

KCA연구2018

5G 빔포밍 무선국 전자파 인체 노출량 평가방법 연구

(최종보고서)

2018 . 10 . 30 .

한국방송통신전파진흥원

연구수행기관 : 조선대학교 산학협력단

KCA연구2018

5G 빔포밍 무선국 전자파 인체 노출량 평가방법 연구

(최종보고서)

2018 . 10 . 30 .

한국방송통신전파진흥원

연구수행기관 : 조선대학교 산학협력단

제 출 문

- 목 차 -

한국방송통신전파진흥원장 귀하

본 보고서를 5G 빔포밍 무선국 전자파 인체 노출량 평가방법 연구에 관한 연구의 최종연구 보고서로 제출합니다.

2018년 10월 30일

위탁연구기관 : 조선대학교 산학협력단

위탁연구기관장 : 김 재 수 (인)

위탁연구책임자 : 오 순 수 (인)

참여 연구원 : 조 병 록
이 화 춘
김 동 우
서 태 현
정 지 성
정 동 일
황 용 운

제 1 장 서 론	8
제 2 장 5G 전자파 인체 노출량 평가 동향 분석	9
제 1 절 5G 기술 현황, 표준화 및 산업 동향	9
제 2 절 전자파 노출량 평가 사례 및 표준화 동향	9
제 3 장 5G Massive MIMO 및 빔포밍 기술 분석	13
제 1 절 Massive MIMO 및 빔포밍 기술	13
제 2 절 5G 빔포밍 적용 기술 전자파 특성	17
제 3 절 빔포밍 배열 패치 안테나 설계 및 제작	20
제 1 항 빔포밍용 로트만렌즈 설계 및 제작	20
제 2 항 빔포밍용 배열 안테나 제작 및 측정	28
제 3 항 다중 빔 형성을 위한 전력 분배기 설계 및 제작	45
제 4 항 빔포밍 안테나 실내 및 야외 실험	56
제 4 장 전자파 인체 노출량 평가 방법 연구	68
제 1 절 빔포밍 무선국 전자파 노출량 평가 방법 도출	68
제 2 절 실측정을 통한 평가방법 신뢰성 검증	73
제 1 항 실내 측정에 의한 평가 방법 사전 검증	73
제 2 항 현장 실측정을 통한 평가 방법 신뢰성 검증	89
제 5 장 결 론	99
부록 1. 전자파 노출량 평가기준 고시(2018.08)	100
부록 2. 빔포밍 무선국 전자파 노출량 평가기준 표준안	114

- 표 목 차 -

표 2.1. IEC TC106 MT3 Case Study List(TR62669)	10
표 3.1. 로트만 렌즈 설계 파라미터	20
표 3.2. 모든 로트만 렌즈 빔 포트에 대한 배열 포트의 투과계수 및 출력 위상 ..	25
표 3.3. 빔포밍 안테나 이득, 빔폭, 틸팅 각도 측정 결과	44
표 3.4. 제작한 1x8 전력 분배기의 투과계수 측정 결과	51
표 3.5. 제작한 1x4 전력 분배기의 투과계수 측정 결과	55
표 4.1. 구체적인 평가 방법 순위 결정 지침	68
표 4.2. 계산구역 선택을 위한 경계 정의	69
표 4.3. 측정 장비 정보	89
표 4.4. 측정 설정 정보	90
표 4.5. 측정 결과 (보정 팩터 적용에 따른 결과)	92
표 4.6. 모든 편파에 대한 최대 전계강도 측정	94
표 4.7. PBCH 측정 외삽 기반 최대전계강도 산출 결과	96
표 4.8. PBCH 측정 외삽 기반 최대전계강도 산출 결과 (모든 편파)	97
표 4.9. 시간영역 및 복조영역 측정 및 외삽 결과	98

- 그림 목 차 -

그림 3.1. Massive MIMO 개념도 (출처: https://5g.co.uk/)	13
그림 3.2. 3.5GHz 빔포밍 배열안테나와 가상의 입력포트	17
그림 3.3. 3.5GHz 빔포밍 적용 시 원역장 거리에 1/4에서 전계분포	18
그림 3.4. 3.5GHz 빔포밍 적용 시 원역장 거리에 1/2에서 전계분포	19
그림 3.5. 로트만 렌즈 설계 Matlab 코드	22
그림 3.6. 설계된 로트만 렌즈 시뮬레이션 모델 및 크기	23
그림 3.7. 로트만 렌즈 빔 포트 1에 대한 배열 포트의 투과계수 시뮬레이션 결과	24
그림 3.8. 로트만 렌즈 빔 포트 1에 대한 배열 포트의 위상 시뮬레이션	25
그림 3.9. 제작된 로트만 렌즈 형상	26
그림 3.10. 측정에 사용된 2 port Network Analyzer(E5063A)	27
그림 3.11. 설계된 배열 패치 안테나	28
그림 3.12. 180도 위상 차이를 갖는 급전용 전력 분배기	29
그림 3.13. 급전용 전력 분배기의 반사계수 및 투과계수 시뮬레이션 결과	30
그림 3.14. 급전용 전력 분배기의 출력 포트 위상차이 시뮬레이션 결과	30
그림 3.15. 설계된 배열 패치 안테나의 반사계수 시뮬레이션 결과	31
그림 3.16. 설계된 배열 패치 안테나의 표면 전류 분포	32
그림 3.17. 안테나 입력에 동위상의 전력을 가할 시의 방사패턴	33
그림 3.18. 로트만 렌즈 배열포트 출력을 안테나 입력포트에 급전 설정창	34
그림 3.19. 로트만렌즈 배열포트의 크기, 위상을 적용한 안테나 방사패턴	36
그림 3.20. 제작된 빔포밍 배열 패치 안테나	37
그림 3.21. 배열 패치 안테나 후면에 결선했던 로트만 렌즈 형상	38
그림 3.22. 빔 포트 1 입력 시 안테나 방사패턴	40
그림 3.23. 빔 포트 2 입력 시 안테나 방사패턴	40
그림 3.24. 빔 포트 3 입력 시 안테나 방사패턴	41
그림 3.25. 빔 포트 4 입력 시 안테나 방사패턴	41

그림 3.26. 빔 포트 5 입력 시 안테나 방사패턴	42
그림 3.27. 빔 포트 6 입력 시 안테나 방사패턴	42
그림 3.28. 빔 포트 7 입력 시 안테나 방사패턴	43
그림 3.29. 빔 포트 8 입력 시 안테나 방사패턴	43
그림 3.30. 설계된 1x8 전력 분배기 시뮬레이션 모델	45
그림 3.31. 설계된 1x8 전력 분배기의 반사계수 및 투과계수 시뮬레이션 결과	45
그림 3.32. 제작된 다중 빔 형성을 위한 1x8 전력 분배기	46
그림 3.33. 입력포트에 대한 출력포트 2의 투과계수 측정 결과	47
그림 3.34. 입력포트에 대한 출력포트 3의 투과계수 측정 결과	47
그림 3.35. 입력포트에 대한 출력포트 4의 투과계수 측정 결과	48
그림 3.36. 입력포트에 대한 출력포트 5의 투과계수 측정 결과	48
그림 3.37. 입력포트에 대한 출력포트 6의 투과계수 측정 결과	49
그림 3.38. 입력포트에 대한 출력포트 7의 투과계수 측정 결과	49
그림 3.39. 입력포트에 대한 출력포트 8의 투과계수 측정 결과	50
그림 3.40. 입력포트에 대한 출력포트 9의 투과계수 측정 결과	50
그림 3.41. 설계된 1x4 전력 분배기의 시뮬레이션 모델	51
그림 3.42. 설계된 1x4 전력분배기의 반사계수 및 투과계수 시뮬레이션 결과	52
그림 3.43. 제작된 다중 빔 형성을 위한 1x4 전력 분배기	53
그림 3.44. 입력포트에 대한 출력포트 2의 투과계수 측정 결과	53
그림 3.45. 입력포트에 대한 출력포트 3의 투과계수 측정 결과	54
그림 3.46. 입력포트에 대한 출력포트 4의 투과계수 측정 결과	54
그림 3.47. 입력포트에 대한 출력포트 5의 투과계수 측정 결과	55
그림 3.48. 전자파 수신전력 측정 환경	56
그림 3.49. 외곽 입력의 수신 안테나 높이에 따른 10m 거리의 전자파 세기	57
그림 3.50. 중심 입력의 수신 안테나 높이에 따른 10m 거리의 전자파 세기	57
그림 3.51. 안테나에서 최대 전력 수신점의 최단거리 측정 환경	58
그림 3.52. 외곽 입력에 대한 거리별 수신전력	59

그림 3.53. 중심 입력에 대한 거리별 수신전력	60
그림 3.54. 전자파 직접 노출 실험을 위한 측정 환경	60
그림 3.55. 거리별 전자파 직접 노출 실험 결과	61
그림 3.56. 사용된 케이블의 손실 측정 결과	62
그림 3.57. 5G 신호 야외실험 측정 환경	63
그림 3.58. 원역장 거리에서 최대 수신점 측정 결과	63
그림 3.59. 최단거리에서 수신 안테나 거리별 수신전력 측정 결과	64
그림 3.60. 9m 수신점에서의 최대 수신전력 측정 결과	65
그림 3.61. 9m 거리 최대 수신점과 안테나 최단거리 경로 거리별 수신전력 측정 결과	66
그림 3.62. 9m 수신점에서의 PBCH 측정값으로부터 외삽한 최대 인체노출량	67
그림 4.1. 안테나 주위의 전자계 강도 계산을 위한 세 가지 유효한 영역을 보여 주는 그림	69
그림 4.2. 3.5 GHz 신호 측정 시스템	73
그림 4.3. 3.5 GHz의 반송주파수 송신 셋팅창	74
그림 4.4. 3.5 GHz의 반송주파수의 BWP 셋팅창	75
그림 4.5. 3.5 GHz의 변조된 신호 측정	75
그림 4.6. 3.5 GHz 신호 측정 결과 변환 과정 및 오차 결과	76
그림 4.7. 안테나를 이용한 3.5 GHz 실내 측정 환경	77
그림 4.8. 3.5 GHz 신호 제어 셋팅창 및 PBCH DRMS 측정 결과	78
그림 4.9. 3.5 GHz 신호 PBCH DRMS 측정값 오차 산출과 EIRP 계산	78
그림 4.10. 28 GHz 신호 측정 시스템	79
그림 4.11. 28 GHz 신호 측정 시스템	80
그림 4.12. 28 GHz 신호 측정 시스템	80
그림 4.13. 28 GHz의 변조된 신호 측정	81
그림 4.14. 반송주파수 28 GHz 8개 캐리어의 occupied bandwidth 측정 결과	81
그림 4.15. 28 GHz 신호 측정 결과 변환 과정 및 오차 결과	82
그림 4.16. 안테나를 이용한 28 GHz 0.2m 실내 측정 환경	83
그림 4.17. 28 GHz 신호 제어 셋팅창	83

그림 4.18. 28 GHz 신호 제어 셋팅창 및 PBCH DRMS 측정 결과	84
그림 4.19. 28 GHz 신호 PBCH DRMS 측정값 오차 산출과 EIRP 계산	85
그림 4.20. 안테나를 이용한 28 GHz 0.4m 실내 측정 환경	86
그림 4.21. 안테나를 이용한 28 GHz 0.4m 실내 측정 환경	86
그림 4.22. 안테나를 이용한 28 GHz 0.4m 실내 측정 환경	87
그림 4.23. 28 GHz 신호 0.4m 일 때 PBCH DRMS 측정값 오차 산출과 EIRP 계산	88
그림 4.24. 5G NR FR1 기지국 설치 및 측정 현장	89
그림 4.25. 8개의 빔 신호 (8개 SSB) 방사 시	92
그림 4.26. 8개의 빔 신호 (8개 SSB)와 full PDSCH 방사 시 시간영역 트레이스	93
그림 4.27. 복조 영역에서 측정 결과	96

제 1 장 서론

5G 서비스가 도래할 가까운 미래에는 이전과 다른 초고속, 대용량, 초연결, 초실시간의 서비스가 제공 가능 하여 모든 디바이스가 5G네트워크를 통해 연결되어 고객에게 이전과는 다른 새로운 가치를 제공할 수 있을 것으로 예상된다. 현재 5G 이동통신의 기지국 RF 핵심기술은 빔포밍과 Massive MIMO 기술이다. 빔 포밍기술은 안테나에서 송수신되는 전파 빔을 원하는 방향으로 보내서 간섭을 줄이고 신호를 원하는 사용하게 도착하게 하는 것이다.

과학기술정보통신부 산하 전자파 인체영향 연구를 담당하고 있는 국립전자파연구원(RRA)은 SAR 측정시설을 비롯하여 안테나 측정 시설 등을 구축하여 전자파 인체노출량 평가 방법에 대한 연구를 지속하고 있다. 또한 2017년 한국방송통신전파진흥원에서는 <5G 이동통신 서비스 도입을 대비한 무선설비 측정방법 연구> 과제를 수행하였으며, 3GPP의 MIMO 기지국 OTA 측정에 대한 분석을 수행하고, 5G 기술에 대한 OTA 시험 연구를 수행하였다. 그러나 전자파 노출량에 대한 평가는 수행이 되지 않은 상황이다.

한편 5G 기술에서는 Massive MIMO 와 빔포밍이 향후 구현될 것으로 예상되며 이에 따라 안테나의 주빔의 방향은 시간적으로 변화하게 된다. 따라서 빔고정 상태에서 측정을 수행하는 기존의 측정방법은 더 이상 사용할 수 없으며, 이에 대한 대책이 연구되어야 한다. 또한 다중 빔을 운영하는 Massive MIMO의 특성을 파악하고 이에 대한 정확한 노출량 평가에 대한 연구가 거의 전무하며 본 연구에서는 이에 대한 연구가 이루어져야 한다.

본 보고서는 5G 전자파 인체 노출량 평가 동향 분석을 수행하고, 이어서 5G Massive MIMO 및 빔포밍 기술 분석을 수행한 결과를 수록하고 있다. 또한 5G 빔포밍 적용 기술 전자파 특성을 분석하였다. 아울러 전자파 인체 노출량 평가 방법을 연구하였으며, 신뢰성 검증 및 관련 기준 개선(안)을 마련하였다. 부록으로써 전자파 노출량 평가기준 고시 및 표준 안을 제시하였다.

제 2 장 5G 전자파 인체 노출량 평가 동향 분석

제 1 절 5G 기술 현황, 표준화 및 산업 동향

과거 2G부터 3G까지의 이동통신은 음성 위주의 서비스 및 데이터 서비스의 시작점을 제공하였던 반면에, 4G 이동통신에서는 본격적인 데이터 중심의 이동통신 서비스로의 큰 변화를 이루었다.

최근 콘텐츠별 무선 트래픽을 보면 동영상상을 포함한 멀티미디어, 인터넷 등의 서비스가 모바일 환경에서도 주된 콘텐츠로 자리 잡게 되었다. 더구나 앞으로 다가올 미래에는 고품질 멀티미디어 서비스의 본격화, IoT 서비스 확산 등의 변화로 인해 기하급수적인 무선 데이터 트래픽 발생 및 스마트 기기가 폭발적으로 증대할 것으로 예상된다.

이러한 서비스 이용 패턴의 변화에 따라 2020년 상용화를 목표로 한 새로운 5G 이동통신에 대한 논의 및 연구가 진행되고 있다. 특히 현재 이동통신 네트워크 기술로는 가용 주파수 확보, 안테나 기술의 제약, Small Cell 구성 등 다양한 한계가 있기에 새로운 기술이 요구되고 있으며, 이를 위해 기존 네트워크 혁신 및 진화를 위한 5G이동통신 기술에 대한 요구 사항이 전 세계에서 본격적으로 논의되고 있다.

제 2 절 전자파 노출량 평가 사례 및 표준화 동향

전자파에 의한 건강위험에 불안함이 특정인에게 있어 객관적인 이유 없이 실제 육체적인 통증을 동반하는 경우가 있다고 독일 요하네스 구텐베르크 대학의 연구에서 발표하였다. 본 연구팀은 피실험자 154명의 머리에 안테나를 부착, 전파가 흐르지 않는 무선 LAN 신호를 송신한 결과, 피실험자의 54%에게 불안감이나 집중력의 저하, 손가락 및 팔뚝, 발 등이 쑤시는 등의 증상이 나타남을 보고한 바 있다.

본 연구에서는 또한, 전자파 인체 영향에 대한 보고서가 대부분의 사람들에게 영향을 미치고 있을 가능성이 높으며 미디어와 과학은 협력하여 항상 건강 위험에 대한 최신의 올바른 정보를 제공할 필요가 있다고 강조한다.

따라서 국민의 불안감을 해소하기 위하여 정확한 전자파 인체 노출량에 대한 평가가 이루어져야 하지만, 5G Massive MIMO에서는 빔의 공간적 방향이 바뀜으로 현재는 정확한 평가가 어려움이 있다.

아래의 표 2.1과 같이 IEC TC106 MT3에서는 5G Base station에 대하여 계산에 의한 방법에 대하여 다루고 있으므로 협력이 가능하다. 측정에 의한 방법은 다루고 있지 않으므로 협력 가능성이 낮으며, 본 연구를 통하여 기술을 개발하면 세계 기술을 리드할 수 있다.

표 2.1 IEC TC106 MT3 Case Study List (TR62669)

NO	Measurement Computation	Use case
1	SAR measurement	Local area BS
2	Computation	5G base station with massive MIMO systems
3	SAR + S Meas	Spatial averaging impact for medium range BS
4	Computation	Radio realy dish
5	Computation	Implementing simplified installation classes
6	SAR measurement	Measurement of SRE antennas at 3.5 GHz
7	Computation	5G outdoor mono tech
8	Field measurement	Small cells(field test)
9	Field measurement	Macro site (2G, 3G, 4G)
10	Field measurement	Drone based measurements

과학기술정보통신부 산하 전자파 인체영향 연구를 담당하고 있는 국립전파연구원(RRA)은 SAR 측정시설을 비롯하여 안테나 측정 시설 등을 구축하여 전자파 인체노출량 평가 방법에 대한 연구를 지속하고 있다. 정부 산하의 국내 최대 정보통신 연구기관인 전자통신연구원(ETRI)은 전파기술 연구부 산하 전파환경팀을 구성하여 전자파 인체 영향에 대한 전문적 연구를 수행하고 있다.

국내 유일의 민간주도 단체표준 제정기관인 한국정보통신기술협회(TTA)는 전자파 인체 영향에 대한 국내 표준 연구를 수행하고 있으나 5G 등 새로운 통신서비스에 대한 측정표준에 대한 연구는 보고되고 있지 않다.

한국방송통신전파진흥원(KCA)의 강우근 박사는 2017년도 GLORE 회의에서 한국내 설치된 LTE 기지국의 전자파 측정결과를 발표하였다. 2011년 7월부터 2017년 10월까지 KCA에서 측정한 LTE 기지국 전자파 강도를 ICNIRP 기준과 비교하면, 10% 미만의 값을 보이는 기지국이 약 96% 수준이었다. 지역별 분석결과 지역에 따른 결과의 차이는 거의 없었으며, 과거 측정된 3G (WCDMA) 기지국의 결과와 비교한 결과 매우 유사한 전자파강도의 경향을 보이고 있다. 따라서 이동통신 시스템이 발전하고 주파수가 높아지며, 이와 동시에 무선통신 가입자 수가 급증함에 따라 무선국의 수도 증가하고, 셀 크기는 작아지는 반면에 기지국의 전자파 강도는 크게 변화가 없다.

영국 내 이동통신 사업자는 건강에 대한 우려로 인하여 안테나 설치에 대한 제약을 받고 있다. 정부 정책감독관은 거주지 내 30피트(약 10m) 높이의 안테나를 세우기 위해 오렌지사(社)에서 제출한 신청을 거절했는데, 이는 안테나의 설치가 거주지역 내 주민에게 ‘심각한 위해(serious harm)’를 줄 수 있기 때문이라고 밝혔다. 이러한 결정은 영국 전역에서 수많은 유사 사례에 대해 매우 중요한 영향을 미칠 것으로 예상되며, 지역사회 및 안전캠페인 운동가들은 휴대전화 신호를 송수신하는 안테나의 전자파 방사에 대한 위험 공포를 지속적으로 표출하였다. 이러한 안테나 설치의 제한으로 인하여, 기술의 발전은 늦추어지고 새로운 무선통신 서비스의 출현에 방해물로 작용할 수 있다. 따라서 5G 서비스에 대한 정확한 인체 노출량 평가를 수행함으로써, 5G 무선통신 서비스와 관련한 다양한 기술들이 발전될 수 있다.

전파방사가 건강에 미치는 영향에 대한 국제 보고서 Bioinitiative 2012

에서, 인도의 이동통신 기지국의 방사 허용한도가 안전 한도인 0.5mW/m²보다 900배 높음을 시사하였다. Bioinitiative 2012 보고서는 인도, 스웨덴, 이탈리아, 미국, 러시아 등의 29명의 독립 과학자와 10개국의 전문가에 의해 발표되었고, 2007년 보고서 이후 2번째 업데이트 버전이다. 이번 보고서에 참가한 인도 델리의 Jawa-harlal Nehru대학 Jitendra Behari 교수는 방사능이 생식력과 번식력에 부정적인 영향을 미칠 수 있다고 밝혔다. 5G 서비스는 산정할 수 없는 경제적 가치를 가지지만, 5G 서비스를 안정하게 뒷받침하는 전자파 노출량 평가방법이 필요하다.

제 3 장 5G Massive MIMO 및 빔포밍 기술 분석

제 1 절 Massive MIMO 및 빔포밍 기술

5G 이동통신의 기지국 RF 핵심기술은 빔포밍과 Massive MIMO 기술이다. MIMO는 기초기술로 여러 개의 정보를 다수의 송신 안테나를 통해서 전송하여 전송속도를 향상시키는 공간다중화, 다수의 송신안테나로 똑같은 정보를 중복 전송하고 수신 안테나에서 이들 신호를 결합하고 오류를 제어하는 공간 다이버시티, 안테나에서 송수신되는 전파 빔을 원하는 방향으로 보내서 간섭을 줄이고 신호를 원하는 사용자에게 도착하게 하는 빔포밍이 있다.

Massive MIMO는 무수히 많은 안테나 요소를 갖추고 프리코딩 기술을 사용하여 타겟 모바일 유저에게 무선 에너지를 집중함으로써 채널의 파워를 절감하고, 에너지를 특정 사용자에게 집중하면 채널 내 파워가 절감될 뿐만 아니라, 다른 유저들에 대한 간섭도 줄어들고, 완벽한 채널정보를 요구하고 있기 때문에 주로 10 GHz 이상의 주파수를 사용하는 시분할 교차 송수신(TDD: Time Division Duplexing)방식의 시스템에서 주로 연구 및 개발이 되고 있다.

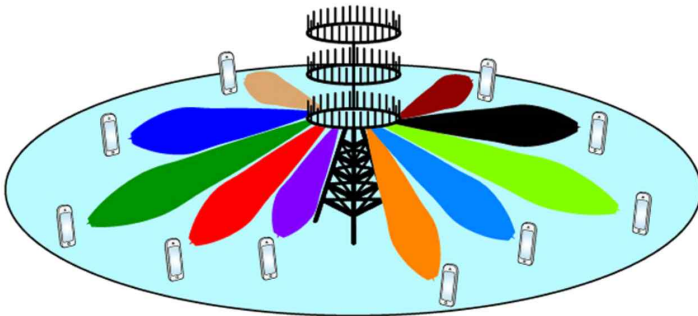


그림 3.1 Massive MIMO 개념도 (출처: <https://5g.co.uk/>)

KT는 송수신 안테나 수를 증가시켜 기지국 용량을 획기적으로 늘려 체감 속도 및 수용 인원을 증가시키는 5G 핵심 기술 'Massive MIMO(다중 입출력)'의 실외 시연을 2015년 5월 세계 최초로 성공했다고 발표하고, Massive MIMO 성능 검증 및 지속적인 기술 고도화로 128개의 안테나와 최대 16개 데이터 채널 전송, 3D 빔포밍 기술을 접목하여 2018년 2월 평창에 test bed를 구축하였다.

LG유플러스는 글로벌 네트워크 장비업체인 화웨이와 손잡고 5G를 위한 차세대 네트워크 핵심 기술인 'Massive MIMO(Massive Multiple-Input Multiple-Output)'를 중국 현지에서 시연에 성공하였다.

SK 텔레콤은 Ericsson과의 5G 현장 시험 종료 MU-MIMO, Massive MIMO 및 빔 추적을 활용하였다.

Nokia의 AirScale Massive MIMO 적응형 안테나는 64 개의 전송 및 64 수신 스트림, 16 계층의 Massive MIMO 및 다양한 사용자 정의 변형을 갖춘 Carrier Aggregation을 사용하여 최대 5배의 네트워크 용량, 높은 피크 다운 링크 처리량, 크게 개선된 업 링크보다 넓은 범위를 제공하였다.

Vodafone과 Huawei는 최근 호주에서 Massive MIMO 기술을 실제 환경 측정하여 Vodafone의 기존 주파수 스펙트럼을 사용할 수 있었고, Huawei의 5G 능동 안테나 장치 (32 개의 내부 송신기와 수신기가 특징이다.)와 함께 8개의 장치에서 717Mbps의 전송 속도를 달성하고, Vodafone은 가정과 가까운 곳에 Massive MIMO를 배치 한 최초의 유럽 모바일 네트워크가 되었다.

Sprint는 공급 업체 파트너인 Nokia와 함께 멀티 기가비트 속도를 구현하는 Massive MIMO 시연을 64개 송신과 64개 수신 128 개 안테나로 했고, 20 MHz 채널 한 개를 사용하여 300 Mbps 이상의 최고 속도를 얻었다.

Ericsson은 Massive MIMO를 128개 요소 안테나 (64개의 전송 및 수

신 요소 (64T64R))를 사용하고 수평 및 수직 빔 포밍을 지원하였다.

캐나다 Nutaq의 5G Massive MIMO 테스트 베드는 차세대 어레이 수신기가 일반적으로 작동할 복잡한 다중 경로 전파 환경에서 새로운 대규모 MIMO 개념을 검증 가능하다.

미국 버라이즌(Verizon)은 2017년 초에 5G 파일럿을 시연하고, 5G 테스트베드(Testbed) 솔루션, 5G MIMO 채널 사운더, 802.11ad 테스트베드 등 각종 밀리미터파 기반의 솔루션과 제품을 선보였다.

‘NIWEEK2015’ 현장. 삼성전자 미국 법인 삼성 리서치아메리카가 5G 이동통신을 구현하는데 필요한 핵심기술 중 하나인 ‘FD-MIMO(Full Dimension Multiple Input Multiple Output)’를 실시간 시연했는데 기존 LTE 통신 대비 주파수 효율성(spectral efficiency)이 3~5배 가량 개선되었다.

내셔널인스트루먼트(ni.com/korea, 이하 NI)는 세계 최초의 MIMO 애플리케이션 프레임워크를 발표하고, 이 소프트웨어 설계 프레임워크를 NI 소프트웨어 정의 라디오 하드웨어와 결합하면, 기존 MIMO와 Massive MIMO 프로토타입을 모두 설계할 수 있다.

퀄컴의 5G 설계는 MIMO 안테나 기술은 3D 빔 형성이 가능한 기지국에서 2차원 안테나 어레이를 사용하여 중간 대역 스펙트럼의 고주파수 대역을 활용하고 하고 있다.

ZTE corporation은 는 Massive MIMO 기지국을 사용하여 다중 사용자를 위한 다중 스트림 전송기술의 사용화 이전 현장 시험을 세계 최초로 실시하였다.

Huawei는 다양한 상업용 이동 통신 시나리오에서 Massive MIMO 검증을 수행하고 2.3, 2.6 및 3.5 GHz의 주 TDD 주파수 대역에서 테스트하였다. Huawei는 2017년 Mobile World Congress에서 FDD Massive MIMO 및 TDD Massive MIMO 듀얼 솔루션을 전시하고, Massive MIMO는 무선 및 안테나 구성 요소를 통합 한 Active Antenna Unit 설

계로 신뢰성과 프로젝트 구현 용이성을 제공하고, 획기적인 솔루션은 3D 빔 형성을 위해 수직 및 수평 모두 폭과 기울기를 제어 할 수 있는 대규모 안테나 어레이를 채택하고 있다.

SoftBank는 Huawei의 Massive MIMO를 사용하는 3.5GHz 대역에서 40MHz를 채택하여 1.4Gbps 달성하였다.

국내는 이동통신 3사에서 Massive MIMO에 대한 기술개발을 수행하고 있으며, 해외에 비하여 80%의 기술수준을 보이고 있다.

제 2 절 5G 빔포밍 적용 기술 전자파 특성

본 절은 빔포밍 안테나의 근거리장과 원거리장에서 전계분포를 관찰하고 그 특성을 기술한 것이다. 그림 3.2와 같이 빔포밍 안테나는 가로로 8개 소자가 있고, 세로로 16개의 소자가 있다. 이상적인 전계분포를 관찰하기 위하여 본 절에서는 그림 3.2와 같이 가상의 포트를 설정하였다. 실제 빔포머 소자를 부착 시에는 위상과 전계의 값이 달라짐으로 인하여 다소 상이한 결과를 보이지만, 시뮬레이션에서는 이상적인 분포를 도출하고자 한다. 이러한 안테나에 대하여 원역장 거리 대비 1/4 거리와 1/2거리에서 각각 전계분포를 도출하였다.

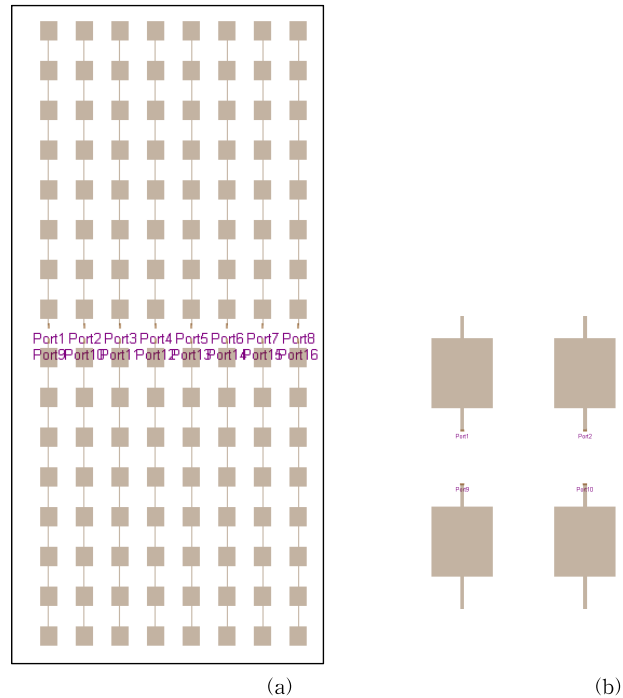


그림 3.2. 3.5GHz 빔포밍 배열안테나와 가상의 입력포트

다음 그림 3.3에서는 원역장 거리의 1/4에서 전계분포를 도출한 것이다. 중앙빔은 각 포트마다 1V의 크기와 0도의 위상을 갖는 인가한 경우이다. 사이드빔은 각 포트마다 1V의 크기와 순차적으로 50도씩 증가하는 위상을 갖도록 인가한 경우이다. 그림 3.3에서 알 수 있듯이 근역장 영역에 존재하므로 전계분포가 원역장 패턴과 많은 차이를 가짐을 알 수 있다. 아울러 널이 발생하는 지점은 불규칙적이다. 본 결과로부터 근역장에 존재 시에는 스캐닝을 촘촘하게 수행해야함을 알 수 있다.

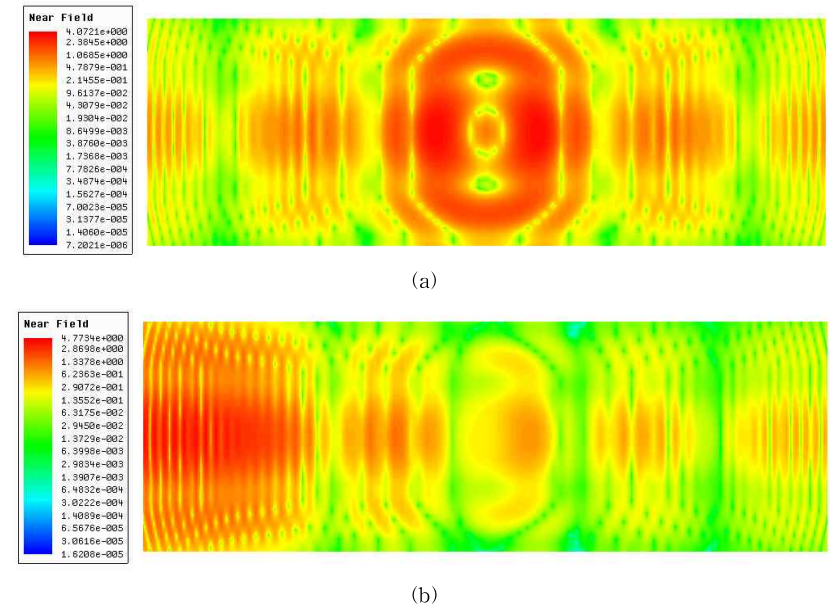
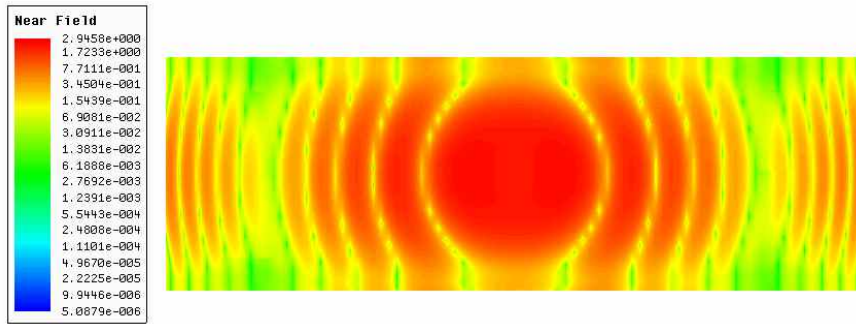


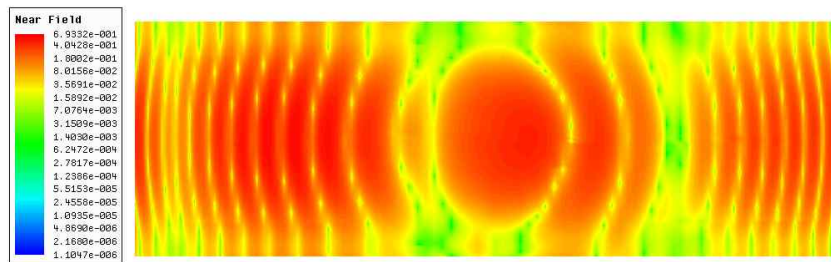
그림 3.3. 3.5GHz 빔포밍 적용 시 원역장 거리의 1/4에서 전계분포 (a) 중앙빔 (b) 사이드빔

다음 그림 3.4에서는 원역장 거리의 1/2인 10미터에서 전계분포를 도출한 것이다. 그림 3.4에서 알 수 있듯이 원역장의 1/2 거리는 원역장 패턴에 유사한 특성을 보임을 알 수 있다. 아울러 널이 발생하는 지점은 방사

패턴과 유사함을 알 수 있다. 또한 그림 3.4로부터 알 수 있는 것은 빔이 중앙에서 벗어날 경우, 사이드로브가 더 많이 발생하고 간격이 좁아진다는 것이다. 따라서 원역장에 존재 시 스캐닝 간격은 파장보다는 빔폭과 관련이 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 3.4. 3.5GHz 빔포밍 적용 시 원역장 거리의 1/2에서 전계분포 (a) 중앙빔 (b) 사이드빔

제 3 절 빔포밍 배열 패치 안테나 설계 및 제작

본 절에서는 5G 통신용 빔고정 및 틸팅 시스템 설계 및 구현을 위한 컴퓨터 모의실험 및 결과값을 설명함. 설계된 모든 유전체 기판은 Taconic 사의 TLY-5 두께 20mil로 설계되었음.

제 1 항 빔포밍용 로트만렌즈 설계 및 제작

가. 설계 파라미터

표 3.1. 로트만 렌즈 설계 파라미터

항 목	설계값
중심주파수	3.55 GHz
사용 기판	Taconic TLY-5 유전율: 2.2 기판 두께: 20mil
최대 틸팅 각(θ)	$\pm 28^\circ$
중심각(α)	40°
빔 포트 개수	8개
배열 포트 개수	8개
더미 포트 개수	8개

나. 설계된 로트만렌즈

일반적으로 빔포밍 안테나는 안테나 소자마다 한 개의 위상천이기와 한 개의 감쇠기를 요구한다. 위상 천이기를 이용하여 안테나 소자로 인가되는 파의 위상 차이를 형성함으로써 빔을 틸팅할 수 있다. 그러나 안테나 소자마다 위

상천이기가 필요하므로 제작 단가가 높다는 단점이 있다. 본 연구에서는 로트만렌즈를 사용하여 빔포밍 안테나를 구현하는데 있어 제작 단가를 줄였다.

로트만렌즈는 안테나로 입력되는 전파의 위상을 등차수열로써 인가시키는 역할을 수행한다. 안테나의 입력에 위상 차이를 형성함으로써 안테나에서 방사되는 빔의 주 빔(main lobe)이 입력 포트의 개수만큼 틸팅이 가능하다. 본 연구에서 설계된 로트만렌즈는 빔을 방위각 방향으로 틸팅시키기 위하여 입력 8개의 빔 포트(beam port)와 배열 안테나로 인가되는 출력 8개의 배열 포트(array port)로 설계한다. 로트만 렌즈는 기본적으로 빔 포트 중앙에 파를 인가 시 모든 배열 포트에서 동 위상의 파가 출력된다. 그러나 설계된 로트만 렌즈는 빔 포트가 중앙에 위치하지 않아 동 위상의 출력은 생성할 수 없다. 즉, 그림 3.6의 포트 4에 파를 인가 시 배열 포트의 출력 위상은 동 위상이 출력되지 않으며 각 배열 포트에서 균일한 차이를 갖는 위상이 출력되어야 한다. 최대 틸팅 각은 그림 3.6의 포트 1과 포트 8에 인가하였을 때 틸팅되는 각도를 의미한다. 총 최대 틸팅 각도 56°이며 안테나의 방위각 빔폭은 8°이므로 로트만 렌즈를 이용한 최대 스캔 각도는 64°로 설계되었다.

```

11 %% Basic input parameters
12 %input set 1
13 v0=299792458; %[m/s] speed of light
14 f=3.55e9; %[Hz] design frequency
15 lambda0=v0/f; %[m] wavelength in vacuum
16 Er=2.2; %[-] relative permittivity of dielectric substrate
17
18 %input set 2
19 Nb=8; %number of the beam ports
20 Na=8; %number of the array ports
21 Nd=8-0; %[1 2 4 8] only possible number of the dummy ports.
22 theta = 28; %[deg] Array steering angles
23 alpha = 25+15; %[deg] Focal angle
24 beta = 0.9-0.05; %Focal ratio f2/f1
25 fl=(8-4)*lambda0; %0n-axis focal length
26 gamma = 1.00-0.3; %Expansion factor sin(phi)/sin(alpha)
27 %% Antenna element spacing
28
29 % sd=1/(1+sin(pi*50/180)); %[lambda0] maximal array antenna elements
30 %spacing preventing to form the gratin lobes
31 sd=0.6; %[lambda0]array antenna elements spacing

```

그림 3.5. 로트만렌즈 설계 Matlab 코드

로트만렌즈의 초기 설계는 Matlab을 이용하여 설계되었다. Matlab 코드는 렌즈 각 포인트의 좌표값을 추출하여 dxf파일로 변환한다. 추출된 dxf 파일을 ANSYS Designer에 불러들여 EM 분석을 실시한다. 그림 3.6은 추출된 dxf 파일을 불러와 기판정보 및 각 포트들을 설정한 것이다.

로트만렌즈를 설계하기 위하여 Matlab 코드의 디버깅을 실시하였고 Designer에서 포트를 설정하여 각 빔 포트에 대한 배열 포트들의 투과계수와 위상을 확인한다. 설계된 로트만 렌즈는 그림 3.6과 같이 사각 모양으로 도출되지 않고 렌즈 형태의 50Ω 전송선로가 끊어진 형태로 그려지게 된다. 설계에 사용된 기판은 Taconic 사의 TLY-5 20mil 기판을 사용하였다. 기판의 제작 시 크기의 제한이 있어 크기를 줄이고 50Ω 전송선로를 추가하여 제작 후 커넥터를 붙이기 용이하게 추가적인 작업이 필요하다.

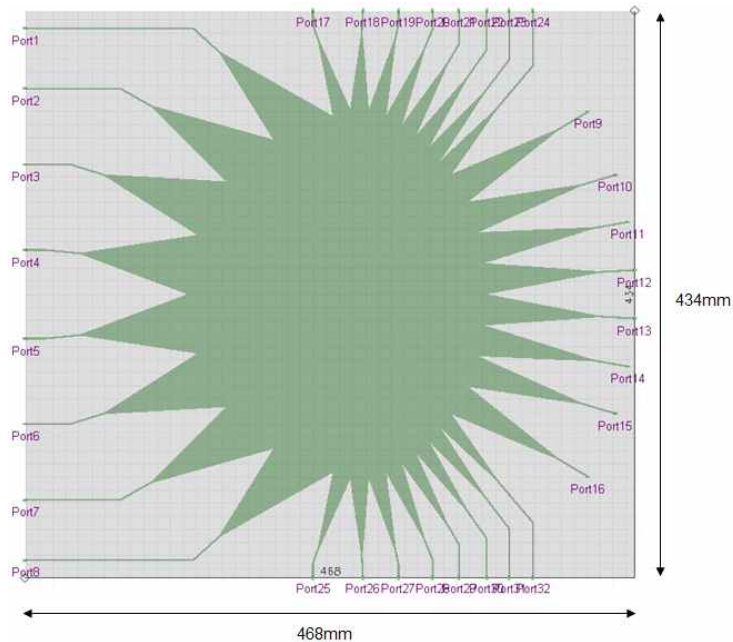


그림 3.6. 설계된 로트만 렌즈 시뮬레이션 모델 및 크기

다. 시뮬레이션 결과

로트만 렌즈는 각 빔 포트에 파를 인가하여 수 파장의 렌즈를 통해 배열 포트에 동일한 위상차를 형성하는 렌즈 형태의 위상천이기이다. 본 연구의 중심 주파수는 3.55GHz로써 파장이 약 84.5mm이며 설계된 로트만 렌즈의 가로 길이는 그림 3.6에서 468mm로써 약 5.5 파장의 길이를 갖는다. 이는 안테나까지 도달하는 파의 경로가 증가하게 되어 파의 손실이 발생한다. 그러므로 출력되는 파의 크기와 위상의 값은 최소한의 손실을 가지며 파가 전달되도록 설계하는 것이 중요하다. 설계된 로트만 렌즈는 배열 포트가 총 8개이므로 수 파장의 경로 손실을 고려하였을 때 각 배열 포트의 투과계수는 -11dB 이하의 값을 갖추어야 하며 그림 3.7에서 로트만렌즈 빔 포트 1의 입력에 대한 모든 배열 포트의 투과계수를 보이고 있

다. 그림 3.8은 빔 포트 1의 입력에 대한 모든 배열 포트의 출력 위상을 보이고 있다. 출력 위상은 모든 포트에서 약 110°씩 등차적인 값을 갖는다. 표 3.2는 모든 빔 포트에 대한 배열 포트의 투과계수와 위상차를 나타내었다.

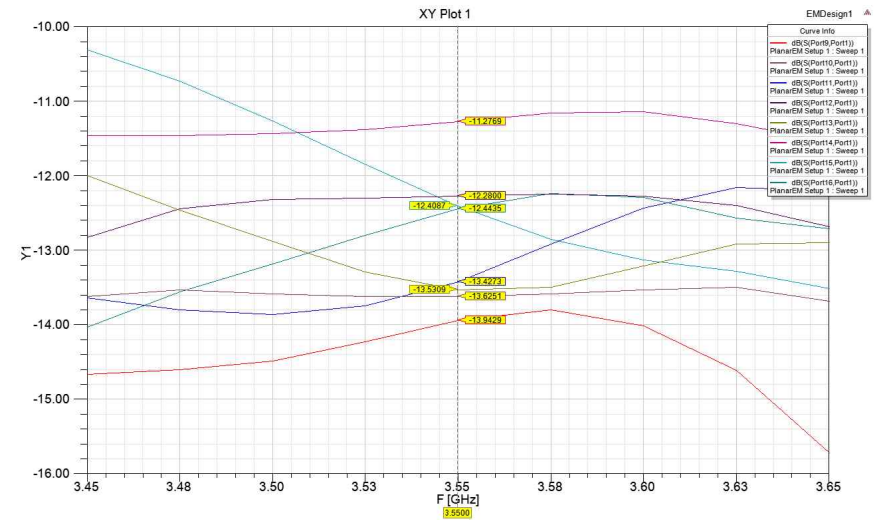


그림 3.7. 로트만 렌즈 빔 포트 1에 대한 배열 포트의 투과계수 시뮬레이션 결과

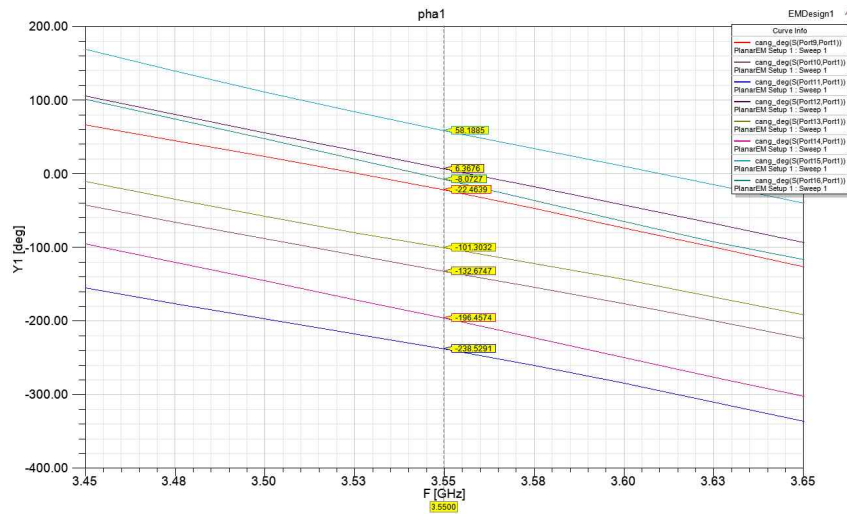


그림 3.8. 로트만 렌즈 빔 포트 1에 대한 배열 포트의 위상 시뮬레이션

표 3.2. 모든 로트만렌즈 빔 포트에 대한 배열 포트의 투과계수 및 출력 위상

로트만렌즈 빔 포트	로트만렌즈 배열 포트	
	투과계수 [dB]	위상차 [°]
1	-11 이하	-108
2	-11 이하	-65
3	-11 이하	-45
4	-11 이하	-16
5	-11 이하	+15
6	-11 이하	+45
7	-11 이하	+65
8	-11 이하	+107

설계된 로트만렌즈는 8개의 빔 포트의 입력에 대하여 모든 배열 포트에서 투과계수 -11dB 이하의 값을 가지며 빔 포트 1, 2, 3, 4에 대한 배열 포트들의 위상 차이는 빔 포트 5, 6, 7, 8에 대한 배열포트들의 위상 차이와 대칭 구조를 이루고 있다. 빔 포트 1에 대칭되는 빔 포트는 8번, 빔 포트 2에 대칭되는 빔 포트는 7번, 빔 포트 3에 대칭되는 포트는 6번, 빔 포트 4에 대칭되는 포트는 5번으로 서로 대칭의 위상 차이가 배열 안테나의 포트에 인가될 수 있다.

라. 제작된 위상 천이용 로트만렌즈

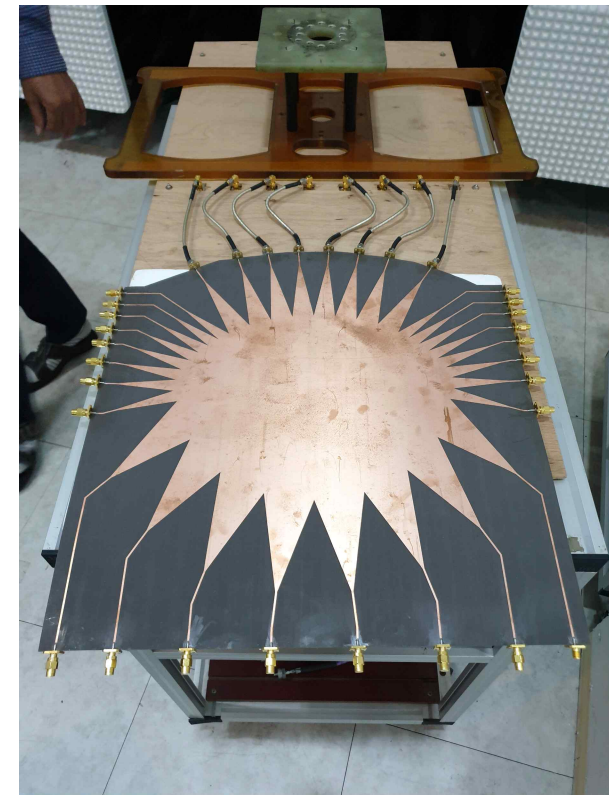


그림 3.9. 제작된 로트만렌즈 형상

마. 측정 결과

제작된 로트만렌즈는 다음과 같은 절차로 측정되었다.

1. 로트만렌즈의 각 포트에 SMA 커넥터 납땜 작업을 실시한다.
2. 측정을 진행할 빔 포트 한 개와 배열 포트 한 개를 제외한 나머지 포트들은 50Ω 터미네이션을 체결한다. 체결 시 주의사항으로 기관의 두께가 20mil(0.5mm)로 작업 중 기관이 찢어지거나 휘어질 수 있으므로 체결 시 스패너를 이용하여 SMA 커넥터를 고정한 후에 토크 렌치를 사용하여 체결한다.
3. 측정에 사용된 계측기는 Keysight사의 E5063A Network Analyzer를 이용한다. 2 port calibration을 진행한 후 로트만렌즈의 빔 포트와 배열 포트에 결선하여 측정을 진행한다.



그림 3.10. 측정에 사용된 2 port Network Analyzer(E5063A)

제 2 항 빔포밍용 배열 안테나 제작 및 측정

가. 설계된 배열 패치 안테나 형상

본 연구에서는 5G 통신에 있어 기지국 안테나에서 빔 포밍을 통하여 인체 전자파 노출량의 평가를 위하여 빔 틸팅 각도가 최대 $\pm 28^\circ$ 를 구현하기 위하여 안테나 소자를 8x16의 총 128개의 소자를 설계하였다. 설계된 배열 패치 안테나는 고각 방향의 안테나의 배열 간격은 높은 안테나 이득을 위하여 0.8λ (67.6mm)로 설계되었으며 방위각 방향의 안테나 배열 간격은 빔포밍 시 Grating lobe를 원하는 각도에서 형성시키기 위하여 0.6λ (50.7mm)로 설계하였다.

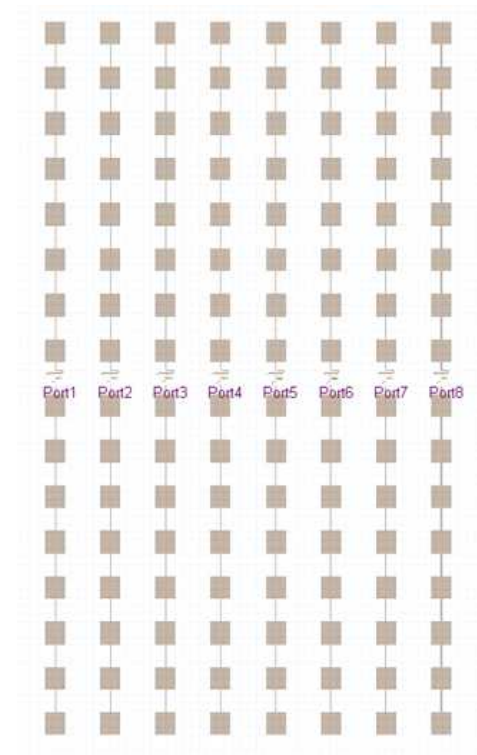


그림 3.11. 설계된 배열 패치 안테나

설계된 배열 패치 안테나는 그림 3.11에서 도시하고 있으며 안테나의 급전은 중심으로 급전되어 상부와 하부 패치 안테나를 통해서 방사파가 이루어진다. 급전 시 급전부의 상부와 하부에 동위상의 파를 인가하면 편파의 위상 차이에 의하여 파의 상쇄가 발생한다. 이러한 파의 상쇄를 방지하기 위하여 급전부에 180° 위상 차이를 갖는 전력 분배기를 설계하였다. 전력 분배기는 0.6λ 의 배열 간격을 넘지 않아야하므로 meander line으로 설계하여 고각 방향의 배열을 중앙 피딩 지점에서 벌어지지 않게 설계하였다.

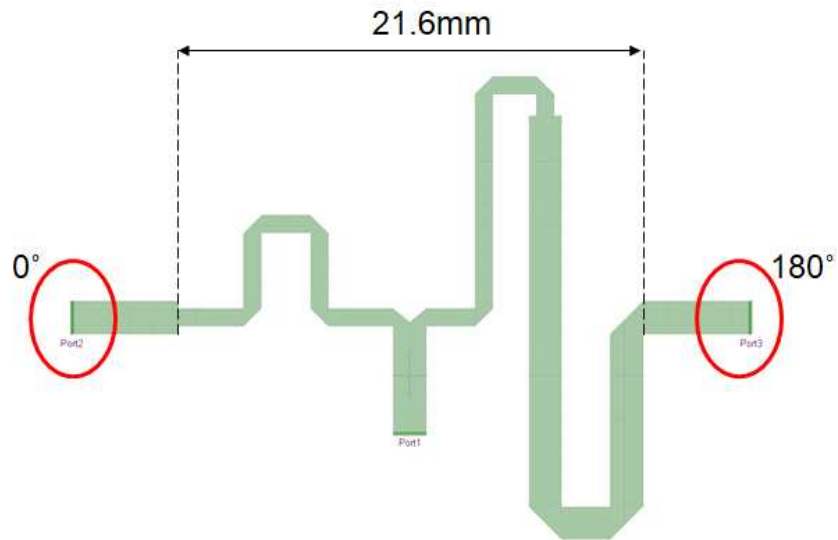


그림 3.12. 180° 위상 차이를 갖는 급전용 전력 분배기

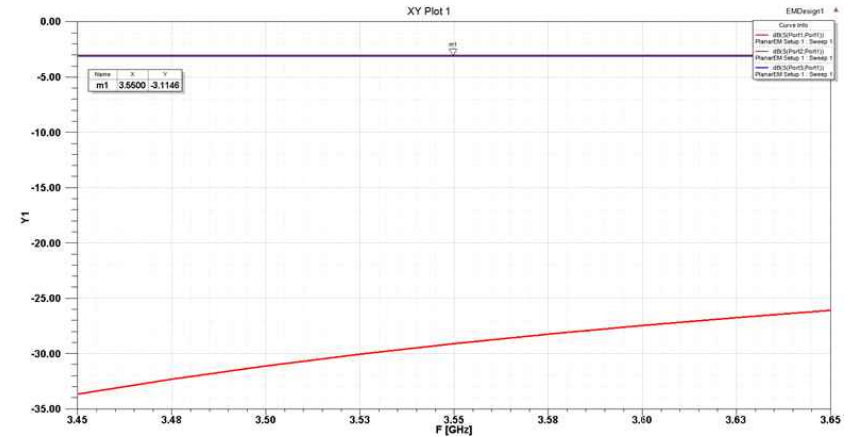


그림 3.13. 급전용 전력 분배기의 반사계수 및 투과계수 시뮬레이션 결과

설계한 meander line 180° 위상 차이를 갖는 전력 분배기는 그림 3.12에서 보이고 있으며 전력 분배기의 입력 포트에 대한 반사계수와 출력포트의 투과계수 그리고 위상 차이를 각각 그림 3.13과 3.14에서 보이고 있다.

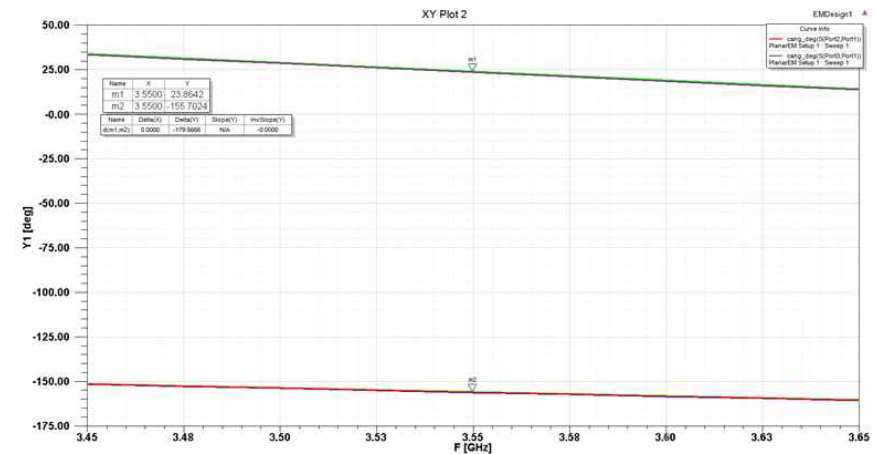


그림 3.14. 급전용 전력 분배기의 출력 포트 위상차이 시뮬레이션 결과

설계된 전력 분배기는 구동 주파수(3.55GHz)에서 각 출력 포트 -

3.1dB의 투과계수 값을 갖는다. 위상 확인을 위하여 ANSYS Designer의 De-embedding 기능을 사용하여 50Ω 전송선로 길이만큼을 보상한 위치에 서 위상 차이를 확인하였다. 설계된 급전용 전력 분배기의 출력 포트 위 상 차이는 -179.56도의 차이를 가지므로 이를 적용함으로써 전파의 상쇄 현상을 없앨 수 있다. 다음 본문에서는 meander line 180° 위상 차이를 갖 는 전력 분배기를 포함하여 배열 패치 안테나의 급전부에 동일한 전력과 위상을 인가하였을 때의 결과값을 보일 것이다.

나. 안테나 시뮬레이션 결과

배열 패치 안테나는 총 8개 포트에 구성되어 있으며 각 포트에 대하여 반사계수를 확인하였다. 설계된 모든 안테나 입력 포트의 반사계수는 중 심 주파수에서 -15dB 이하의 값을 가지며 -15dB 대역폭은 약 10MHz 로 협대역 특성을 갖는다. 그림 3.15에서 입력 포트에 대한 반사계수 그래 프를 도시하였다.

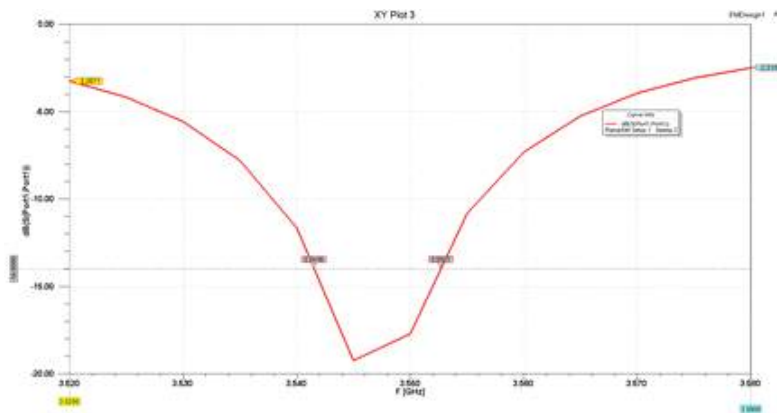


그림 3.15. 설계된 배열 패치 안테나의 반사계수 시뮬레이션 결과

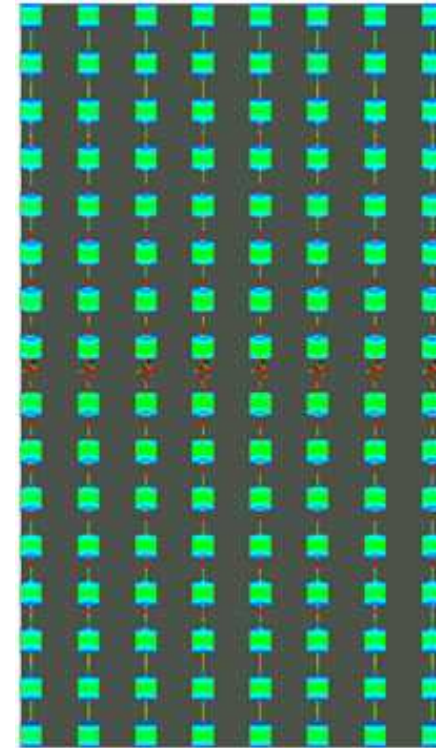


그림 3.16. 설계된 배열 패치 안테나의 표면 전류 분포

안테나에 입력 포트에 파를 인가 시 안테나의 표면 전류의 분포는 그림 3.16에 도시하였으며 전류 분포는 모든 안테나 소자에서 균일한 전계가 분포됨을 알 수 있다.

그림 3.17은 각 안테나 입력 포트에 동일한 전력과 위상을 인가 시의 방사 패턴을 보이고 있다.

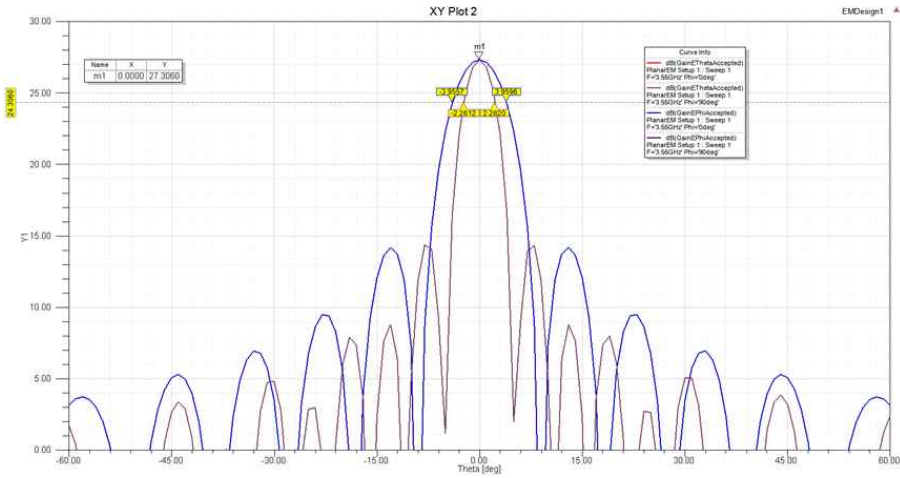


그림 3.17. 안테나 입력에 동위상의 전력을 가할 시의 방사패턴

설계된 배열 패치 안테나의 이득은 27.3dBi이며 고각 빔폭은 4.5° 방위 각 빔폭은 8°의 값을 갖는다. 방위각 빔폭이 8°로 설계되어 이는 설계된 배열 패치 안테나가 설계된 로트만렌즈의 출력을 받아 각 8°의 빔 틸팅 각도를 갖는데 적합함을 알 수 있다. 그러나 설계된 배열 패치 안테나는 동일한 전력과 위상의 파가 인가되지 않고 로트만렌즈에서 출력된 파가 설계된 배열 패치 안테나의 입력으로 인가된다. 그러므로 설계된 로트만 렌즈의 배열 포트에 출력되는 크기와 위상값을 적용하여 설계된 배열 패치 안테나에 적용하여 시뮬레이션을 진행하여 빔 틸팅 가능 여부의 모의 실험을 진행하였다. 그림 3.18은 ANSYS Designer의 port excitation 설정창을 보이고 있으며 로트만렌즈 배열포트의 크기 및 위상 값을 적용하여 안테나 급전부의 크기와 위상값을 설정하였다. 빔이 틸팅된 방사패턴은 그림 3.19에서 도시하고 있다.

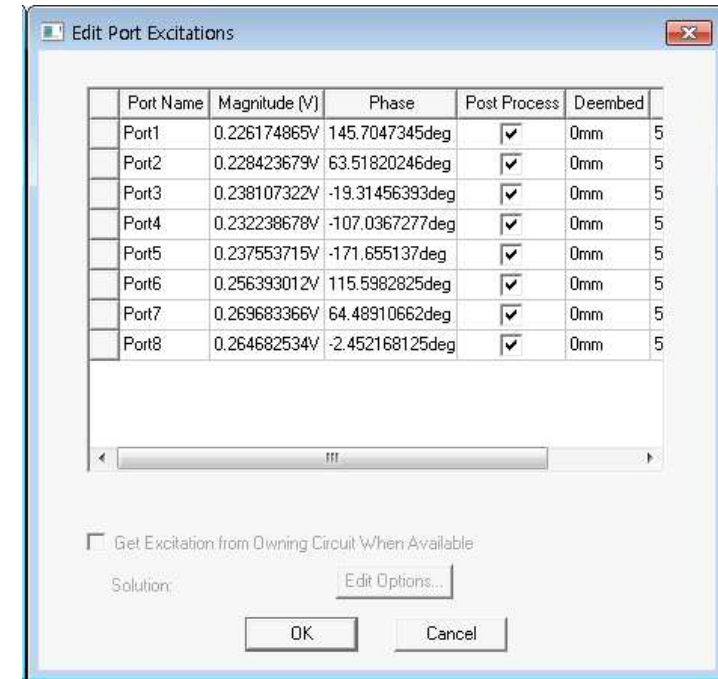


그림 3.18. 로트만렌즈 배열포트 출력을 안테나 입력포트에 급전 설정창

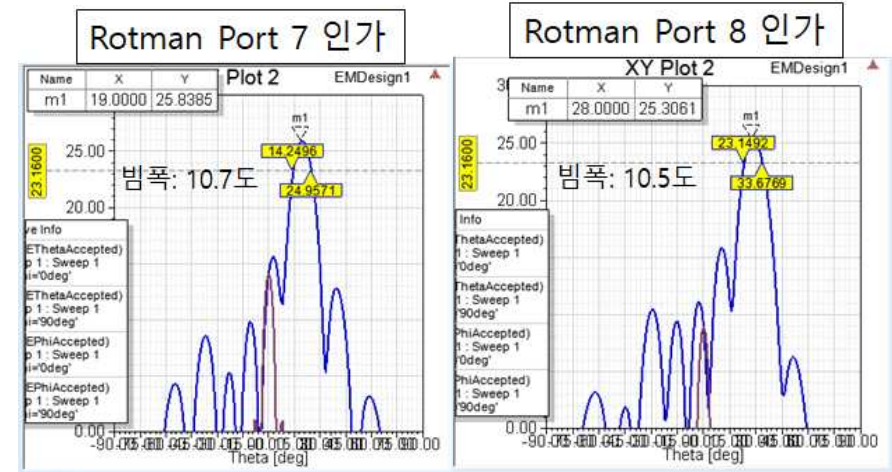
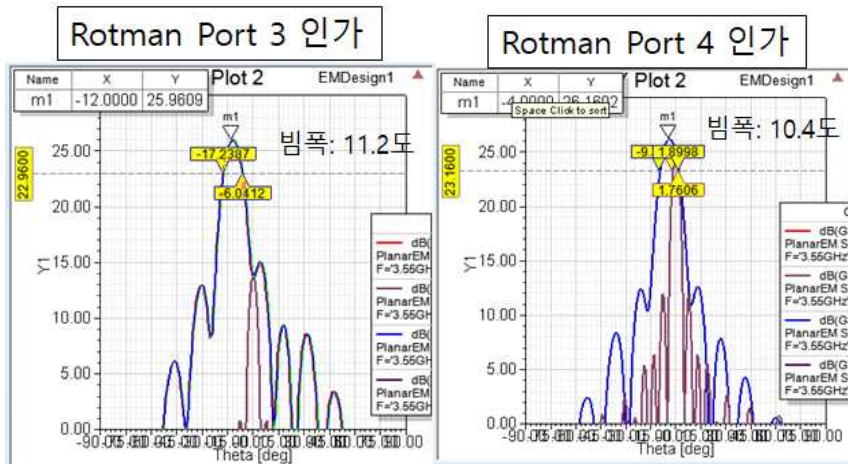
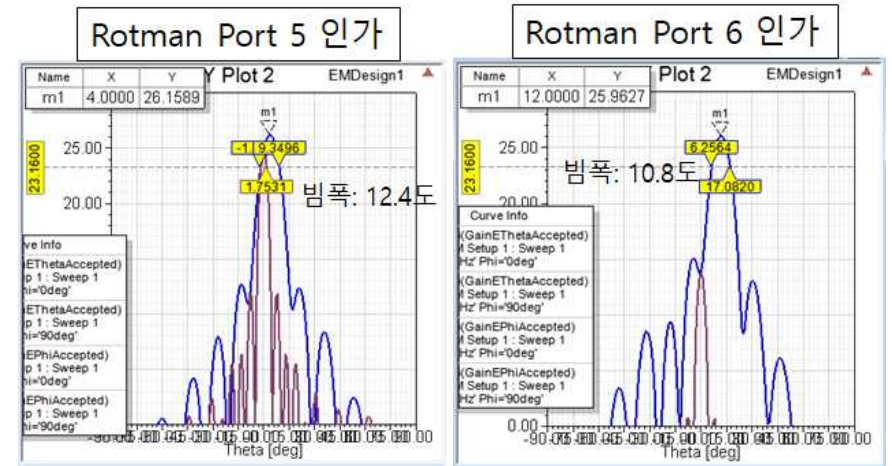
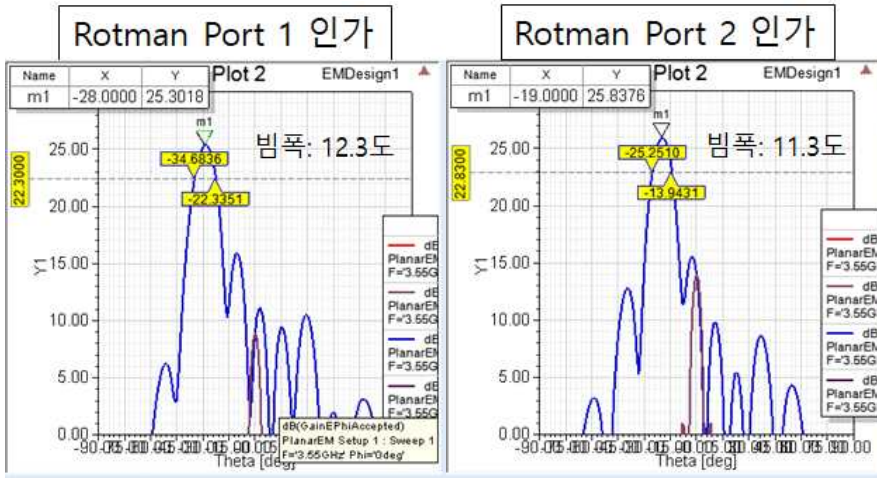


그림 3.19. 로트만렌즈 배열포트의 크기, 위상을 적용한 안테나 방사패턴

로트만렌즈 배열포트의 크기, 위상값을 적용한 결과 설계한 배열 패치 안테나의 빔 틸팅 각도는 로트만렌즈 빔 포트 1부터 순서대로 -28° , -19° , -12° , -4° , $+4^\circ$, $+12^\circ$, $+19^\circ$, $+28^\circ$ 의 값을 가졌다. 틸팅 각도별 안테나의 빔폭은 12.3° , 11.3° , 11.2° , 10.4° , 12.4° , 10.8° , 10.7° , 10.5° 의 값을 가졌다.

다. 안테나의 빔폭은 설계한 로트만렌즈의 배열포트의 출력 위상차가 정확히 균등하지 않고 약 $\pm 10^\circ$ 의 오차를 가지고 있어 발생하는 현상으로 판단된다.

다. 빔포밍용 배열 안테나 제작

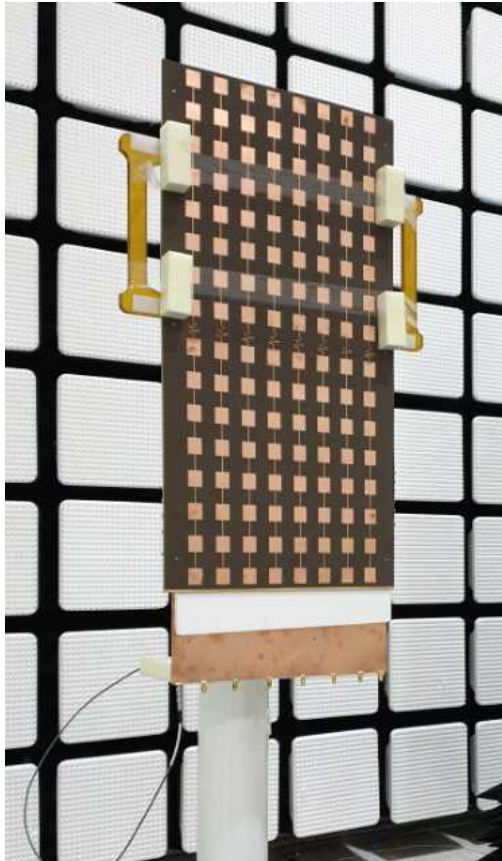


그림 3.20. 제작된 빔포밍 배열 패치 안테나

제작된 빔포밍용 배열 패치 안테나의 급전은 기판에 via를 뚫어 SMA 커넥터의 내심을 끼워 급전하는 방법이다. 제작된 안테나의 크기는 375x880 mm의 크기를 갖는다. 제작된 안테나의 원역장 거리($2D^2/\lambda$)는 21.7m로 원역장 측정을 위하여 매우 큰 챔버가 요구된다. 국내에 보유중인 원역장 챔버는 측정이 불가능하여 근역장 측정을 통하여 원역장 변환을 실시하였다. 안테나의 측정은 인천 IoT 기술지원센터의 근역장 측정 챔버에서 진행하였다.



그림 3.21. 배열 패치 안테나 후면에 결선한 로트만렌즈 형상

라. 측정 결과

빔포밍용 배열 패치 안테나의 측정 절차는 다음과 같다.

1. 제작된 안테나의 중심주파수에서 측정 장비의 보정작업을 실시한다.
2. 로트만렌즈 배열 포트와 배열 패치 안테나의 입력 포트의 결선을 실시한다. 주의 하여야 할 사항은 로트만렌즈의 배열포트에 출력되는 위상이 온전히 안테나에 전달되어야 한다. 그러므로 결선에 이용하는 케이블은 모두 동일 길이의 케이블을 사용한다.
3. 결선이 완료된 포트와 파를 인가 할 로트만렌즈의 빔 포트를 제외하고 모두 50 터미네이션 포트를 체결한다.
4. 각 빔 포트에 파를 인가하여 중심 주파수에서 근역장 측정을 실시한다.
5. 측정된 근역장 데이터를 원역장 변환을 통하여 방사패턴을 얻어낸다. 위 절차를 실시하여 얻은 안테나의 방사패턴은 다음 그림 3.22 ~ 3.29 와 같으며 표 3.3에 측정을 통하여 얻은 각 포트별 이득, 3dB 빔폭, 빔 틸팅 각도를 정리하였다.

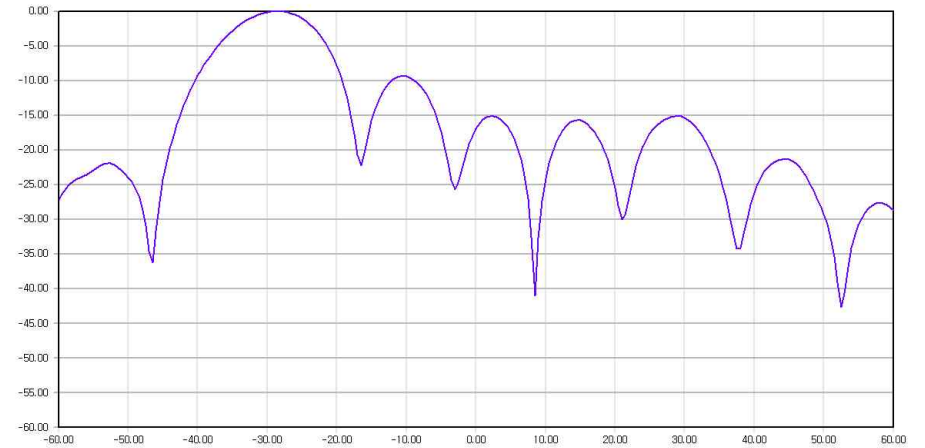


그림 3.22. 빔 포트 1 입력 시 안테나 방사패턴

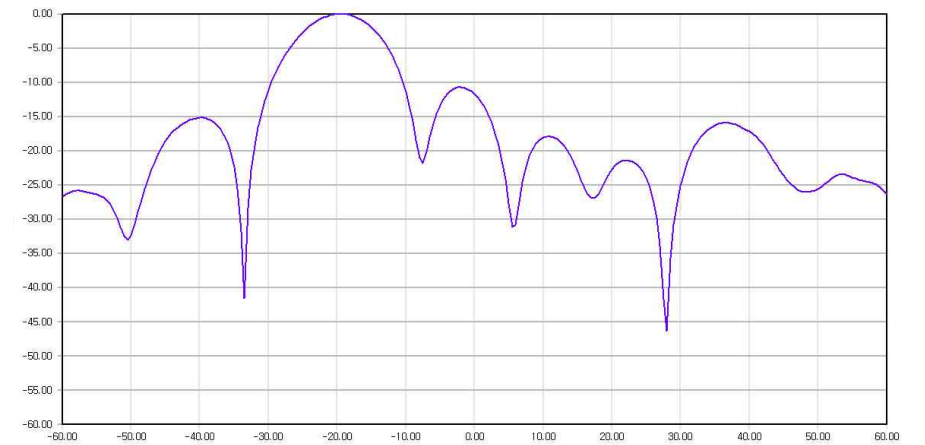


그림 3.23. 빔 포트 2 입력 시 안테나 방사패턴

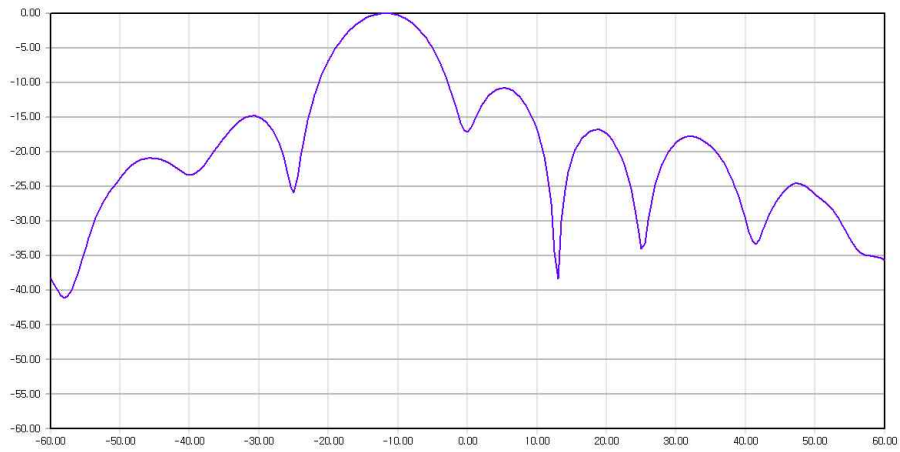


그림 3.24. 빔 포트 3 입력 시 안테나 방사패턴

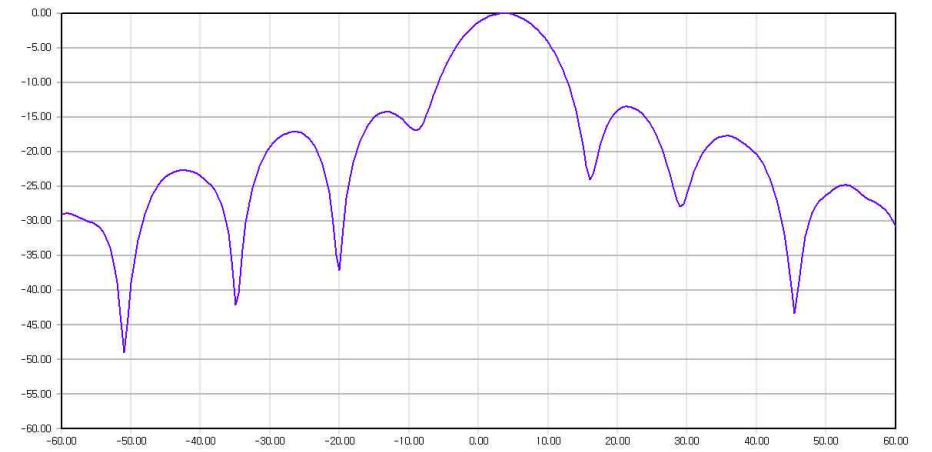


그림 3.26. 빔 포트 5 입력 시 안테나 방사패턴

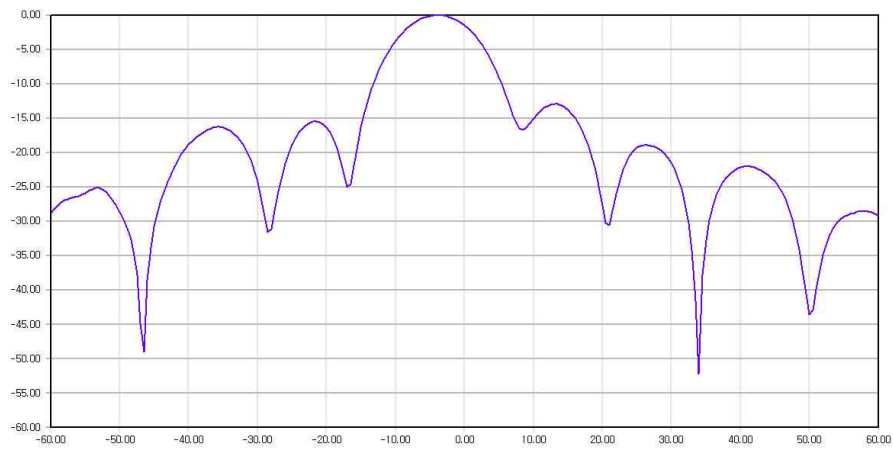


그림 3.25. 빔 포트 4 입력 시 안테나 방사패턴

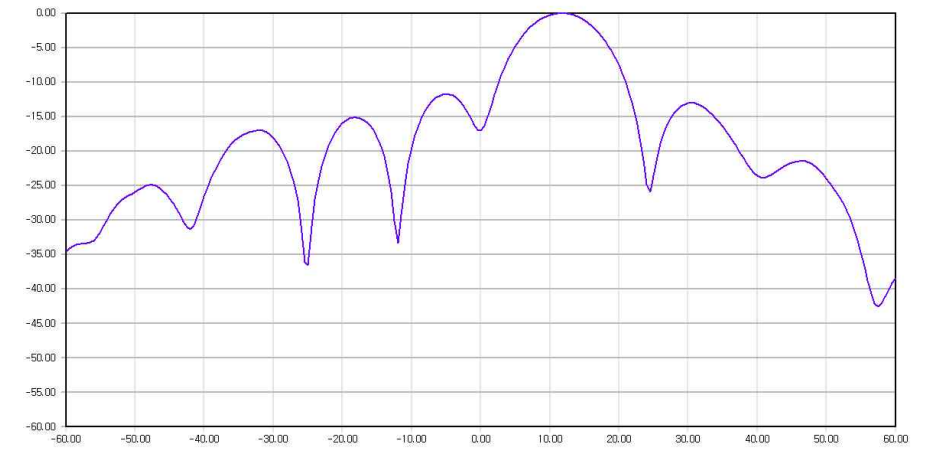


그림 3.27. 빔 포트 6 입력 시 안테나 방사패턴

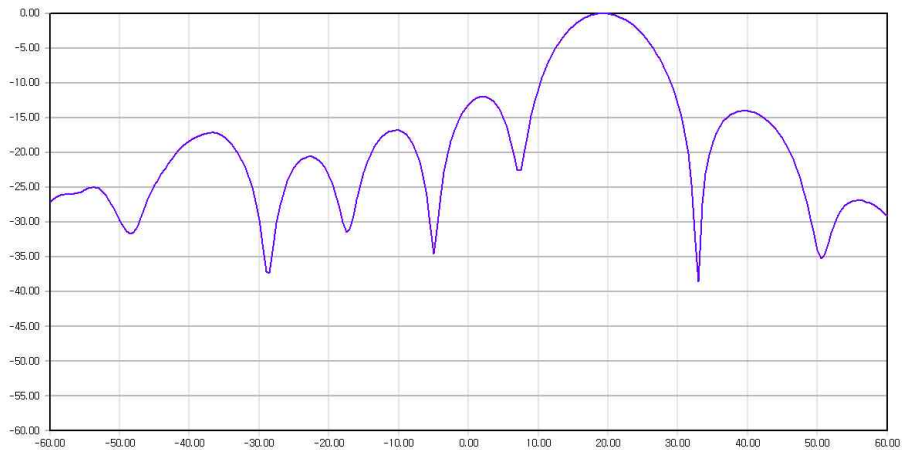


그림 3.28. 빔 포트 7 입력 시 안테나 방사패턴

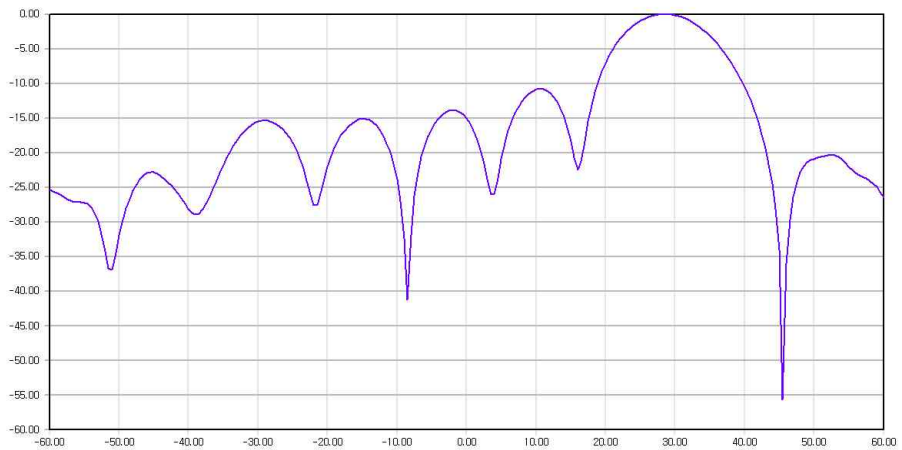


그림 3.29. 빔 포트 8 입력 시 안테나 방사패턴

제작된 안테나는 이득을 제외한 3dB 빔폭과 빔 틸팅 각도는 설계값에 근사한 값을 나타내었지만 이득은 전체적으로 약 -5dB정도 감소한 값을 얻었다. 추후 전자파 인체 노출량 실험에 차질이 있는 정도는 아니지만

측정 결과에 대한 검증과 이득 감소 원인을 찾는 디버깅 과정이 추가적으로 필요하다.

표 3.3. 빔포밍 안테나 이득, 빔폭, 틸팅 각도 측정 결과

로트만렌즈 전력 인가 포트	측정 결과	
	이득 [dBi]	20.2
포트 1	빔폭 [deg]	12.45
	빔 틸팅 각도 [deg]	-28.5
	이득 [dBi]	21.3
포트 2	빔폭 [deg]	11.3
	빔 틸팅 각도 [deg]	-19.5
	이득 [dBi]	21.4
포트 3	빔폭 [deg]	11
	빔 틸팅 각도 [deg]	-12
	이득 [dBi]	21.7
포트 4	빔폭 [deg]	10.9
	빔 틸팅 각도 [deg]	-4
	이득 [dBi]	21.7
포트 5	빔폭 [deg]	10.9
	빔 틸팅 각도 [deg]	3.5
	이득 [dBi]	21.4
포트 6	빔폭 [deg]	10.9
	빔 틸팅 각도 [deg]	11.5
	이득 [dBi]	21.4
포트 7	빔폭 [deg]	11
	빔 틸팅 각도 [deg]	19.5
	이득 [dBi]	20.3
포트 8	빔폭 [deg]	12.4
	빔 틸팅 각도 [deg]	28.5
	이득 [dBi]	20.2

제 3 항 다중 빔 형성을 위한 전력 분배기 설계 및 제작

가. 8개 다중 빔 형성을 위한 1x8 전력 분배기

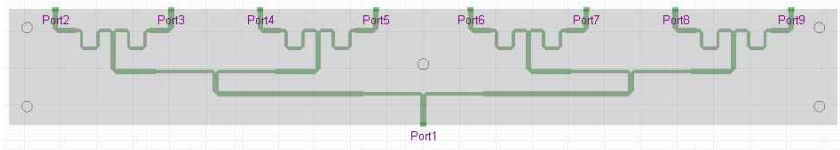


그림 3.30. 설계된 1x8 전력 분배기 시뮬레이션 모델

1x8 전력 분배기는 로트만렌즈의 빔 포트 중 한 개의 포트만 사용하지 않고 모든 빔 포트를 동시에 사용하여 다중 빔을 형성하기 위하여 설계되었다. 마이크로스트립 라인의 임피던스 매칭은 quarter wave transformer를 이용하여 50Ω 정함으로 설계하였으며 설계된 1x8 전력 분배기는 그림 3.30에서 도시하고 있다. 설계된 1x8 전력 분배기는 229 x 31.6mm의 크기를 가지며 전력이 1/8로 감소되어 전달되므로 중심주파수에서 각 출력 포트에 -9dB의 투과계수 값을 갖도록 설계하였다.

나. 시뮬레이션 결과

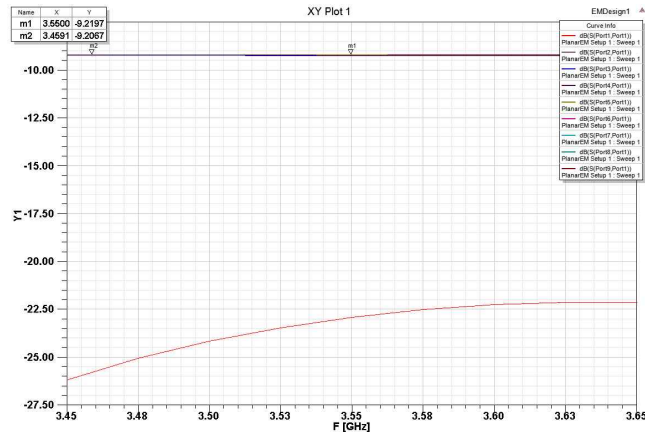


그림 3.31. 설계된 1x8 전력 분배기의 반사계수 및 투과계수 시뮬레이션 결과

1x8 전력 분배기의 시뮬레이션 결과 그림 3.31과 같이 입력 포트에서 -20dB 이하의 반사계수 값을 가지며 출력 포트에서 투과계수는 -9.2dB의 양호한 값을 나타냈다.

다. 다중 빔 형성을 위한 전력 분배기 제작 및 측정

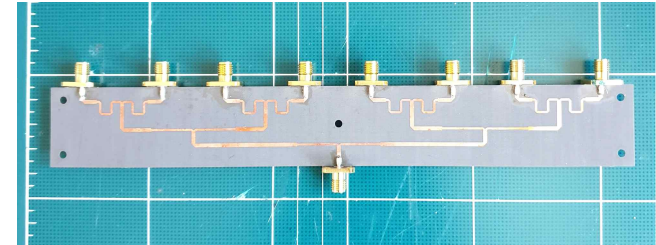


그림 3.32. 제작된 다중 빔 형성을 위한 1x8 전력 분배기

제작된 1x8 전력 분배기는 로트만렌즈의 8개 빔 포트에 결선되어 다중 빔 형성 기능을 수행하므로 모든 출력 포트에 동일한 전력의 파가 전달되어야 한다. 그림 3.32는 제작된 1x8 전력 분배기의 측정결과를 도시하고 있으며 표 3.4에 측정된 데이터를 정리하였다. 모든 출력 포트에서 약 -9.1dB의 양호한 투과계수 값을 갖는다.

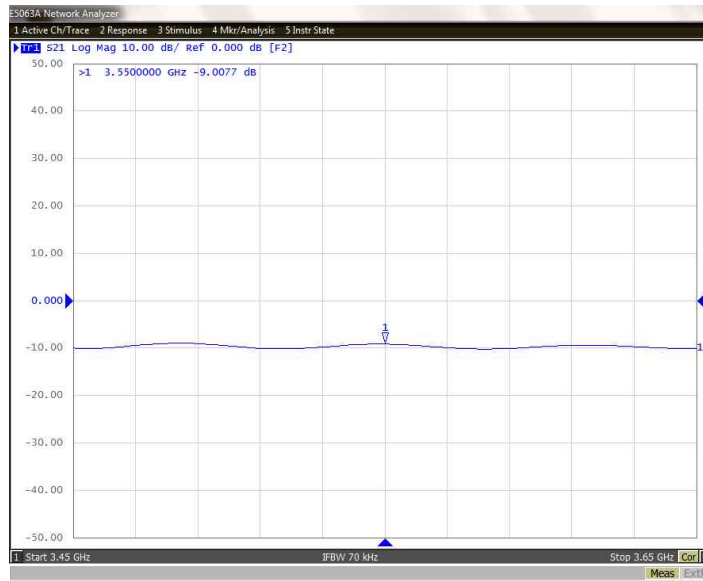


그림 3.33. 입력포트에 대한 출력포트 2의 투과계수 측정 결과

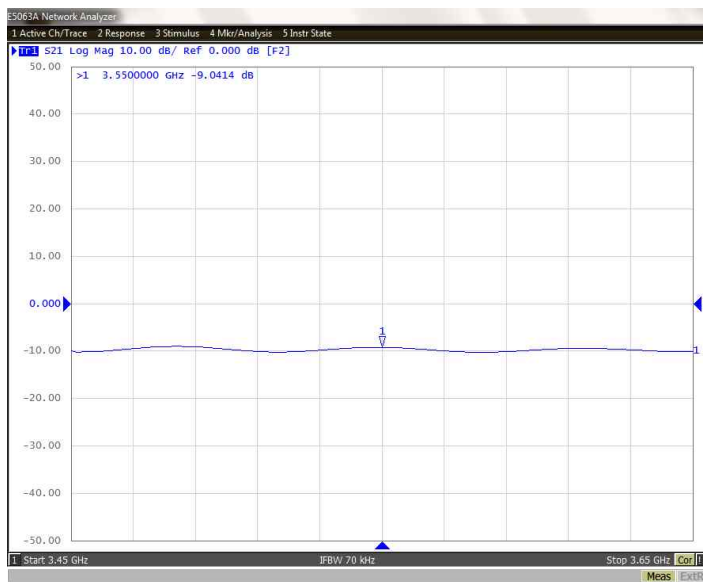


그림 3.34. 입력포트에 대한 출력포트 3의 투과계수 측정 결과

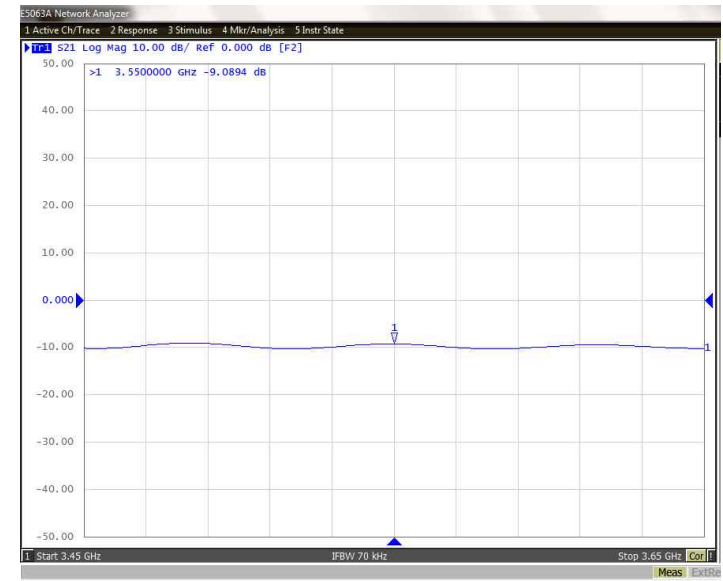


그림 3.35. 입력포트에 대한 출력포트 4의 투과계수 측정 결과

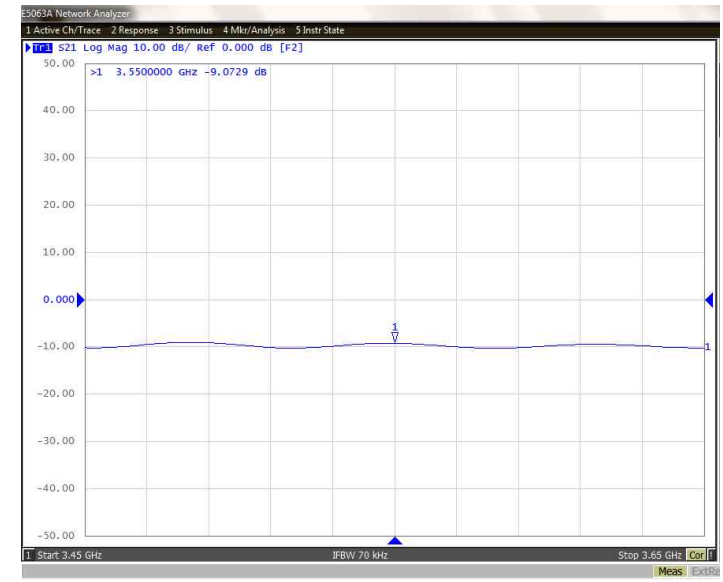


그림 3.36. 입력포트에 대한 출력포트 5의 투과계수 측정 결과

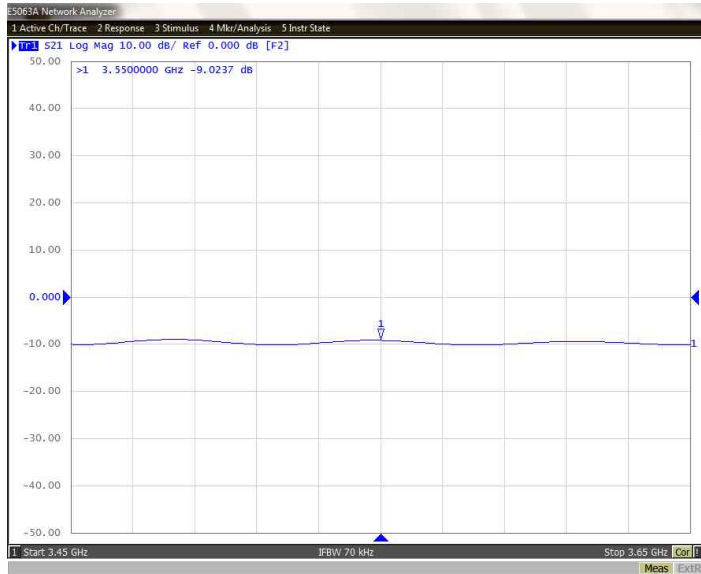


그림 3.37. 입력포트에 대한 출력포트 6의 투과계수 측정 결과

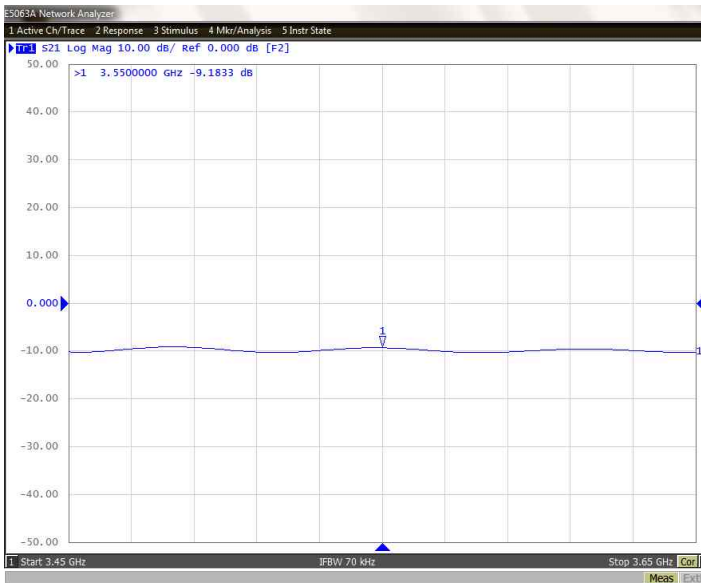


그림 3.38. 입력포트에 대한 출력포트 7의 투과계수 측정 결과

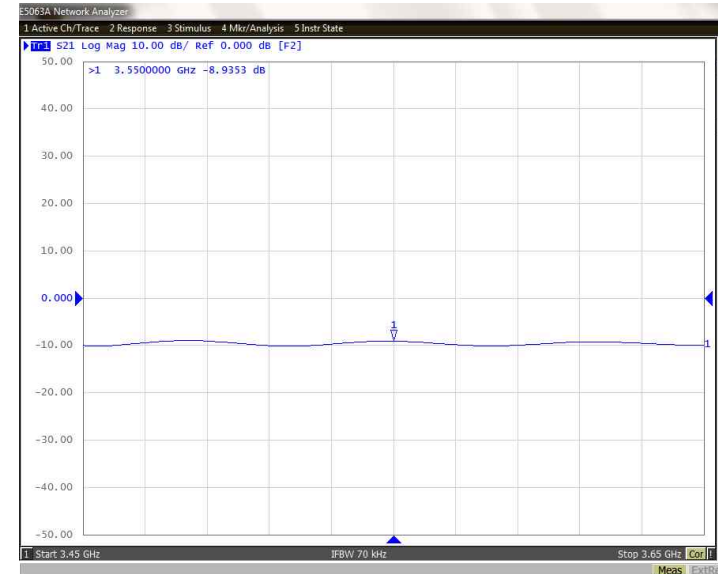


그림 3.39. 입력포트에 대한 출력포트 8의 투과계수 측정 결과

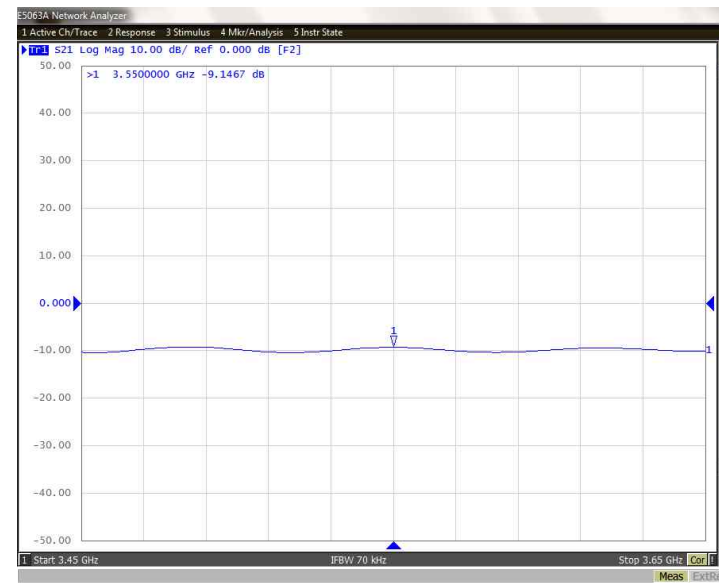


그림 3.40. 입력포트에 대한 출력포트 9의 투과계수 측정 결과

표 3.4. 제작한 1x8 전력 분배기의 투과계수 측정 결과

출력 포트	투과계수 [dB]
포트 2	-9.00
포트 3	-9.04
포트 4	-9.08
포트 5	-9.07
포트 6	-9.02
포트 7	-9.18
포트 8	-8.94
포트 9	-9.15

라. 4개 다중 빔 형성을 위한 1x4 전력 분배기

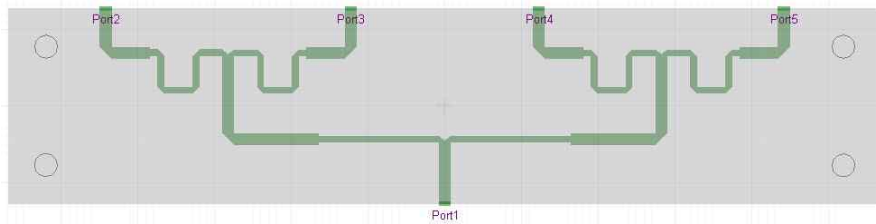


그림 3.41. 설계된 1x4 전력 분배기의 시뮬레이션 모델

1x4 전력 분배기는 로트만렌즈의 빔 포트 중 한 개의 포트만 사용하지 않고 8개중 4개의 빔 포트를 동시에 사용하여 다중 빔을 형성하기 위하여 설계되었다. 마이크로스트립 라인의 임피던스 매칭은 quarter wave transformer를 이용하여 50Ω 정함으로 설계하였으며 설계된 1x4 전력 분배기는 그림 3.41에서 도시하고 있다. 설계된 1x4 전력 분배기는 114 x

25.4mm의 크기를 가지며 전력이 1/4로 감소되어 전달되므로 중심주파수에서 각 출력 포트에 -6dB의 투과계수 값을 갖도록 설계하였다. 로트만 렌즈는 총 8개의 빔 포트에 제작되어 각 4개의 빔 포트에 결선되도록 1x4 전력 분배기를 2개로 제작하여 다중 빔 형성을 설계하였다.

마. 시뮬레이션 결과

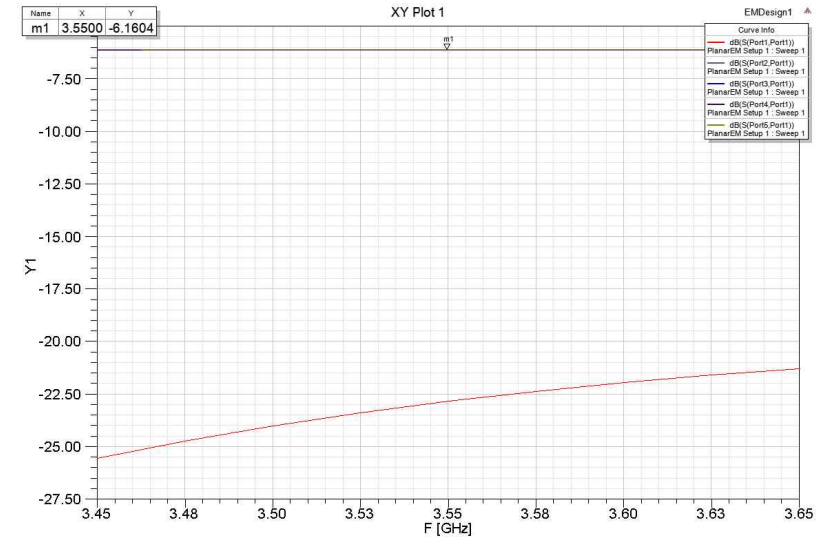


그림 3.42. 설계된 1x4 전력 분배기의 반사계수 및 투과계수 시뮬레이션 결과

설계된 다중 빔 형성을 위한 1x4 전력 분배기의 입력 포트에 대한 반사계수와 출력 포트의 투과계수 시뮬레이션 결과를 그림 3.42에 도시하였다. 시뮬레이션 결과 중심 주파수에서 -20dB이하의 반사계수 값을 가지며 투과계수는 -6.1dB로 매우 양호한 결과를 나타냈다.

바. 4개 다중 빔 형성을 위한 1x4 전력 분배기 제작 및 측정

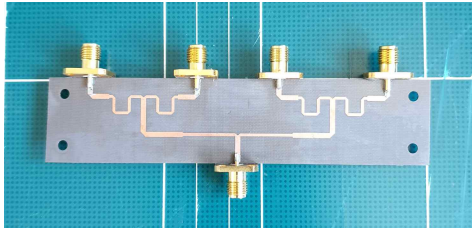


그림 3.43. 제작된 다중 빔 형성을 위한 1x4 전력 분배기

제작된 1x4 전력 분배기는 로트만렌즈의 8개 빔 포트에 4개씩 결선되어 다중 빔 형성 기능을 수행하므로 모든 출력 포트에 동일한 전력의 파가 전달되어야 한다. 그림 3.43은 제작된 1x4 전력 분배기의 측정결과를 도시하고 있으며 표 3.5에 측정된 데이터를 정리하였다. 모든 출력 포트에서 약 -6dB의 양호한 투과계수 값을 갖는다.

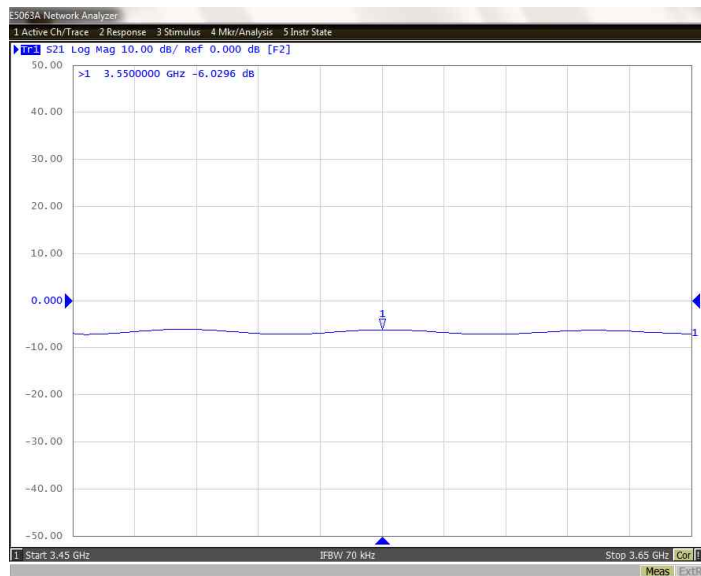


그림 3.44. 입력포트에 대한 출력포트 2의 투과계수 측정 결과

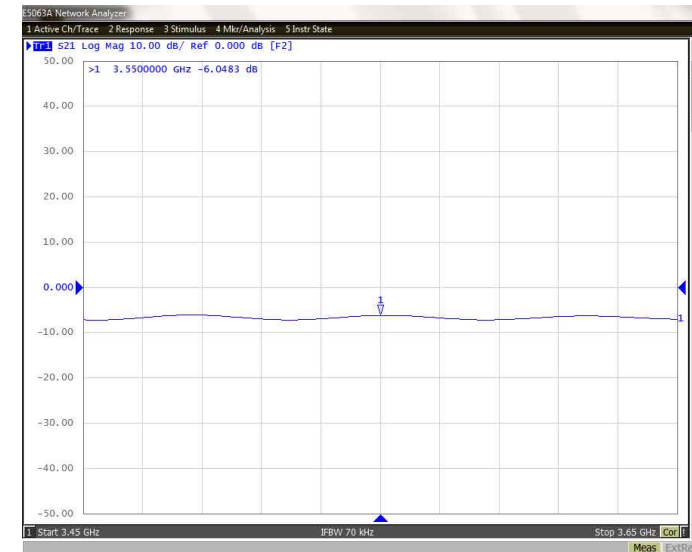


그림 3.45. 입력포트에 대한 출력포트 3의 투과계수 측정 결과

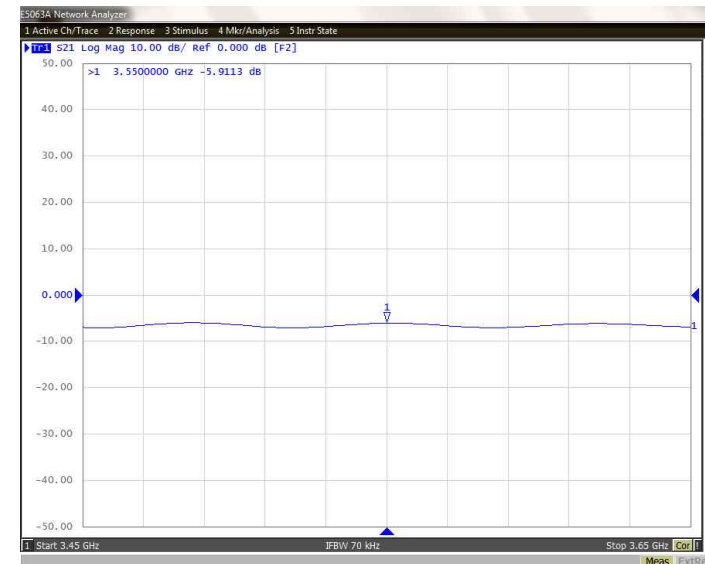


그림 3.46. 입력포트에 대한 출력포트 4의 투과계수 측정 결과

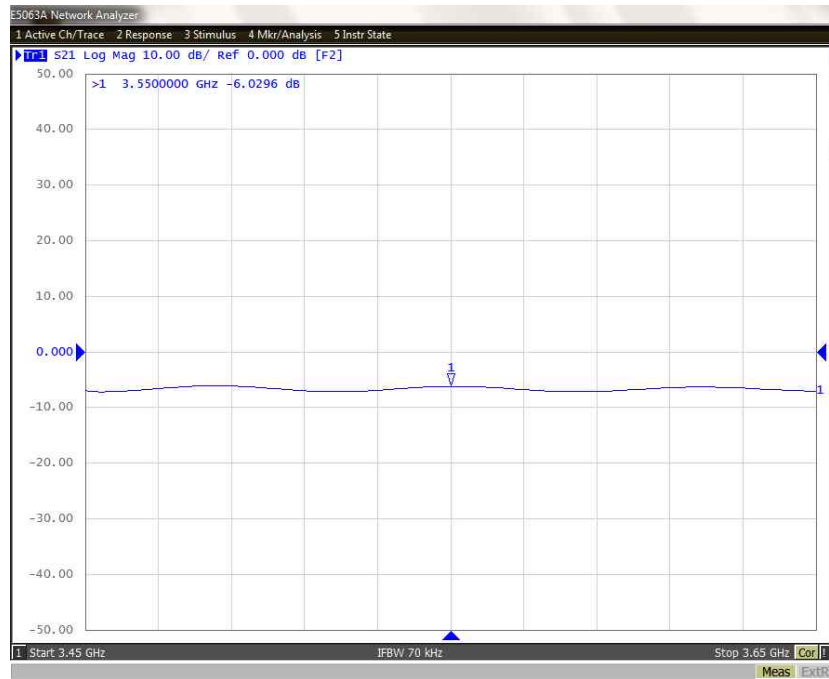


그림 3.47. 입력포트에 대한 출력포트 5의 투과계수 측정 결과

표 3.5. 제작한 1x4 전력 분배기의 투과계수 측정 결과

출력 포트	투과계수 [dB]
포트 2	-6.03
포트 3	-6.05
포트 4	-5.91
포트 5	-6.03

제 4 항 빔포밍 안테나 실내 및 야외 실험

제작된 빔포밍 안테나의 실내 측정은 나주 국립전파연구원의 반사실 챔버에서 진행하였다. 송신 안테나의 위치는 기지국 안테나가 위치하는 약 3m 위로 배치하였고, 수신 안테나인 POD 안테나는 1.1m, 1.5m, 1.7m로 높이를 변화하면서 일반적인 성인 신체의 무릎, 허리, 가슴으로 수신전력의 세기를 측정하였다. 실험의 구성은 그림 3.48과 같으며 송신 안테나의 입력은 스위치를 이용하여 로트만 렌즈에 파를 인가하였다. 수신 안테나는 안step 모터를 사용하여 10cm 단위로 자동 측정이 가능하도록 유도 레일을 깔아 측정을 진행하였다. 전자파의 측정은 Keysight E5063A NA를 사용하였으며 Labview를 사용하여 측정된 데이터를 수집하는 시스템을 구성하였다.

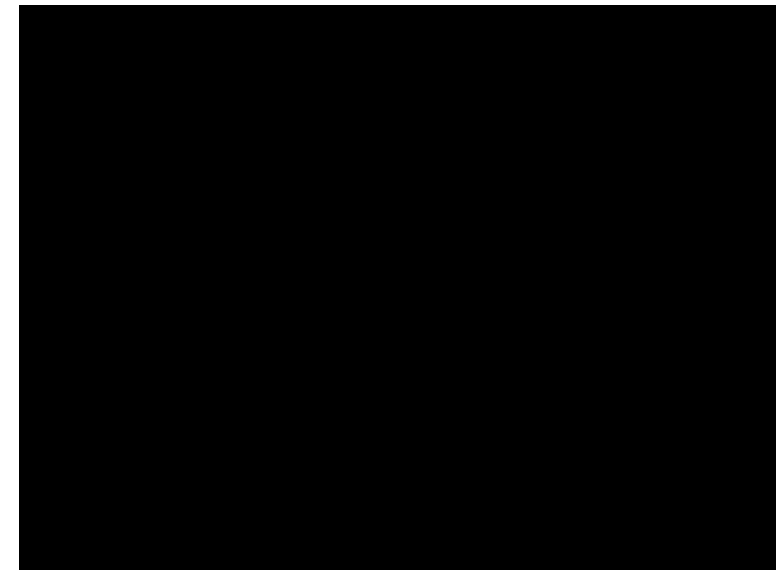


그림 3.48. 전자파 수신전력 측정 환경

안테나의 측정은 10m 거리에서 외곽 포트와 중심 포트에 대한 최대 수신 지점을 찾기 위하여 그림 3.49에 결과를 나타내었다. 그림 3.49의 x축 거리는 안테나에서 10m 거리까지 수직으로 뻗은 점이 0m이며 우측으로 5.5m를 측정하였다. 로트만렌즈의 외곽포트에 입력 시 안테나의 최대 수신 점은 5.5m이며, 중심 포트에 인가 시 최대 수신점은 0.7m로 측정되었다.

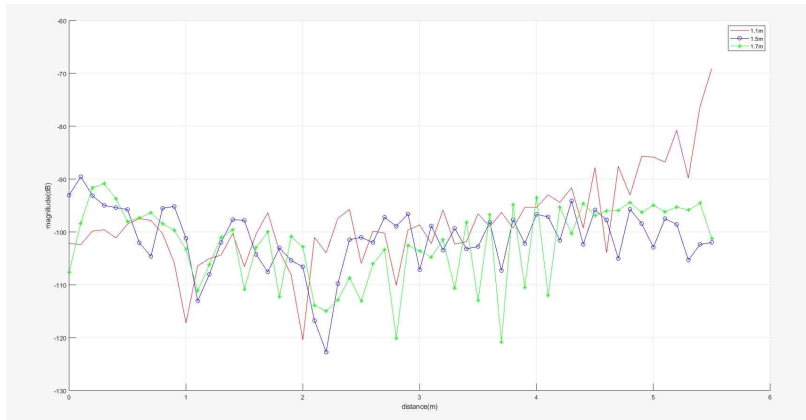


그림 3.49. 외곽 입력의 수신 안테나 높이에 따른 10m 거리의 전자파 세기

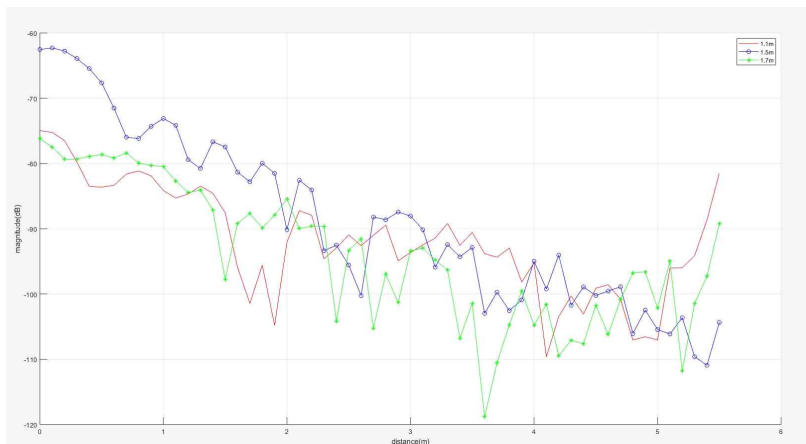


그림 3.50. 중심 입력의 수신 안테나 높이에 따른 10m 거리의 전자파 세기

최대 수신점으로부터 안테나의 최단거리를 측정하기 위하여 그림 3.51과 같이 환경을 구성하였다. 10m의 최대 수신점에서 안테나까지의 경로에서 수신전력을 측정하여 안테나로부터 거리에 대한 분석을 실시하였다.

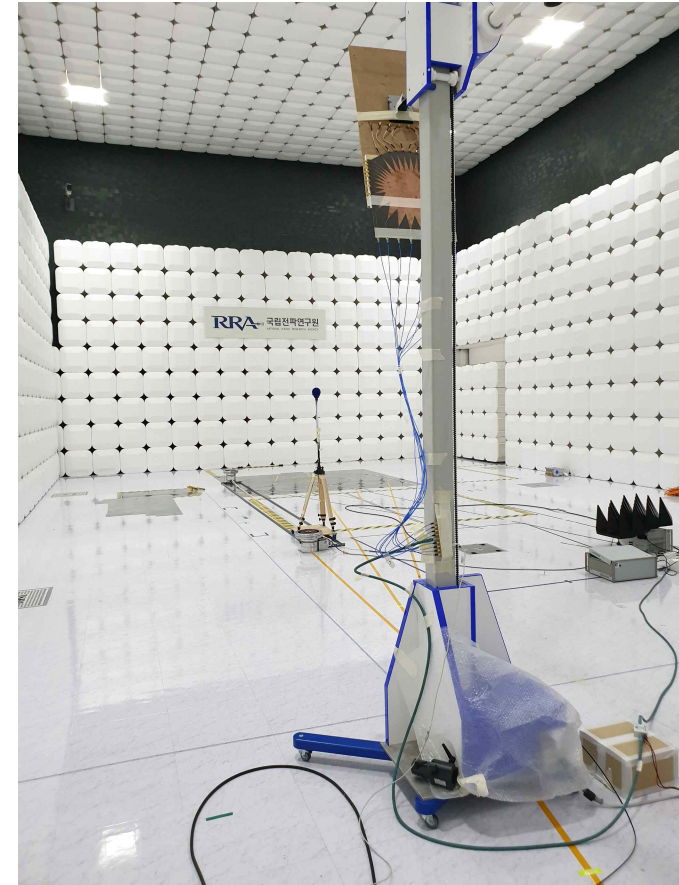


그림 3.51. 안테나에서 최대 전력 수신점의 최단거리 측정 환경

그림 3.52는 외곽 입력에 대하여 수신 안테나의 거리별 수신전력을 나타내고 있다. 수신 안테나는 높이를 변경하며 측정을 진행 하였으며, 1.1m 와 1.7m의 높이에서는 최대 수신점에서 가장 큰 수신전력을 보이고 있지만 1.5m의 높이에서는 최대 수신전력의 위치가 가장 가까울 때가 아닌 0.3m정도 이동 한 후의 결과를 나타냈다.

중심 입력에 대한 거리별 수신전력을 그림 3.53에서 나타내고 있으며 동일하게 높이를 변경하며 측정을 진행하였다. 중심 입력에 대한 결과는 1.1m, 1.7m 역시 동일하게 가장 가까울 때 수신전력이 높았지만 1.5m에서는 반대로 안테나로부터 멀리 떨어져있을 때 수신 전력이 가장 높았다.

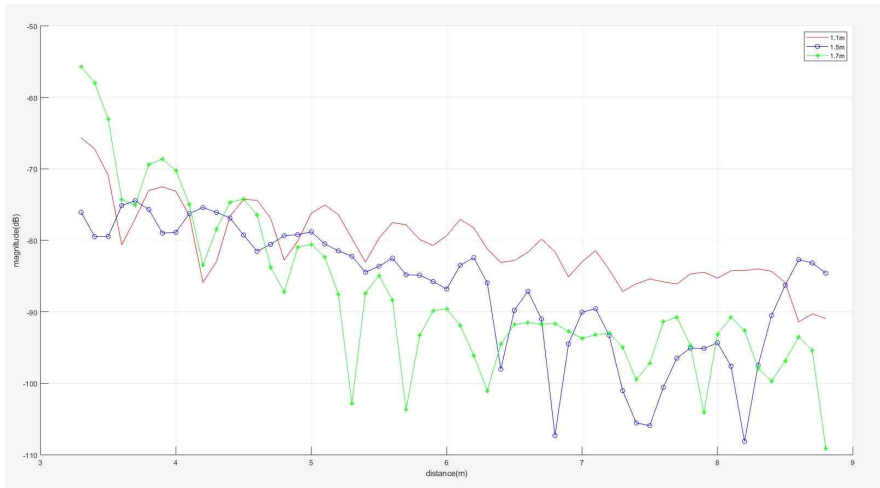


그림 3.52. 외곽 입력에 대한 거리별 수신전력

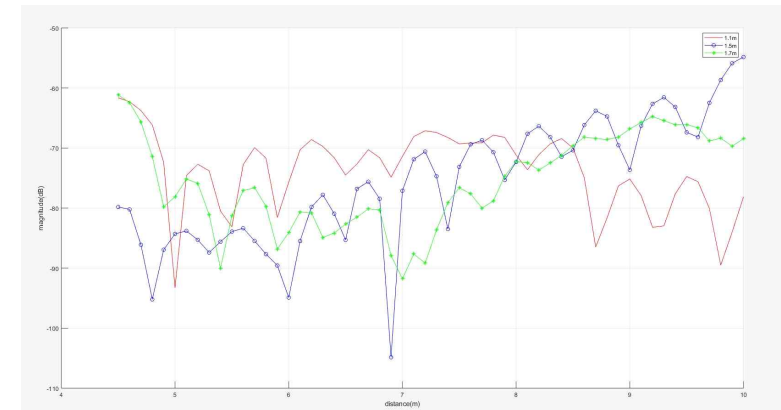


그림 3.53. 중심 입력에 대한 거리별 수신전력



그림 3.54. 전자파 직접 노출 실험을 위한 측정 환경

안테나의 정면으로 파를 직접 수신할 시 수신 전력의 변화를 관찰 하였다. 송신 안테나의 높이를 기존 3m에서 수신 안테나의 높이와 동일한 1.5m로 낮추어 그림 3.54과 같이 측정 환경을 구성하였다. 안테나는 외곽 포트와 중심포트에 각각 입력파를 인가하여 실험하였으며, 그 결과는 그림 3.55과 같다. 수신 안테나가 가까울 때에 약 5m 거리에 있을 시 파의 변화가 매우 크지만 5m 이후에는 수신 전력의 변화가 거의 없는 결과를 나타냈다.

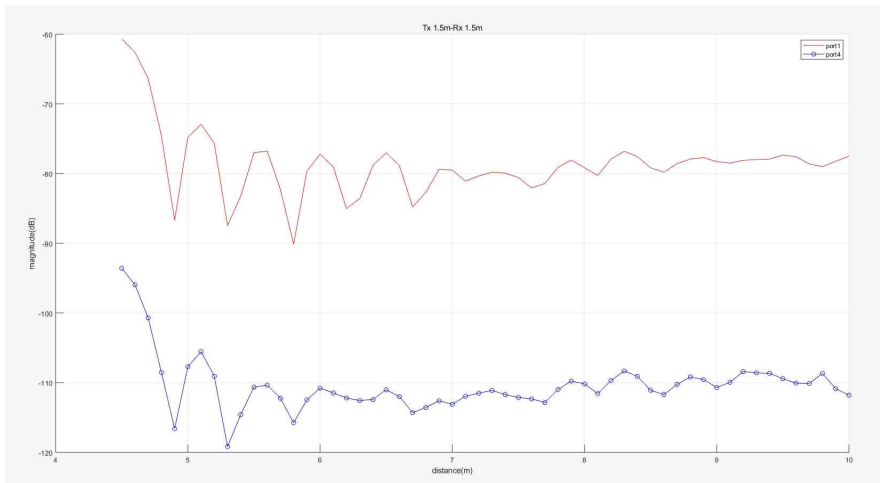


그림 3.55. 거리별 전자파 직접 노출 실험 결과

그림 3.56은 본 실험에서 사용된 측정 케이블의 손실을 보이고 있으며 케이블에 의한 손실은 -37.67dB의 값을 보이고 있다. 모든 측정 결과에 케이블 손실에 대한 보상 값을 적용시켜 확인하여야 한다.

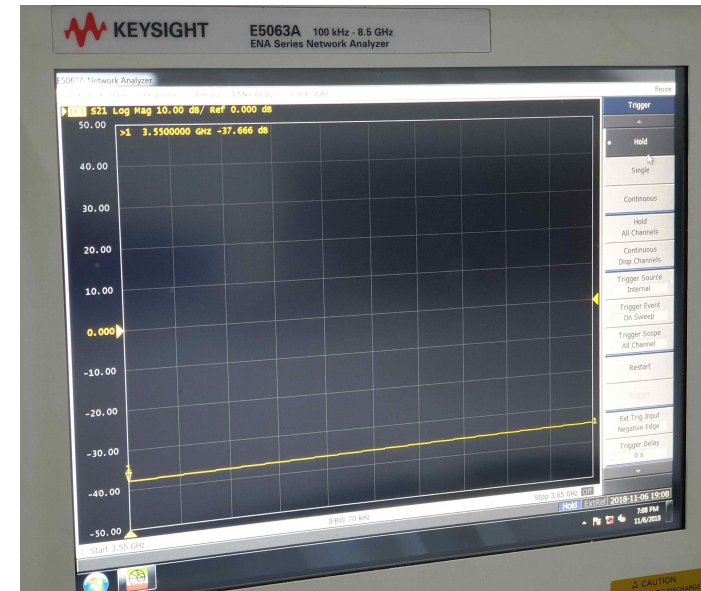


그림 3.56. 사용된 케이블의 손실 측정 결과

제작된 안테나의 원역장 거리는 22m의 넓은 장소가 요구되지만 반사실 챔버로 22m이상의 크기를 구축하기에 어려움이 있어 야외 실험을 진행하였다. 야외 실험은 나주에 위치한 한국방송통신전파진흥원의 뒤편에 위치한 운동장에서 실험을 진행하였으며 원역장 거리인 22m의 거리에서 송신 안테나에 5G 신호를 인가하여 수신 안테나의 PBCH(30kHz) 값을 확인하였다.



그림 3.57. 5G 신호 야외실험 측정 환경

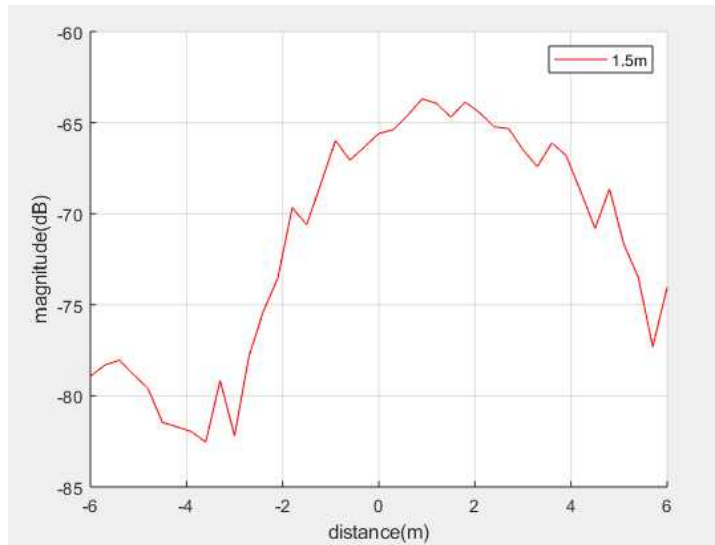


그림 3.58. 원역장 거리에서 최대 수신점 측정 결과

그림 3.57은 야외실험을 위하여 구성된 측정 환경을 보이고 있다. 안테나의 높이는 송신안테나 3m의 높이에서 수신 안테나 1.5m의 높이에 대하여 측정을 진행하였다. 원역장 측정 거리인 22m에 대하여 수신 안테나의 최대 수신점을 찾기위하여 22m거리에서 송신 안테나를 중심으로 0.3m 단위로 $\pm 6m$ 거리를 측정하였다. 중심포트에 대한 측정 결과 0.9m에서 $-63.7dBm$ 의 최대 수신점을 확인하였고, 최대 수신점 확인 후 실내 실험과 동일하게 수신 안테나와 송신안테나를 최대 수신점에서 최단거리로 측정을 진행하였다.

그림 3.58에서 측정결과를 보이고 있으며 원역장 거리의 최대 수신점이었던 0.9m에서 송신 안테나까지의 최단 경로 수신전력을 나타내고 있다. 측정결과 수신 안테나는 송신 안테나로부터 9m 거리에서 $-46.7dBm$ 의 가장 많은 전력을 수신하였으며 보다 더 가까이 접근 할 시 안테나의 빔 폭에 의하여 수신 전력이 점점 줄어드는 것을 확인하였다.

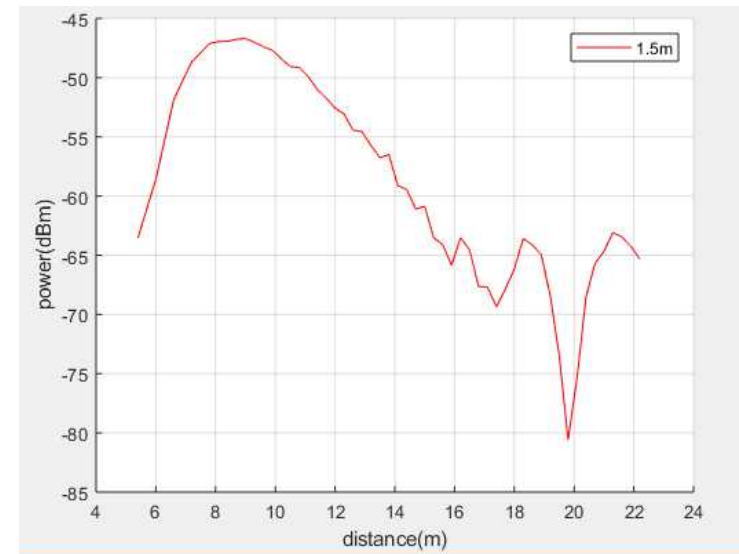


그림 3.59. 원역장 최대 수신점과 안테나 최단거리 경로 거리별 수신전력 측정 결과

그림 3.59은 로트만렌즈 외곽 포트에 파를 인가하여 빔을 틸팅 후 실험을 진행하여 얻은 측정결과이다. 최단거리에서의 최대 수신점인 9m 거리에서 수신 안테나를 x축으로 움직이며 측정을 진행한 결과를 보이고 있다. 원역장에서 최대 수신점을 찾는 방법과 동일하게 9m에서의 최대 수신점을 측정 하였으며 수신 안테나는 4.8m에서 -64.3dBm의 최대값을 가졌다. 본 측정결과는 앞서 실험한 중앙 포트 입력에 대한 수신 전력보다 더 작은 수신 전력을 나타내고 있다. 그 이유는 빔 틸팅 시 안테나 정렬의 문제로 판단된다.

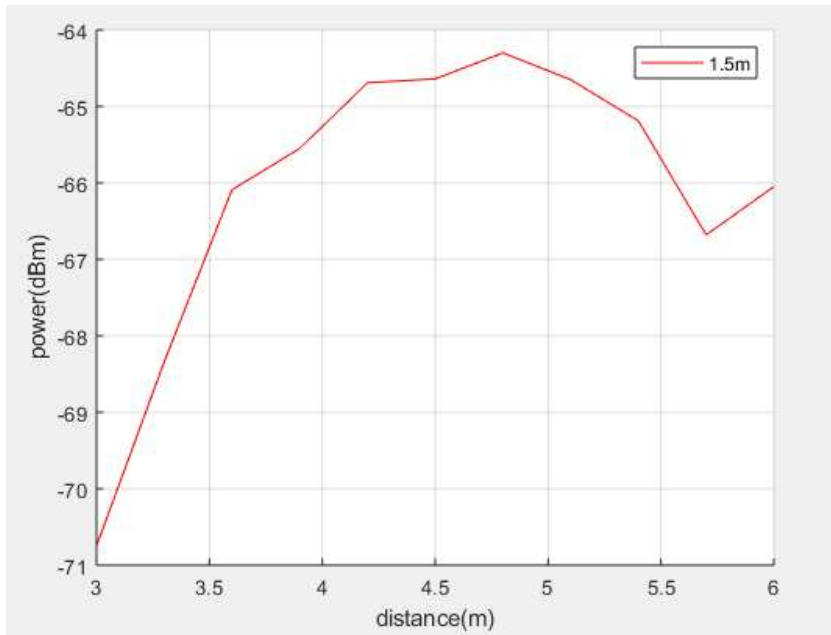


그림 3.60. 9m 수신점에서의 최대 수신전력 측정 결과

4.8m의 거리에서도 원역장과 동일하게 송신 안테나와 최단거리 경로의 거리별 수신전력 측정을 실시하였다. 그림 3.60에서 측정결과를 보이고 있

으며 9.5m의 최대 수신점에서 안테나의 높이를 1.1m, 1.5m, 1.7m로 변경하여 측정을 실시하였고 측정 결과 1.1m에서 -68.55dBm, 1.5m에서 -63.88dBm, -1.7m에서 -63.91dBm의 값으로 1.5m 높이에서 가장 많은 수신전력을 보였다.

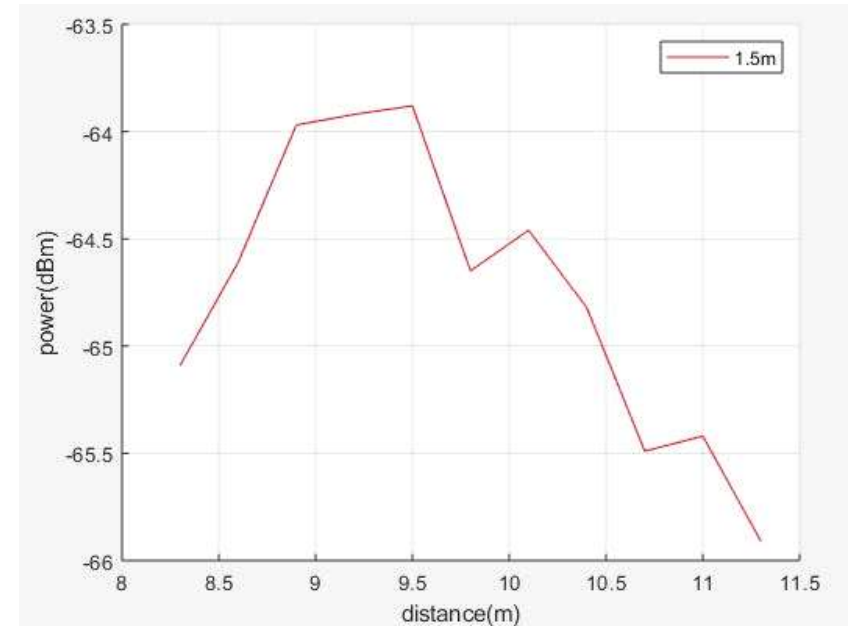


그림 3.61. 9m 거리 최대 수신점과 안테나 최단거리 경로 거리별 수신전력 측정 결과

본 실험을 통하여 로트만렌즈의 외곽포트와 중심포트에 입력 시 안테나의 빔포밍을 확인하였으며 신체 높이별 전자파 수신전력을 확인하였다. 실내와 야외 실험을 통하여 빔포밍에 대한 검증을 실시하였으며 5G 신호의 송신을 통하여 수신되는 전력의 세기를 측정하여 검증을 실시하였다.

그림 3.61에서 9m 수신점에서의 PBCH 측정값은 -46.7 dBm이다. 이 값으로부터 외삽을 통하여 계산한 최대 인체노출량은 -9.73 dBm이다. 이

값의 정확성을 계산하기 위하여 EIRP와 비교하면, 오차는 1.61dB가 산출된다. 따라서 본 연구에서 제시한 측정법은 작은 오차를 가지는 것을 확인하였다.

신호발생기 설정				
주파수		3.55	GHz	
송신출력		0	dBm	
스펙트럼 분석기 결과				
PBCH DRMS (30kHz)		-46.7	dBm	
No. RB		80	RB	
거리	9 m	송신 안테나 이득	24	dBi
파장	0.085 m	수신 안테나 이득	2.14	dBi
		케이블(송신) 손실	-28.28	dB
		케이블(수신) 손실	2.49	dB
PBCH 전력 환산 값	2.13796E-05	mW		
	0.070039638	mw		
Slot format	PBCH DMRS 외삽	EIRP 계산 (Pt*Gt)		오차
Format0	-9.06 dBm	23.05	dBm	0.95
Format3	-9.38 dBm	22.73	dBm	1.27
Format4	-9.73 dBm	22.39	dBm	1.61
Format5	-10.10 dBm	22.01	dBm	1.99
Format6	-10.52 dBm	21.59	dBm	2.41
Format7	-12.53 dBm	19.58	dBm	4.42

그림 3.62. 9m 수신점에서의 PBCH 측정값으로부터 외삽한 최대 인체노출량

제 4 장 전자파 인체 노출량 평가 방법 연구

제 1 절 계산에 의한 전자파 노출량 평가 방법 및 절차

전자파 노출량 평가는 크게 계산에 의한 방법과 측정에 의한 방법으로 나누어진다. 계산에 의한 방법은 아래와 같이 분류할 수 있다.

- 기본(basic) 계산 방법
 - . 전력 밀도에 대한 구 및 원통형 공식
 - . 전신 SAR 및 침투-공간 SAR 추산 공식
- 응용(advanced) 계산 방법
 - . 합성 방법 및 광선-추적 알고리즘
 - . 전파(full wave) RF 전자계 강도 평가
 - . 전파(full wave) SAR 평가

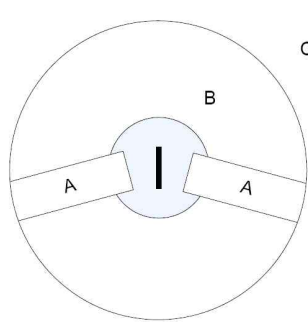
어떤 계산 방법을 선택할 것인지를 고려할 때, 요구되는 정밀도 수준이 제공되는 경우에 가장 간단하게 적용할 수 있는 방법을 사용해야 한다. 응용 계산은 기본 평가 결과와 비교하였을 때 우선순위를 가질 수 있음을 고려한다.

표 4.1. 구체적인 평가 방법 순위 결정 지침

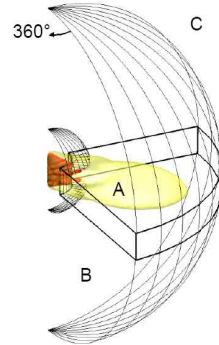
평가 노출 지표		SAR (전신 및 신체 일부)	전력 밀도, 전계강도, 자계강도
평가 방법 순위	1	측정(신체 일부)	주파수-선택 측정
	2	전파(full wave)	광대역 측정 ^o
	3	SAR 평가 공식	전파(full wave)
	4		광선-추적
	5		구형/원통형 공식
^o 정확한 해석과 추정이 가능하도록 모든 관련 정보가 알려져 있는 매우 제한적인 평가조건 하에서 광대역 측정은 적절하다. 그렇지 않은 경우에, 광대역 측정은 RF 전계/자계 강도에 대하여 체계적 과대평가 결과를 가져올 수 있고, 6위에 오르게 된다.			

표 4.2. 계산구역 선택을 위한 경계 정의

		계산 방법	경계 제한
계산구역 내의 관심 위치 [그림 4.1]	A	침두/평균 실린더형 공식	$3.6\lambda \leq r_\gamma \leq \max\left[\frac{2L^2/\lambda}{L/2+2.5\lambda}\right]$ 안테나 ^o 높이 이내의 주 로브 중심선에서 적용 가능 Sector arrays: $\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2$ Omnidirectional arrays: $-\pi \leq \phi \leq \pi$
	B	침두/평균 수정 구형 공식	$L/2+2.5\lambda \leq r \leq 2L^2/\lambda$ 안테나 ^o 높이 위 및 아래의 주 로브 중심 선을 벗어나서 적용 가능
	C	침두/평균 고전 구형 공식	$r_\gamma < \max\left[\frac{2L^2/\lambda}{L/2+2.5\lambda}\right]$
° 전기적 하향틸트의 경우에, ‘안테나 높이 이내의 주 로브 중심선에서’ 라는 조건은 다음과 같이 정의 된다. $-\frac{L}{2} - r_\gamma \cdot \sin(\gamma) \leq z \leq \frac{L}{2} - r_\gamma \cdot \sin(\gamma)$			



(a) 2차원 그림



(b) 3차원 그림

그림 4.1 안테나 주위의 전자계 강도 계산을 위한 세 가지 유효한 영역을 보여 주는 그림

그림 4.1의 구역 A에 적용하는 공식은 아래와 같다.

. 공간-평균 원통형 공식:

omnidirectional arrays:

$$\bar{S}(r_\gamma) = \frac{\bar{P}_{avg}}{2\pi r_\gamma L \cos^2(\gamma) \sqrt{1 + (\gamma_r/r_0)^2}}, \quad r_0 = \frac{1}{2} DL \cos^2 \gamma$$

sector-coverage arrays:

$$\bar{S}(r_\gamma, \phi) = \frac{\bar{P}_{avg} 2^{-(2\phi/\phi_{3dB})^2}}{\phi_{3dB} r_\gamma L \cos^2(\gamma) \sqrt{1 + (r_\gamma/r_0)^2}}, \quad r_0 = \frac{\phi_{3dB}}{12} DL \cos^2 \gamma$$

. 공간-침두 원통형 공식

omnidirectional arrays:

$$S(r_\gamma) = \frac{\bar{P}_{avg}}{\pi r_\gamma L \cos^2(\gamma) \sqrt{1 + (2\gamma_r/r_0)^2}}, \quad r_0 = \frac{1}{2} DL \cos^2 \gamma$$

sector-coverage arrays:

$$\bar{S}(r_\gamma, \phi) = \frac{2\bar{P}_{avg} 2^{-(2\phi/\phi_{3dB})^2}}{\phi_{3dB} r_\gamma L \cos^2(\gamma) \sqrt{1 + (2r_\gamma/r_0)^2}}, \quad r_0 = \frac{\phi_{3dB}}{12} DL \cos^2 \gamma$$

그림 4.1의 구역 B에 적용 공식은 아래와 같다.

omnidirectional arrays:

$$S(r, \theta) \approx \bar{S}(r, \theta) = \frac{1.2\bar{P}_{net} G_\theta}{4\pi r^2}, \quad G_\theta = 1.26 G_{sidelobe} + G_2^{-\left(\frac{\theta - \gamma - \pi/2}{\theta_{3dB}}\right)^2}$$

sector-coverage arrays:

$$S(r, \theta, \phi) \approx \bar{S}(r, \theta, \phi) = \frac{1.2\bar{P}_{net} G_{\theta, \phi}}{4\pi r^2},$$

$$G_\theta = 1.26 G_{sidelobe} + G_2^{-\left(\frac{\theta - \gamma - \pi/2}{\theta_{3dB}}\right)^2} - \left(\frac{1.9\phi}{\phi_{3dB}}\right)^2$$

그림 4.1의 구역 C에 적용 공식은 아래와 같다.

$$S = (1 + |\Gamma|)^2 \frac{\bar{P}_{net} G_{\theta, \phi}}{4\pi r^2}$$

전면(주 빔)방향에 적용 가능한 SAR 추산 공식이다.

$$SAR_{wb}^{a, ch} = C(f) \frac{H_{eff}}{\tilde{A}^{a, ch} \tilde{B}^{a, ch}} \frac{\bar{P}_{avg}}{\phi_{3dB} L d} \left[1 + \left(\frac{4\pi d}{\phi_{3dB} DL} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

$$SAR_{10g} = 25 SAR_{wb}^a \frac{\tilde{B}}{H_{eff}} \frac{1}{R_{wb/10g}}$$

$$SAR_{1g} = 20 SAR_{wb}^a \frac{\tilde{B}}{H_{eff}} \frac{1}{R_{wb/10g}}$$

여기에서 $SAR_{wb}^{a, ch}$ 는 성인(adult) 또는 어린이(children)에 대한 전신 SAR를 의미하고, $\tilde{A}^{a, ch}$ 는 0.089m(성인) 또는 0.06m(어린이)이고, $\tilde{B}^{a, ch}$ 는 1.54m(성인) 또는 0.96m(어린이)이다.

국제전기기술위원회(IEC)의 TC106에서는 2017년에 2개의 WG(Working Group)과 6개의 PG(Project Group)과 6개의 MT(Maintenance Team)을 구성하여 표준화 진행 작업을 수행 중이다. (현재 IEC TC106 표준화에 참여하고 있는 국가는 우리나라를 비롯하여 총 36개국임)

현재 TC106회의는 정기적으로 국제총회 연 1회, 산하 작업반 회의의 경우 수시 웹미팅 및 대면회의로 활발하게 운영되고 있다. 국내에선 국립전파연구원을 중심으로 산학연관이 TC106 국제회의에 참가형, 우리나라의 의견 및 연구개발 평가 등에 대한 기고를 진행하고 있다.

작년 10월에 5G 이동통신의 6GHz~300GHz 전력밀도 측정방법에 대하여 듀얼 로그화를 위한 공동작업반 구성논의가 만장일치로 의결되었으며,

의장은 핀란드 Kai Niskala, 부의장으로 일본의 Teruo Onishi와 미국의 John Roman이 담당하게 되었다.

5G 서비스에 대한 무선국 인체노출량 평가방법에 대한 표준인 IEC62232가 2017년 8월 발간되었으며, 무선국 평가에 대한 표준의 이해를 돕기 위한 기술보고서인 TR62669가 2018년 6월 발간을 목표로 MT3에서 작업 중이다.

독일은 IEC62232 ED2.0 문서에 대한 개정 제안으로 근역장 측정을 위한 다양한 사후처리 방법 개정, 전신 SAR 및 최대공간평균 SAR 계산식 보완, 계산에 의한 평가 시 구현 및 원통형 수식 업데이트 및 어레이(빔포밍 안테나)에 대한 추가 고려사항에 대하여 제안하였다.

제 2 절 실측정을 통한 평가방법 신뢰성 검증

제 1 항 실내 측정에 의한 평가 방법 사전 검증

그림 4.2는 5G 대역 중 하나인 3.5 GHz에서의 신호 측정 한 것을 보여 준다. 가장 위의 디스플레이 화면은 신호 발생기 제어용 모니터이며 그 아래는 Ketsight사의 모델명 N9020B(10 Hz-50 GHz)인 스펙트럼 분석기 그리고 가장 하단의 장비는 Keysight사의 PXIe에 탑재된 신호 발생기이다. 탑재된 신호발생기는 M9305A, M9303A, M9300A, M9318A, M9312A, M9314A 등으로 구성된다. 현재 사진은 신호 발생기에 입력 부분에서 스펙트럼 분석기로 한 케이블로 직접 연결된 상태이다.

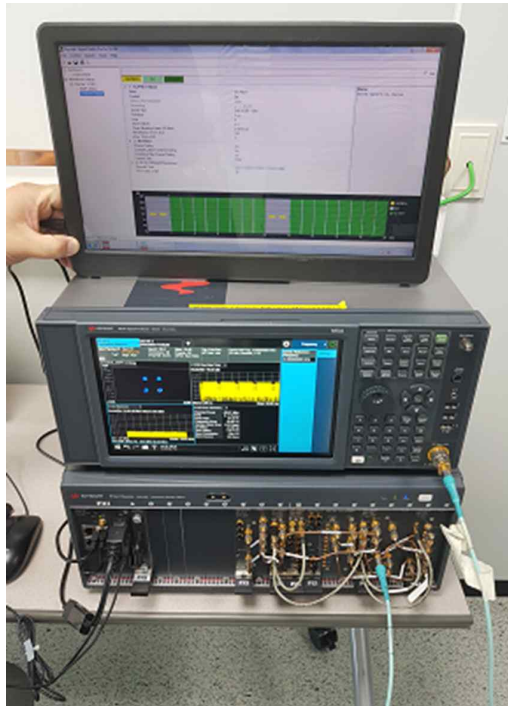


그림 4.2 3.5 GHz 신호 측정 시스템

5G의 신호를 송신하기 위해서는 특정의 웨이브파일(확장자 .wfm)을 소스로 변조시켜야 한다. 그림 4.3은 해당과정의 신호 발생기의 인터페이스를 보여준다. 현재 그림은 4.3은 GHz의 반송주파수의 -30 dBm 전력을 송신한 셋팅창을 보여주고 있다. 그림 4.4는 BWP(Bandwidth part)의 설정창이다. 대역폭 98.28 MHz로 R8 number는 273으로 wfm 파일이 설정되었음을 확인할 수 있다.

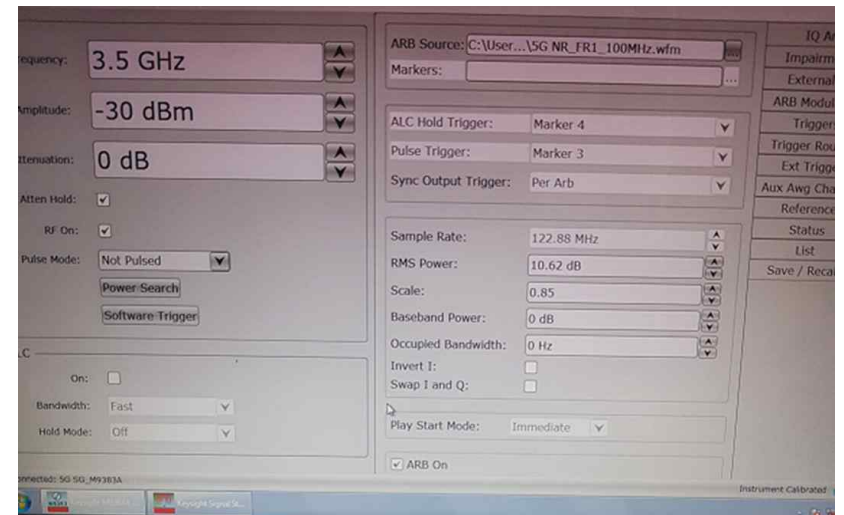


그림 4.3 3.5 GHz의 반송주파수 송신 셋팅창

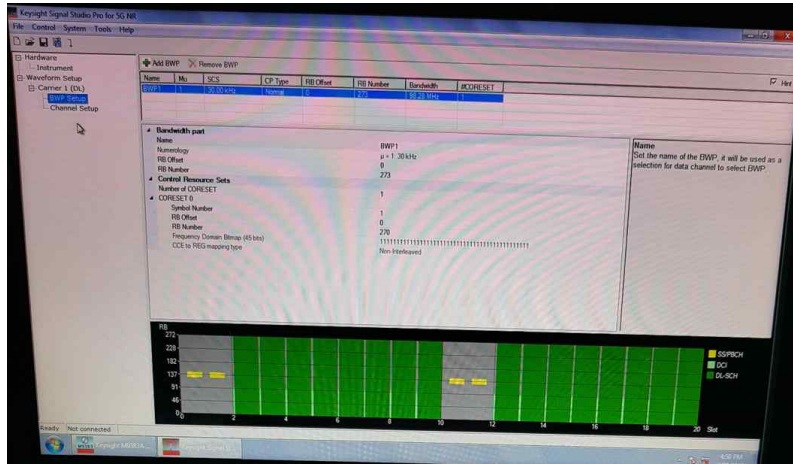


그림 4.4 3.5 GHz의 반송주파수의 BWP 셋팅창

5G 변조된 신호를 측정하기 위해서 스펙트럼 분석기 또한 모듈레이션 분석창에서 측정결과를 확인할 수 있다. 그림 4.5는 5G NR Modulation analysis를 통해 측정된 5G 신호 데이터를 보여주고 있다. 측정된 파라미터는 PSS, SSS, PBCH, PBCH DMRS, PDSCH DMRS 등이 있다. 그리고 각 파라미터의 Evm, power, Num.RB 등 측정된 값 또한 보여주고 있다.



그림 4.5 3.5 GHz의 변조된 신호 측정

측정 결과는 다음 그림 4.6과 같이 제시된 과정을 통해 변환하였다. 측정된 PBCH DRMS의 값인 -66.1 dBm 을 mW로 환산하면 $2.45471 \times 10^{-7} \text{ mW}$ 으로 계산되어진다. 이를 R8의 값인 273×12 인 값을 곱하면 0.000804163 mW 로 계산된다. 이 값을 다시 dBm으로 환산하면 -30.946 dBm 으로 환산되며 케이블 손실 1.2 dB 를 고려할 시 -29.747 dBm 으로 환산할 수 있다. 환산된 값은 송신출력과의 오차를 확인 할 수 있다. 슬롯 포맷 4 기준으로 오차는 0.42 dB 임을 본 과정을 통해 산출되었다.

신호발생기 설정		
주파수	3.5 GHz	
대역폭	98.28 MHz	
송신출력	-30 dBm	
Atten	0 dB	
스펙트럼 분석기 결과		
PBCH DRMS (30kHz)	-66.1 dBm	
No. RB	80 RB	
파장	0.0857143 m	
케이블 손실 1	1.2 dB	
PBCH 전력 환산 값	$2.45471 \text{E-}07 \text{ mW}$	
	0.000804163 mW	
Slot format		PBCH DMRS 외삽
Format0		-29.747 dBm
Format3		-30.068 dBm
Format4		-30.416 dBm
Format5		-30.794 dBm
Format6		-31.208 dBm
Format7		-33.224 dBm
		오차
		-0.25
		0.07
		0.42
		0.79
		1.21
		3.22

그림 4.6 3.5 GHz 신호 측정 결과 변환 과정 및 오차 결과

3.5 GHz의 반송주파수의 신호를 안테나를 이용해 측정하였다. 측정은 한국방송통신전파진흥원 내부의 무반사실에서 수행하였다. 안테나 사이 간격은 2m이며 안테나는 Schwarzbeck BBHA 9120의 혼안테나이다. 안테나 간 정확한 얼라인을 위해 유전체의 박스와 책을 통해 거치하였다.



그림 4.7 안테나를 이용한 3.5 GHz 실내 측정 환경

그림 4.8은 송신 세팅이 포함돼 있으며 3.5 GHz의 반송주파수에 5G NR의 웨이브 신호를 세팅하고 송신하였다. PBCH DRMS 측정 값은 -69.08 dBm 이며, 이는 위와 과정과 동일하게 환산한다. 위와 다르게 안테나와 그 사이 경로 손실이 계산되어야 하며 그 값은 그림 4.9에 자세하게 서술하였다. 측정 채널 파워 -35.35 dBm는 송수신 안테나 이득, 케이블 손실, 거리 2m, 주파수 3.5 GHz 등의 파라미터로 계산 할 수 있다. PBCH DRMS 측정값을 mW로 환산하면 1.23595×10^{-7} 로 산출된다. 산출된 값에 12×273 을 곱하면 0.000404896 mW이며 dBm으로 환산하면 -33.927 dBm 이 되며 수신부의 케이블 손실 6.56 dB를 고려할 시 -27.367 dBm으로 환산할 수 있다.. 이 값은 EIRP 14.84 dBm의 이득과 비교하여야 하며 슬롯 포맷 4 기준으로 오차는 1.64 dB임을 확인 할 수 있다.

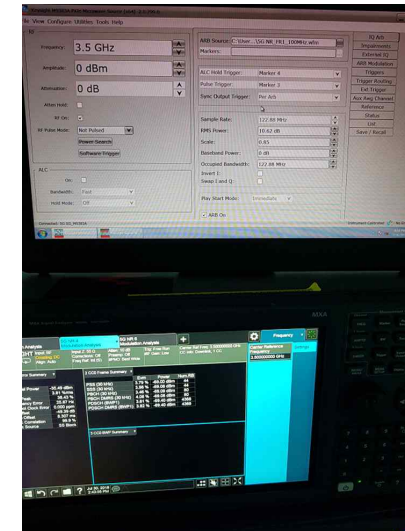


그림 4.8 3.5 GHz 신호 제어 셋팅창 및 PBCH DRMS 측정 결과

신호발생기 설정			
주파수	3.5 GHz		
대역폭	98.28 MHz		
송신출력	0 dBm		
Atten	0 dB		
스펙트럼 분석기 결과			
측정 채널파워	-35.35 dBm		
PBCH DRMS (30kHz)	-69.08 dBm		
No. RB	80 RB		
거리	2 m	송신 안테나 이득	13.2 dBi
파장	0.086 m	수신 안테나 이득	13.2 dBi
		케이블(송신) 손실	6.73 dB
		케이블(수신) 손실	6.56 dB
PBCH 전력 환산 값	1.23595E-07 mW		
	0.000404896 mw		
Slot format	PBCH DMRS 외삽	EIRP 계산 (Pt*Gt)	오차
Format0	-27.367 dBm	15.51 dBm	-2.31
Format3	-27.688 dBm	15.19 dBm	-1.99
Format4	-28.036 dBm	14.84 dBm	-1.64
Format5	-28.414 dBm	14.46 dBm	-1.26
Format6	-28.828 dBm	14.05 dBm	-0.85
Format7	-30.844 dBm	12.03 dBm	1.17

그림 4.9 3.5 GHz 신호 PBCH DRMS 측정값 오차 산출과 EIRP 계산

그림 4.10은 5G 대역 중 하나인 28 GHz에서의 신호 측정 한 것을 보여 준다. 가장 위의 디스플레이 화면은 신호 발생기 제어용 모니터이며 그 아래는 Keysight사의 모델명 N9020B(10 Hz-50 GHz)인 스펙트럼 분석기 그리고 가장 하단의 장비는 Keysight사의 PXIe에 탑재된 신호 발생기이다. 탑재된 신호발생기는 M9305A, M9303A, M9300A, M9318A, M9312A, M9314A 등으로 구성된다. 현재 사진은 신호 발생기에 입력 부분에서 스펙트럼 분석기로 한 케이블로 직접 연결된 상태이다. 반송 주파수 28 GHz을 중심으로 총 8개의 캐리어로 구성된다.



그림 4.10 28 GHz 신호 측정 시스템

28 GHz의 신호를 송신하기 위해서는 반송주파수 3.5 GHz 셋팅과 유사하게 특정의 웨이브파일(확장자 .wfm)을 소스로 변조 시켜야한다. 그림 4.11은 해당과정의 신호 발생기의 인터페이스를 보여준다. 현재 그림은 28 GHz의 반송주파수의 0 dBm 전력을 송신한 셋팅창을 보여주고 있다. 그림 4.12는 waveform 설정창이다. 대역폭 98.28 MHz의 8개 캐리어 셋팅창 좌측 탭에 보이며 R8 number는 273으로 wfm 파일이 설정되었음을 확인할 수 있다.

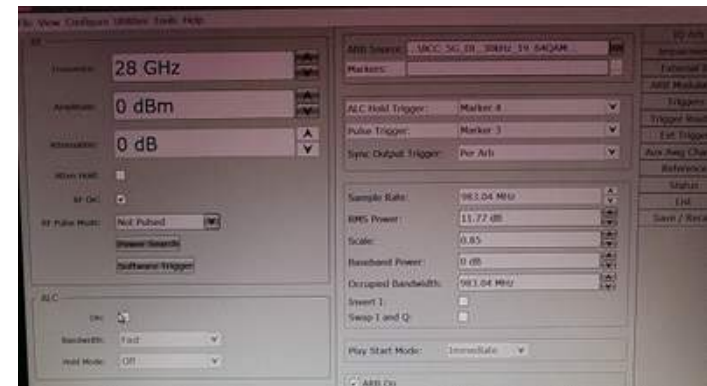


그림 4.11 28 GHz 신호 측정 시스템



그림 4.12 28 GHz 신호 측정 시스템

그림 4.13은 28 GHz 의 측정 결과가 나오며 PBCH DRMS 측정값은 -53.46 dBm이 측정되었다. 그림 4.14를 통해 8개의 캐리어를 확인 할 수 있으며 총 대역은 790.59 MHz이었다.

28 GHz 신호 측정 결과 또한 다음 그림 4.15와 같이 제시된 과정을 통해 변환하였다. 측정된 PBCH DRMS의 값은 그림 4.13과 같이 -53.46 dBm이며 mW로 환산하면 4.50817×10^{-6} mW으로 계산되어진다. 이를 R8의 값과 캐리어 8개를 곱한 값, $273 \times 12 \times 8$ 인 값을 곱하면 0.118150042 mW 로 계산된다. 이 값을 다시 dBm으로 환산하면 -9.276 dBm으로 환산되며 케이블 손실 3 dB를 고려할 시 -6.276 dBm 값을 가진다. 환산된 값은 송신출력과의 오차를 확인 할 수 있다. 슬롯 포맷 4 기준으로 오차는 0.32 dB 임을 본 과정을 통해 산출되었다.

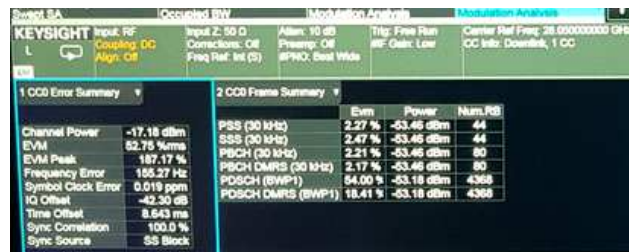


그림 4.13 28 GHz의 변조된 신호 측정



그림 4.14 반송주파수 28 GHz 8개 캐리어의 occupied bandwidth 측정 결과

신호발생기 설정			
주파수		28.05	GHz
대역폭		983.04	MHz
송신출력		-7.27	dBm
Atten		0	dB
스펙트럼 분석기 결과			
PBCH DRMS (30kHz)		-53.46	dBm
No. RB		80	RB
파장	0.011	m	
케이블 손실 1	3	dB	
PBCH 전력 환산 값		4.50817E-06	mW
		0.118150042	mW
Slot format		PBCH DMRS 외삽	오차
Format0		-6.276	dBm
Format3		-6.598	dBm
Format4		-6.945	dBm
Format5		-7.323	dBm
Format6		-7.737	dBm
Format7		-9.753	dBm
			2.48

그림 4.15 28 GHz 신호 측정 결과 변환 과정 및 오차 결과

28 GHz의 반송주파수의 신호를 안테나를 이용해 측정하였다. 안테나의 원역장 크기는 0.2m로 케이블 손실 등을 감안하여 SA, SG 앞에서 측정하였다. 안테나는 RFspin DRH67의 혼안테나이다. 나무로 구성된 삼각대를 이용하여 안테나 간 얼라인을 조정하였다. 그림 4.17과 같이 28 GHz 반송주파수의 0 dBm 전력으로 송출 중이다. 설정창 우측 위에 wfm 파일 이름이 5G 8개 캐리어의 source를 로드하였음을 보여주고 있다.



그림 4.16 안테나를 이용한 28 GHz 0.2m 실내 측정 환경



그림 4.17 28 GHz 신호 제어 셋팅창

그림 4.18은 28 GHz의 반송주파수에 5G NR의 웨이브 신호를 셋팅하고 송신하였다. PBCH DRMS 측정값은 -74.06 dBm 이며, 이는 지금까지 서술된 과정과 동일하게 환산한다. 측정 채널 파워 -38.11 dBm 또한 송수신 안테나 이득, 케이블 손실, 거리 0.2 m, 주파수 28 GHz 등의 파라미터로 계산할 수 있다. PBCH DRMS 측정값을 mW로 환산하면 3.92645×10^{-8} 로 산출된다. 산출된 값에 $12 \times 273 \times 8$ 을 곱하면 0.001029044 mW이며 dBm으로 환산하면 -29.876 dBm 이 되며 케이블 손실 3 dB를 고려할 시 -26.876 dBm이 된다. 이 값은 EIRP 15.95 dBm의 이득과 비교하여야 하며 슬롯 포맷 4 기준으로 오차는 1.75 dB 임을 확인 할 수 있다.



그림 4.18 28 GHz 신호 제어 셋팅창 및 PBCH DRMS 측정 결과

신호발생기 설정				
주파수		28.05 GHz		
대역폭		983.04 MHz		
송신출력		-7.27 dBm		
Atten		0 dB		
스펙트럼 분석기 결과				
측정 채널파워		-38.11 dBm		
PBCH DRMS (30kHz)		-74.06 dBm		
No. RB		80 RB		
거리	0.2 m		송신 안테나 이득	14.2 dBi
파장	0.011 m		수신 안테나 이득	14.2 dBi
			케이블(송신) 손실	3 dB
			케이블(수신) 손실	3 dB
PBCH 전력 환산 값	3.92645E-08 mW			
	0.001029044 mw			
Slot format	PBCH DMRS 외삽	EIRP 계산 (=Pt*Gt)	오차	
Format0	-26.876 dBm	9.35 dBm	-2.42	
Format3	-27.198 dBm	9.02 dBm	-2.09	
Format4	-27.545 dBm	8.68 dBm	-1.75	
Format5	-27.923 dBm	8.30 dBm	-1.37	
Format6	-28.337 dBm	7.88 dBm	-0.95	
Format7	-30.353 dBm	5.87 dBm	1.06	

그림 4.19 28 GHz 신호 PBCH DRMS 측정값 오차 산출과 EIRP 계산

위 과정에 이어서 안테나 간격 0.4m으로 28 GHz의 반송주파수의 신호를 측정하였다. 안테나는 RFspin DRH67의 혼안테나이며 0.2 m 간격일 때의 셋팅과 동일하다. 그림 4.21과 같이 28 GHz 반송주파수의 0 dBm 전력으로 송출 중이다.



그림 4.20 안테나를 이용한 28 GHz 0.4m 실내 측정 환경



그림 4.21 안테나를 이용한 28 GHz 0.4m 실내 측정 환경

그림 4.22는 안테나 간격이 0.4 m의 측정값이다. PBCH DRMS 측정값은 -79.63 dBm이며, 측정 채널 파워 -43.55 dBm이다. PBCH DRMS 측정값을 mW로 환산하면 1.08893×10^{-8} 로 산출된다. 산출된 값에 $12 \times 273 \times 8$ 을 곱하면 0.000285387 mW이며 dBm으로 환산하면 -35.446 dBm이 되며 케이블 손실 3 dB를 고려할 시 -33.446 dBm이 된다. 이 값은 EIRP 16.40 dBm의 이득과 비교하여야 하며 슬롯 포맷 4 기준으로 오차는 2.20 dB 임을 확인할 수 있다.

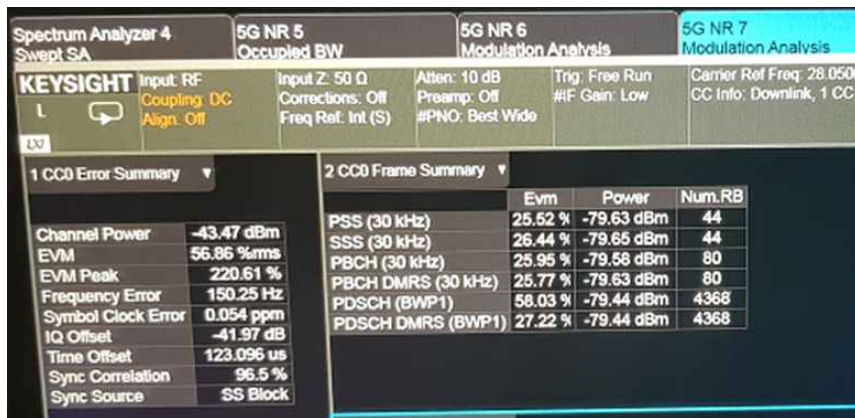


그림 4.22 안테나를 이용한 28 GHz 0.4m 실내 측정 환경

신호발생기 설정			
주파수	28.05	GHz	
대역폭	983.04	MHz	
송신출력	-7.27	dBm	
Atten	0	dB	
스펙트럼 분석기 결과			
측정 채널파워	-43.55	dBm	
PBCH DRMS (30kHz)	-79.63	dBm	
No. RB	80	RB	
거리	0.4	m	송신 안테나 이득 14.2 dBi
파장	0.011	m	수신 안테나 이득 14.2 dBi
			케이블(송신) 손실 3 dB
			케이블(수신) 손실 3 dB
PBCH 전력 환산 값	1.08893E-08	mW	
	0.000285387	mw	
Slot format	PBCH DMRS 외삽	EIRP 계산 (=Pt*Gt)	오차
Format0	-32.446	9.80	-2.87
Format3	-32.768	9.47	-2.54
Format4	-33.115	9.13	-2.20
Format5	-33.493	8.75	-1.82
Format6	-33.907	8.33	-1.40
Format7	-35.923	6.32	0.61

그림 4.23 28 GHz 신호 0.4m 일 때 PBCH DRMS 측정값 오차 산출과 EIRP 계산

제 2 항 현장 실측정을 통한 평가 방법 신뢰성 검증

2018년 8월 27일 2시부터 4시, 2시간동안 신방화역 인근 공영 주차장 옥상에서 LG U+ 5G NR FR1 기지국 전자파 현장 측정을 수행하였다. 다음 표 4.3는 측정 장비와 환경을 서술한 것이다.

표 4.3. 측정 장비 정보

구 분	제조사 및 모델	기타
기지국 안테나 (3.5GHz)	Huawei	중심주파수 : 3.55GHz 대역폭 : 100MHz EIRP : 73dBm
수신안테나 (3.5GHz)	BBHA 9120	주파수 : 1 ~ 10GHz 안테나 이득 : 13.2dBi@3.5GHz 안테나 팩터 : 28.9 dB/m
3축 등방성 안테나	AGOS / SDSA6000	주파수 : 0.3 ~ 6GHz 안테나 팩터 : 44 dB/m
RF 케이블	Gore	수신 Cable Loss : 1.2dB @3.5GHz
측정 수신기	미국 Keysight / N9020B	



그림 4.24 5G NR FR1 기지국 설치 및 측정 현장

화웨이 FR1 3.5GHz 대역 기지국은 인근 13층 높이 건물 옥상 모서리에 설치되어 있으며, 인근 공영주차장과 아파트를 향해 방사되도록 설치되어 있다. 아래 기울기 각도는 약 8도로 설정되어 있으며, 총 EIRP 73 dBm으로 방사한다. 측정 안테나는 지향성 혼안테나로 기지국을 지향하여 측정하였으며, 스펙트럼 분석기의 시간영역에서 측정을 수행하였다. 5G NR FR1의 기지국 설정은EIRP 8개의 수평 빔이 10 ms 주기로 전체 수평 빔 각 105도로 방사되고, 수직 빔폭은 22.5도 1열 배열이다. 측정은 두 가지로 수행하였다. 첫 번째 빔만 방사하는 경우이고, 두 번째 단말기 Full data 통화일 경우에 대한 측정이다.

표 4.4. 측정 설정 정보

구 분	내용
기지국 송신 설정 조건	중심주파수 : 3.55GHz 대역폭 : 100MHz EIRP : 73dBm 빔 개수 : 8개 (L=8) 수평 빔폭 : 105도 , 수직 빔폭 : 22.5도 SCS (Sub-carrier spacing) ; 30 kHz SSB 배열 형식 : Case B Slot Format : 1~3 all D, 4 HD HU, 5 all U
측정 장비 설정 조건	Sweep : 10ms RBW : 4 MHz, VBW: 39 kHz Span 0 모드

시간영역에서 측정한 결과는 그림 4.25와 같다. 10ms 1 frame 이내에 20개의 slot으로 구성되는데 15개의 slot은 PDSCH로 할당되어 있으며, 5 slot내에서 SSB가 구성되어 있다. 그림 4.25(a)의 경우 8개의 빔중 4번 빔이 주빔으로 측정되며, 방사 전력 -19.88 dBm이 측정되었다.

그림 4.25 (b)의 경우 15개의 PDSCH slot이 3개의 그룹으로 slot format이 구성 되는데 1~3번 slot은 전체가 Down 심볼로 구성되고, 4번 slot은 절반은 Down 절반은 Up, 그리고 5번 slot은 전체가 down으로 구성된다.

측정은 SSB 신호의 PBCH 전력 방사 값을 측정하였고, 그중 하나 RE(Resource Element)에 대한 PBCH 값을 도출하고 다시 외삽하는 방법으로 결과를 구하였다.

$$E_{i,T} = E_{i,meas} \cdot \sqrt{S_{RB} \cdot PRB} \quad (4-1)$$

여기서, $E_{i,meas}$ 는 셀*i* 하나의 심벌단위 기준신호 측정값

S_{RB} 는 하나의 Resource Block으로 구성되는 Subcarrier 개수

PRB 는 전체 대역폭에서의 Physical Resource Block 개수

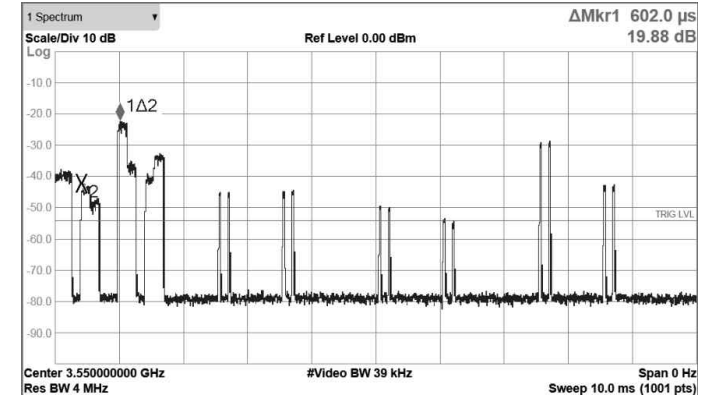
S_n 은 SS Burst 주기에 따른 SSB 개수 및 하향 Slot 개수에 따른 보정 팩터[표 4.4 참조]

$$S_n = \sqrt{\frac{S_{ssb}}{S}} \quad (4-2)$$

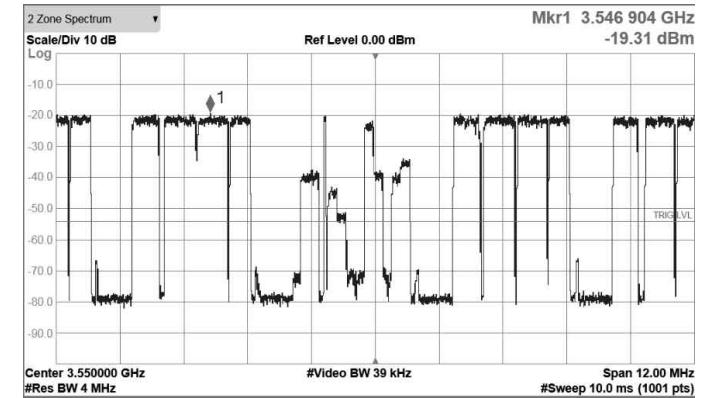
여기서, S_{ssb} 는 SS Burst 한개 주기에서의 심벌 개수

S 는 SS Burst 한개 주기에서의 심벌 총 개수

외삽은 12개의 서브캐리어와 전체 273개의 PRB 개수를 곱하여 도출한다.



(a) SSB 만 방사 되는 경우



(b) SSB와 full PDSCH 방사 시

그림 4.25 8개의 빔 신호 (8개 SSB) 방사 시

표 4.5. 측정 결과 (보정 팩터 적용에 따른 결과)

측정거리 (m)		시간영역 측정 파워 (dBm/4MHz)	100MHz 대역 확산 최대 파워(dBm)	최대 전계강도 (V/m)	기준신호 PBCH/RE (dBm)	기준신호 전계강도 (V/m)	외삽 팩터 (12*273RB)	보정팩터 (S n)	외삽 최대 전계강도 (V/m)
1	60.00	-19.80	-5.82	3.66	-41.04	0.06	57.24		3.24
2	60.00	-19.80	-5.82	3.66	-41.04	0.06	57.24	0.8743	2.83
3	60.00	-19.80	-5.82	3.66	-41.04	0.06	57.24	0.8619	2.79

표 4.5에서 측정된 채널 파워값은 5G 단말기와 통신 상태에서의 측정값이며, 최대 Payload가 실린 상태이다. (그림 4.26 참조)

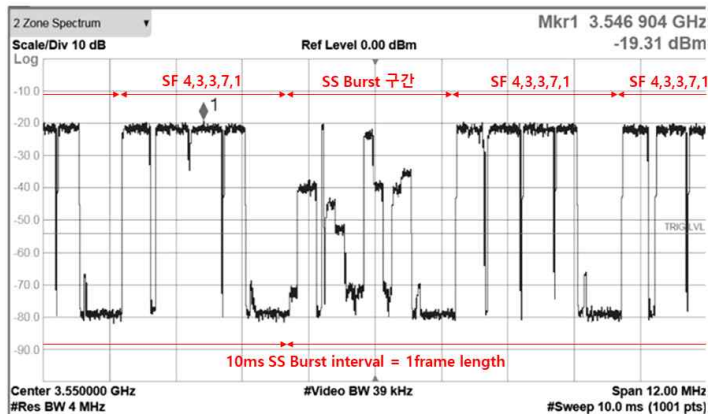


그림 4.26 8개의 빔 신호 (8개 SSB)와 full PDSCH 방사 시 시간영역 트레이스

측정값은 단말기 인근 약 1미터 옆에서 측정하였고, 주파수 영역에서 측정이 안 되므로 시간영역에서 측정을 하였다. 그림과 같이 약 -19.31 dBm이 측정이 되었고, 표 4.5에서는 반복적으로 얻은 -19.80 dBm을 적용 하였다. 최대 전계강도 계산을 위하여 다음 수식을 4-3을 사용하였다.

$$E(\text{전계강도}) = K(\text{안테나 팩터}) \times V(\text{전압}) \quad (4-3)$$

여기서 $V = \sqrt{\text{최대파워} \times 50\Omega}$ 이며, 안테나 팩터 $K = 10^{(28.9/20)}$ 이다.

시간 영역에서의 Peak level은 Marker 지점에 따라 약 3dB 오차가 발생할 수 있으며, 통상적으로 주파수 영역의 채널 파워보다 높게 나오는 경향이 있다.

측정된 -19.80dBm값은 RBW 4MHz로 얻은 값이므로 100MHz로 적용하면 -5.82dBm이 되고 케이블 손실 1.2dB를 고려할 시 -4.62dBm이 된다. 전계강도로 변환하면 3.66 V/m이 된다. (측정기는 스펙트럼 모드에서

RBW 100MHz가 안됨)

3.27 V/m은 실제 모든 영역이 채워져 있다는 가정이기 때문에 실제 방사되는 5G 신호는 각 Slot에서 심볼들이 빠져 있기 때문에 실제보다 높은 값이다. 또한 시간 영역에서의 Peak level은 실제 레벨보다 높은 Trace값을 적용하기 때문에 하나의 Resource Element 값을 구하고 채워진 심볼 및 Subcarrier들을 계산해서 최대 전계강도 값으로 도출해야 한다.

기준신호 PBCH 는 7.2MHz에 걸쳐 분포되어 있으므로, 시간 영역 측정값 -19.80 dBm에서 133으로 나누어 주어야 한다. 따라서 -41.04 dBm을 얻을 수 있다.

우선 기술기준 별표 3의 slot format 4의 경우에 대한 보정을 적용하면 결과는 다음과 같이 변경된다. (L=8, F4, 10ms 주기에 해당하는 인자 값 : 0.8743). 따라서 값은 3.24 V/m 값을 얻을 수 있다

실제 화웨이 기지국 Slot format 설정으로 보정하면 2.79 V/m이 최종 결과 값이 된다. (화웨이 기지국 Slot 구성 : 10ms 구간 안에 데이터 slot 은 15개이고 5개 씩 3조로 slot 구성을 하였음. 1~3 full down, 4 half Down half Up, 5 full up 화웨이측 정보 제공)

* 실제 측정해보면 Slot format 4, 3, 3, 7, 1 형태로 구성 된 것으로 보임. 하지만 측정 결과 계산은 화웨이측 제공 정보에 우선 따랐음

모든 편파를(+ 3dB) 고려하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

표 4.6. 모든 편파에 대한 최대 전계강도 측정

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
측정거리 (m)	시간영역 측정 파워 (dBm/4MHz)	100MHz 대역 환산 최대 파워(dBm)	최대 전계강도 (V/m)	기준신호 PBCH/RE (dBm)	기준신호 전계강도 (V/m)	외삽 팩터 (12*273RB)	보정팩터 (S n)	외삽 최대 전계강도 (V/m)
1	60.00	-16.80	-2.82	5.17	-38.04	0.08	57.24	4.58
2	60.00	-16.80	-2.82	5.17	-38.04	0.08	57.24	0.8743 4.00
3	60.00	-16.80	-2.82	5.17	-38.04	0.08	57.24	0.8619 3.95

표 4.6의 결과는 양 편파에 대한 결과이며, 한 편파 측정에 대한 +3dB를 더해서 계산하였다.

1. 안테나 중앙에서 측정 안테나 간의 거리
2. 시간영역에서 Peak search로 측정한 신호의 Amplitude로 필터 대역폭에 따른 파워 값 (RBW 4 MHz 설정)
3. 100MHz 대역폭의 신호이므로 4MHz를 100MHz로 외삽한 최대 파워 값 (dBm)
4. 100MHz 대역폭으로 외삽한 최대 파워값을 측정 안테나 팩터 케이블 손실 등을 고려한 전계강도 환산 값 5.17 V/m.
5. 기준 동기신호 PBCH 파워 값이며 하나의 Resource Element에 해당함
6. 위 기준신호에 대한 전계강도 값 0.08 V/m이 도출 됨
7. 하나의 RE는 하나의 Subcarrier와 하나의 심볼 영역에 해당하므로 12개의 Subcarrier와 273개의 PRBff 이용하여 외삽인자 57.24를 구함.
8. 보정팩터는 시간에 대한 점유되어있는 심볼 영역만을 계산하는 것으로서 한 프레임 또는 한 SS burst 기간에서의 파워의 변화량을 보상해주는 인자임
9. 외삽인자까지 보정된 결과 값으로 최종적인 최대전계강도를 도출함.

복조 영역에서의 측정 결과는 아래와 같다.

- Cell ID : 23, Frequency error : 35.113 Hz
- Channel Power : -8.153 dBm
- SSB EVM : -23.994 dB
- SSB 정보 : Lmax 8, 10ms periodicity, SSB caseB
- PSS Power per RE: -43.267 dBm
- SSS Power per RE: -43.274 dBm
- PBCH Power per RE: -43.273 dBm

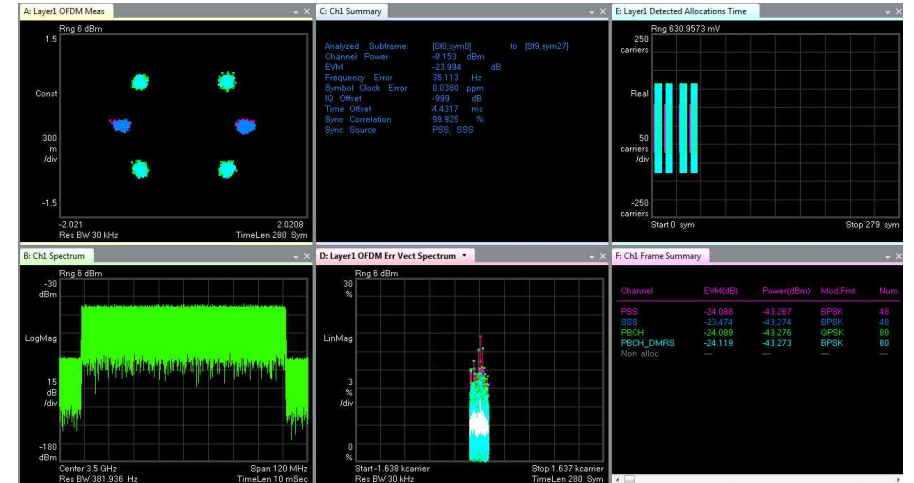


그림 4.27 복조 영역에서 측정 결과

계측기 Vector Signal Analysis 프로그램으로 측정한 Full data 시의 채널 파워와 비교해보면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

표 4.7. PBCH 측정 외삽 기반 최대전계강도 산출 결과

측정거리 (m)	채널 파워 (dBm)	전계 강도 (V/m)	기준신호 PBCH/RE (dBm)	기준신호 전계 강도 $E_{i,measure}$ (V/m)	외삽 팩터 (12*27 3RB)	보정팩터 S_n	외삽된 최대전계강도 (V/m)	Extrapolated power (dBm)	계산된 EIRP (dBm)	Power 에서 계산된 E(V/m)
1	60.00	-8.15	2.50	-43.27	0.04	57.24	2.51	-8.12	58.77	2.51
2	60.00	-8.15	2.50	-43.27	0.04	57.24	0.8743	-8.12	58.77	2.51
3	60.00	-8.15	2.50	-43.27	0.04	57.24	0.8619	-8.12	58.77	2.51

계측기의 복조 영역에서의 채널 파워는 -8.153 dBm이고, 계산된 전계강도는 2.5 V/m이 된다. 이는 단말기와 설정된 환경에서의 최대 Payload 시의 전계강도이므로 측정된 기준신호로 외삽한 결과와 동일해야 한다. 표 4.7과 같이 외삽된 결과는 보정인자 적용 전 2.51 V/m로 동일한 결과 값이다.

기준신호 PBCH 파워는 -43.27 dBm으로 측정이 되었고 이에 대한 외삽 인자 및 보정 인자 이전과 이후에 대한 계산결과는 보정인자에 따라 각각 2.51, 2.19, 2.16 V/m 로 도출이 된다.

검증을 위해 기준신호 dBm값을 외삽해보면 -8.12 dBm을 얻게 되어 동일함을 알 수 있고 계산과 산출 방법이 정확함을 알 수 있다.

표 4.8. PBCH 측정 외삽 기반 최대전계강도 산출 결과 (모든 편파)

측정거리(m)	채널 파워(dBm)	전계강도(V/m)	기준신호 PBCH/RE (dBm)	기준신호전계강도 (V/m) $E_{i,measure}$	외삽 팩터 (12*273RB)	보정팩터 S_n	외삽된 최대전계강도 (V/m)	Extrapolated power (dBm)	계산된 EIRP (dBm)	Power 에서 계산된 E(V/m)
1 60.00	-5.15	3.53	-40.27	0.06	57.24		3.54	-5.12	61.77	3.54
2 60.00	-5.15	3.53	-40.27	0.06	57.24	0.8743	3.10	-5.12	61.77	3.54
3 60.00	-5.15	3.53	-40.27	0.06	57.24	0.8619	3.05	-5.12	61.77	3.54

45도 한 편파만 측정하였으므로 다른 편파를 측정하여야 하나 사정상 측정 대신 +3 dB를 적용하여 산출하면 최종 3.05 V/m을 얻게 된다.

서비스대역 100MHz 기준으로 시간 영역과 복조 영역에서의 채널 파워 측정값은 각각 -2.82 dBm과 -5.15 dBm이다. 결과 값 차이의 원인은 시간영역에서의 측정은 파형 트레이스의 Peak 값으로 도출된 값으로 실제 값보다 높으며, 이러한 측정 오차 값은 항상 높은 쪽으로 발생하게 된다. 외삽의 결과 역시 복조 기반의 도출된 결과보다 높다.

따라서 결론은 복조 영역에서 측정 산출되는 기준신호 PBCH 또는 PSS 등의 파워 측정으로 외삽하는 것이 더 정확한 값으로 산출되며, 시간적인 오차 보정을 더하여 실제 값에 더 가깝게 도출하여야 한다.

표 4.9. 시간영역 및 복조영역 측정 및 외삽 결과

측정거리(m)	시간영역 측정 파워 (dBm/4MHz)	100MHz 대역 환산 최대 파워(dBm)	최대전계강도 (V/m)	기준신호 PBCH/RE (dBm)	기준신호 전계강도 (V/m)	외삽 팩터 (12*273RB)	보정팩터 (S_n)	외삽 최대 전계강도 (V/m)
60.00	-16.80	-2.82	4.61	-38.04	0.08	57.24	0.8619	3.95

(a) 시간영역 측정 및 외삽 결과

측정거리(m)	채널 파워 (dBm)	전계강도 (V/m)	기준신호 PBCH/RE (dBm)	기준신호전계강도 (V/m) $E_{i,measure}$	외삽 팩터 (12*273RB)	보정팩터 S_n	외삽된 최대 전계강도 (V/m) $E_{i,T}$
60.00	-5.15	3.53	-40.27	0.06	57.24	0.8619	3.05

(b) 복조 영역 측정 및 외삽 결과

제 5 장 결론

본 보고서는 5G 전자파 인체 노출량 평가 동향 분석을 수행하고, 5G Massive MIMO 및 빔포밍 기술 분석을 수행한 결과를 수록하고 있다. 또한 5G 빔포밍 적용 기술 전자파 특성을 분석하였다. 아울러 전자파 인체 노출량 평가 방법 연구하였으며, 신뢰성 검증 및 관련 기준 개선(안)을 마련하였다. 부록으로써 전자파 노출량 평가기준 고시 및 표준 안을 제시하였다.

현재 국내의 기술동향은 다음과 같다. KT는 송수신 안테나 수를 증가시켜 기지국 용량을 획기적으로 늘려 체감 속도 및 수용 인원을 증가시키는 5G 핵심 기술 'Massive MIMO(다중입출력)'의 실외 시연을 2015년 5월 세계 최초로 성공했다고 발표하고, Massive MIMO 성능 검증 및 지속적인 기술 고도화로 128개의 안테나와 최대 16개 데이터 채널 전송, 3D 빔포밍 기술을 접목하여 2018년 2월 평창에 test bed를 구축하였다. 아울러 LG유플러스는 글로벌 네트워크 장비업체인 화웨이와 손잡고 5G를 위한 차세대 네트워크 핵심 기술인 'Massive MIMO(Massive Multiple-Input Multiple-Output)를 중국 현지에서 시연에 성공하였다. 또한 SK 텔레콤은 Ericsson과의 5G 현장 시험 종료 MU-MIMO, Massive MIMO 및 빔 추적을 활용하였다.

본 연구에서는 8x16 빔포밍 배열 안테나에 대하여 원역장 거리의 1/2인 10미터에서 전계분포를 관찰하였다. 그 결과 널이 발생하는 지점은 방사패턴과 유사함을 알 수 있었다. 또한 빔이 중앙에서 벗어날 경우, 사이드로브가 더 많이 발생하고 간격이 좁아진다는 것이다. 따라서 원역장에 존재 시 스캐닝 간격은 파장보다도 빔폭과 관련이 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 또한 위상 천이용 로트만렌즈 제작 및 측정을 수행하였다. 빔포밍용 배열 패치 안테나를 제작 및 측정하고 다중 빔 형성을 위한 전력 분배기를 제작 및 측정하였다. 또한 실측정을 통한 평가방법 신뢰성 검증을 수행하였다. 먼저 실내 측정에 의한 평가 방법 사전 검증하고 현장 실측정을 통한 평가 방법 신뢰성 검증을 완료하였다. 최종적으로 전자파 노출량 평가기준 고시(초안)를 제시하고, 빔포밍 무선국 전자파 노출량 평가기준 표준안을 제시하였다.

부록 1. 전자파 노출량 평가기준 고시 초안(2018.08)

[별표 3] 시분할 복신방식 무선국 전자파강도측정방법 (제3조 관련)

1. 이 측정방법은 전파법 제47조의2제3항에 따라 전자파강도를 측정하여 보고하여야 하는 무선국 중에서 시분할 복신 방식을 사용하여 서비스 하는 무선국에 대한 준공검사, 정기검사 및 변경검사(전파법시행령 제51조제1항·제3호·제6호·제7호·제9호의 사항에 대하여 변경이 있는 경우에 한 한다) 시의 전자파강도 측정절차를 규정하는 것을 목적으로 한다.

2. 이 별표에서 사용하는 용어의 정의는 다음 각 목과 같다.

가. “계산안전경계”라 함은 계산상으로 무선국의 전자파강도가 전자파 인체보호기준 상의 기준값과 동일한 값을 갖는 지점들을 말한다. 안테나 중심으로부터 계산안전경계까지의 거리(R)는 다음 식에 의해 계산한다.

$$R = \sqrt{\frac{AP_0^{G/10}}{4\pi E^2 / \eta_0}} \quad [m]$$

여기서, A : 지면반사를 고려한 상수(AM송신국의 경우 4.0, 그 외 2.56)

P : 안테나 공급 전력(시스템 손실 포함) [W]

G : 안테나 이득 [dBi]

E : 무선국 송신주파수대역의 전자파인체보호기준 일반인 전기장강도 기준값 [V/m]

$$\eta_0$$

“총 노출지수”라 함은 측정지점에서 다중 주파수 노출이 있는 경우 각 무선국의 해당 주파수 신호에 대한 노출지수의 합을 말한다.

$$\text{총 노출지수} = \sum_{i=1}^M (\text{노출지수})_i$$

여기서, (노출지수)_i : i번째 무선국 신호에 대한 노출지수

M : 각기 다른 주파수대역을 사용하는 무선국의 개수

라. “회절점”은 무선국 안테나의 중심점과 측정지점을 연결하는 가상의 직선을 포함하는 수직면 상에서 회절이 발생하는 건물 또는 장애물의 모서리가 만나는 점을 말한다.

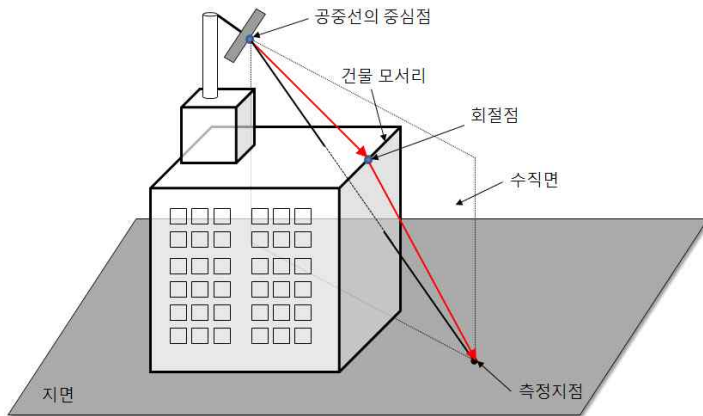


그림 1. 회절점

마. “측정대역폭”이라 함은 전자파강도 측정대상 신호의 대역폭을 말한다.

바. “기본측정”이라 함은 측정대상 무선국에 대한 전자파 노출지수를 결정하기 위한 측정을 말한다.

사. “다중복사원측정”이라 함은 기본측정에 의해 전자파인체보호기준을 초과할 가능성이 있는 경우 주변 무선국의 영향을 고려한 총 노출지수를 구하는 측정을 말한다.

아. “시분할 복신 방식”이라 함은 상향링크와 하향링크 전송들이 서로 다른 시간에 발생되며, 동일한 주파수를 공유할 수도 있는 복신 방식 기법을 말한다.

자. “복조 모드”라 함은 데이터 통신에서 수신된 신호를 원래의 신호로 재생하는 조작 모드를 말한다.

차. “방송 채널”이라 함은 이동 및 무선 통신 시스템에서 기지국이 관장하는 권역 내의 모든 이동국으로 정보를 전달하는데 사용되는 하향 채널을 말한다.

카. “외삽인자”라 함은 최대 가능 수신전력과 신호의 시분변 성분 사이의 비율을 말한다.

타. “기준신호”라 함은 단말기를 찾기 위하여 사용하는 신호이며, 하향 링크 데이터를 포함하고 있지 않는 신호를 말한다.

3. 적용범위 : 이 별표는 전파법시행령 별표 6에서 정한 전자파강도 측정대상 무선국 중에서 빔포밍 방식을 사용하여 서비스하는 무선국에 한하여 적용하며, 그 외 무선국에 대해서는 별표 1의 측정기준을 적용한다.

4. 측정기기

가. 일반 사항 : 측정기기는 다음 1세목부터 4세목의 조건을 만족하여야 한다.

1) 수신기는 주파수 선택적인 협대역 측정이 가능하여야 한다.

2) 수신기는 전자파강도의 실효값을 환산과정 없이 직접 측정할 수 있어야 한다. 전자파강도의 직접적인 측정이 불가능한 수신기를 사용하여 측정할 경우에는 별지 제3호 서식의 측정결과서에 전자파강도 환산에 사용된 수식을 기재하여야 한다.

3) 프로브와 수신기를 연결하는 케이블은 이중 차폐 등 적절히 차폐된

것을 사용하여 외부 전자파에 의한 영향을 받지 않도록 하여야 한다.

4) 수신기는 시분할 복신 신호의 복조가 가능하여야 한다.

나. 프로브 : 측정 프로브는 다음 1세목부터 4세목의 조건을 만족하여야 한다.

1) 측정 프로브는 편파에 상관없이 측정이 가능한 등방성 프로브이어야 한다.

2) 프로브 동작영역의 최소값은 0.05 V/m 이하, 최대값이 100 V/m 이상이어야 한다.

3) 프로브의 등방성 특성은 ± 2.5 dB 이내이어야 한다.

4) 프로브 고정용 지지대는 낮은 유전체 손실 탄젠트($\tan\delta \leq 0.05$)와 낮은 상대 유전율($\epsilon_r \leq 5.0$) 값을 가져야 한다.

5. 측정환경

가. 측정자는 측정대상 무선국과 관련하여 다음 각 세목의 정보를 사전에 확인하여야 한다.

- 1) 무선국의 허가 정보
- 2) 무선국의 위·경도 정보
- 3) 안테나 전력의 시스템 손실
- 4) 안테나 이득
- 5) 안테나로부터 계산안전경계까지의 거리
- 6) 안테나의 빔 형성 개수 및 형태
- 7) 등가 등방성 방사 전력¹⁾
- 8) 무선국의 송신 디지털 신호 정보

나. 측정 프로브 주변 1.0 m 이내에 측정자를 포함한 산란체가 없어야 한다. 단, 옥내와 같이 프로브 주변 1.0 m 이내에 산란체가 불가피하게 존

1) 동의어: 유효 등방성 방사 전력

재하는 경우에는 그 이유와 산란체의 위치에 대한 상세한 정보를 별지 제 3호 서식의 측정 결과서에 기록하여야 한다.

6. 측정지점 등

가. 측정시작지점 선정: 측정대상 무선국의 각 섹터별로 그림 2와 같이 각 섹터의 수직 빔 방향의 공간상에서 계산안전경계(R)의 5배 거리에 해당하는 경계선 이내(DI)를 측정 영역으로 선정한다. 안테나 기울기 각도 기준으로 수직 빔 패턴의 3dB 지점의 측정 가능한 영역에서 최대 지점을 찾는다. 측정 영역이 위 경우에 해당 하지 않는다면 최대 6dB 지점까지 영역에서 최대 지점을 찾는다.

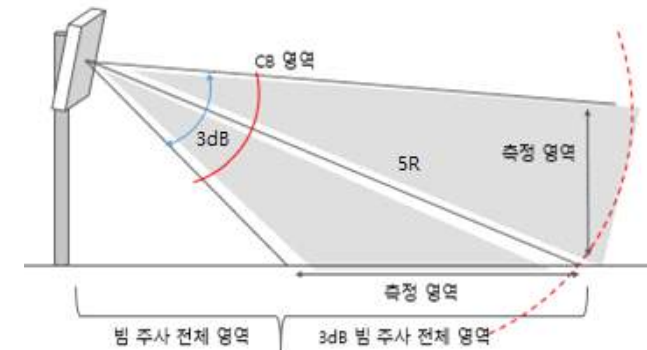


그림 2. 수직 빔에 대한 측정 영역

그림 2의 수직 빔에 대한 최대 지점을 기준으로 수평 빔 패턴의 3dB 지점의 측정 가능한 영역에서 최대 지점을 찾으며, 측정 영역이 존재하지 않을 경우, 최대 45도 거리까지 측정 가능한 영역에서 최대 지점을 찾는다.

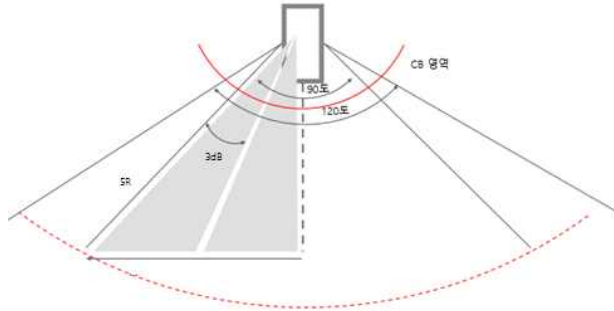


그림 3. 수평 빔에 대한 측정 영역

나. 측정경로: 그림 4와 같이 가목의 측정시작지점으로부터 안테나 방향의 지표면 또는 건물 옥상을 포함하는 경로를 기본 측정경로로 설정한다.

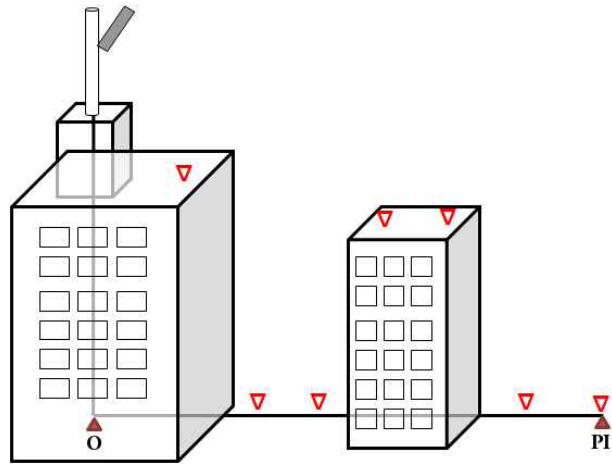


그림 4. 측정경로

다. 측정지점 : 측정지점은 다음 각 세목에 따라 선정한다.

- 1) 가목의 측정시작지점으로부터 나목의 경로를 따라 표1의 간격으로 일반인의 접근이 가능한 최근접 영역까지 측정지점들을 선정한다.
- 2) 선정된 측정지점들 중에서 측정이 불가능하거나 비가시경로인 지

점에서는 그림 5와 같이 해당 측정지점(M)과 거리(\overline{OM})가 동일한 동심원 상에서 측정지점 M에 가장 가까운 측정 가능한 가시경로 상의 지점 M'을 측정지점으로 선정한다.

3) 2세목에서 가시경로를 확보할 수 없는 경우에는 동심원 상에서 최악의 조건에 해당하는 지점, 즉, 무선국 안테나의 중심점과 측정지점을 연결하는 가상의 직선으로부터 회절점과의 거리가 최소가 되는 지점을 육안으로 확인하여 선정한다.

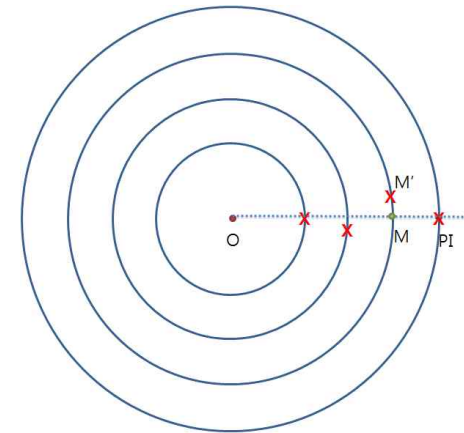


그림 5. 측정지점

라. 측정위치 : 그림 6과 같이 프로브 중심 높이를 지면으로부터 1.1 m, 1.5 m, 1.7 m로 위치시켜 총 3개 위치에서 측정한다.

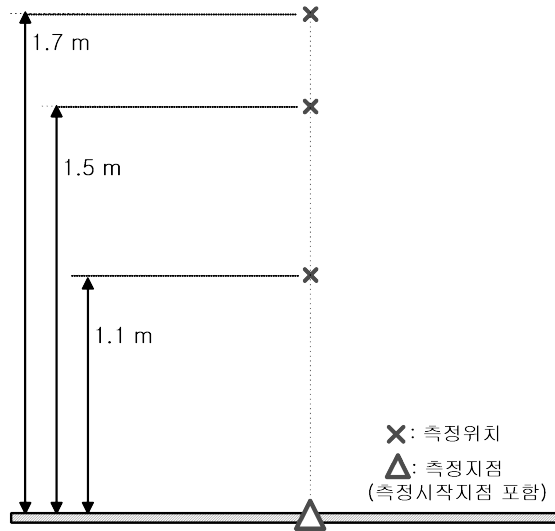


그림 6. 측정위치

7. 측정절차

가. 기본측정 : 기본측정의 절차는 다음 각 세목의 순서를 따른다.

- 1) 제4호에 따라 측정기기의 적합 여부를 확인한다.
- 2) 제5호에 따라 측정환경을 확인하고 기록한다.
- 3) 제6호 가목에 따라 측정시작지점을 선정한다. 단, 측정시작지점이 안전시설 내에 있는 경우, 별도로 측정시작지점을 선정하지 않고 안전시설로부터 1 m 떨어진 지점을 측정지점으로 한다.
- 4) 프로브의 높이를 지면으로부터 1.5 m에 위치시킨다.
- 5) 측정기기를 그림 7에 따라 배치한다.
- 6) 수신기를 다음과 같이 조정한다.
 - 가) 수신기의 측정 주파수와 측정 대역폭은 측정대상 신호의 주파수 및 대역폭과 동일하게 조정한다. 현재 사용 중인 무선국의 송신 주파수와 대역폭은 표 2와 같다.

나) 검파 모드는 실효값을 측정할 수 있게 조정한다.

다) 시분할 복신 신호의 복조 모드로 설정하여, 물리적 방송 채널값을 표시하게 한다.

7) 제6호 나목과 다목에 따라 측정경로 및 표 1의 측정간격으로 접근하면서 측정대상 무선국 주파수 범위 내 기준신호를 측정한다. 단, 3세목 단서의 경우에는 표 1의 측정간격에도 불구하고 3세목 단서에서 정한 측정지점에서만 측정대상 무선국 주파수 범위 내의 기준신호를 측정한다.

8) 7세목에 따라 측정된 결과 중 가장 높은 측정지점에서 제6호 라목의 측정위치에 대해 기준신호를 측정한다.

9) 7세목에 따라 측정된 3개의 값에 대해 표 3에 따른 외삽인자를 곱하여 최대 전자파강도 계산값을 산출하고 그 중 최대값의 노출지수를 구하고 그 결과를 기록한다.

10) 9세목에서 산출한 노출지수가 0.05를 초과할 경우 다음의 다중복사원 측정을 수행한다.

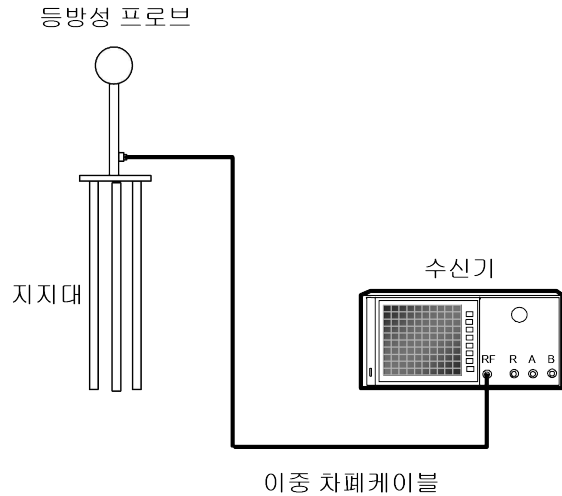


그림 7. 측정기기의 배치

표 1. 무선국 송신주파수별 측정간격

송신 주파수	50 MHz 미만	50 MHz 이상 800 MHz 미만	800 MHz 이상 3000 MHz 이하	3 GHz 이상
측정간 격	$\lambda/3$ 이하 또는 $d/40$ 이하 ¹⁾	2m 이하 또는 $d/40$ 이하	1 m 이하	0.5 m 이하
비고	d : 안테나에서 측정 시작지점까지의 거리 λ : 무선국 송신 신호의 파장 주1) AM방송국 전자파강도 측정은 일반인의 출입이 통제된 안전 시설에서 1 m 떨어진 지점부터 21 m (필요시는 그 이상) 떨어 진 지점 까지 2 m 간격으로 측정한다.			

나. 다중복사원 측정 : 다중복사원 측정절차는 다음과 같다.

1) 제7호 가목 8세목의 측정지점에서 수신기의 주파수 범위를 조정하여 측정대상 무선국의 신호이외에 제3호에 따른 측정대상 무선국을 모두 포함하도록 하여 주변 무선국의 신호를 확인한다.

2) 1세목에서 노출지수가 0.01 이상인 무선국의 모든 신호를 대상으로 각각의 신호에 대하여 가목 6세목의 방법으로 수신기를 조정하고 제6호 라목의 측정위치에서 전자파강도를 6분간 측정하여 평균값을 산출한다. 단, 1분 이상 6분 미만으로 6분간의 평균값을 얻을 수 있는 경우 측정시간을 단축할 수 있다.

3) 각 신호에 대한 2세목의 절차로 측정된 3개의 값 중 최대값으로 해당 신호의 노출지수를 구하고 그 결과를 기록한다.

4) 3세목에서 계산된 각각의 신호에 대한 노출지수를 모두 합하여 총 노출지수를 구하고 그 결과를 기록한다.

8. 측정결과는 별지 3호 서식에 의거하여 측정기기, 측정환경, 측정시작지점, 측정경로, 측정지점, 측정방법, 측정결과 및 계산결과 등 측정과 관련된 제반 정보를 측정결과 요약서와 측정결과 보고서에 기록하여야 한다.

표 2. 무선국의 송신주파수와 측정 대역폭

무선국 구분	송신주파수 대역*	측정 대역폭*
이동전화 (셀룰러)	869 ~ 874 MHz	5 MHz
개인휴대전화 (PCS)	1860 ~ 1870 MHz	10 MHz
LTE(low)	874 ~ 884 MHz	10 MHz
	884 ~ 894 MHz	10 MHz
	949.3 ~ 960 MHz	10 MHz
LTE(mid)	1810 ~ 1830 MHz	20 MHz
	1830 ~ 1850 MHz	20 MHz
LTE(high)	2110 ~ 2120 MHz	10 MHz
	2640 ~ 2660 MHz	20 MHz
이동통신 (IMT-2000)	2120 ~ 2150 MHz	30 MHz
	2150 ~ 2170 MHz	20 MHz
휴대인터넷 (WiBro)	2300 ~ 2327 MHz	27 MHz
	2330 ~ 2360 MHz	30 MHz
시분할 복신방식을 사용하는 3.5GHz 이동통신	3,420 ~ 3,500 MHz	80 MHz
	3,500 ~ 3,600 MHz	100 MHz
	3,600 ~ 3,700 MHz	100 MHz
분할 복신 방식을 사용하는 28GHz 대역 이동통신	26,500 ~ 27,300 MHz	800 MHz
	27,300 ~ 28,100 MHz	800 MHz
	28,100 ~ 28,900 MHz	800 MHz
무선호출	317.9875 ~ 320.9875 MHz	3 MHz
TRS	390 ~ 400 MHz	10 MHz
	851 ~ 855 MHz	4 MHz
	856 ~ 867 MHz	11 MHz
무선데이터	938 ~ 940 MHz	2 MHz
AM라디오	526.5 kHz ~ 1606.5 kHz	채널대역폭 15 kHz
FM라디오	88 MHz ~ 108 MHz	채널대역폭 260 kHz
DMB	174 MHz ~ 216 MHz	채널대역폭 1.54 MHz
DTV	470 MHz ~ 698 MHz	채널대역폭 6 MHz

* 측정대상 무선국의 주파수와 측정대역폭이 이 표에 명시한 값과 다를 경우에는 할당 또는 지정 받은 주파수와 대역폭을 적용한다.

표 3. 시분할 복신 방식을 사용하는 무선국의 송신 디지털신호 형태에 따른 외삽인자

무선국 송신 디지털신호 형태*	외삽인자
포맷 0	OO
포맷 3	OO
포맷 4	OO
포맷 5	OO
포맷 6	OO
포맷 7	OO

* 시분할 복신 방식을 사용하는 무선국의 송신 디지털신호의 형태에 따라 외삽인자를 적용한다.

무선국 전자파강도 측정결과 요약서			
측정대상 무선국 정보	시설자명		
	호출명칭		
	위도 및 경도	북위 / 동경	
	설치장소(주소)		
	용도지역	<input type="checkbox"/> 주거 <input type="checkbox"/> 상업 <input type="checkbox"/> 공업 <input type="checkbox"/> 관리	
	안테나 형식		
	안테나 전력	W (시스템 손실 : dB)	
	안테나 이득	dB _i	
	안테나 높이	m	
	안테나 빔 정보	빔 개수 (개), 빔 형태 ()	
동가동방성 방사전력			
무선국의 송신 디지털 신호 정보			
계산안전경계	m		
측정기관명			
측정일시	측정일	년 월 일	
	측정시간	시 분 ~ 시 분	
측정조건	온도/습도	°C / %	
	날씨		
측정기기	등방성 프로브	수신기	
	모델명 / 제조사		
	주파수 대역	~	
	교정일자	년 월 일	년 월 일
측정물리량	<input type="checkbox"/> 전기장강도 [V/m] <input type="checkbox"/> 자기장강도 [A/m] <input type="checkbox"/> 전력밀도 [W/m²]		
측정지점		측정간격 : m, 측정지점 수 : 곳	
평균시간		분 평균	
최대 측정위치의 기준신호 측정값 및 최대 전자파강도 계산값	높이	1.1 m	1.5 m
	측정값		
외삽인자	계산값		
전자파강도 최대(계산)값			
전자파강도 기준값과의 비교	기준값	기준주파수	노출지수 ¹⁾
	~		
다중복사원 측정	복사원 갯수		
	총 노출지수 ¹⁾		
전력측정의 경우 사용한 환산식		(필요 시 별도의 용지를 사용)	
작성 일자 : 년 월 일			
측정 기관(주 소) :			
측 정 자 :		(서명 또는 인)	
작 성 자 :		(서명 또는 인)	

부록 2. 빔포밍 무선국 전자파 노출량 평가기준 표준안

Appendix I

Extrapolation method for 5G EMF assessment

This appendix provides guidance for the method of EMF extrapolation for the exposure assessment of 5G NR TDD base station.

I.1 Technical considerations for 5G base station EMF assessment

EMF assessment of 5G based on TDD is needed to understand air interface behaviour and consider fast data traffic variation. The considerations are following.

- 1) 5G TDD data frame shares the downlink and uplink resource element in slot level, the slot format is need to know.
- 2) 5G use SS Burst set contains SSB which matches the number of broadcasting beam to synchronize between the base station and UE (user equipment).
- 3) SS Burst interval can be set with 5, 10, 20, 40, 80, 160ms periodically.
- 4) Traffic beamforming for PDSCH data streaming to UE can be various up to the maximum beam number.
- 5) To decide the spot of maximum radiation in the multi beam or single beam, proper approach procedure should be considered.

Unlikely traditional radio services, there are some complexities for the LTE TDD based beamforming with 5G NR protocol. To overcome these difficulties of EMF measurement, the understanding of frame structures in time domain and physical resource block in frequency domain, and also need to beam sweeping and beamforming behaviours.

Table I.1 Maximum Number of PRB structure

SCS	5	10	15	20	25	30	40	50	60	80	100
(kHz)	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz
	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}

)											
15	25	52	79	106	133	TBD	216	270	N/A	N/A	N/A
30	11	24	38	51	65	TBD	106	133	162	217	273
60	N/A	22	18	24	31	TBD	51	65	79	107	135

(a) Maximum transmission bandwidth configuration NRB : FR1)

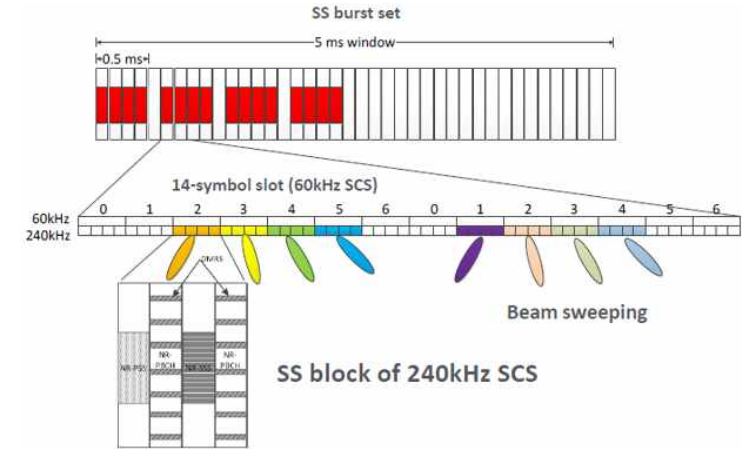
SCS	50	100	200	400
(kHz	MHz	MHz	MHz	MHz
)	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}
60	66	132	264	N/A
120	32	66	132	264

(b) Maximum transmission bandwidth configuration NRB : FR2)

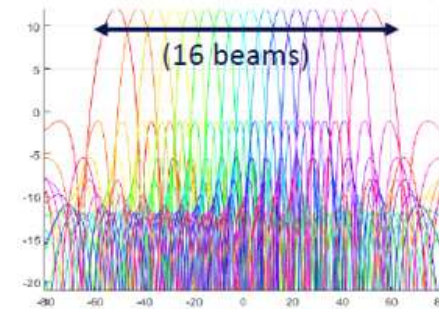
NOTE – data from <http://www.sharetechnote.com/html/5G/>

To estimate the maximum EMF exposure field strength for 5G base station, the reference signal power measurement and extrapolation to the maximum transmitting frequency bandwidth. PSS, SSS and PBCH are considered as the reference signal in 5G NR

- PSS, SSS and PBCH are located in SSB (Synchronization Signal Block).
- SS(PSS and SSS) and PBCH in NR is transmitted in the same 4 symbol block.
- SS Burst set has some number of SSB that can be the number of broadcasting beam.



(a) SSB synchronization with beams



(b) 120 degrees for 16 beams for azimuth direction

Figure I.1 Scalable beams for synchronization

For the example in figure I.1, 60 or 240kHz subcarrier spacing has 16 SSB in one SS Burst set synchronize 16 beams and each SS Burst set generates periodically. If we can measure one resource element power in SSB, we can extrapolate to the transmitting frequency bandwidth.

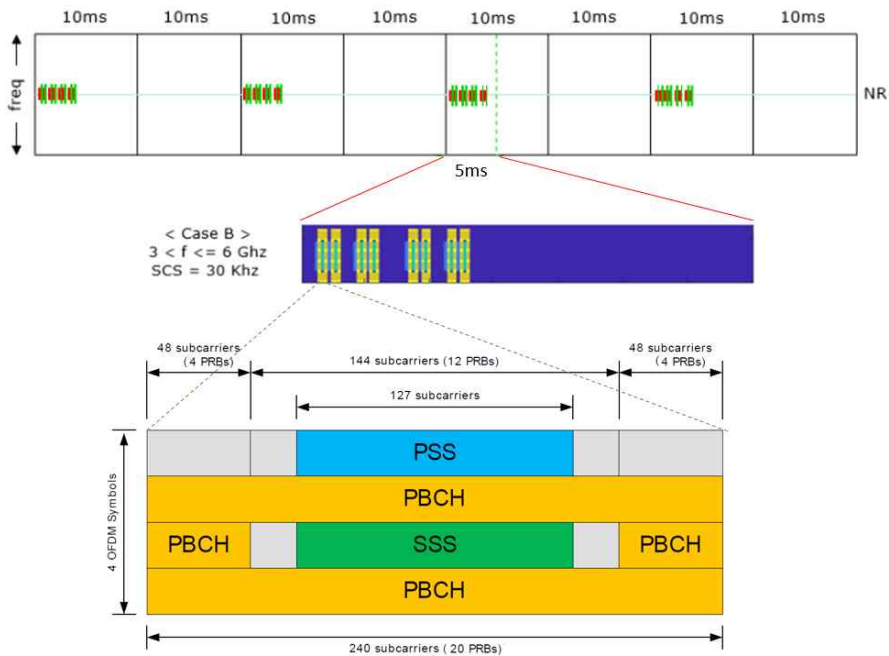


Figure I.2 Structure of SSB

One SSB occupies 4 OFDM symbols in one slot and 240 subcarriers. To get the maximum electromagnetic field strength and power density can be delivered using one resource element of PBCH DMRS or PSS power. The extrapolation factor can be calculated from this calculation procedure.

$$K_i^{R_0} = \sqrt{S_{RB} \cdot PRB_{total}}$$

S_{RB} Subcarrier number of one resource block

PRB_{total} The number of physical resource block for the entire bandwidth

One additional consideration is the deduction of empty symbols in slot level in

LTE TDD based 5G NR system. SS Burst and PDSCH data frame has some empty symbols that include time interval and uplink symbols according to slot format type.

Table I.2 Numerology and slot length

Parameter / Numerology (μ)	0	1	2	3	4
Subcarrier Spacing (KHz)	15	30	60	120	240
1 Slot length (number of symbol)	1 ms (14)	0.5 ms (14)	0.25 ms (14) (12)	0.125 ms (14)	0.0625 ms (14)
Number of Sub-frame	10	20	40	80	160
Number of slot in a Sub-frame	1	2	4	8	16
OFDM Symbol length (us)	66.67	33.33	16.67	8.33	4.17
Cyclic Prefix length (us)	4.69	2.34	1.17	0.57	0.29
OFDM symbol length included CP (us)	71.35	35.68	17.84	8.92	4.46

SS Burst period can be set with 5, 10, 20, 40, 80, 160ms.

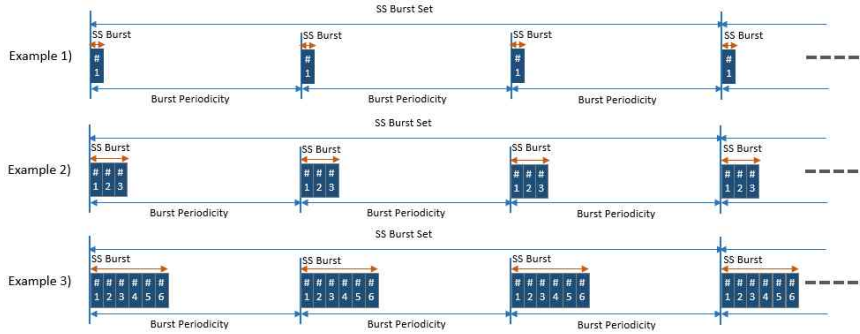


Figure I.3 SS Burst period for deduction

There need to consider two correction factors to deduct power for the actual radiated power from the maximum electric field strength.

- Power deduction empty symbol blocks in SS Burst period
- Power deduction up symbol blocks according to slot format

Due to the characteristics of 5G NR air interface protocol, only SS Burst signals radiate periodically with 5ms, 10ms, 20ms, 40ms, 80ms, 160ms time interval. In terms of EMF exposure, 5G NR could be lower EMF level than 4G LTE, but most concern is that the beam focus on and status of connection with UE.

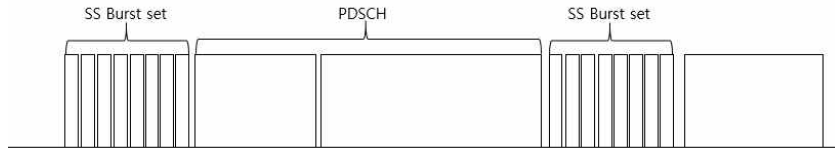


Figure I.4 5G NR frame stream in time domain (=8)

I.2 Extrapolation theory

The instant maximum electromagnetic field strength can be calculated with measured reference signal field strength and multiplying extrapolation factor.

$$E_{i,Max} = E_{i,measured}^{R_0} \cdot K_i^{R_0}$$

$E_{i,Max}$ Extrapolated maximum electromagnetic field strength of cell i (V/m)

$E_{i,measured}^{R_0}$ Measured electromagnetic field strength of reference signal per a RE (V/m)

$K_i^{R_0}$ Extrapolation factor of cell i

Extrapolation factor $K_i^{R_0}$ is;

$$K_i^{R_0} = \sqrt{S_{RB} \cdot PRB_{total}}$$

S_{RB} Subcarrier number of one resource block

PRB_{total} The number of physical resource block for the entire bandwidth

The above calculation is just considered instant measurement. To consider time varying measurement and assessment, there need to consider two kind of compensation factors.

$$E_{t,T} = E_{i,Max} \cdot S_n$$

S_n Compensation factor for empty symbols in one SS Burst period

S_n is depends on the SS burst period (5, 10, 20, 40, 80, 160ms). During radiation, there needs to consider deducting radiated field strength for empty symbols based on SS burst period. And there also need to add uplink symbols deduction according to slot format type.

S_n compensation factor can be deliver as following:

$$S_n = \sqrt{\frac{S_{ssb}}{S_{total}}}$$

S_{ssb} Number of symbols in one SS Burst period.

S_{total} Total number of symbols in one SS burst period

Table I.3 Example S_{total} (in case of 100MHz BW)

SCS(kHz)	SCmax (100MHz)	Nsymbol /frame	Total Symbol in frame & BW	5ms	10ms	20ms	40ms	80ms	160ms
				0.5	1	2	4	8	16
30(L=4)	3276	280	917280	458640	917280	1834560	3669120	7338240	14676480
30(L=8)	3276	280	917280	458640	917280	1834560	3669120	7338240	14676480
120(L=6 4)	792	1120	887040	443520	887040	1774080	3548160	7096320	14192640

Table I.4 Example S_{ssb} (in case of 100MHz BW & Slot format 0)

SCS(kHz)	Nsymbol/ssb (empty symbol block)	Up symbols /slot format(32)	5ms	10ms	20ms	40ms	80ms	160ms
			0.5	1	2	4	8	16
30(L=4)	134272	0	324368	783008	1700288	3534848	7203968	14542208
30(L=8)	222680	0	235960	694600	1611880	3446440	7115560	14453800
120(L=6 4)	390400	0	53120	496640	1383680	3157760	6705920	13802240

Table I.5 Example S_{ssb} (in case of 100MHz BW & Slot format 4)

SCS(kHz)	Nsymbol/ssb (empty symbol block)	Up symbols /slot format(32)	5ms	10ms	20ms	40ms	80ms	160ms
			0.5	1	2	4	8	16
30(L=4)	134272	6552	278504	671624	1457864	3030344	6175304	12465224
30(L=8)	222680	6552	203200	596320	1382560	2955040	6100000	12389920
120(L=6 4)	390400	1584	53120	369920	1130240	2650880	5692160	11774720

I.3 Results of lab test

To verify the extrapolation theory for 5G NR measurement, some tests were implemented in lab environment using 5G Signal generator and 5G signal analyzer direct connection.

Table I.6 Test environments

Tools	Instrument	Specifications
RF cable	Gore cable	Cable Loss : 1.2dB
5G Signal generator	Keysight / N5172B	5G NR protocol /100MHz BW
5G signal analyzer	Keysight / N9020B	Zero span, 5G NR demodulation

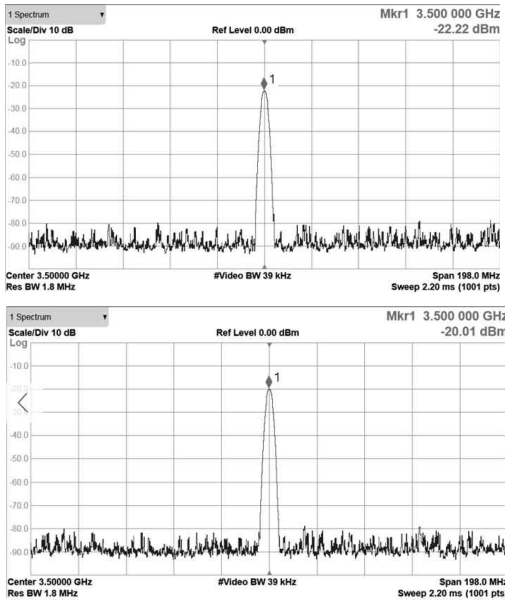
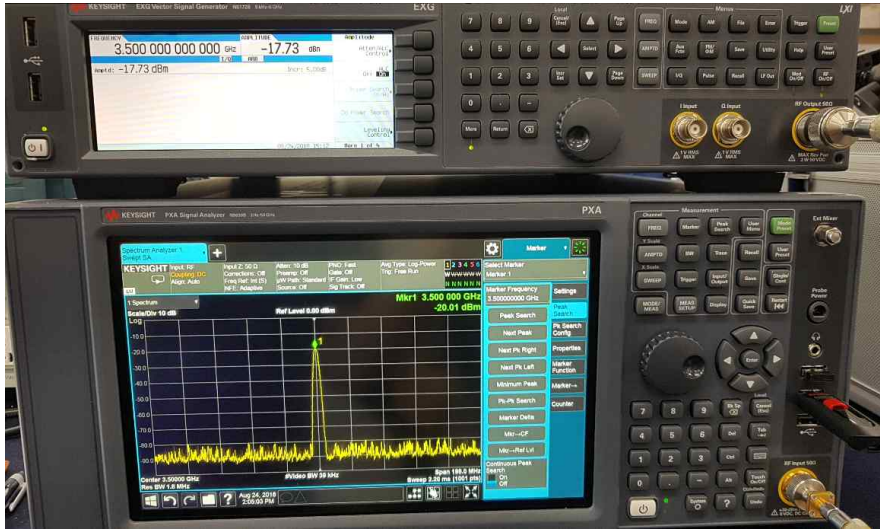
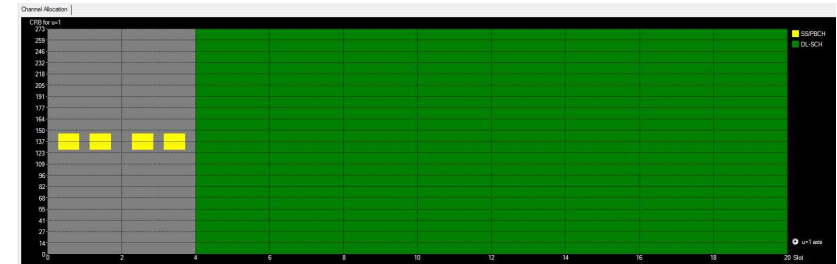


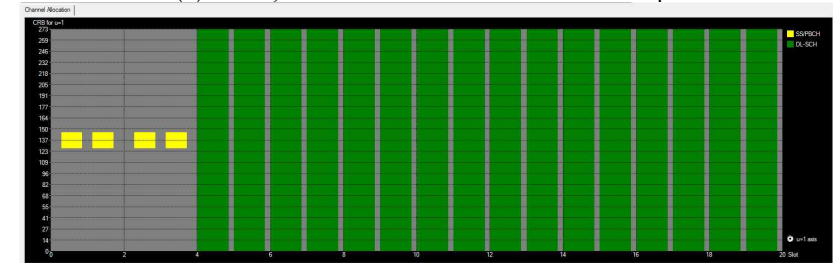
Figure I.5 Receiving power calibration with adjusting Tx

5G NR signal generator connected to signal analyzer with 1.2 dB loss RF cable

and the signal generator adjusted for -20dBm received in Signal analyzer in the calibration process. The test frequency was 3.5GHz with 100MHz bandwidth. 5G NR signal formats for the test are refer to Figure 5.1. There are 2 scenarios for the test and implemented to prove the extrapolation factor, compensation factor and procedures as below.



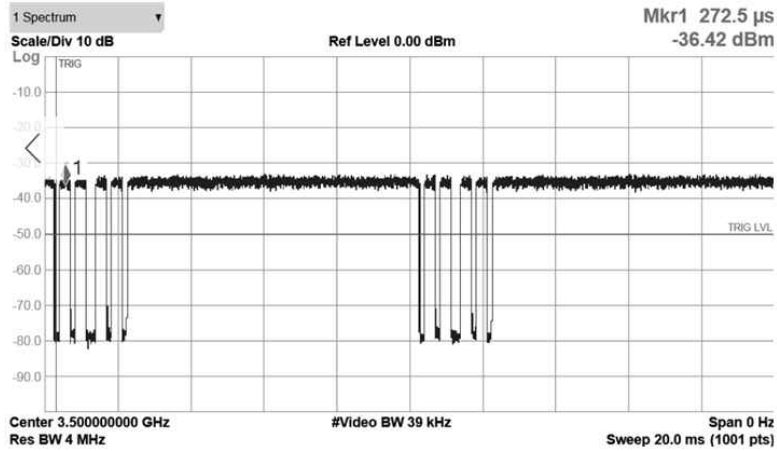
(a) L=8, Slot format0 and 10ms SS Burst period



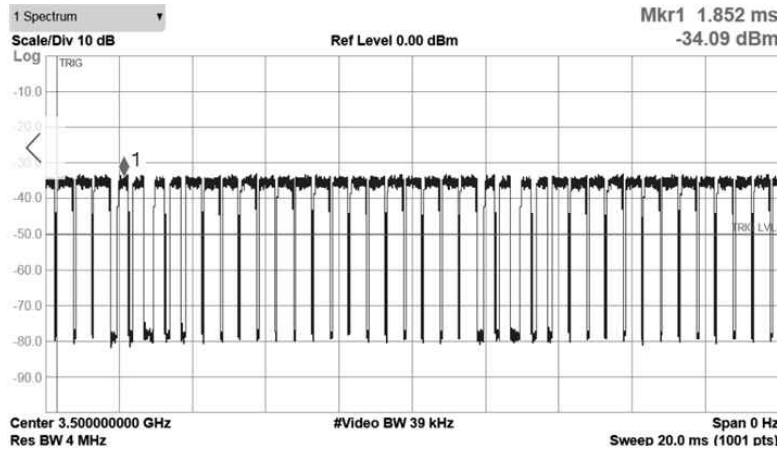
(b) L=8, Slot format0 and 10ms SS Burst period

Figure I.6 Frame structures for test using Keysight Signal studio

In figure5.2, (a) is 8 beams matched with 8 SSB located in two sub-frames. SS Burst period is 10ms and slot format is 0 which means all down link (14 symbols : D). (b) is just changed to slot format 4 which means 2 symbols are up link (10 symbols : D, 2 symbols : U). The green colour is PDSCH and yellow is SSB. It is one frame structure set up with 30 kHz SCS, 20 slots and two SSB in one slot. SS Burst time is 5ms and 10ms period. SSB located in slot with $S = 4,8,16,20,32,36,44,48$.



(a) L=8, Slot Format 0 in time domain



(b) L=8, Slot Format 4 in time domain

Figure I.7 Frame measurement in Zero span mode

Figure 5.2 (a) shows 8 SSB in 10ms interval. In other word, in every 10ms interval, 8 beam transmitting for 5ms cell searching. It also has full PDSCH with all down link data. But (b)has 2 symbols up link portion and less power

radiating than (a) case. PDSCH resource element parts will be fluctuated depends on data usage or UE connection severely. Without averaging, the marker point level of (a) and (b) are different depends on marking according to symbol mapping difference. 2~5 dB difference along with trace upper part variations.

Table I.7 Results in time domain measurement

Format	Level at SSB window (dBm)	Extrapolated Power level (dBm)
3.5GHz with L=8 and slot format 0	-34.62	-20.64
3.5GHz with L=8 and slot format 4	-34.09	-20.11

Power level at the SSB is -34.62 dBm (L=8, Slot format 0) and -34.09 dBm (L=8, Slot format 4) with RBW 4 MHz (3.81MHz needed) and VBW 39 kHz for averaging effect (100:1 ratio setting recommended) in zero span status. For the actual transmitted power in 100 MHz bandwidth, the result should be extrapolated from 4 MHz RBW window to 100 MHz RBW window. The results is increased 25 times from the measurement at the SSB to -20.64 dBm and -20.11 dBm. So, the measurement error could be 0.11 ~ 0.64 dB.

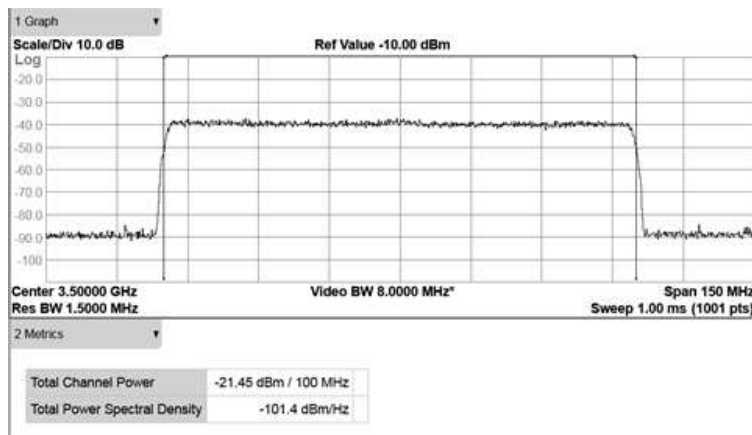
$$P_{extrapolated}(dBm) = P_{measured} * 10 \log \left(\frac{RBW_{ssb}}{RBW_{tbw}} \right)$$

RBW_{ssb} is the matched with SSB occupied bandwidths in MHz

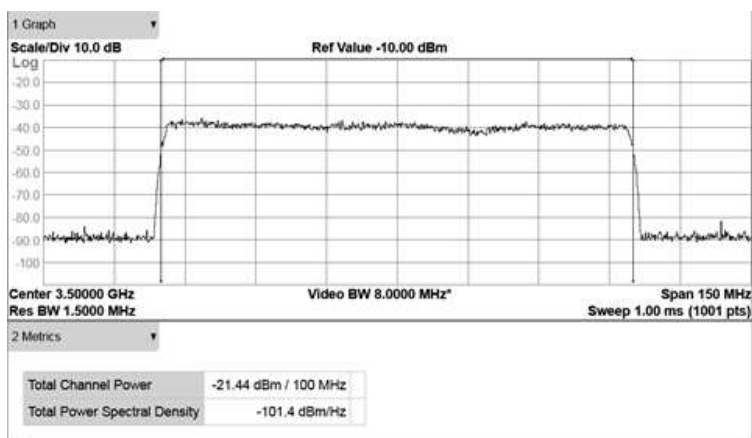
RBW_{tbw} is the matched with total service bandwidths in MHz

But in this case, the uncertainty could be much higher along with trace level difference range about 3~5dB drift. And there is also not identify the base station in urban environment especially. It can increase the measurement

uncertainty.



(a) L=8, Slot format 0, channel power



(b) L=8, Slot Format 4, channel power
Figure I.8 Channel power in frequency domain

In frequency domain, the channel power can be measured easily in normal common sense, but the actual 5G NR signal is not able to set the whole signal

trace with swept-tune spectrum analyser due to fast variation with SS burst interval and PRB changing.

Table I.8 Channel power measurement result in frequency domain

Format	Channel Power (dBm)
3.5GHz with L=8 and slot format 0	-21.45
3.5GHz with L=8 and slot format 4	-21.44

To compare with other result, we can get the -21.45 dBm (L=8, slot format 0) and -21.44 dBm (L=8, slot format 4) with the full payload case in frequency domain. But in actual field environment, it is not easy to measure and more increased uncertainty of measurement.

The better way to measure power density from 5G NR radiation is the modulation analysis and extrapolation with it for the EMF exposure assessment. The all results come from resource element power analysis based. The constant power measurement of SSB can be used for the extrapolation to get the maximum field strength and power density. PSS, SSS and PBCH power measurement can be the start of the extrapolation process.

1 CC0 Error Summary		2 CC0 Frame Summary		
		Evm	Power	Num.RB
Channel Power	-20.87 dBm	PSS (30 kHz) 1188.43 %	-55.05 dBm	44
EVM	84.68 %rms	SSS (30 kHz) 1763.00 %	-55.10 dBm	44
EVM Peak	20570.46 %	PBCH (30 kHz) 837.73 %	-55.08 dBm	80
Frequency Error	-455.61 Hz	PBCH DMRS (30 kHz) 936.55 %	-55.10 dBm	80
Symbol Clock Error	-6.068 ppm	PDSCH (BWP1) 58.03 %	-55.64 dBm	4368
IQ Offset	-40.67 dB	PDSCH DMRS (BWP1) 26.97 %	-55.65 dBm	4368
Time Offset	8.247 ms	PDSCH PTRS (BWP1)	---	---
Sync Correlation	99.9 %	PDCCH (BWP1)	---	---
Sync Source	SS Block	PDCCH DMRS (BWP1)	---	---

(a) L=8, Slot format 0, modulation analysis

1 CC0 Error Summary		2 CC0 Frame Summary			
			Evm	Power	Num.RB
Channel Power	-21.53 dBm	PSS (30 kHz)	1187.96 %	-55.05 dBm	44
EVM	122.89 %rms	SSS (30 kHz)	1694.62 %	-55.03 dBm	44
EVM Peak	43361.95 %	PBCH (30 kHz)	1064.71 %	-55.09 dBm	80
Frequency Error	-580.27 Hz	PBCH DMRS (30 kHz)	3576.63 %	-55.08 dBm	80
Symbol Clock Error	-4.639 ppm	PDSCH (BWP1)	63.40 %	-56.39 dBm	4368
IQ Offset	-39.04 dB	PDSCH DMRS (BWP1)	28.31 %	-55.65 dBm	4368
Time Offset	4.330 ms	PDSCH PTRS (BWP1)	---	---	---
Sync Correlation	99.9 %	PDCCH (BWP1)	---	---	---
Sync Source	SS Block	PDCCH DMRS (BWP1)	---	---	---

(b) L=8, Slot format 4, modulation analysis
Figure I.9 Results of L=8 demodulation analysis

In figure 5.4, demodulated channel powers are -20.87 dBm and -21.53 dBm. But we can get stable result only the case of constant payload radiated, the real world is not. So, it is much fluctuated between more 10~20 dB variation. But PSS, SSS, PBCH resource element powers are much more stable due to their mission and characteristics.

In the first case, the extrapolation can be used with using PBCH DRMS power, Sub-carrier number and PRB number for the instant power as below.

$$\text{Transmitted power (dBm)} = \text{PBCH power} * \text{Nsubcarrier} * \text{NPRB}$$

So, the result shows in the table 5.4.

Table I.9 Comparison table for the result of extrapolation

Format	Channel Power (dBm)	PBCH DRMS (dBm)	Extrapolated Power (dBm)
3.5GHz with L=8 and slot format 0	-20.87	-55.10	-19.95
3.5GHz with L=8 and slot format 4	-21.53	-55.08	-19.93

But, the result is the instant power case. The difference is 0.18 dB and 1.6 dB between channel power and extrapolated power using PBCH. It means the extrapolated power result just calculated in symbol time, but the channel power can be based on slot, sub-frame or frame time. So, it can be compared each other exactly. We need to consider deduction for the empty symbols contained zero powers.

In L=8, slot format 0 and 10ms SS Burst period case example,

$$= 10 * \log_{10}(0.7572) = -1.21 \text{ dB}$$

So, the adjusted result is -21.16 dBm from -19.95 dBm. The deviation is 0.29 dB from the demodulated channel power -20.87 dBm.

In L=8, slot format 4 and 10ms SS Burst period case example,

$$= 10 * \log_{10}(0.6501) = -1.87 \text{ dB}$$

So, the adjusted result is -21.80 dBm from -19.93 dBm. The deviation is 0.27 dB from the demodulated channel power -21.53 dBm.

Conclusion

When assessing EMF exposure levels in vicinity of 5G NR base station, we recommend an extrapolation technique using the measured of PBCH or PSS channel power in SSB. These signals are radiated periodically and are maintained a constant power. Calculating the whole PRB using one of measured SSB signal power, these can be used as extrapolation factor. If the measurement parameter is the time varying average value, this factor should be considered to deduct the power of empty symbols.

This theory is proved in the test bed in the laboratory. The measurement under real environment will be followed. We propose this material would be inserted as Appendix of ongoing K.Supp-5G_EMF_Compliance.