 시간, MCS 사용 통계는 그림 31, 그림 32, 그림 33, 그림 34, 그림 35, 그림 36과 같다. WiFi 네트워크의 성능은 LAA 에너지 감지 임계값을  $-72$  dBm으로 했을 때와 동일하다.

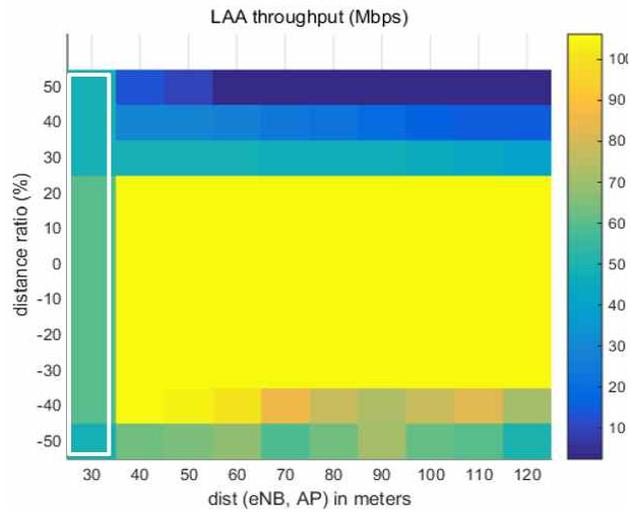


그림 31. LAA 에너지 감지 임계값이  $-62$  dBm 일 때, LAA 수율 (흰색 테두리는 LAA 에너지 감지 임계값을 넘는 STA과 AP의 신호가 들어오는 최종 지점을 나타냄)

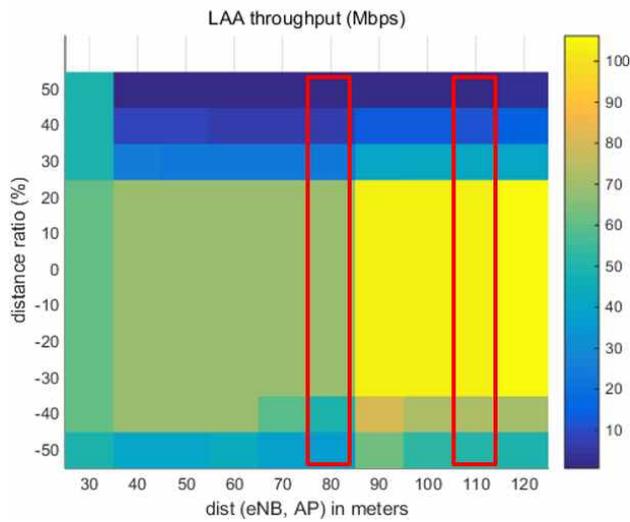


그림 32. LAA 에너지 감지 임계값이  $-82$  dBm 일 때, LAA 수율 (왼쪽 및 오른쪽 빨간색 테두리는 LAA 에너지 감지 임계값을 넘는 STA과 AP의 신호가 들어오는 최종 지점을 각각 나타냄)

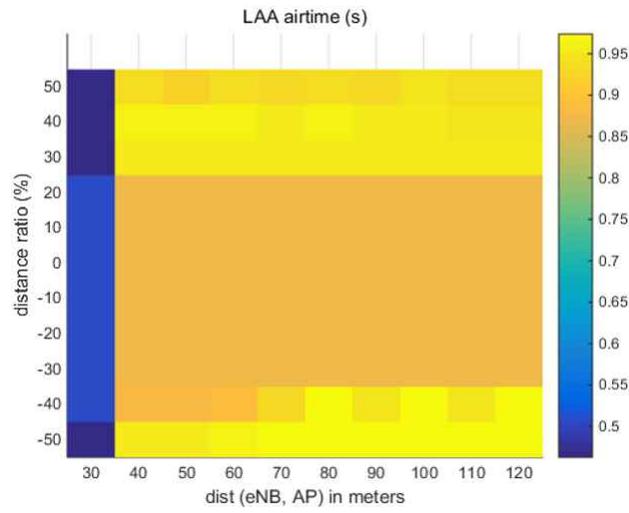


그림 33. LAA 에너지 감지 임계값이  $-62$  dBm일 때, LAA의 채널 점유 시간

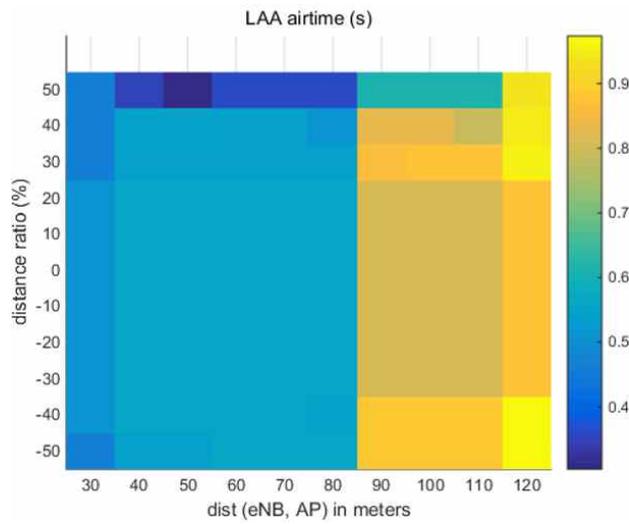


그림 34. LAA 에너지 감지 임계값이  $-82$  dBm일 때, LAA의 채널 점유 시간

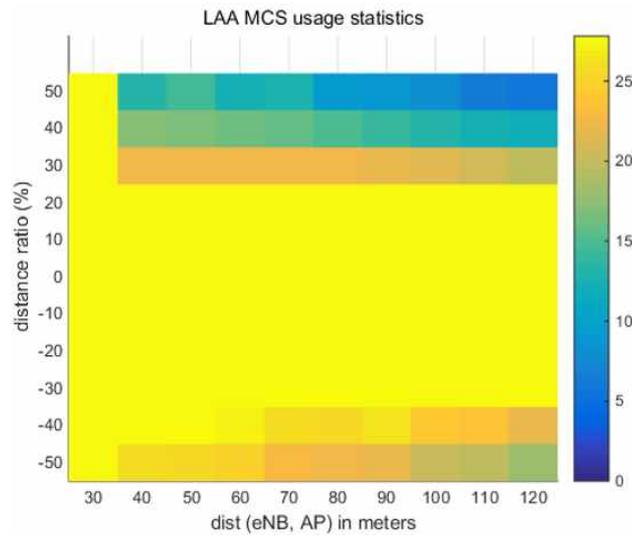


그림 35. LAA 에너지 감지 임계값이  $-62$  dBm일 때, LAA의 MCS 사용 통계

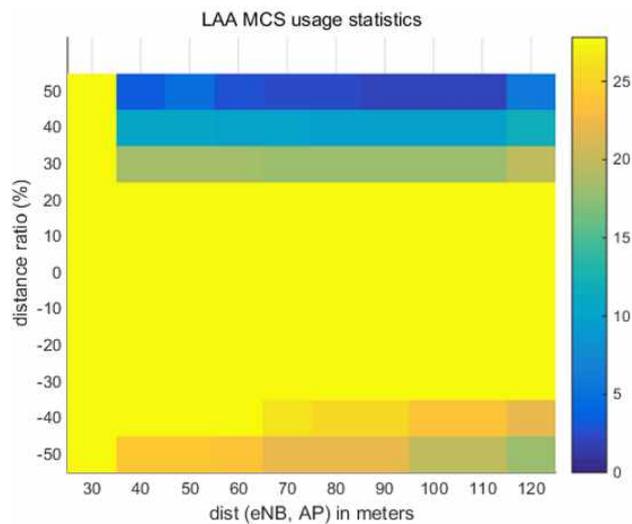


그림 36. LAA 에너지 감지 임계값이  $-82$  dBm일 때, LAA의 MCS 사용 통계

LAA 에너지 감지 임계값을  $-62$  dBm으로 변경하였을 때에는 eNB와 AP간 거리가 30 m인 지점을 제외하고는 LAA 네트워크의 수율 및 MCS 사용 통계는 AP와 eNB의 동시 전송이 일어날 때의 SINR과 밀접한 관계가 있음을 확인하였다. 이는 대부분의 시간에서 eNB의 전송이 AP의 전송과 충돌이 생기기 때문이다. eNB와 AP간 거리가 30 m인 지점에서는 eNB의 전송이 AP의 전송과 충돌이 거의 일어나지 않는 환경이기 때문에 SINR이 높아 가장 높은 MCS를 사용하고,

수율도 해당 MCS를 사용할 때 거의 실패하지 않을 경우의 값이 나오는 것을 확인하였다.

LAA 에너지 감지 임계값을  $-82$  dBm으로 변경하였을 때에는 LAA 에너지 감지 임계값이  $-72$  dBm과 같이 네 가지 구간으로 구분되는 것을 확인할 수 있었다. 구분되는 기준은 LAA 에너지 감지 임계값이  $-72$  dBm인 경우와 동일하며 단지 LAA 에너지 감지 임계값이 더 낮아짐에 따라 해당 구간들 중 두 번째 구간인 eNB가 받는 AP와 STA의 신호 세기가 LAA 에너지 감지 임계값 보다 높지만, AP가 받는 eNB의 신호 세기가 WiFi 에너지 감지 임계값 보다 낮은 경우와 세 번째 구간인 eNB가 받는 AP의 신호 세기는 LAA 에너지 감지 임계값 보다 높지만, STA의 신호 세기는 이보다 낮으며, AP가 받는 eNB의 신호 세기는 LAA 에너지 감지 임계값 보다 낮은 경우가 그래프상에서 오른쪽으로 이동하는 효과가 있었다.

### 제 3 절 LAA 네트워크는 항상 전송을 성공하는 환경

AP와 eNB간 동시 전송이 일어났을 때 UE와 STA 의 SINR 및 eNB와 AP에서 각 노드로부터 오는 신호 세기에 대한 결과는 각각 그림 37, 그림 38, 그림 39, 그림 40, 그림 41과 같다.

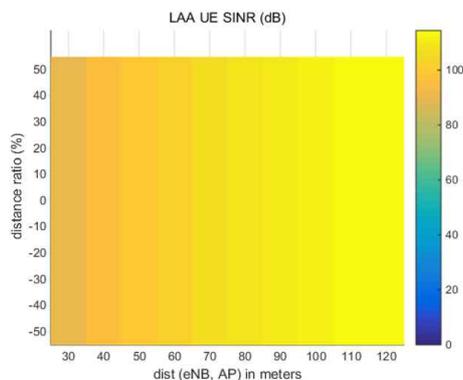


그림 37. eNB와 AP간 동시 전송 발생 시 UE의 SINR

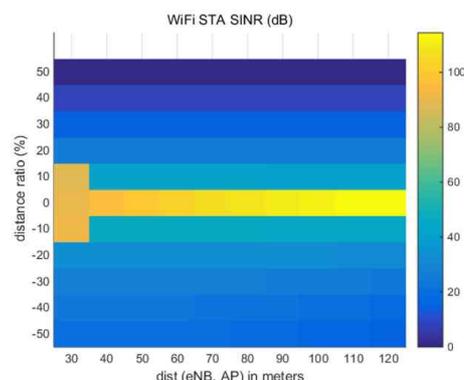


그림 38. eNB와 AP간 동시 전송이 발생 시 STA의 SINR

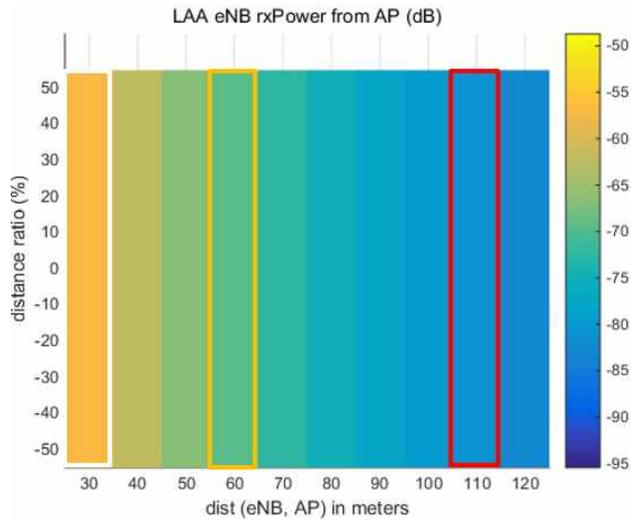


그림 39. eNB에서 받는 AP 전송 신호 세기 (흰색, 주황색, 빨간색 테두리는 LAA 에너지 감지 임계값을 각각 -62, -72, -82 dBm으로 하였을 때 해당 임계값을 넘는 AP 신호가 eNB로 들어오는 최종 지점)

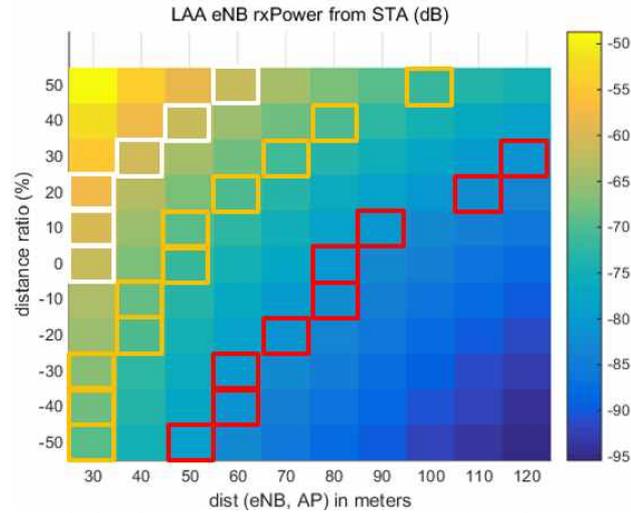


그림 40. eNB에서 받는 STA 전송 신호 세기 (흰색, 주황색, 빨간색 테두리는 LAA 에너지 감지 임계값을 각각 -62, -72, -82 dBm으로 하였을 때 해당 임계값을 넘는 STA 신호가 eNB로 들어오는 최종 지점)

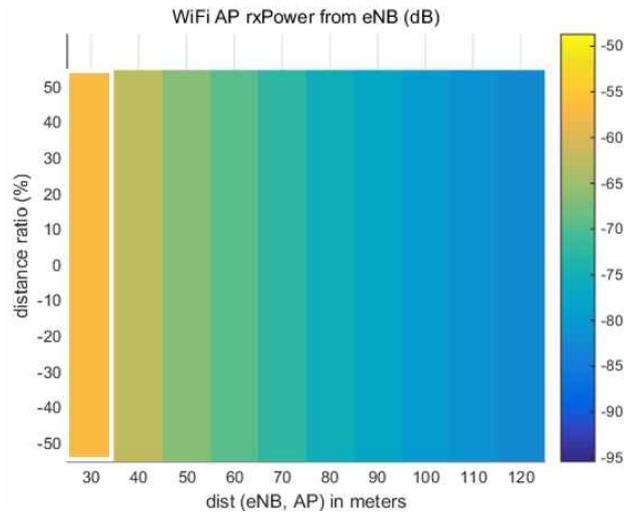


그림 41. AP에서 받는 eNB 전송 신호 세기 (흰색 테두리는 WiFi 에너지 감지 임계값인  $-62$  dBm을 넘는 eNB 신호가 AP에 간섭을 미치는 최종 지점)

표준과 같이 LAA의 에너지 감지 임계값이  $-72$  dBm일 때의 LAA와 WiFi의 수율 성능은 각각 그림 42, 그림 43과 같으며, AP와 eNB의 채널 시간 및 MCS 사용 통계는 그림 44, 그림 45, 그림 46, 그림 47과 같다.

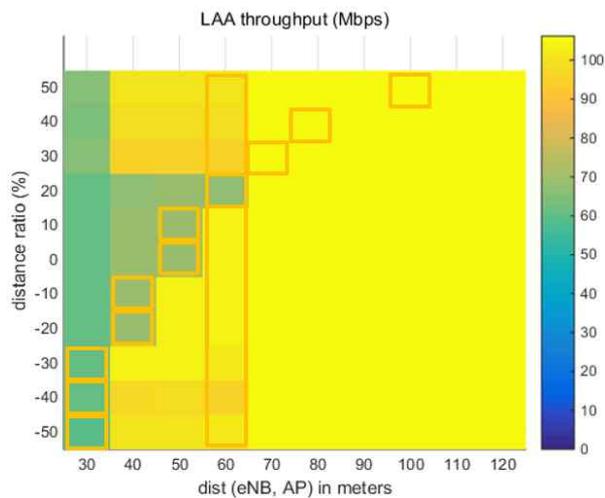


그림 42. LAA 에너지 감지 임계값이  $-72$  dBm 일 때, LAA의 수율 (작은 주황색 테두리 및 긴 주황색 테두리는 LAA 에너지 감지 임계값을 넘는 STA와 AP의 신호가 들어오는 최종 지점을 각각 나타냄)

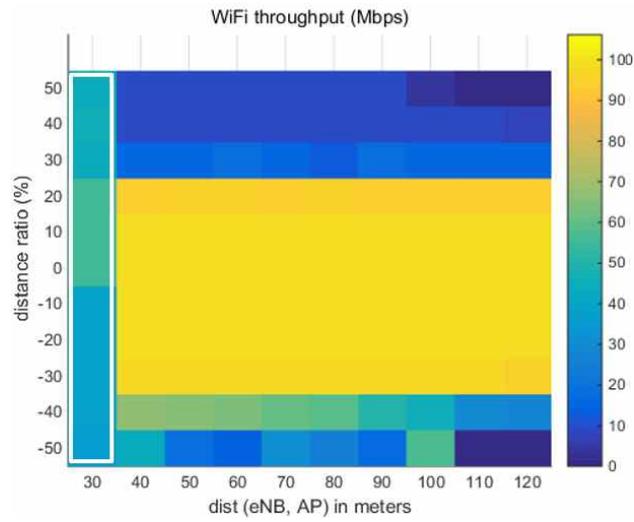


그림 43. LAA 에너지 감지 임계값이  $-72$  dBm 일 때, WiFi의 수율 (흰색 테두리는 eNB 신호가 WiFi의 에너지 감지 임계값을 넘는 최종 지점을 나타냄)

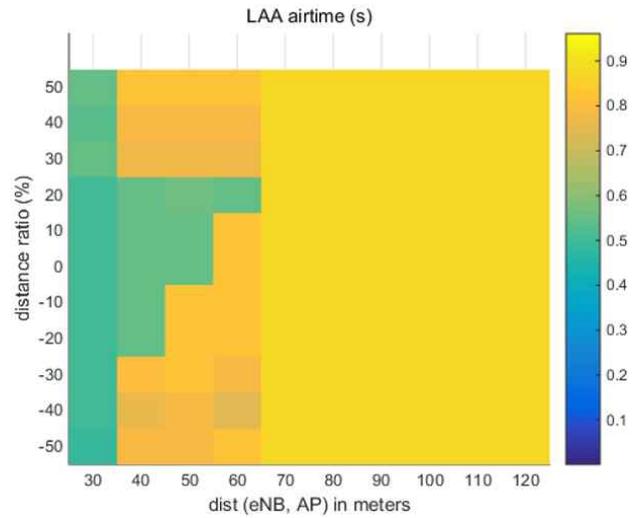


그림 44. LAA 에너지 감지 임계값이  $-72$  dBm 일 때, LAA의 채널 점유 시간

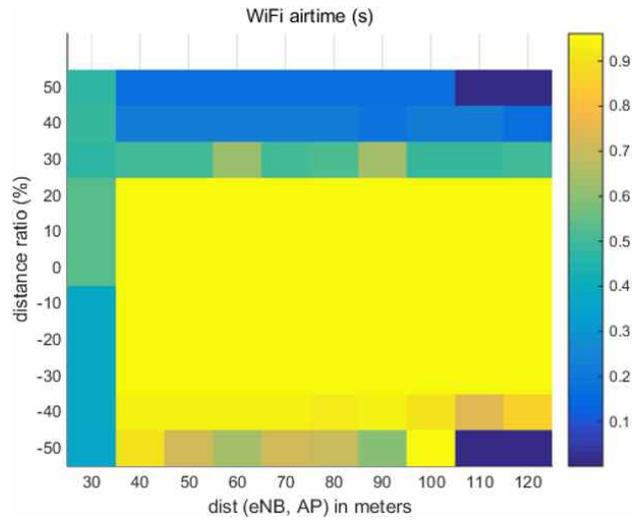


그림 45. LAA 에너지 감지 임계값이  $-72$  dBm 일 때, WiFi의 채널 점유 시간

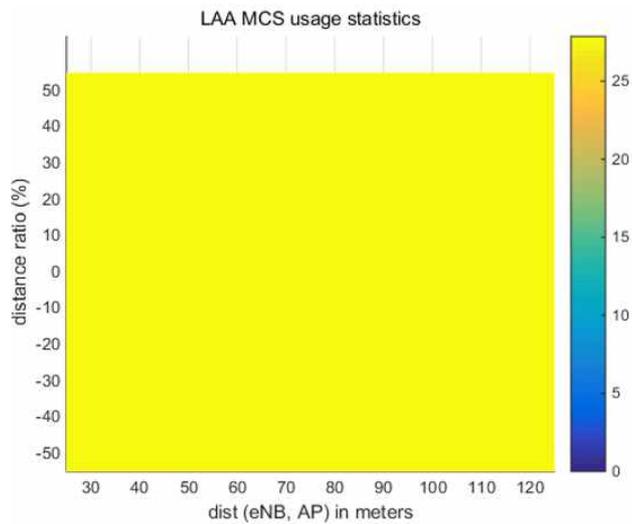


그림 46. LAA 에너지 감지 임계값이  $-72$  dBm 일 때, LAA의 MCS 사용 통계

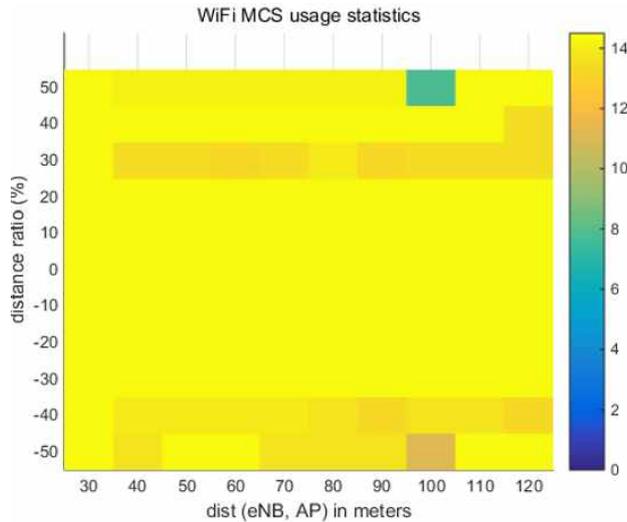


그림 47. LAA 에너지 감지 임계값이  $-72$  dBm 일 때, WiFi의 MCS 사용 통계

WiFi 네트워크의 수율, 채널 점유 시간 및 MCS통계는 특징에 따라 크게 두 구간으로 나누어진다. AP가 받는 eNB의 신호 세기가 WiFi 에너지 감지 임계값 보다 높은 구간인 eNB와 AP간 거리가 30 m인 지점과 그 이외의 지점들이다. 첫 번째 구간인 eNB와 AP간 거리가 30 m인 지점에서는 eNB와 AP간 서로의 신호 세기가 에너지 감지 임계값을 넘기 때문에 채널을 약 절반씩 점유한다. 두 번째 구간인 eNB와 AP간 거리가 30 m 를 넘는 지점들에 대해서는 AP와 STA간 거리가 가까워 SINR이 높은 구간에서는 수율이 높고 그렇지 못한 구간에서는 수율이 낮다. AP는 eNB의 신호를 감지하지 못하고 계속 전송할 수 있으나, SINR이 낮은 지점들에서는 채널 점유율도 낮아지는데 이는 전송 충돌로 인해 경쟁 윈도우가 증가하기 때문이다.

LAA 네트워크의 수율, 채널 점유 시간 및 MCS 통계는 특징적인 네 가지 구간으로 구분하여 설명할 수 있다. 첫 번째 구간은 eNB와 AP간 거리가 30 m인 구간으로 서로의 신호 세기가 에너지 감지 임계값을 넘어 채널을 절반씩 점유하는 구간이다. 서로 가장 높은 MCS로 전송을 진행하며, 각 네트워크가 약 절반씩의 채널을 점유하고 이로 인해 각 네트워크는 점유 시간과 MCS에 해당하는 전송 속도에 비례하는 수율을 얻는 것을 확인할 수 있다. 두 번째 구간은 eNB가 받는 AP와 STA의 신호 세기는 LAA 에너지 감지 임계값인  $-72$  dBm을 넘으나 AP가 받는 eNB의 신호 세기는 WiFi의 에너지 감지 임계값인  $-62$  dBm을 넘지 않는 구간이다. 해당 구간에서는 AP는

eNB의 전송에 상관없이 계속 전송하기 때문에 WiFi 네트워크에 비해 채널 점유율이 떨어지며, 해당 채널 점유율에 비례하는 수율을 얻는다. 하지만 해당 구간에서 예외인 구간이 있는데, STA의 SINR이 낮은 지점들에 대해서는 채널 점유율이 높고, 이로 인해 성능이 계속 전송하는 지점들과 비슷함을 확인하였다. 이는 WiFi 네트워크가 계속되는 전송 실패로 경쟁 윈도우 값이 커져 eNB가 채널 점유 경쟁에서 대부분 이기기 때문이라고 해석할 수 있다. 세 번째 구간은 eNB가 받는 AP의 신호 세기는 LAA 에너지 감지 임계값인  $-72$  dBm을 넘으나 STA의 신호 세기는 LAA 에너지 감지 임계값인  $-72$  dBm을 넘지 못하며, AP가 받는 eNB의 신호 세기는 WiFi 에너지 감지 임계값인  $-62$  dBm을 넘지 않는 구간이다. 해당 구간에서는 수율 및 채널 점유 시간이 높아지는 것을 확인할 수 있는데 이는 STA으로부터 수신되는 신호의 세기가 더 이상 eNB의 에너지 감지 임계값을 넘지 않아 AP의 하향링크 전송이 끝나자마자 백오프 카운터 값을 낮추기 때문이다. AP와 eNB가 채널 점유 경쟁 시, eNB의 백오프 카운터 값이 0이 먼저 되는 경우가 더 많아져 채널 점유 시간이 증가하고, 이로 인해 수율도 증가하였다. 마지막 네 번째 구간은 LAA 네트워크와 WiFi 네트워크간 서로의 신호 세기가 각 네트워크의 에너지 감지 임계값을 넘지 않는 구간이다. 이 구간에서는 서로의 전송 유무와 관계 없이 전송을 진행한다. LAA 네트워크의 경우, eNB와 UE간 거리가 가까워 전송 실패가 없어 수율이 계속 높이 유지되는 반면, WiFi 네트워크의 경우 SINR이 높은 지점들에서는 수율이 높이 유지되나, 그렇지 않은 지점들에서는 계속되는 전송 실패와 이로 인해 경쟁 윈도우 값이 증가하여 채널 점유 시간이 줄어든다. 이로 WiFi 네트워크는 낮은 수준의 수율을 얻는다.

LAA 에너지 감지 임계값을 표준과 달리  $-62$  dBm 및  $-82$  dBm로 정했을 때의 LAA 및 WiFi 네트워크의 수율, 채널 점유 시간, MCS 사용 통계는 그림 48, 그림 49, 그림 50, 그림 51과 같다.

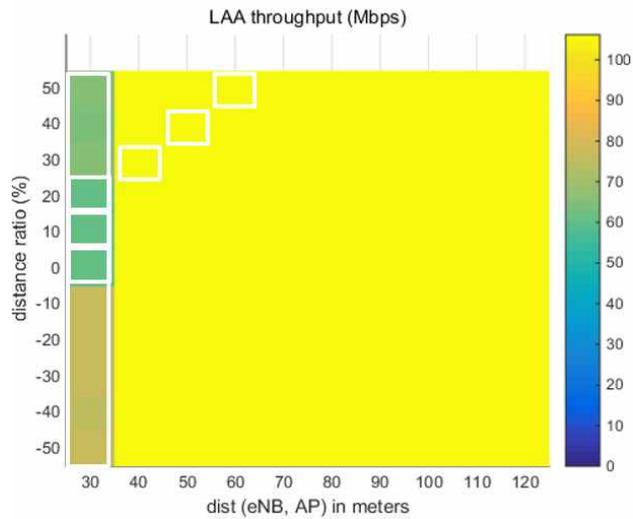


그림 48. LAA 에너지 감지 임계값이  $-62$  dBm 일 때, LAA의 수율 (작은 흰색 테두리 및 긴 흰색 테두리는 LAA 에너지 감지 임계값을 넘는 STA와 AP의 신호가 들어오는 최종 지점을 각각 나타냄)

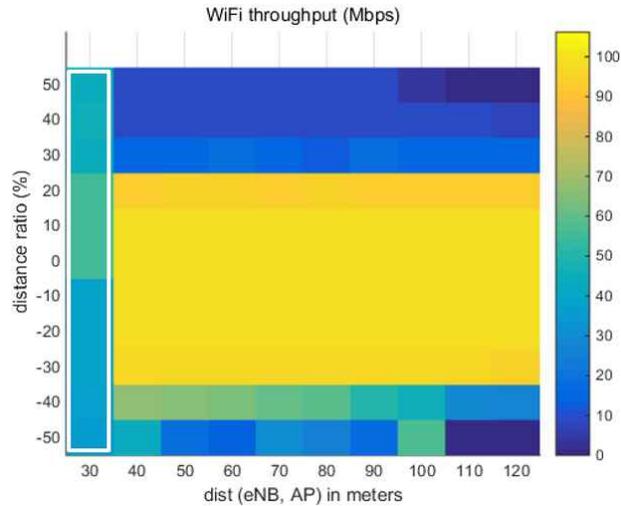


그림 49. LAA 에너지 감지 임계값이  $-62$  dBm 일 때, WiFi의 수율 (흰색 테두리는 eNB 신호가 WiFi의 에너지 감지 임계값을 넘는 최종 지점을 나타냄)

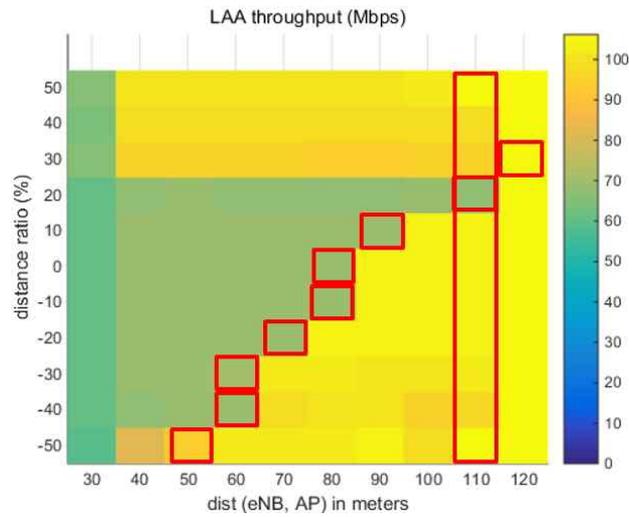


그림 50. LAA 에너지 감지 임계값이  $-82$  dBm 일 때, LAA의 수율 (작은 빨간색 테두리 및 긴 빨간색 테두리는 LAA 에너지 감지 임계값을 넘는 STA의 신호 및 AP의 신호가 들어오는 최종 지점을 각각 나타냄)

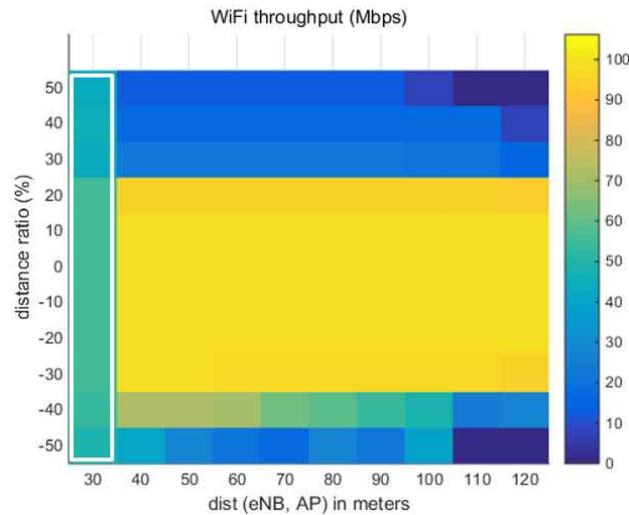


그림 51. LAA 에너지 감지 임계값이  $-82$  dBm 일 때, WiFi의 수율 (흰색 테두리는 eNB 신호가 WiFi의 에너지 감지 임계값을 넘는 최종 지점을 나타냄)

LAA 에너지 감지 임계값을 표준과 달리  $-62$  dBm 및  $-82$  dBm로 정했을 때 또한 WiFi 네트워크는 같은 양상을 보였으며, LAA 네트워크 또한 왼쪽 및 오른쪽으로 이동한 그래프를 얻을 수 있었다.

## 제 6 장 결론

본 논문에서는 LAA와 WiFi 공존 시뮬레이터로 LAA간 공존 실험 및 LAA와 WiFi간 공존 실험을 진행하였다.

LAA간 공존 실험에서는 서로 다른 채널 접속 방식을 사용하는 eNB들이 공존할 경우 사용하는 채널 접속 방식 및 공존하는 eNB의 채널 접속 방식에 따라 수율이 최대 67%까지 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 각 채널에서 백오프를 진행하는 채널 접속 방식 A가 하나의 채널에서만 백오프를 진행하고 나머지 채널에서는 간단한 확인 후 동시 전송을 진행하는 채널 접속 방식 B와 공존할 경우 그 수율이 더 낮은 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 LAA간 공존 시에도 적절한 설계를 통해 각 eNB가 트래픽 수요를 맞추어 줄 필요가 있음을 확인하였다.

LAA와 WiFi간 공존 실험에서는 LAA와 WiFi의 에너지 감지 임계 값이 달라 비대칭적 히든 현상이 발생하는 것을 확인하였다. 또한 WiFi는 전송 성공 실패에 대한 피드백과 같은 제어 메시지를 비면허대역으로 보내는 반면 LAA는 제어 메시지를 면허대역으로 보내기 때문에 LAA eNB에서 WiFi의 ACK을 감지하지 못하는 경우 채널 접속이 불공평하게 일어날 수 있음을 확인하였다. LAA의 에너지 감지 임계 값을 조정하여 히든 및 ACK을 감지하지 못하여 생기는 불공평성을 줄일 수 있었다.

## 참고 문헌

- [1] European Telecommunications Standards Institute, *ETSI EN 301 893 V2.1.1*, 2017.
- [2] 3rd Generation Partnership Project, *3GPP TS 36.213 V14.3.0*, 2017.
- [3] E. Tuomaala, *Effective SINR approach of link to system mapping in OFDM/multi-carrier mobile network*, International Conference on Mobile Technology, Applications and Systems, 2005.

## Abstract

# Performance Analysis on Coexistence of LAA and WiFi

성 명 Taejun Park

학과 및 전공 Electrical and Computer Engineering

The Graduate School

Seoul National University

We develop an LAA and WiFi coexistence simulator and analyze LAA and WiFi coexistence performance using the simulator. The LAA simulator module based on ns-3 LTE module is compliant with 3GPP standard release 13, and we implement signal interference in unlicensed bands between LAA and WiFi devices by modifying LTE channel module and WiFi channel module which are independently implemented. To analyze coexistence performance, we vary energy detection threshold of LAA. Having different energy detection threshold values, LAA and WiFi have asymmetric hidden node problem. Although channel access procedures of LAA and WiFi are similar, LAA and WiFi are based on different communication technologies so that we have found unexpected phenomenon.

**Keywords** : LAA, WiFi, Coexistence, Energy detection threshold

**Student Number** : 2012-23216

## 감사의 글

2011년 2학기에 연구실에 인턴으로 들어와 연구실에서 7년간 지내면서 좋은 교수님과 학생들과 더불어 연구하는 법을 배워나가고 함께 일하는 방법에 익숙해질 수 있어서 좋은 시간이 되었습니다.

무엇보다도 제 졸업을 많이 도와주신 교수님께 감사를 드립니다. 제가 부족하여 졸업하기 힘들었던 상황에서도 제 상황을 이해해주시고 한 없는 기회를 주셔서 이번에 졸업을 할 수 있었습니다. 연구실 생활을 할 때에도 과제가 바쁘고 어려울 때에는 솔선하여 디버깅을 진행하시며 어떤 때에는 학생들보다도 더 늦게 주무시기도 하는 등 같이 동고동락하시는 모습에서 많은 감동을 느끼고 힘을 많이 받았습니다. 또한 교수님과 함께 팀으로 일하며 본을 배울 수 있었던 점은 연구실 생활 중 큰 행운이었습니다. 바쁘신 와중에도 각 분야에 대해 공부하는 것을 게을리하지 않으시고 즐기시며 학생들과 회의를 자주 가지며 연구를 도와주시는 점이 존경스러웠습니다. 또한 개인적인 일로 상담을 할 때에는 마치 자신의 일과 같이 들어주시고 같이 고민해주셔서 연구실 생활이 힘들 때 많이 의지가 되고 따뜻하다고 느꼈습니다.

제가 연구실에 잘 다닐 수 있도록 도와준 가족들에게 감사 인사를 드립니다. 저에게 직접적인 조언 및 도움을 준 아버지 덕분에 연구실 생활에 많은 도움을 받았습니다. 또한 제가 학업에만 전념할 수 있도록 도와주신 어머니 덕분에 연구실 생활에 더욱 집중할 수 있었습니다. 그리고 자기 일도 바쁘게 가족들도 잘 챙겨주는 여동생 덕분에 연구실 생활을 잘 할 수 있었고, 한 편으로는 친구 같이 의지할 수 있어 심적으로도 편안함을 유지하는데 도움을 받았습니다. 자신의 꿈을 향해 노력하는 모습이 멋있고, 그 꿈을 이루어나가며 행복하기를 바랍니다.

연구실 생활을 하면서 든든한 지원군이 되었던 친구들인 이성용, 김종한, 박주현, 윤영길, 이진용, 이창환, 최성원에게 감사를 드립니다. 자주 연락하고 만나며 좋은 일은 같이 축하해주고 어려운 일을 당하였을 때에는 위로해주어 연구실 생활에 큰 활력소가 되었습니다.

연구실 내에서 제가 편하게 다가갈 수 있었고 제가 고민하고 있으면 먼저 다가와 주었던 이원보, 홍종우, 손위평, 신연철, 윤강진, 윤호영, 황선욱에게 큰 감사를 드립니다. 시냇가에 잎과 열매가 무성한 나무가 있으면 새가 날아와 쉬었다 갈 수도 있고, 또 열매를 먹으며 즐거워하고 잠시 나무에 앉아 풍경을 보며 다른 생각도 할 수 있듯이 저에게는

연구실에 이런 나무와 같은 존재가 있어 참 좋았습니다. 연구실 생활이 힘들 때엔 잠시 마음을 가다듬을 수 있었고, 또 연구를 할 때에는 서로 도움을 주고 받을 수 있었고, 연구가 진행되는 것을 보며 보람을 얻으며, 연구실 외적인 부분에도 신경을 쓰며 성찰하는 시간을 가질 수 있었습니다.

저와 같이 ETRI 과제를 진행했던 손위평, 윤강진, 김선도, 김준석, 김지훈, 이재홍, 황선욱에게 같이 고생하며 진행하였던 것에 감사를 드립니다. 첫 해에는 과제 진행이 어려워 밤을 새는 날도 많았고, 또 어떤 때에는 한 달간 잠을 5~6시간만 자고 나머지 시간은 모두 과제를 진행하여 어느 팀보다도 힘든 때가 있었습니다. 하지만, 그럴수록 더욱 적극적으로 일을 진행하여 과제를 잘 마무리할 수 있었습니다. 또한 팀장으로 일을 진행하는 것이 능숙하지 못하였으나 많이 조언해주고 도와주어 덕분에 발전할 수 있었습니다.

지금은 사회에 나가 있는 박천우, 서지훈이 있는 동안 연구실에서 즐겁게 보낼 수 있었습니다. 항상 밝고 어려운 일이 있더라도 견뎌내고 미래를 생각하는 박천우를 보면서 많이 용기를 얻을 수 있었습니다. 그리고 마음 씀씀이가 깊고 남을 배려하는 성격의 서지훈 덕분에 편하게 이야기할 수 있었습니다.

제가 힘들어할 때 신경을 많이 써 주었던 것을 이제서야 알게 되었을 정도로 내색하지 않고 저를 대해준 박승일, 이규진, 이기택에게도 감사를 드립니다.

유머러스하고 친화력 있는 김성원 덕분에 연구실 처음 들어왔을 때 잘 적응할 수 있었고, 훈련소 가서도 잘 적응할 수 있었습니다. 또한 훈련소 생활을 통해 행동과 가치관을 바로 옆에서 느낄 수 있었는데, 덕분에 긍정적인 변화를 할 수 있었습니다. 감사합니다.

이미 졸업한 김동명, Edwin, 최문환, 이혜원, 이옥환, 이원보, 홍종우, 유승민, 손위평, 신연철, 구종회, 김성원, 변성호, 김병진, 김현우, 조병갑, 박천우, 서지훈, 곽규환, 가순원에게서 연구하는 모습의 본을 배울 수 있었습니다.

박승일, 윤강진, 이규진, 양창목, 김선도, 손영욱, 김지훈, 이재홍, 김준석, 윤호영, 최준영, 이기택, 곽철영, 황선욱, 이지환, 이주현, 허재원, 이강현, 권희재, 김병준, 장민석, 임수훈, 이경진 모두 연구실 생활 잘 마무리 하시면 좋겠습니다.