

발 간 등 록 번 호

11-1721137-100032-01

RRA-2025-HM-102

고주파 대역 신규 전자파 인체노출량(APD) 등 전자파 인체노출량 평가기술 연구

2025. 12.

 **국립전파연구원**
National Radio Research Agency
한국해양과학기술원



고주파 대역 신규 전자파 인체 노출량 (APD) 등 전자파 인체영향 평가기술 연구

2025 . 12 국립전자파연구원

제 출 문

본 보고서를 「고주파 대역 신규 전자파 인체노출량(APD) 등
전자파 인체영향 평가기술 연구」 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2025. 12. 10.

연구책임자 : 방 진 규 (한국해양과학기술원)

연 구 원 : 구 성 민 (한국해양과학기술원)

김 민 (한국해양과학기술원)

연구보조원 : 김 도 영 (한국해양과학기술원)

신 희 철 (한국해양과학기술원)

“이면은 공백임”

요 약 문

1. 과 제 명 : 고주파 대역 신규 전자파 인체노출량(APD) 등
전자파 인체영향 평가기술 연구
2. 연 구 기 간 : 2025. 3. 10 ~ 2025. 12. 10
3. 연구책임자 : 방 진 규
4. 계획 대 진도

가. 월별 추진내용

세부내용	연구자	월별 추진계획												비 고
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
신규 전자파 흡수전력밀도 평가 기술 동향 분석														
고주파 대역 흡수전력밀도 해석을 위한 전자파 수치해석														
안테나 타입, 위상조건 등에 따른 고주파 흡수전력밀도 수치해석														
수치해석 기반 고주파 대역 흡수 전력밀도의 전자파 인체노출량 평가방법 검토														
인체등가용액 기반 신규 흡수 전력 밀도 측정 시스템 구성 및 검증														
인체등가용액 기반 고주파 대역 흡수 전력밀도 측정														
인체등가용액 기반 흡수 전력밀도 측정 기반의 전자파 인체노출량 평가방법 검증														

전자파 인체노출량 분포 모델링 연구															
전자파 동시노출 조건에 대한 분포 합성기술															
전자파 동시노출 조건 평가기술 간소화 기술연구															
분기별 수행진도(%)				5.5%		27.3%		43.6%		23.6%				100%	

나. 세부 과제별 추진사항

- 1) 고주파 전자파 흡수전력밀도 평가기술 동향 분석
 - IEC 국제 표준 흡수전력밀도 평가 표준 동향 분석
 - 고주파 전자파 흡수전력밀도 측정방법 분석
- 2) 고주파 대역 흡수전력밀도 해석을 위한 전자파 수치해석
 - 전자파 흡수전력밀도 해석을 위한 시뮬레이션 조건 설정
 - 전자파 흡수전력밀도 해석을 위한 기준 안테나 구조 설정
- 3) 안테나 타입, 위상조건 등에 따른 고주파 흡수전력밀도 수치해석
 - 10 GHz 패치 안테나 모델링 및 시뮬레이션
 - 기준 혼안테나 모사구조 모델링 및 시뮬레이션
- 4) 수치해석 기반 고주파 대역 흡수전력밀도 평가방법 검토
 - 흡수 전력 밀도 (APD)와 전력밀도 (IPD) 상관관계 검토
- 5) 인체등가용액 기반 신규 흡수 전력밀도 측정 시스템 구성 및 검증
 - 신규 흡수 전력 밀도 (APD) 측정 시스템 구성 검토
- 6) 전자파 인체노출량 분포 모델링 연구
 - 1D 가우시안 분포를 기반한 SAR 분포 모델링
 - 2D 가우시안 분포를 기반한 SAR 분포 모델링
- 7) 전자파 동시노출 조건에 대한 분포 합성 및 간소화 기술
 - 가중평균 기반 최대 SAR 위치 도출 방법 검토
 - 가우시안 모델링 기반으로 합성 SAR 해석적 분석 방법 검토

- 8) 전자파 동시노출 측정 면제 조건 분석
 - 전자파 동시노출 분포의 측정 면제 거리 해석적 유도
 - 전자파 동시노출 분포 기반 면제거리 heatmap 구현 방법
- 9) 동시노출 조건에 대한 측정 분석
 - Mockup 구조를 적용한 동시노출 조건 분석
 - 상용 무선 휴대기기 측정 결과를 기반한 동시노출 조건 분석

5. 연구 결과

- 1) 고주파 전자파 흡수전력밀도 표준화 연구 동향 조사 및 분석
- 2) 고주파 흡수전력밀도 시뮬레이션 조건 분석
- 3) 고주파 흡수전력밀도 해석용 기준 안테나 모델링 (패치, 혼안테나)
- 4) 기준 안테나 흡수전력밀도, 입사전력밀도, 전자파흡수율 시뮬레이션
- 5) 모의인체 기반 기준 안테나 공진변화에 따른 경향성 분석
- 6) 10 GHz 패치안테나 기준 흡수전력밀도, 입사전력밀도 상관성 분석
- 7) 28 GHz 패치안테나 기준 흡수전력밀도, 입사전력밀도 상관성 분석
- 8) 전자파 동시노출 분석을 위한 SAR 분포 모델링
- 9) 전자파 동시노출 분석을 위한 SAR 분포 합성 모델링
- 10) 전자파 동시노출 간소화를 위한 최대 SAR 위치 도출 방법 연구
- 11) 전자파 동시노출 조건의 면제거리 분석 방법 연구
- 12) 전자파 동시노출 평가방법 검증을 위한 mockup/상용 모델 테스트

6. 기대효과

- 1) 전자파 흡수전력밀도에 대한 조건별 분석 및 분석 결과를 통한 실효적 평가 방법을 도출하고, 인체 영향에 대한 국제적 표준화 선도
- 2) 기존 인체 영향 평가 기준과의 상관관계 분석을 통해 전자파 흡수전력 밀도 평가기준 도입에 대한 기초 연구결과로 활용
- 3) 휴대기기의 전자파 인체 동시노출 조건에 대한 합성 SAR 평가 방법을 제시하고 관련 평가 방법(안) 제안

- 4) 전자파 흡수전력밀도 측정 시스템 구성에 대한 이해 및 도출 데이터 분석을 통해 신규 측정 시스템 도입 시 검토조건 분석
- 5) 다중 송신기 기반 모바일 단말 환경에서 보수적인 기존 SAR 평가 방식의 현실적 개선 방향 제시
- 6) 사용 환경 기반 SAR 영향 예측 모델 확보로 전자파 인체노출에 대한 합리적 평가절차 및 면제기준 제공
- 7) 신기술 기기의 다중 대역 기반 차세대 단말기의 인체노출 안전성 확보 및 규제 대응력 강화

7. 기자재 사용 내역

시설·장비명	규격	수량	용도	보유현황	확보방안	비고
GPU Workstation	GPU: NVIDIA RTX4090	2	전자파 인체노출량 시뮬레이션 및 데이터 수집/분석	한국해양과학기술원	보유	
Simulation Software	SEMCAD X (Sim4Life)	1	전자파 시뮬레이션	한국해양과학기술원	보유	
Simulation Software	Matlab	2	동시노출 모델링 및 해석	한국해양과학기술원	유상임대 (일부 옵션)	
Network Analyzer	E5063A	1	RF 디바이스 (반사, 투과계수) 특성 계측	한국기술교육대학교	무상임대	
고주파 APD 측정 DASY8	IEC/IEEE 62209-1528: 2020	1	고주파 대역 APD 측정	국립전파연구원	과제 진행 중 이용	
정규 SAR DASY6	IEC/IEEE 62209-1528: 2020	1	정규 SAR/APD 측정	국립전파연구원	과제 진행 중 이용	동시노출 측정
CSAR 3D	IEC/IEEE 62209-1528: 2020	1	고속 SAR 측정	국립전파연구원	과제 진행 중 이용	동시노출 측정

8. 기타사항

해당사항 없음

“이면은 공백임”

최종보고서 초록

국문 초록
본 연구는 차세대 무선통신 기기에서 발생하는 전자파 인체노출을 보다 정확하고 효율적으로 평가하기 위해, 기존 고주파 대역 APD 측정 표준에 대한 연구동향 분석 및 고주파 대역에서의 APD/IPD 특성 분석과 다중 송신기 동시노출 환경에서의 SAR 합성 평가기술을 통합적으로 연구한 결과를 제시한다. 우선 고주파 대역에서 기존 SAR 방식의 한계를 극복하기 위해, 인체등가용액과 안테나 구조 간 상호작용, 주파수 상승에 따른 전자파 침투깊이 감소, APD, IPD의 주파수 종속 특성 등을 실측과 해석적으로 분석하였다. 이를 통해 고주파 환경에서는 APD가 인체 표면에서의 전력흡수를 더 직접적으로 반영하는 핵심 지표임을 확인하였으며, 매질 유전특성 변화와 근접장 조건에 따라 APD/IPD 비율이 이론값과 달라지는 원인을 체계적으로 도출하였다. 또한 다중 송신기(simultaneous transmission) 조건에서 SAR 볼륨스캔 측정 횟수 증가로 인해 발생하는 비효율성을 해소하기 위해, SAR 분포를 2차원 가우시안 함수로 모델링하고 psSAR, 분포폭, 피크 간 거리를 이용해 동시노출 시 SAR 증가량을 근사적으로 계산하는 새로운 분석기법을 제안하였다. 본 기법은 일정 비율(τ %) 증가 조건을 기준으로 면제 거리를 산출할 수 있어, 복잡한 안테나 구조와 다양한 주파수 조합을 갖는 상용 단말기에도 적용 가능함을 확인하였다. 나아가 실제 양산 단말기의 SAR 볼륨스캔 측정 결과와 제안된 모델의 예측값을 비교한 결과, 분포 형상·피크 위치·증가량이 정성적·정량적으로 높은 일치성을 보이며 면제거리 기준이 실측 기반으로 타당함을 검증하였다. 본 연구는 고주파 기반 5G·6G 단말기에서 요구되는 인체노출 평가체계를 과학적으로 정립하고, 동시노출 평가의 실용적 대안을 제시함으로써, 향후 국제 표준화 및 규제 고도화에 기여할 수 있는 기술적 기반을 마련한다.
영문 초록
This study presents an integrated analysis aimed at establishing a more accurate and efficient assessment framework for human exposure to electromagnetic fields generated by next-generation wireless communication devices. The work encompasses a review of research trends on existing high-frequency APD measurement standards, a detailed investigation of APD/IPD characteristics in the high-frequency range, and the development of a SAR combination evaluation technique applicable to simultaneous-transmission scenarios. To overcome the limitations of conventional SAR-based assessment methods at high frequencies, we

experimentally and analytically examined the interactions between antennas and tissue-equivalent liquids, the reduction in electromagnetic penetration depth with increasing frequency, and the frequency-dependent behavior of APD and IPD. The results confirm that APD serves as a more direct indicator of surface power absorption under high-frequency exposure conditions, and the origin of deviations between theoretical and measured APD/IPD ratios was systematically identified with respect to dielectric property variations and near-field coupling effects.

Furthermore, to address the inefficiency caused by repeated SAR volume scans required for multiple transmitter pairs, we propose a new analytical method that models SAR distributions using two-dimensional Gaussian functions. By incorporating parameters such as psSAR, distribution width, and peak-to-peak separation, the method enables approximate estimation of SAR increments during simultaneous transmission and facilitates the determination of exemption distances based on a predefined percentage-increase threshold. This approach was validated using SAR volume-scan data obtained from commercial mass-produced devices, where the modeled results demonstrated strong qualitative and quantitative agreement with measurements in terms of distribution shape, peak location, and combined SAR magnitude. The close alignment between prediction and measurement verifies the practical validity of the proposed exemption-distance criterion.

Overall, this study establishes a scientifically grounded evaluation methodology tailored to high-frequency 5G/6G devices and provides a practical alternative for simultaneous-transmission assessments. The findings are expected to support future international standardization efforts and contribute to the advancement of regulatory frameworks for human electromagnetic exposure.

색 인 어	한글	흡수전력밀도, 입사전력밀도, 전자파흡수율, 전자파동시노출
	영문	Absorbed Power Density (APD), Incident Power Density (IPD), Specific Absorption Rate (SAR), Simultaneous transmission

SUMMARY

대용량 정보의 전송을 위해 다양한 무선통신 주파수가 활용되고 있다. 특히 무선 이동통신에 신규 주파수가 도입되면 주파수 특성에 대한 전자파 인체노출량에 대한 새로운 평가 기준이 필요하다. 전자파 흡수전력밀도(Absorbed Power Density, APD)는 6 GHz 이상의 주파수에 대하여 전자파 인체노출의 평가기준으로 논의되고 있다. 전자파 수치해석을 통한 흡수전력밀도의 인체노출량 경향성을 분석하고 기존 평가기준인 전자파 입사전력밀도와 전자파 흡수전력밀도 간의 상관관계를 분석한다. 입사전력밀도와 흡수전력밀도 간의 상관성은 전력간의 투과율로 근사할 수 있으나 흡수전력밀도의 경우 인체등가용액의 유전율에 의해 최대 전력을 전달할 수 있는 주파수가 달라져 이론적인 투과율과는 차이가 발생한다. 이를 개선하기 위해 대역폭을 갖는 안테나 및 관련 시스템을 활용하면 투과율의 편차를 최소화할 수 있다. 또한 다중 송신기 환경에서 각 송신기 조합에 대해 SAR 볼륨스캔을 수행해야 하는 사례를 최소화하기 위해 해석적인 방법을 도출한다. 이를 위해 SAR 분포를 2차원 가우시안 형태로 모델링하는 새로운 분석 기법을 제안하였고, 이 기법은 psSAR, SAR 분포폭, SAR 간 피크 간 거리를 이용해 두 SAR 분포의 중첩 시 증가량을 근사적으로 계산할 수 있으며, 이를 통해 특정 기준을 만족하는 면제거리(exemption distance)를 산출할 수 있다. 실제 양산 단말기를 대상으로 수행한 SAR 볼륨스캔 결과와 제안 모델의 예측 결과를 비교한 결과, 분포 형상, 피크 위치, SAR 증가량이 유사한 경향을 보임을 확인하였고, 제안된 면제기준이 실측 기반으로 검증하였다.

본 연구는 고주파 기반 5G·6G 단말기에서 요구되는 고주파 전자파 흡수전력밀도(APD) 등 인체노출 평가 기술의 정확도와 효율성을 향상시키는 데 일정 근거를 제시할 수 있으며, 동시노출 평가의 과도한 보수성을 완화할 수 있는 실용적 기준을 제시한다. 또한 고주파 대역의 APD, IPD 간 상관성을 규명하고, 동시노출 평가 기준을 실증적으로 검증함으로써 향후 국제 표준화 및 규제 고도화에 활용 가능한 기술적 기반을 제공한다.

“이면은 공백임”

목 차

그림목차	14
제 1 장 연구 배경 및 목적	19
제 1 절 연구 배경 및 목적	19
제 2 장 고주파 전자파 흡수전력밀도 표준화 진행현황	23
제 1 절 고주파 전자파 흡수전력밀도(APD) 표준화 현황	23
제 2 절 고주파 전자파 흡수전력밀도(APD) 연구기술	26
제 3 장 수치해석 기반 고주파 흡수전력밀도 평가방법 연구	43
제 1 절 인체영향 평가기준	43
제 2 절 흡수전력밀도(APD) 해석조건	46
제 3 절 흡수전력밀도(APD) 시뮬레이션	54
제 4 절 흡수전력밀도(APD) 측정	68
제 4 장 동시노출 간소화 평가기술 연구	83
제 1 절 동시노출 인체영향 평가	83
제 2 절 SAR 분포 특성	91
제 3 절 1차원 SAR 분포 모델링 및 합성	96
제 5 장 결론 및 향후 계획	133
제 1 절 고주파 전자파 흡수전력밀도 표준화 진행현황	133
제 2 절 수치해석 기반 고주파 흡수전력밀도 평가방법 연구	133
제 3 절 동시노출 간소화 평가기술 연구	134
제 6 장 참고문헌	137

그 립 목 차

그림 1-1. ITU WRC-23	20
그림 1-2. 주파수 대역별 인체노출량 평가방법	20
그림 2-1. IEC/IEEE 63572 회람 의견	23
그림 2-2. IEC/IEEE 63572 APD 평가방법	24
그림 2-3. 고주파 흡수전력밀도(APD) 평가방법 분류	26
그림 2-4. APD 측정 기준면 (검토 안)	27
그림 2-5. 전자파 흡수율(SAR) 평가시스템	28
그림 2-6. psSAR와 psAPD 변환계수	29
그림 2-7. 10 GHz 이하 SAR 측정 Cube와 흡수전력밀도 평균 면적 비교	29
그림 2-8. SPEAG社 DASY8 APD Module	30
그림 2-9. 인체 모델에 기반한 APD 모의인체 모델	30
그림 2-10. APD 측정 시스템	31
그림 2-11. 반사율 팬텀의 APD 평가	32
그림 2-12. 반사율 팬텀 기반의 APD 측정설비 구성	33
그림 2-13. 반사율 팬텀 기반의 APD 측정 결과	34
그림 2-14. Cavity-fed dipole arrays (CFD)	35
그림 2-15. Pyramidal horns with slot arrays (HSA)	36
그림 2-16. IR 기반 열역학 측정에 기반한 APD 평가 방법의 개략도 ...	37
그림 2-17. IR 기반 측정 시스템 예시	38
그림 2-18. 저손실 팬텀 기반의 APD 측정시스템 예시	39
그림 2-19. 증강 OTA 기법을 이용한 APD 평가 순서도	41
그림 2-20. Validation of the OTAA for APD measurements	41
그림 3-1. 전자파 흡수율 측정 장비 (SPEAG DASY SYSTEM)	44
그림 3-2. 전자파 흡수전력밀도 측정 장비 (SPEAG DASY SYSTEM) ..	45
그림 3-3. 인체노출 기준주파수 (Yellow: SAR, Blue: PD)	46
그림 3-4. 패치 안테나 (6 GHz)	47
그림 3-5. 패치 안테나 (10 GHz)	48

그림 3-6. 패치 안테나 (30 GHz)	49
그림 3-7. 혼안테나 (Ka-band)	50
그림 3-8. 혼안테나 모사구조 (케이스 포함)	51
그림 3-9. 혼안테나 모사구조 (케이스 제거)	51
그림 3-10. 혼안테나 입력파와 반사파	52
그림 3-11. 혼안테나 전기장 분포 (27 GHz)	53
그림 3-12. 시뮬레이션 해석 구조	55
그림 3-13. 모의 인체 유전특성	56
그림 3-14. 전기장의 입사, 반사, 투과 현상 (수직편파)	57
그림 3-15. 안테나 단독 공진 최적화 조건에서의 임피던스	60
그림 3-16. 안테나 단독 공진 최적화 조건에서의 파라미터	60
그림 3-17. APD/IPD/SAR (안테나 단독 공진 최적화 조건)	61
그림 3-18. APD와 SAR 상관관계 (안테나 단독 공진 최적화 조건)	62
그림 3-19. APD와 IPD 상관관계 (안테나 단독 공진 최적화 조건)	62
그림 3-20. 안테나와 모의인체 통합 조건에서의 임피던스	64
그림 3-21. 안테나와 모의인체 통합 조건에서의 파라미터	64
그림 3-22. APD/IPD/SAR (안테나와 모의인체 통합 조건)	65
그림 3-23. APD와 SAR 상관관계 (안테나와 모의인체 통합 조건)	66
그림 3-24. APD와 IPD 상관관계 (안테나와 모의인체 통합 조건)	66
그림 3-25. CASE 1과 CASE 2 결과	67
그림 3-26. APD와 SAR 상관관계 (CASE 1과 CASE 2 통합)	67
그림 3-27. 8 GHz 패치 안테나 구조	68
그림 3-28. 전자파 무반향실 구조 및 안테나 거치	69
그림 3-29. 안테나 임피던스 및 방사패턴	69
그림 3-30. 전자파 흡수전력밀도 (APD) 측정 시스템 구성	70
그림 3-31. 전자파 입사전력밀도 (IPD) 측정 시스템 구성	71
그림 3-32. APD 및 IPD 측정결과 (8GHz)	72
그림 3-33. 전자파 인체등가용액 접촉 전후의 임피던스 변화	74
그림 3-34. 28 GHz 1×4 배열 패치 안테나 및 측정 시스템, 방사패턴 ...	76
그림 3-35. 신규 APD 측정 시스템	77

그림 3-36. 28 GHz 안테나 APD 측정 구성	79
그림 3-37. APD 및 IPD 측정결과 (28GHz)	80
그림 3-38. 28GHz 대역 인체조직 등가용액 접촉유무에 따른 임피던스 변화	81
그림 4-1. 무선 휴대기기의 전자파 동시노출 사례	84
그림 4-2. IEC/IEEE 62209-1528 Alternative 1	85
그림 4-3. IEC/IEEE 62209-1528 Alternative 2	86
그림 4-4. IEC/IEEE 62209-1528 Alternative 3	86
그림 4-5. IEC/IEEE 62209-1528 Alternative 4	87
그림 4-6. 전자파동시노출 평가절차	89
그림 4-7. 전계 분포와 SAR 분포 비교	91
그림 4-8. 주파수별 SAR 분포 형태	92
그림 4-9. 주파수별 SAR 분포 형태 (평면도)	93
그림 4-10. SAR 측정 분석 시스템	94
그림 4-11. SAR 분포 비교 (시뮬레이션 vs. 측정)	95
그림 4-12. 1차원 SAR 분포 모델링	97
그림 4-13. 1D 가우시안 분포 합성	98
그림 4-14. 1D 가우시안 분포 합성 시 최대위치	99
그림 4-15. 가중평균 예시	100
그림 4-16. 가중평균을 통한 합성 가우시안 분포 최대값	101
그림 4-17. 거리별 가중평균을 통한 합성 가우시안 분포	102
그림 4-18. 거리별 A/σ^k 가중평균을 통한 합성 가우시안 분포	105
그림 4-19. 거리별 1차 미분근사식을 통한 합성 가우시안 분포	107
그림 4-20. 2D 가우시안 분포 모델링	109
그림 4-21. 2D 가우시안 분포 합성	111
그림 4-22. 2D 가우시안 분포 합성 시 최대위치	112
그림 4-23. A/σ^k 가중평균을 통한 2D 합성 가우시안 분포	114
그림 4-24. 편미분 근사식을 통한 2D 합성 가우시안 분포	115
그림 4-25. SAR 분포 비교 (시뮬레이션, 측정, 가우시안 모델)	117
그림 4-26. 합성 SAR 분포 비교 (측정, 가우시안 모델)	119

그림 4-27. 합성 SAR 모델의 측정 면제기준 개념	119
그림 4-28. 합성 SAR 모델기반 heatmap 구성	123
그림 4-29. Mockup test : 835 MHz(P3)+ 2570 MHz(P4)	125
그림 4-30. Mockup test : 1920 MHz(P3)+ 2570 MHz(P4)	127
그림 4-31. 상용 단말기 안테나 배치 및 측정 시스템 구성	128
그림 4-32. 볼륨 스캔 측정결과 (835 MHz + 2570 MHz)	129
그림 4-33. 볼륨 스캔 측정결과 기반 heatmap (835 MHz + 2570 MHz)	130
그림 4-34. 볼륨 스캔 측정결과 (1710 MHz + 2570 MHz)	131
그림 4-35. 볼륨 스캔 측정결과 기반 heatmap (1710 MHz + 2570 MHz)	132

“이면은 공백임”

제1장 연구 배경 및 목적

제1절 연구 배경 및 목적

이동통신 기기의 정보통신 기술의 비약적인 발전과 더불어, 이동통신 서비스는 5G를 넘어 6G 시대로의 진입을 준비하고 있다. 특히, 고주파 대역을 활용하는 차세대 통신 기술은 초고속·초저지연·초연결 특성을 실현하기 위해 전례 없는 수준의 대역폭과 출력 밀도를 요구하고 있다. 이에 따라 인체가 노출되는 전자파 환경 또한 기존의 주파수 대역과는 확연히 다른 특성을 가지게 되며, 이에 상응하는 전자파 인체영향 평가기술의 정립이 요구된다. 기존의 전자파 인체노출량 평가는 대부분 특정 주파수 대역에서의 전자파 흡수율(SAR, Specific Absorption Rate)을 기준으로 수행되어 왔다. 그러나 6G 서비스에서 활용이 예상되는 upper-mid band 및 sub-THz (110 GHz 이상) 대역에서는 전자파의 침투 깊이가 얇고 국소적인 흡수가 지배적이므로, 흡수전력밀도(APD, Absorbed Power Density) 기반의 새로운 평가기술이 필요하다. 이와 같이 기술 패러다임의 전환은 새로운 전자파 인체영향 평가 기준 및 시험 시스템의 도입을 필수적으로 요구하고 있다.

전자파 인체영향에 대한 정확한 평가는 국민의 건강을 보호하고, 동시에 새로운 통신 기술의 상용화를 위한 제도적 기반 마련에 필수적이다. 특히, 6G 시대의 핵심 후보 주파수로 제시되고 있는 lower band(4.4~4.8 GHz), upper-mid band, sub-THz 대역은 그 특성상 기존 평가 시스템과 명확히 구분되는 기술적 접근이 필요하다. 특히 그림 1-1과 같이 국제전기통신연합(International Telecommunication Union, ITU) 주관 2023년 세계전파통신회의(World Radiocommunication Conference 2023, WRC-23)에서 6G 주파수 대역으로 상용화에 유리한 upper-mid band (7.125~15.35 GHz)에 대한 검토를 시작하는 등 신규 주파수에 대한 통신 서비스에 대한 구체적인 방안 검토가 필요하다. 신규 대역인 upper-mid band 대역의 흡수전력밀도(APD)를 측정 기준으로 활용하는 것이 권장되며, 이를 위한 측정 시스템의 프로토타입이 국내에 2025년 도입될 예정으로 관련 기술의 선제적 연구가 요구된다 [1][2]. 또한, 그림 1-2와 같이 국제표준화기구인 IEC TC106 및 IEC/IEEE TR 63572 ED1에서는 인체등가용액 기반 또는 고체 유전체 기반의 다양한 흡수전력밀도 측정시스템이 제안되고 있으며, 각 주파수 대역별로 최적화된 시스템 구성이 필요하다 [3]. 인체노출 평가의 정확도와 효율성을 확보하기 위해서는 주파수 특성에 따른 인체등가용액 구성, 모의인체 설계, 유전율 조정 등을 포함한 정밀한 평가기술 확보가 선행되어야 한다. 그리고 여러 송신 시스템의 동시 운용에 따른 복합 전자파 노출 조건도 현실적인 고려 요소가 된다.

본 연구는 위와 같은 기술적 전환 및 산업적 요구를 반영하여, 다음과 같은 목표를 지닌다. 첫째, 고주파 대역의 신규 전자파 인체노출량(APD)에 대한 정량적 평가기술을

체계화하고, 관련 시스템의 설계 및 수치해석 모델을 고도화한다. 둘째, 국제표준 동향에 부합하는 인체등가용액 기반 측정시스템의 프로토타입을 분석하고, 이로부터 도출되는 측정 결과의 유효성을 확보한다. 셋째, 다수의 송신 시스템을 포함한 복합 노출 환경에서의 전자파 인체노출량 평가를 위한 간소화 수식을 개발함으로써, 현실적인 평가체계를 구축한다.

ITU World Radiocommunication Conference 2023 (WRC-23)

Dubai, United Arab Emirates
20 November to 15 December 2023

Spectrum pipeline ensuring the continued 5G growth across regions and enabling future 5G Advanced and 6G use cases

Key Agenda Items

1.1 — IMT in the 4.8-4.99 GHz band

Considers conditions for which the band 4800-4990 MHz could be used by terrestrial component of IMT.

1.2 — IMT in the 3.5 GHz, 6 GHz, and 10-10.5 GHz bands

Considers identification of bands 3300-3400 MHz (Region 2 and Region 1), 3600 - 3800 MHz (Region 2), 6425-7025 MHz (Region 1), 7025-7125 MHz (globally), and 10.0-10.5 GHz (Region 2) for IMT.

1.3 — Mobile use of the 3.6-3.8 GHz band in Region 1

Considers possible primary allocation in Region 1 to the mobile service (except aeronautical) in the band 3600-3800 MHz.

1.5 — Consideration of sub-1 GHz spectrum in Region 1

Reviews the spectrum use and needs of existing services in the band 470-960 MHz and consider possible regulatory actions in the band 470-694 MHz.

10 — Plan for new 6G coverage band

Proposing an agenda item for WRC-27 to study key upper mid-bands for 6G across all 3 regions, i.e., 7.125-15.35 GHz

Region 1: Europe, Africa, the Commonwealth of Independent States, Mongolia, and the Middle East west of the Persian Gulf, including Iraq.
Region 2: Americas including Greenland, and some of the eastern Pacific Islands.
Region 3: Most of non-FSU Asia east of and including Iran, and most of Oceania.

그림 1-1. ITU WRC-23

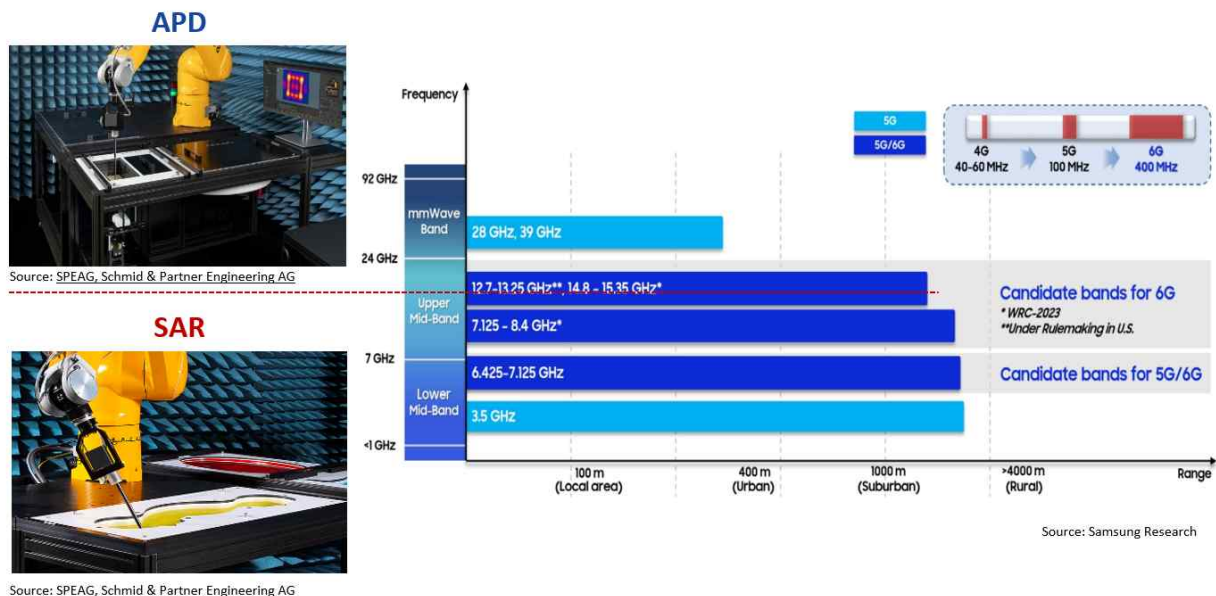


그림 1-2. 주파수 대역별 인체노출량 평가방법 [2]

본 연구는 다음 네 가지 세부 추진 목표를 중심으로 수행된다. 1) 신규 전자파 인체 노출량(APD) 측정 시스템의 구성과 국제표준 기반 분석을 진행하고 2) 인체등가용액 기반의 측정시스템의 설계, 측정기법 개발, 결과 검증을 통해 3) 고주파 대역에서의 수치 해석 기반 인체노출량 평가기술 개발을 세부 목표로 한다. 그리고 4) 다수 송신 시스템의 동시노출 조건에 대한 평가 간소화 및 평가기준 마련하는 것도 목표로 한다.

본 연구의 수행 범위는 크게 다섯 가지로 나누어 정리할 수 있다.

첫째, 고주파 대역의 신규 전자파 인체노출량(APD)에 대한 국내외 기술 동향을 분석하고, 주요 주파수 조건별로 요구되는 평가시스템의 구성요소와 특징을 파악한다. 특히, IEC TC 106에서 논의 중인 기술 기준을 중심으로 평가 방법론의 정합성을 확보한다. 둘째, 인체등가용액 기반의 프로토타입 측정시스템을 구성하여 실제 upper-mid band 조건에서 측정을 수행하고, 흡수전력밀도와 입사전력밀도의 상관관계를 정량적으로 분석한다. 기존 SAR 기준과의 비교를 통해 이중 측정 조건에서의 해석 가능성도 검토한다. 셋째, 전자파 수치해석 모델링 기법을 적용하여 고주파 대역에서의 전자파 인체노출량(APD)의 경향성을 정량적으로 도출한다. 안테나의 배열 구조 및 위상 조건이 전자파 분포에 미치는 영향을 중심으로 전자기장 해석을 수행한다. 넷째, 고주파 대역에서 측정 기반 결과와 수치해석 기반 결과를 연계한 전자파 인체노출량 평가기술을 정립하고, 이를 기반으로 향후 제도화 및 표준화에 반영할 수 있는 기술 기반을 구축한다. 다섯째, 다수의 송신 시스템이 구성된 상용 단말기에 대한 전자파 동시노출 조건을 측정하고, 이를 간소화하기 위한 근사 수식 모델을 개발한다. 이 과정에서 복합 전자기장 분포 간의 상호작용 분석 및 이격거리 변수에 따른 영향성 분석이 수행된다.

“이면은 공백임”

제2장 고주파 전자파 흡수전력밀도 표준화 진행현황

제1절 고주파 전자파 흡수전력밀도(APD) 표준화 현황

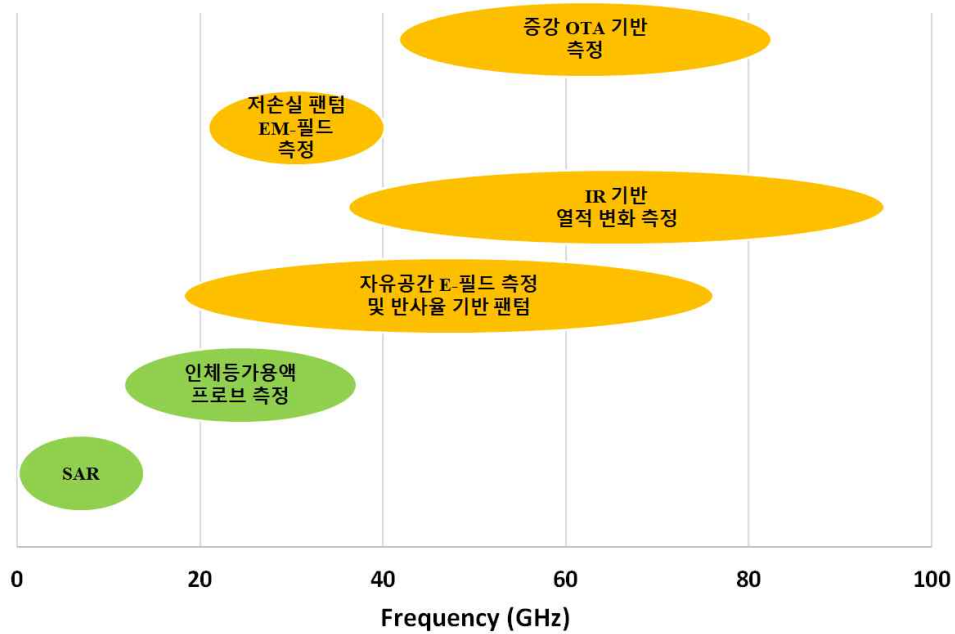
1. IEC/IEEE DTR 63572

전자파 흡수전력밀도(APD)에 대한 표준 개발은 지속적으로 진행되고 있으며 특히 기술 보고서인 IEC/IEEE TR 63572 ED1에서 흡수전력밀도(APD) 평가방법에 대한 논의가 대표적으로 진행되고 있다 [3]. IEC/IEEE TR 63572 ED1의 후속 작업인 IEC/IEEE DTR 63572에서는 지속적으로 논의되었던 고주파 흡수전력밀도(APD) 평가방법의 전반에 대하여 구체적으로 다루고 있으며, 인체등가용액 기반의 고주파 흡수전력밀도(APD) 기법과 고체 팬텀 기반의 고주파 흡수전력밀도(APD) 평가방법을 구체적으로 설명하고 있다 [4]. 현재 IEC/IEEE 63572 기술보고서 초안(Draft Technical Report, DTR)에 대하여 IEC 회원국의 회람을 진행하였고 그림 2-1은 주요 국가기관별 의견을 정리한 것이다. 대부분 정의 및 편집 오류가 많았고, 일부 기술적인 수정에 대한 의견도 있다. 기술보고서의 초안 정리본의 배포는 2025년 2Q에서 2025년 4Q로 변경되었다.

국가/기관	코멘트 수	주요 이슈	수용 여부
캐나다 CANC/IEC	21	정의 오류, 근거부족, 용어 통일, 편집 오류	8 Accepted, 6 Revised, 5 Noted, 1 Rejected
스위스 CES	12	정의 오류, 용어 및 단위 오류	8 Accepted, 3 Revised, 1 Noted
스웨덴 IEC National Committee of Sweden	4	정의 오류	1 Accepted, 1 Revised, 1 Rejected
남아프리카공화국 IEC National Committee of South Africa	2	편집 오류	2 Accepted
체코 IEC National Committee of Czech Republic	3	정보 오류, 단위 표기 오류	2 Accepted, 1 Noted

그림 2-1. IEC/IEEE 63572 회람 의견

그림 2-2는 IEC/IEEE DTR 63572에서 다루고 있는 주요 고주파 전자파 흡수전력밀도 (APD) 측정방법을 나타낸다. 그림 2-2 (a)는 주파수별 고주파 흡수전력밀도(APD) 평가 방법을 표현한 것이고 그림 2-2 (b)는 측정 매질로 APD 평가방법을 구분하였다.



(a) 대역별 흡수전력밀도 평가방법

인체등가용액	자유공간
주파수 대역 (6~30 GHz)	주파수 대역 (6~300 GHz)
SAR 측정결과 및 변환계수를 통한 APD 측정	반사율을 고려한 모의인체 APD 측정
	적외선 열적반응을 이용한 APD 측정
PD 측정용 프로브 및 인체등가용액을 통한 APD 측정	저손실 모의인체 기반 APD 측정
	증강 OTA 기반 APD 측정

(b) 측정방법 별 흡수전력밀도 평가방법

그림 2-2. IEC/IEEE 63572 APD 평가방법

그림 2-2 (a)에서 가로축은 각 평가방법별 주파수 대역을 나타낸다. 실제 사용 가능한 주파수 대역은 넓지만 IEC/IEEE DTR 63572 및 관련 논문에서 테스트 및 언급된 주파수에 한정하여 정리하였다. 그림에서 녹색으로 표시된 부분이 인체등가용액을 사용한 평가 방법이고, 노란색으로 표시된 부분은 고체형 모의인체(팬텀)을 활용한 방법을 나타낸다. 현재까지 연구 개발된 인체등가용액 기반 APD 평가방법은 등가용액 및 측정 시스템의 민감도를 고려하여 30 GHz 이하 주파수에서 평가할 수 있는 방법이 논의 중이며, 자유 공간에서 고체형 모의인체를 이용하는 측정 방법은 10 GHz 대역에 대해 적용가능할 것으로 언급되고 있으나 실제 대부분의 사례는 28 GHz 및 60 GHz 대역 등 5G/6G 등 밀리미터파와 같은 신규 통신대역에 대한 연구가 진행되고 있다.

2. IEC/IEEE 63195-3/4

IEC/IEEE DTR 63572 기술보고서를 기반으로 아래와 같이 IEC/IEEE 63195-3/4 표준화가 개발 중에 있다. IEC/IEEE 63195-3/4는 IEC/IEEE DTR 63572에 기반한 고주파 대역 전자파흡수전력밀도(APD) 측정 및 시뮬레이션 평가 절차를 표준화하고 있다 [5][6].

- 1) IEC/IEEE 63195-3: Assessment of Power Density of Human Exposure to Radio Frequency Fields from Wireless Devices in Close Proximity to the Head and Body (Frequency Range of 6 GHz to 300 GHz) Part 3: Measurement Procedures for Absorbed Power Density
- 2) IEC/IEEE 63195-4: Assessment of Power Density of Human Exposure to Radio Frequency Fields from Wireless Devices in Close Proximity to the Head and Body (Frequency Range of 6 GHz to 300 GHz) Part 4: Computational Procedures for Absorbed Power Density

IEC/IEEE 63195-3의 경우 IEC/IEEE DTR 63572에서 제안하고 있는 측정 평가기술을 포함하고 있으며, 관련한 정의 및 절차 등을 언급하고 있다. IEC/IEEE 63195-4의 경우 유한요소법(Finite Element Method, FEM), 유한 차분 시간 영역법(Finite-Difference Time-Domain Method, FDTD)등을 기반으로 한 시뮬레이션 결과 평가 절차를 나타낸다. 상기 2개 표준화 목표일정은 2025년 5월 CD (Committee Draft) 개발완료, 2026년 3월 CDV (Committee Draft for Vote) 개발완료, 2026년 11월 CDV CR (CDV Comment Resolution) 완료, 2027년 1분기 FDIS (Final Draft International Standard) 완료를 목표로 하였으나 2025년 12월 현재 CD를 위한 draft 버전을 검토 중이다.

제2절 고주파 전자파 흡수전력밀도(APD) 연구기술

1. 고주파 흡수전력밀도(APD) 평가방법 분류

IEC/IEEE DTR 63572 및 IEC/IEEE 63195-3/4과 같은 고주파 흡수전력밀도(APD) 관련 표준에서는 다양한 평가방법이 제안되고 있다. 고주파 흡수전력밀도(APD)의 평가방법은 그림 2-3과 같이 크게 3가지로 분류할 수 있다. 그림 2-3 (a)는 인체등가용액 기반 측정 방법, 그림 2-3 (b)와 그림 2-3 (c)는 자유공간에서 고체 모의인체(팬텀) 기반 측정 방법을 나타낸다. 고체 모의인체 측정 방법은 측정 프로브에 따라 전기장 프로브 이용 방식, 온도 프로브 또는 IR 영상센서 이용 방식으로 구분된다 [3][4].

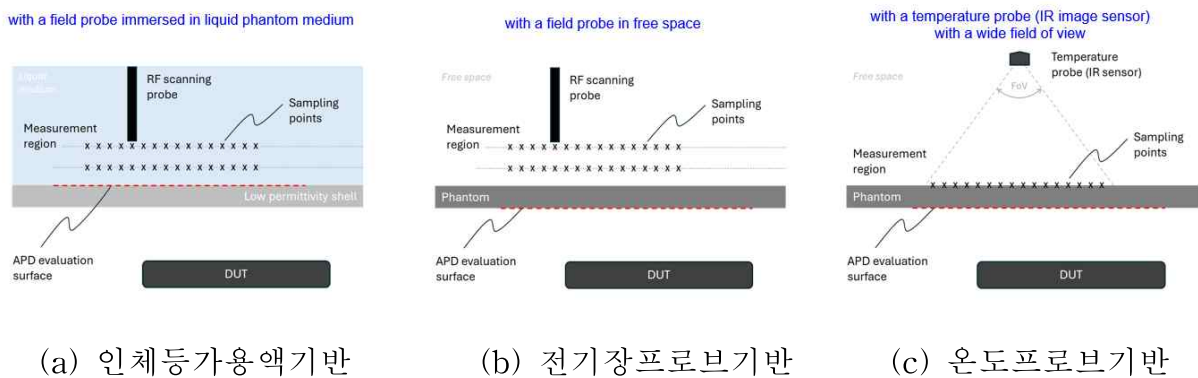


그림 2-3. 고주파 흡수전력밀도(APD) 평가방법 분류

인체등가용액 기반 APD 측정방법은 기존 전자파 흡수율 측정방법과 유사하게 주파수에 적합한 인체등가용액을 저유전체로 구현된 모의인체 케이스에 넣고 용액 내의 전기장 프로브를 이용하여 측정하는 방법이다. 고체 모의인체 기반 APD 측정방법은 전자기장을 형성하는 기기와 측정용 프로브 사이에 판상의 고체 모의인체를 두고 측정하는 방식이며, 이때 고체 모의인체는 유전율에 따른 반사율이 고려되어야 한다.

APD 측정 기준면에 대한 정의는 확정된 내용은 아니며 IEC TC106에서 지속 논의 중이다. 그림 2-4와 같이 APD 측정을 위한 팬텀은 실제 인체 피부의 전자기적 반사 특성을 재현하기 위해 skin model surface와 virtual phantom outer surface의 두 개의 기준면으로 정의된다. 이 중 skin model surface는 APD가 평가되는 측정면(evaluation surface)으로, 기준 피부 모델의 반사계수를 재현하도록 설계되며, virtual phantom outer surface는 DUT의 위치를 정의하기 위한 기준면으로 사용된다. 두 표면 사이에는 가상 팬텀 셀(virtual phantom shell)이 형성되며, 그 두께는 법선 방향 기준으로 2

mm(± 0.05 mm)로 규정된다. DUT 표면과 virtual phantom outer surface 간의 거리를 d_s 라 할 때, DUT 표면과 APD 평가면인 skin model surface 간의 실제 거리는 $d = d_s + 2\text{mm}$ 로 정의된다. 이와 같은 구조는 DUT의 위치 설정과 APD 평가면을 명확히 분리함으로써, SAR 측정에 사용되는 팬텀 기하 구조와의 정합성을 유지하면서도 고주파 대역에서의 인체 표면 전력 흡수 특성을 일관되게 평가하기 위한 것이다. 팬텀의 형상은 평가 대상 인체 부위에 따라 평면 또는 SAM 팬텀 곡면 구조를 적용하며, 모든 경우에 APD는 skin model surface에서 평가된다.

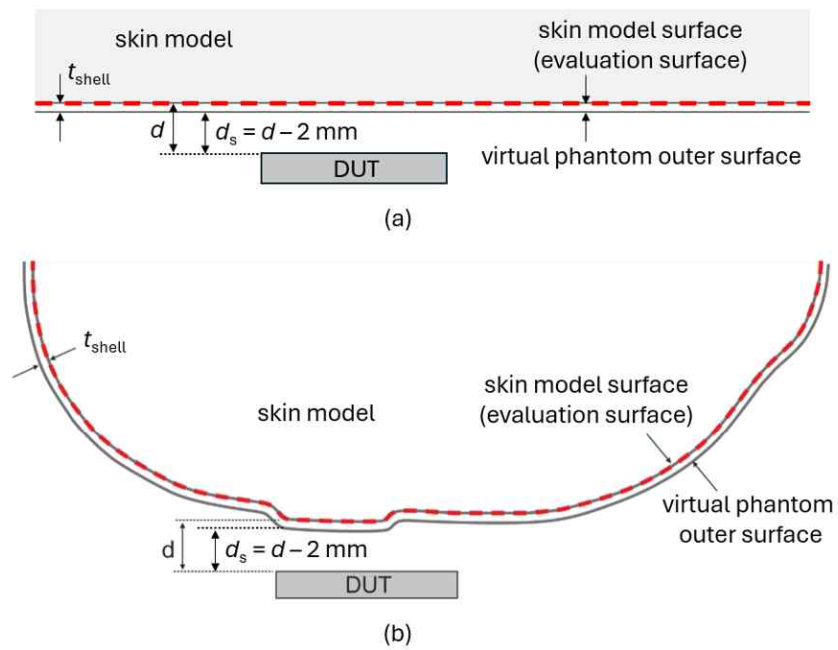


그림 2-4. APD 측정 기준면 (검토 안) [5]

2. 고주파 전자파 흡수전력밀도(APD) 연구기술

가. SAR 측정시스템을 이용한 흡수전력밀도 평가 [3][7][8]

그림 2-5는 10 GHz 이하 기기의 전자파흡수율(SAR)을 측정할 수 있는 측정 시스템을 나타낸다. 전자파흡수율 측정은 인체형상 모형의 용기에 모의인체용액을 넣고 프로브로 측정하는 방식이다. 10 GHz 이하의 주파수에 대해서는 SAR 측정결과를 활용하여 전자파 흡수전력밀도(APD)를 도출할 수 있다.



그림 2-5. 전자파 흡수율(SAR) 평가시스템

IEC/IEEE TR 63572, IEC PAS 63446 :2022에서는 SAR 측정결과에서 변환계수를 적용하여 흡수전력밀도(APD) 평가하는 방법[3][7]이 제안되어 있으며 식 (2-1)로 표현된다.

$$APD_{ab}(r) = \frac{1}{A_{av}} \iint_{A_{av}} \int_0^{z_{\max}} \rho(r) SAR(r) dz dx dy \quad \text{식 (2-1)}$$

PSAPD 변환을 위한 psSAR cube에 대한 일부 가정이 필요하다. PSAPD 변환은 SAR 분포를 기반으로 하며 팬텀 표면의 전력은 팬텀에서 전파되는 모드가 우세하다. 인체로 전달되는 거의 모든 에너지가 팬텀 표면의 해당 입방체적에서 흡수되며 SAR Cube 측면을 통한 전력 누출이 크지 않고, psSAR을 psAPD로 변환하기 위해 psAPD의 평균 영역의 치수는 psSAR 큐브의 표면과 동일하다고 가정한다.

psAPD는 아래 그림 2-6에 제시된 대략적인 변환 계수 CFa와 함께 식 (2-2)를 사용하여 주어진 평균 질량에 대한 psSAR에서 변환된다.

$$psAPD_{averagingarea} \approx psSAR_{averagingmass} \cdot CF_a \quad \text{식 (2-2)}$$

<u>psAPD</u> averaging area [cm ²]	<u>psSAR</u> averaging mass [g]	CF_a [kg/m ²]
1	1	10
4	8	20

그림 2-6. psSAR와 psAPD 변환계수 [3]

변환계수를 이용한 흡수전력밀도 평가의 장점은 전자파흡수를 측정설비인 DASY SAR 측정설비의 측정결과에서 변환계수를 적용하여 APD로 후처리하여 구할 수 있기 때문에 기존 SAR 측정설비를 활용할 수 있다는 것이다. 다만, SAR 측정설비의 측정 주파수 제약으로 평가 주파수가 10GHz 주파수 대역을 초과하여 적용할 수 없는 단점이 있다. 그림 2-7은 1g SAR 체적과 1 cm² 면적의 흡수전력밀도의 평가면적, 10g SAR 체적과 4 cm² 면적의 흡수전력밀도의 평가면적을 나타낸다.

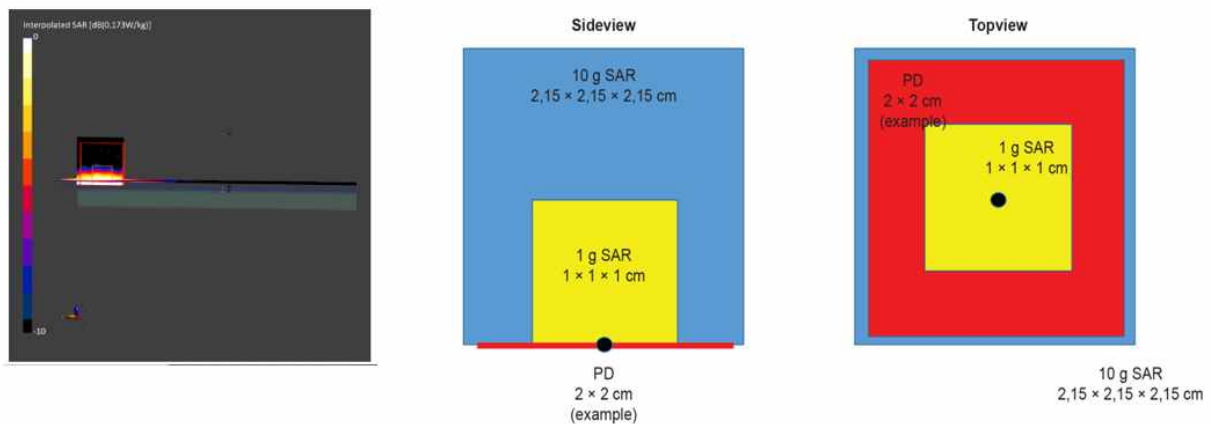


그림 2-7. 10 GHz 이하 SAR 측정 Cube와 흡수전력밀도 평균 면적 비교 [3]

나. 전자기파 흡수 측정 프로브와 인체등가용액을 이용한 APD 평가 [3][8]

흡수전력밀도(APD)를 평가하기 위한 한 방법으로, 인체 특성과 유사한 유전체 재료로 구성된 모의 인체 모델을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다 [12]. 이 평가 기법은 주로 24GHz에서 33GHz에 이르는 밀리미터파(mmWave) 주파수 대역에서의 결과를 반영하며, 해당 대역 특성상 피부조직을 단순화하여 균질 매질로 가정할 경우 고주파 유도에

의한 온도 상승을 실제보다 낮게 예측할 가능성이 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 실제 인체의 피부 구조를 고려하여 각질층, 표피, 진피, 피하지방, 근육 등의 다층 구조를 반영한 계층형 모델이 설계되었다.

이 모의인체는 외피에 약 2mm 두께의 폼 스페이서가 추가되어, 측정 대상 장치(DUT)가 피부 표면으로부터 2mm 거리에서 측정될 수 있도록 한다. 구조적으로는 전통적인 쉘-액체(TSL: 조직 등가 액체) 방식과 달리, 폼-쉘-액체 구성 방식을 채택하며, APD 측정은 액체층 내부에서 수행된다. 이로 인해 실질적으로는 DUT로부터 2mm 거리의 피부 표면에서 발생하는 APD가 평가 대상이 된다. 해당 측정 시스템과 모의인체 모델은 각각 그림 2-8과 그림 2-9에 도식화되어 있다.

Source: Horn ($d = 0 \text{ mm}$, $P_{in} = 18 \text{ dBm}$)

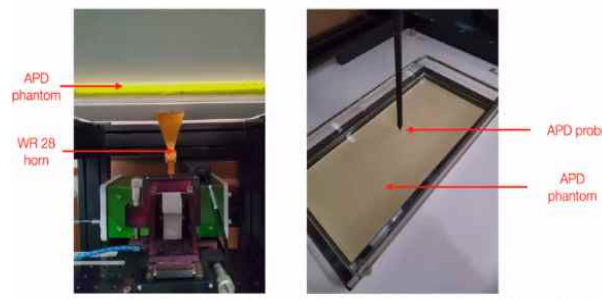
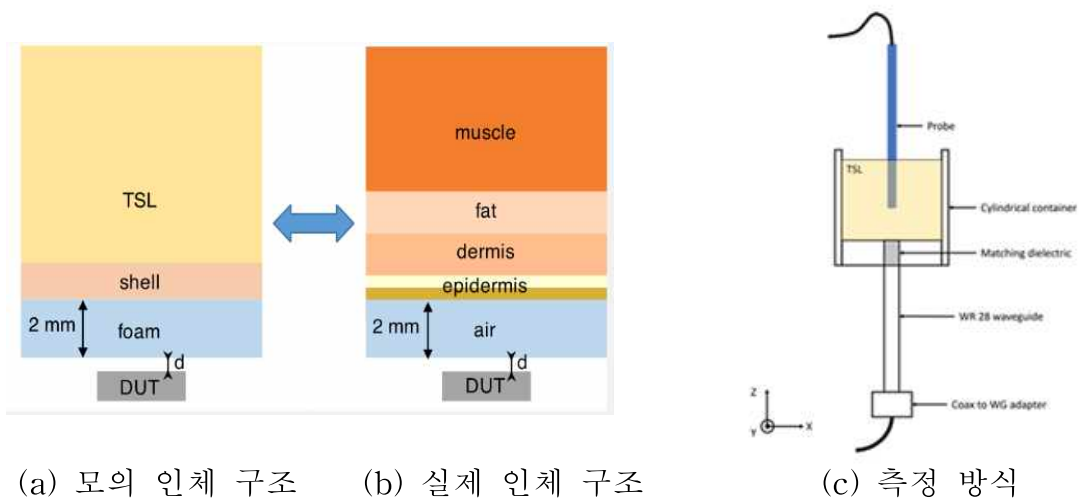


그림 2-8. SPEAG社 DASY8 APD Module



(a) 모의 인체 구조

(b) 실제 인체 구조

(c) 측정 방식

그림 2-9. 인체 모델에 기반한 APD 모의인체 모델 [3]

IEC/IEEE DTR 63572에 대한 회람문서에서 2mm 두께의 폼을 추가하면 APD와 SAR 등 동시노출 합산에 영향을 줄 수 있으므로 이를 보상할 수 있는 평가방법의 추가적인 제안이 필요하다는 의견이 있었고, 이에 대하여 2mm 두께의 폼은 저손실이므로 SAR 평가 시 기준거리인 2mm와 동일한 위치로 간주할 수 있다는 내용으로 논의되었다. 그림

2-10은 전자기파 흡수 측정 프로브와 인체등가용액을 이용한 APD 측정 시스템의 예시를 나타낸다. 그림 2-10 (a)는 APD 전체 시스템 형상을 나타낸다. 그림 2-10 (b)는 APD 측정용 전용 프로브형상을 나타내며, 기존 전자파흡수율(SAR) 대비 프로브 센서가 상대적으로 작음을 알 수 있다. 그림 2-10 (c)는 인체등가용액을 포함하는 모의인체 구조 형상을 나타낸다. 측정 시스템의 동작 주파수는 10 GHz~300 GHz이며, 인체등가용액을 주파수에 따라 변경해야 한다.



(a) 모의 인체 구조



(b) 프로브 구조



(c) 모의인체 구조

그림 2-10. APD 측정 시스템

다. 반사율 기반 인체모형(Phantom) 기반의 APD 평가

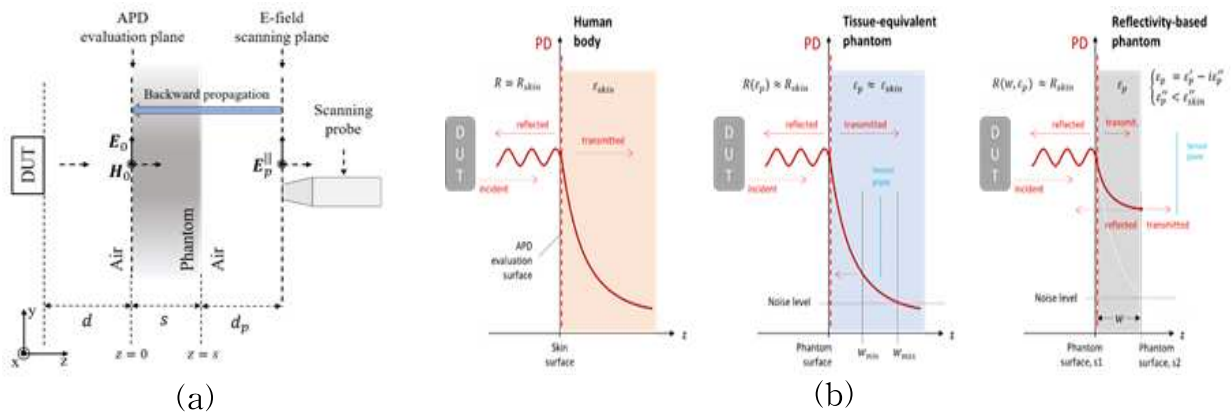
6 GHz를 초과하는 고주파 대역에서는 전자기장이 인체조직의 표면에서 급격히 감쇠되며, 이로 인해 전자파의 생체 조직 내부 침투 깊이는 수백 마이크로미터 수준으로 제한된다. 이러한 특성은 기존의 인체 등가 유전체 재료를 활용한 팬텀 내부에서 전계를 직접적으로 측정하기 어렵게 만든다. 이에 대한 대안으로, 반사계수(reflection

coefficient)를 기반으로 하는 팬텀 구조와 측정 방법이 제안되었으며, 이는 내부 측정보다 외부 반사 특성을 활용하여 흡수 전력 밀도를 간접적으로 평가할 수 있는 방식이다 [8-11].

이 평가 접근법은 얇고 고체 재료로 구성된 평면 팬텀을 사용하며, 이는 인체 피부 표면에서 나타나는 산란 특성을 모사하도록 설계되었다. 기존의 액체 형태의 조직 등가 매질(Tissue Simulating Liquid, TSL)에 비해 유지·관리 측면에서 유리하며, 장기적 사용에 적합하다. 또한 이 팬텀은 인체와 유사한 방식으로 측정 대상 장치(DUT)의 전자기장을 변형시킬 수 있으며, 내부 손실을 최소화하는 재료 특성을 활용하여 설계되었다.

그림 2-11은 측정 셋업을 나타낸다. 측정 셋업은 DUT - 팬텀 - 프로브의 순서로 구성되며, 프로브는 팬텀 표면에 직접 접촉하지 않고 일정 거리 떨어진 위치에서 자유공간상의 전자기장을 측정한다. 이와 같은 비접촉 측정은 신호대잡음비(SNR)를 향상시키며, 측정 위치의 견고성을 확보하는 데 유리하다. 실제 APD 계산은 팬텀 표면을 기준으로 하며, 프로브로부터 획득된 전자기장 데이터를 역전파(back propagation) 알고리즘을 통해 재구성함으로써 해당 면의 APD 값을 도출하게 된다.

이 방식의 중요한 이점은 팬텀 재료가 생체조직의 복합 유전율(complex permittivity)을 반드시 재현하지 않아도 된다는 점이다. 주어진 주파수 범위 내에서 인체 피부의 반사 특성만 충실히 구현하면, 충분한 정확도로 전자파 인체 노출량을 평가할 수 있기 때문이다.



(a) 자유 공간 E-필드 벡터 측정에 기반 한 APD 평가 방법의 개략도

(b) (1) 인체, (2) 피부의 복합 유전율을 재현하는 팬텀, (3) 반사율 기반 팬텀. 적색 곡선은 신체 표면에 직교하는 z축을 따라 인체 팬텀 외부와 내부의 일반적인 전력밀도

그림 2-11. 반사율 팬텀의 APD 평가 [3]

그림 2-12는 반사 기반 방식으로 구성된 APD 측정 시스템의 전체 구조를 도식화한 것이다. 시스템 내에서 VNA(Vector Network Analyzer)는 10MHz에서 26.5GHz 범위에서 동작하며, 고주파(RF) 신호를 생성하는 핵심 장치로 활용된다. 여기에 연결된 VNAX(확장 모듈, Vector Network Analyzer Extension Modules)은 측정 가능 주파수

범위를 5GHz부터 최대 75GHz까지 확장하는 기능을 수행하며, 생성된 고주파 신호는 WR15 도파관을 통해 측정 대상 기기(DUT)에 전달된다.

DUT로부터 일정 거리(d) 떨어진 위치에 모의인체가 배치되며, 팬텀을 통과하는 전기장의 진폭 및 위상은 테이퍼형 선형 편파 개방형 도파관(tapered linearly polarized open-ended waveguide)을 이용해 측정된다. 이 측정 프로브는 자동화된 위치 제어 장치(positioning controller)에 장착되어 있으며, 수평 평면에서의 정밀한 필드 스캔을 가능하게 한다.

측정된 전자기 신호는 증폭된 후 VNAX 트랜시버를 통해 전기적 신호로 변환되어 VNA의 두 번째 포트에 전달된다. 이때, 프로브는 팬텀과의 전자기적 간섭을 최소화할 수 있도록 충분히 이격된 위치에 설치되어야 한다. 시스템은 0.49 dB 이내의 APD 측정 불확도를 유지하도록 설계되었으며, 최종적인 흡수전력밀도(APD) 값은 정재파 특성 및 역전파(back propagation) 분석을 통해 산출된다 [8-11].

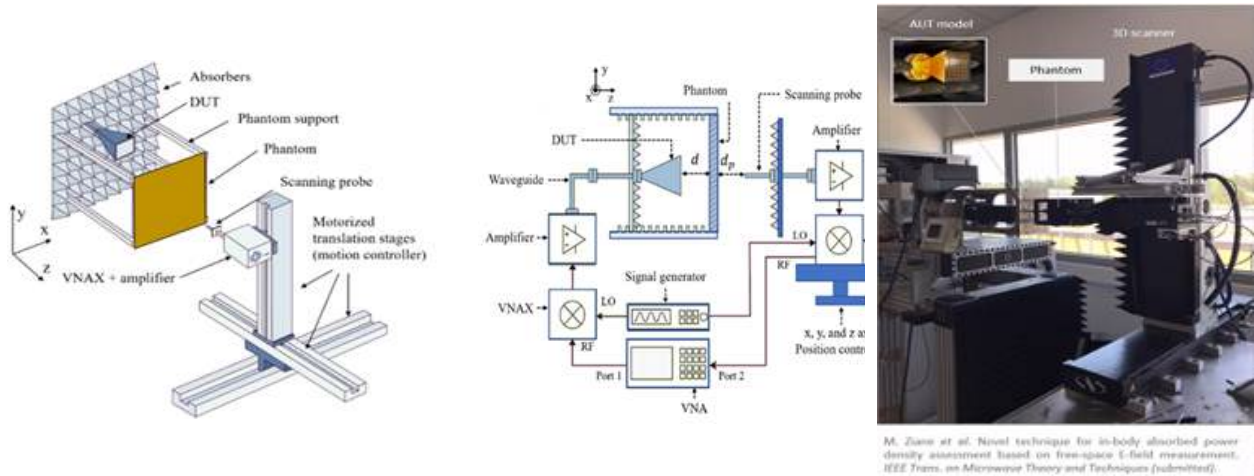


그림 2-12. 반사율 팬텀 기반의 APD 측정설비 구성 [12]

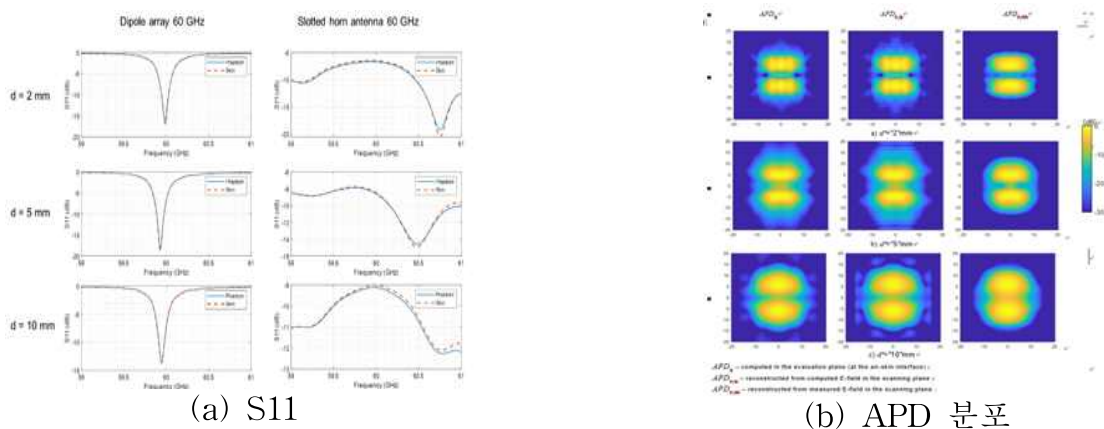
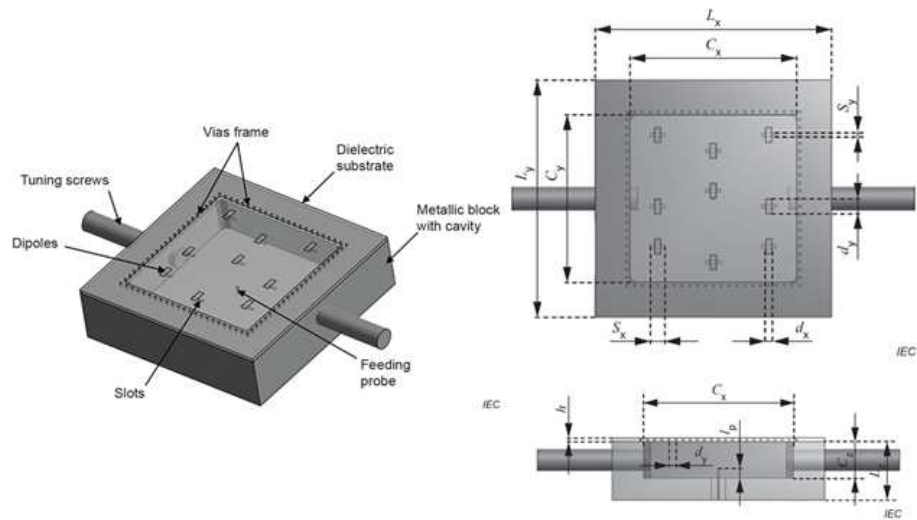


그림 2-13. 반사율 팬텀 기반의 APD 측정 결과 [12]

그림 2-13은 흡수전력밀도(APD) 측정 결과를 시각적으로 나타낸 것이다. 먼저 그림 2-13 (a)는 안테나와 팬텀 간의 이격 거리에 따른 반사계수(S11)를 분석한 그래프를 제시하고 있으며, 팬텀이 인체 피부의 유전 특성을 효과적으로 모사하고 있음을 시사한다. 특히 60GHz 대역에서의 반사계수 차이가 최대 0.1 dB 이내로 매우 미미하여, 해당 팬텀 구조의 전자기학적 정합성이 우수함을 확인할 수 있다. 그림 2-13 (b)는 세 가지 서로 다른 조건에서 측정된 APD 분포 결과를 비교하고 있다. 첫 번째는 이론적으로 가정한 피부 표면에서의 APD 분포, 두 번째는 조직 등가 유전체 물질을 포함한 팬텀 기반 측정값이며, 세 번째는 반사계수 기반 팬텀을 활용하여 도출된 결과이다. 이들 데이터 간의 정량적 비교를 통해 세 조건에서의 APD 분포는 95% 이상의 높은 상관성을 보여주며, 반사율 기반 팬텀 방식이 기존 측정 방식과 유사한 신뢰도를 확보할 수 있음을 보여준다 [8-11].

그림 2-14와 그림 2-15는 APD 측정을 위해 사용한 안테나를 나타낸다. 그림 2-14는 Cavity-Fed Dipole Arrays (CFD)의 형상, 주파수별 사이즈, 전자기장 분포를 나타낸다. 그림 2-15는 Pyramidal horns with slot arrays (HSA)의 형상, 주파수별 사이즈, 전자기장 분포를 나타낸다 [4].



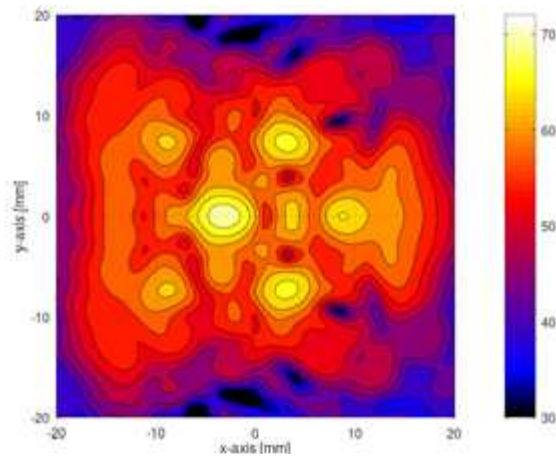
Main dimensions for the cavity-fed dipole arrays – 30 GHz design

(a) 안테나 구조

Table B.2 – Main dimensions for the cavity-fed dipole arrays at each frequency of interest

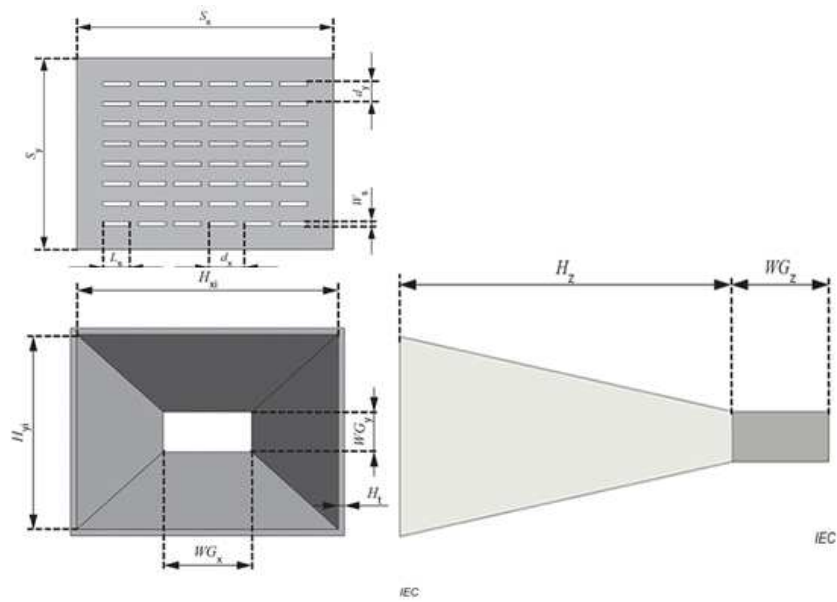
Frequency [GHz]	Number of dipoles and slots along x	Number of dipoles and slots along y	Dipole width d_x [mm]	Dipole length d_y [mm]	Slot length s_x [mm]	Slot width s_y [mm]
10	3	3	2,40 $\pm 0,05$	5,10 $\pm 0,05$	5,70 $\pm 0,05$	1,20 $\pm 0,05$
30	3	3	0,8 $\pm 0,05$	1,86 $\pm 0,05$	1,90 $\pm 0,05$	0,40 $\pm 0,05$
60	3	3	0,40 $\pm 0,025$	0,986 $\pm 0,025$	0,95 $\pm 0,025$	0,20 $\pm 0,025$
90	3	3	0,267 $\pm 0,02$	0,640 $\pm 0,02$	0,613 $\pm 0,02$	0,113 $\pm 0,02$

(b) 주파수별 안테나 사이즈



(c) 전기장 분포

그림 2-14. Cavity-fed dipole arrays (CFD) [4]



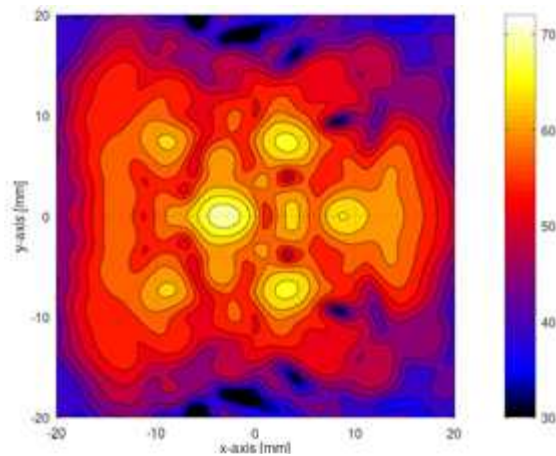
Main dimensions for the pyramidal horn antennas

(a) 안테나 구조

Table B.6 – Main dimensions for the stencil with slot array for each frequency

Frequency	Stencil length S_x	Stencil width S_y	Stencil thickness	Number of slots along x	Number of slots along y	Slot length L_s	Slot width W_s	raster of slots along x d_x	raster of slots along y d_y
[GHz]	[mm]	[mm]	[mm]			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
10	70,75 $\pm 0,01$	52,60 $\pm 0,01$	0,150 $\pm 0,01$	3	5	17,5 $\pm 0,01$	2,4 $\pm 0,01$	22,0 $\pm 0,015$	10,0 $\pm 0,015$
30	42,50 $\pm 0,01$	33,80 $\pm 0,01$	0,150 $\pm 0,01$	6	7	5,40 $\pm 0,01$	0,80 $\pm 0,01$	6,70 $\pm 0,015$	4,47 $\pm 0,015$
60	23,40 $\pm 0,01$	18,78 $\pm 0,01$	0,150 $\pm 0,01$	5	8	2,75 $\pm 0,01$	0,42 $\pm 0,01$	4,00 $\pm 0,015$	2,08 $\pm 0,015$
90	16,70 $\pm 0,01$	13,40 $\pm 0,01$	0,150 $\pm 0,01$	6	8	1,80 $\pm 0,01$	0,30 $\pm 0,01$	2,30 $\pm 0,015$	1,40 $\pm 0,015$

(b) 주파수별 안테나 사이즈



(c) 전기장 분포

그림 2-15. Pyramidal horns with slot arrays (HSA) [4]

라. IR 기반 열역학 측정 기반의 APD 평가 방법

전자파의 인체 흡수 시 발생하는 열적 반응을 흡수전력밀도의 평가방법 [3][4]으로 적용하는 방법도 연구 중이다. 그림 2-16은 열역학적 측정에 기반한 APD 평가방법의 예시를 나타낸다.

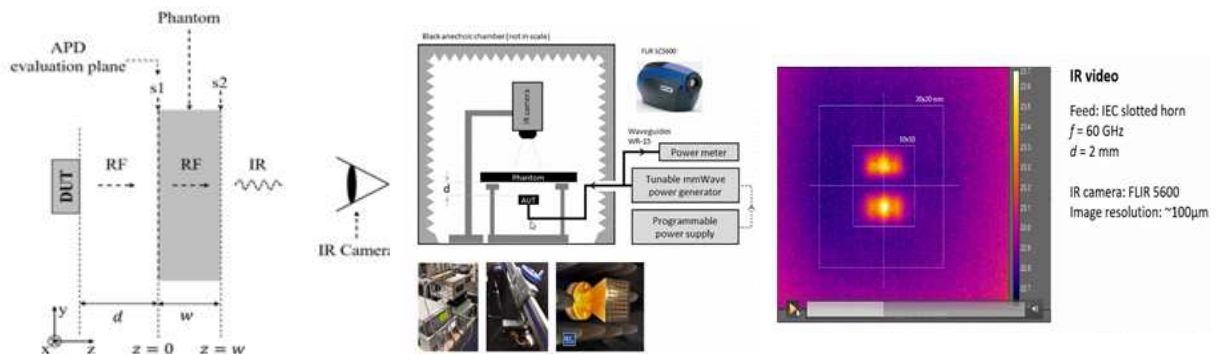


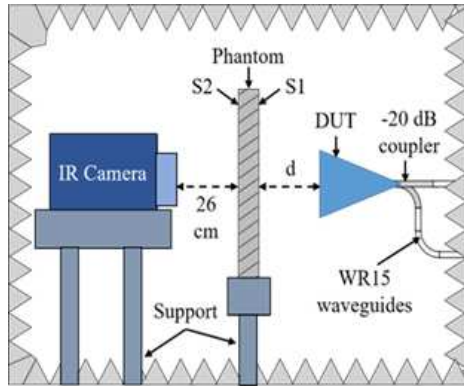
그림 2-16. IR 기반 열역학 측정에 기반한 APD 평가 방법의 개략도 [12]

적외선 이미징 기법은 전자기파에 노출된 표면에서 발생하는 이차적인 열 분포를 원격으로 관측할 수 있는 유용한 수단이다. 이 방식은 물리적인 접촉이나 복잡한 보정 과정 없이, 유도된 2차원 열 패턴을 방해받지 않고 측정할 수 있다는 점에서 높은 비침습성과 실시간성이 장점으로 작용한다. 특히, 얇은 구조의 반사계수 기반 팬텀과 결합하여 활용할 경우, 전체 팬텀 표면에 대해 DUT의 작동 주파수 전 대역에 걸친 신속한 APD 평가가 가능해진다. 기존의 RF 기반 평가방법에서는 포인트 단위로 필드를 스캔하거나 위치 정렬 및 방향 보정을 필요로 하는 반면, 적외선 열 영상 방식은 이러한 복잡한 절차 없이도 전체 면적에 대한 고속·고해상도 측정이 가능하다. 또한, 해당 기법은 서브밀리미터 수준의 공간 분해능을 확보할 수 있어 재구성된 APD 분포의 정확도가 높고, 측정 오차가 줄어드는 특징이 있다. 이 방식은 비공진형 수동 계측법에 해당하며, 단일 IR 촬영만으로도 광대역 및 다중 주파수 대역의 평가가 동시에 가능하다. 특히 주파수가 높아질수록 유전 손실로 인해 전자기 에너지가 열 에너지로 더욱 효과적으로 전환되므로, 6GHz 이상의 고주파 영역에서 더욱 효율적인 APD 평가 방법으로 활용될 수 있다.

팬텀은 마이크로파 에너지를 열 에너지로 변환하는 기능을 수행하는 얇은 고체 흡수체로, 인체 피부의 전자기 반사 특성을 모사하도록 정밀하게 설계되었다. 해당 구조는 실제 인체와 유사하게 DUT에 부하(load)를 주도록 최적화되었으며, 반사계수의 일치를 통해 DUT 동작 시 조건을 유사하게 재현한다.

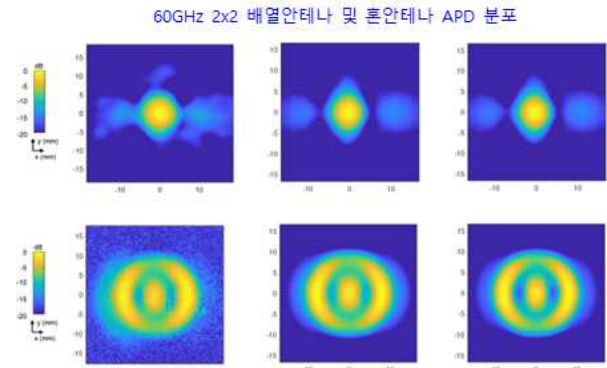
이 팬텀의 두께는 일반적으로 1mm에서 2mm 사이로 설정되며, 이는 대용량 체적 팬텀(bulk phantom)에 비해 더 많은 국소적인 온도 상승을 유도하여 신호대잡음비(SNR)

개선에 기여한다 [3][12-14].



측정 설정의 도식적 표현

(a) 측정시스템



(b) APD 분포

그림 2-17. IR 기반 측정 시스템 예시 [12]

DUT는 팬텀의 전면 표면인 S1 지점으로부터 거리 d 만큼 이격된 위치에 배치된다. DUT에 외부 전원이 공급되는 경우에는 방향성 커플러 및 파워 미터를 활용하여 공급 전력의 크기를 정밀하게 제어할 수 있다. 반면, 팬텀의 반대편 표면인 S2 면에서 유도되는 열 분포는 고감도 적외선 카메라(온도 분해능: 0.02°C)를 통해 기록된다.

검증 실험에 활용된 IR 카메라는 640×512 해상도를 가지며, 실측 기준 거리에서 이는 약 $140\mu\text{m}$ 의 공간 해상도에 해당한다. 팬텀과 카메라 간의 26cm 거리는 사용된 대물렌즈의 시야각과 촬영 대상 면적에 따라 설정된 값으로, 장비의 특성에 따라 조정이 필요할 수 있다. 그림 2-17은 반사율 기반 팬텀을 활용한 APD 측정 결과를 보여준다. 그림 2-17 (a)는 60GHz에서 2×2 배열의 패치 안테나를 사용하여 인체 피부 표면에서 유도된 APD를 측정하는 시스템 설정을 나타내며, 그림 2-17 (b)에서는 시뮬레이션 결과와 측정값 간의 정량적 유사도 분석 결과를 제시한다. 이 분석에서 패치 안테나 어레이는 98% 이상의 상관계수, 혼 안테나는 95%의 상관성을 보여 실제 측정과 수치 해석 간의 강한 일치도를 확인할 수 있다 [3][12-14].

마. 저손실 모의인체 기반 APD 평가

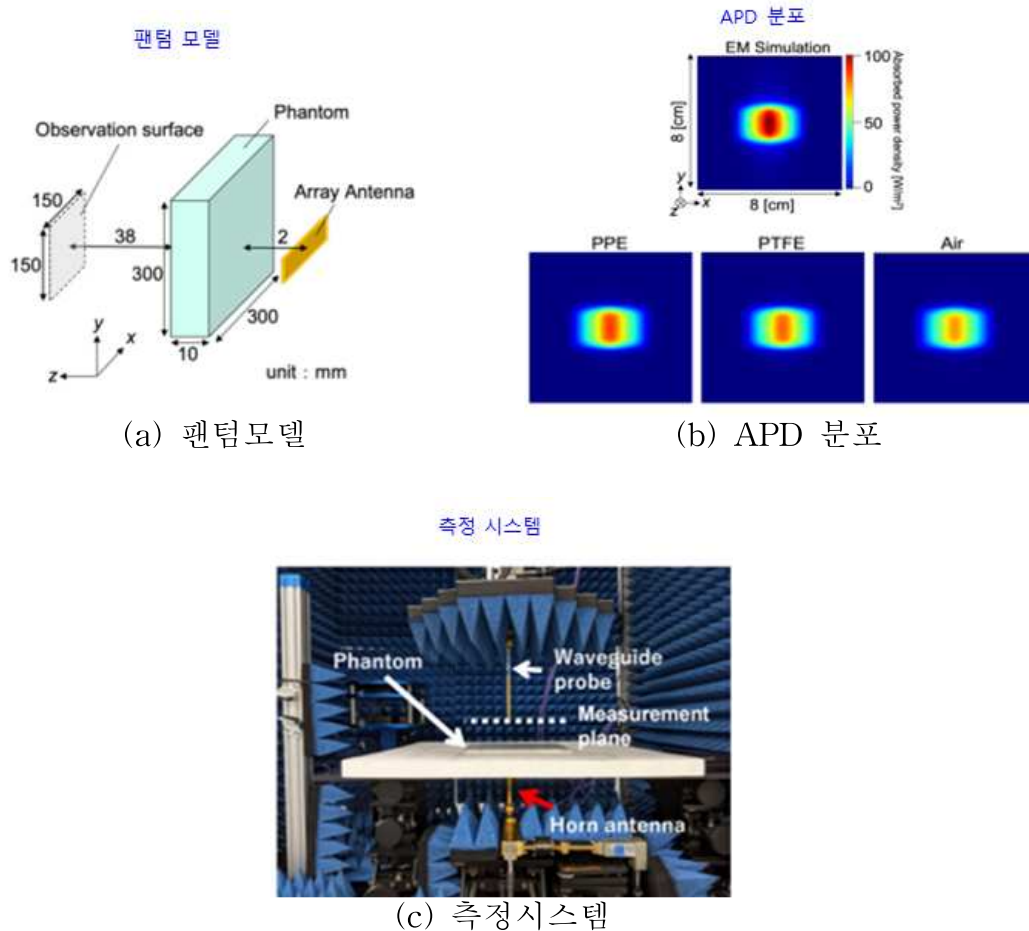


그림 2-18. 저손실 팬텀 기반의 APD 측정시스템 예시 [12]

그림 2-18은 저손실 팬텀을 기반으로 한 흡수전력밀도(APD) 평가기법의 사례를 제시한다[12]. 그림 2-18 (a)에는 정규화된 역소스 기법(regularized inverse source method, ISM)을 적용한 측정 시스템의 구성과 결과가 나타나 있다. 이 기법은 특정 거리만큼 떨어진 안테나에서 방사된 전자기장이 저손실 유전체를 투과할 때 형성되는 전자기장 분포가, 동일한 안테나 조건 하에서 피부 등가 팬텀 내부에서 발생하는 전자기장 분포와 유사하다는 가정을 기반으로 한다. 해당 분포를 역산해 정규화된 ISM 알고리즘을 적용하여 APD 분포를 재구성하는 방식이다.

그림 2-18 (b)에서는 수치해석으로 생성한 APD 분포를 기준으로 하고, 이를 다양한 저손실 유전체 물질을 활용한 측정 결과와 비교하였다. 사용된 재료는 PPE(Polyphenylene Ether), PTFE(Polytetrafluoroethylene), 그리고 공기(air)이며, 공기는 가장 낮은 유전율을 갖는 매질로 간주된다. 비교 결과, PPE와 PTFE의 경우 시뮬레이션 기준 대비 최대 1 dB 수준의 차이, 공기의 경우 1.3 dB 정도의 오차를 보이며, 제안된 방법이 수치적으로도 신뢰성 있는 결과를 제공함을 확인할 수 있다 [3][15-18].

바. 전자기장과 열 측정을 복합 적용한 APD 평가

전자기장과 열 특성을 결합하여 분석하는 복합 평가기법(hybrid electromagnetic and thermal measurements)은 APD(흡수전력밀도)를 평가하는 데 있어, 전자기장에 의한 온도 변화와 전자기장 분포를 동시에 측정함으로써 보다 총체적인 물리량 해석을 가능하게 한다[3][4]. 본 방식은 전자기 노출로 인해 물체 내부 또는 표면에서 유도되는 열 효과를 실시간으로 관찰함으로써, 전자기장이 대상 환경 및 재료에 미치는 열적 영향에 대한 정량적 분석이 가능하다는 점에서 유용성이 크다.

특히, RRA(Radio Resource Allocation) 설정이 특정되지 않거나 시점별로 달라질 수 있는 상황에서는, 팬텀 내부 또는 외부, 혹은 표면에 배치된 복수의 전자기장 센서(probe)를 통해 얻어진 전기장 및 자기장 데이터를 시간 동기적으로 수집하고, 이를 기반으로 온도 기반 APD를 추론하는 보완적 평가 방식이 적용된다.

시분할 다중 접속(TDMA)이나 빔 포밍과 같은 기능을 포함한 무선통신 단말의 경우, 안테나에서 방사되는 전기장이 팬텀 표면의 전체 영역에 도달하는 시간 분포가 달라질 수 있다. 이러한 특성은 특히 동적으로 자원을 할당하는 디바이스에서 두드러지며, 이로 인해 테스트 시간 동안 RRA 설정이 변경될 수 있으므로, APD 결과 보정 시에는 특정 RRA 보정 계수의 적용이 고려되어야 한다.

또한, 해당 측정 방식에서는 팬텀 표면에 입사되는 전자기파의 세기와 공간 분포를 직접 검출하는 프로브를 활용한다. 이 프로브는 DUT에서 발생한 전자기장이 팬텀 외부에 어떻게 도달하는지를 계측하는 데 사용되며, 결과적으로 이 정보는 온도 기반 APD 평가에 있어 중요한 입력 데이터로 활용될 수 있다.

사. 증강 OTA(Over The Air Augmented) 기법을 이용한 APD 평가

증강 OTA(Over-the-Air Augmentation, OTAA) 방식을 활용한 APD(Absorbed Power Density) 평가기법 [3][4][19]은 실제 OTA 측정 데이터와 전자기장 전파에 대한 전파 해석(FEM, FDTD 등 Full-Wave Electromagnetic Simulation)을 결합하여 인체 노출량을 정량적으로 도출하는 접근법이다. 그림 2-19는 이와 같은 OTAA 기반 APD 평가 절차의 개략적인 흐름을 시각적으로 나타낸 것이다.

이 기법은 전체적으로 네 단계로 구성되며, 다음과 같은 절차를 따른다.

1단계에서는 측정 대상 장치(DUT)와 송신 안테나 주변의 전자기 환경을 다양한 조건에서 OTA 방식으로 반복 측정한다. 여기에는 DUT의 동작 조건, 방사 방향, 전력 조건 등이 포함된다. 2단계는 측정된 OTA 데이터를 바탕으로, DUT 주변에 형성되는 전자기장을 등가 전류 분포(equivalent current distribution) 형태로 재구성하는 과정이다. 이때 획득된 등가 전류는 실제 송신원과 유사한 역할을 수행하게 된다. 3단계에서는 앞서 얻어진

등가 전류 분포를 전자파 시뮬레이션의 입력 조건으로 활용하여, 팬텀을 포함한 전파 환경 내에서의 EM 시뮬레이션을 수행한다. 여기서의 등가 전류는 디지털 트윈 개념으로 확장될 수 있으며, 실제 측정 결과를 반영한 현실 기반의 시뮬레이션으로 이해될 수 있다. 4단계는 마지막으로, 전자기 수치해석 결과를 기반으로 팬텀 내부 또는 표면에서의 APD 분포를 계산하고 평가하는 단계이다.

이와 같은 OTAA 기반 접근법은 OTA 측정과 해석 간의 상호 연계성을 강화함으로써, 실제 환경에서의 DUT 방사 특성 및 인체 노출 평가 간의 정합성을 확보할 수 있는 현실적이고 확장 가능한 APD 평가 프레임워크를 제공한다.

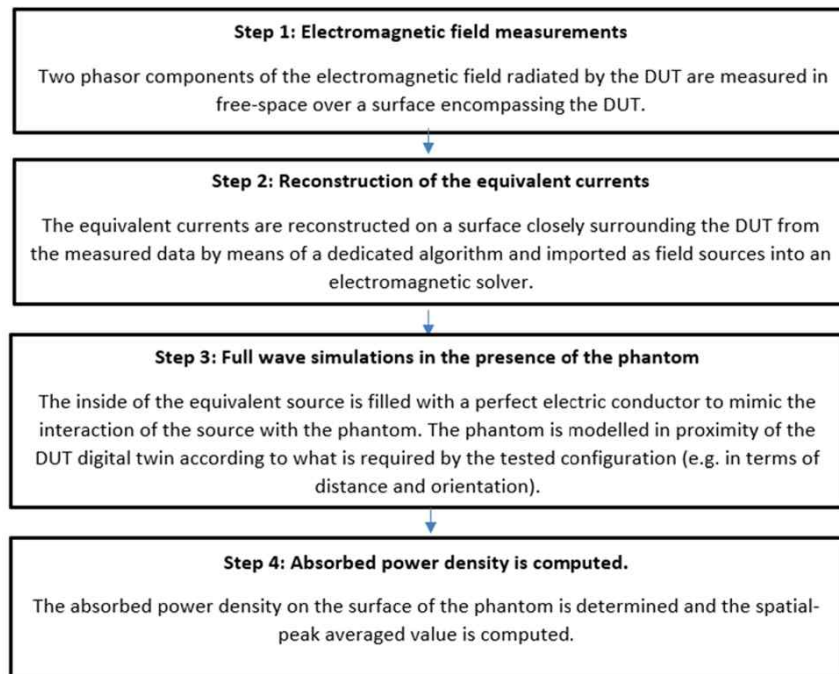
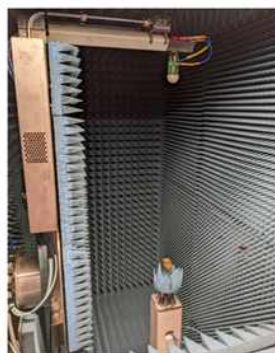


그림 2-19. 증강 OTA 기법을 이용한 APD 평가 순서도 [3][4]



(a)

(b)

Type	Manufacturer	Model
Anechoic chamber	Rohde and Schwarz GmbH	ATS1000
Measurement probe (dual polarized Vivaldi)	Rohde and Schwarz GmbH	TC-TA85CP
Vector network analyzer	Rohde and Schwarz GmbH	ZVA67
Reconstruction algorithm	Rohde and Schwarz GmbH	AMS 32 integrating FIA FTA (Technical University of Munich)
Computational solver	IMST GmbH	Empire XPU

30 GHz		60 GHz	
σ [S/m]	σ	σ [S/m]	σ
27,10	15,51	36,40	7,97

그림 2-20. Validation of the OTAA for APD measurements [3][4][19]

OTAA(Over-the-Air Augmentation) 기법을 기반으로 한 APD 평가 방법의 타당성 분석을 위해, 국제 표준 IEC/IEEE 63195-1에서 규정한 검증용 기준 안테나를 활용하였다. 해당 안테나의 전자파 방사 특성은, 균일한 평면 웨임 조건에서 그림 2-20 (b)에 제시된 인체 조직에 대한 전자기 시뮬레이션 파라미터를 기반으로 수치 해석하여 평가되었으며, 비교 분석 대상 주파수는 30 GHz와 60 GHz이다. 평가 결과, 전자파 수치 해석 기반 APD 시뮬레이션과 OTAA 방식의 계산 결과는 전반적으로 유사한 경향을 나타내어, OTAA 기법의 정확성을 뒷받침한다.

제3장 수치해석 기반 고주파 흡수전력밀도 평가방법 연구

제1절 인체영향 평가기준

1. 전자파 흡수율

전자기장의 주파수에 따라 인체 침투 깊이가 달라지기 때문에 특정 주파수를 기준으로 인체영향 평가 기준을 구분하고 있다. 일반적으로 이동통신 기기의 전자기장 인체노출 기준은 기준 주파수 6 GHz 또는 10 GHz를 중심으로 구분하며, 기준주파수 이하는 인체 전자파 흡수율 (SAR: specific absorption ratio), 기준주파수 이상은 전력밀도(PD: power density)로 구분한다. 일반적으로 이동통신 기기에 적용되는 전자파 인체노출기준은 기준 주파수 10 GHz를 중심으로 구분하며, 기준주파수 이하는 SAR, 기준주파수 이상은 PD (Power Density)로 구분한다.

SAR는 인체 내의 단위 질량당 전력 흡수량을 나타내며 관련 정의는 식 (3-1)로 나타낼 수 있다[20].

$$SAR = \frac{p_{diss}}{m} = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} [W/kg] \quad \text{식 (3-1)}$$

식 (3-1)에서 P_{diss} 는 피부조직 내 흡수되는 전력량 [W], m 은 피부조직의 질량 [kg], σ 는 피부조직의 도전율 (conductivity) [S/m], E 는 전기장의 RMS 세기 [V/m], ρ 는 피부조직의 질량 밀도 [kg/m^3]를 나타낸다. 전자파 흡수율은 단위 질량에 흡수되는 전력량을 측정해야 하므로 전자파 흡수율 측정 장비는 인체 내부에서 프로브를 통해 전력량을 측정할 수 있도록 설비되어야 한다.

그림 3-1은 전자기파에 대한 인체 노출 평가에서 사용되는 전자파 흡수율(SAR, Specific Absorption Rate) 측정 장비의 구성 예를 나타낸다[21]. 이 측정 시스템은 일반적으로 세 가지 주요 구성요소로 나뉜다. 첫째, 인체 내부에 유도된 전기장을 측정하기 위한 프로브와 이를 정밀하게 이동시키는 로봇 팔, 둘째, 인체 형상을 재현한 모의 인체 (phantom)와 그 내부를 채우는 인체 조직 유사 유전 특성을 갖는 용액, 마지막으로 DUT(기기)를 고정하기 위한 지지 구조로 구성된다.

SAR 측정은 인체 내부에서 흡수된 전력을 평가하는 방식이므로, 인체 조직과 유사한

유전율 및 투자율을 갖는 매질이 필요하다. 이를 위해 맞춤 설계된 유전체 용액이 팬텀 내부에 채워지며, 측정용 프로브를 액체 내에 삽입하여 전기장의 세기를 계측한다. 이후, 측정된 전기장을 기반으로 단위 질량당 흡수된 전력량을 계산함으로써 SAR 값을 산출한다.

SAR은 단위 질량 기준의 평균 전력밀도를 의미하므로, 설정된 질량 크기에 따라 결과값이 달라질 수 있다. 예를 들어, 1g 또는 10g 단위의 정육면체 부피를 전기장 최대 위치 중심에 설정하고, 그 내부 전력을 평균하는 방식으로 SAR을 평가한다. 그림 3-1은 이러한 평가 방식에 따라 도출된 SAR 결과 예시를 시각화한 것이다.

측정 기준 질량이 커질수록 동일한 중심 위치를 기준으로 주변 저전력 영역이 더 많이 포함되므로, 10g 조건은 1g 조건보다 평균 SAR 값이 낮게 산출되는 경향이 있다. 따라서, 동일 전기장 분포 내에서도 평가 질량의 크기에 따라 SAR 수치가 달라지며, 이 특성은 고주파 인체노출 평가에서 중요한 변수로 작용한다.

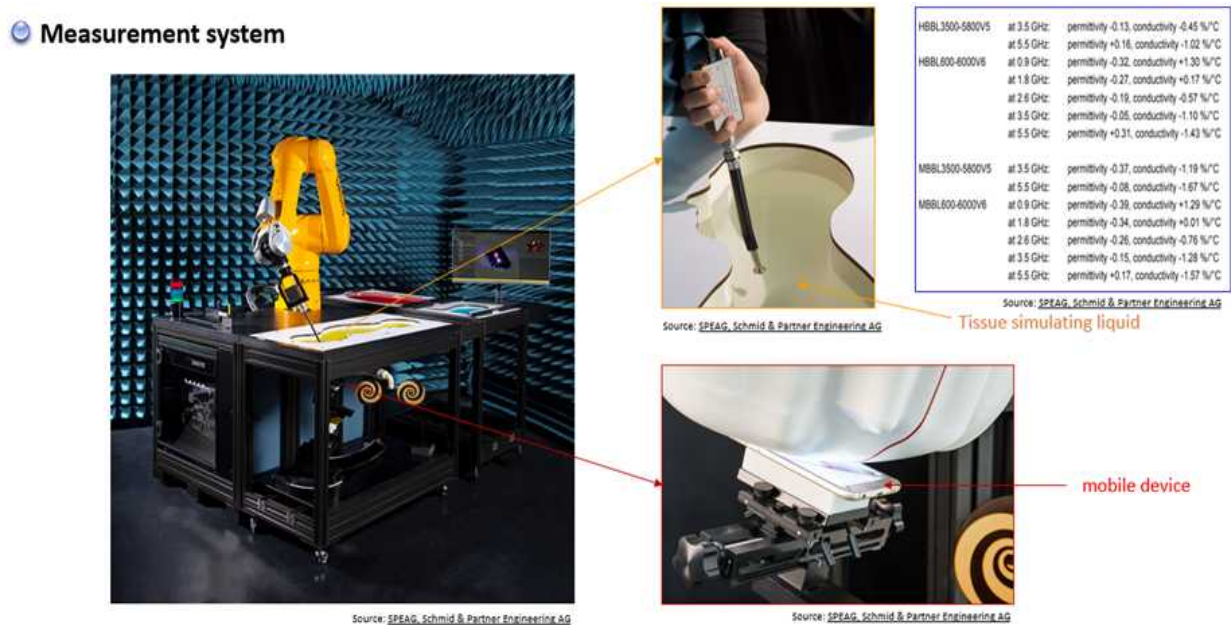


그림 3-1. 전자파 흡수율 측정 장비 (SPEAG DASY SYSTEM) [21]

2. 전력밀도

전력밀도 (Power density, PD)는 인체 표면의 단위 면적 당 전력 흡수량을 나타내며, 식 (3-2)와 같이 Poynting vector의 면적 적분 형태로 표현할 수 있다[20].

$$PD = \frac{1}{2A} \int_A \left| \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*) \right| \cdot ds \text{ [W/m}^2\text{] or [mW/cm}^2\text{]} \quad \text{식 (3-2)}$$

식 (3-2)에서 A 는 단위면적의 크기 [m^2], $\vec{E}$ 는 전기 벡터 [V/m], $\vec{H}^*$ 는 자기 벡터의 켈레복소수 [A/m], Re 는 Poynting vector ($\vec{E} \times \vec{H}^*$)의 실수값을 나타낸다. 전자파 전력밀도는 단위 면적이 연산되는 위치 및 매질에 따라 입사전력밀도 (incident power density, IPD)와 흡수전력밀도 (absorbed power density, APD)로 구분될 수 있다. 밀리미터파와 같이 높은 주파수의 경우 인체 피부표면에 대부분의 전자기장 전력이 밀집되므로 인체영향 평가는 피부 표면에서 이루어져야 하므로 피부 표면 외부의 자유공간에서 측정하는 것이 합리적이므로 입사전력밀도 (IPD)를 고려할 수 있다. 전자파 흡수율 (SAR)과 전자파 전력밀도 (PD)로 구분되는 경계주파수에서는 인체 내부에서 흡수되는 전자파를 고려하기 위해 인체 내부에서 피부 표면 면적을 고려한 흡수전력밀도 (APD)를 고려하는 것이 필요하다.

APD : Internal field test (10GHz~300GHz)



Source: SPEAG, Schmid & Partner Engineering AG

IPD : External field test



Source: SPEAG, Schmid & Partner Engineering AG

그림 3-2. 전자파 흡수전력밀도 측정 장비 (SPEAG DASY SYSTEM) [21]

제2절 흡수전력밀도(APD) 해석조건

1. 기준 안테나

전자파 흡수전력밀도 (APD) 모의시험 및 측정 검증을 위해 기준이 되는 안테나 검토가 필요하다. 기준 안테나는 전자파 흡수율(SAR), 흡수전력밀도(APD), 입사전력밀도(IPD) 측정 시스템에 모두 거치 가능할 수 있는 형태가 필요하다. SAR, APD, IPD 측정 시스템과 안테나 간 거치 오차를 최소화하기 위해 평면형 인체 모형(flat phantom)에 적합한 안테나 형태를 고려해야 하며, 패치 안테나의 형태가 거치 오차를 최소화할 수 있는 형태라 할 수 있다. 그리고 SAR, APD, IPD를 고려하는 경우 주파수 대역이 매우 넓기 때문에 안테나 설계 기준 주파수는 각 전자파 인체 노출량 평가기준을 측정기법이 변경되는 대표 주파수를 기준으로 선정한다. 그림 3-3은 각 기관별 인체노출 기준주파수를 나타내며, 그림 3-3을 기반으로 안테나 설계의 기준 주파수를 6 GHz, 10 GHz, 30 GHz로 선정한다 [20][22-25].

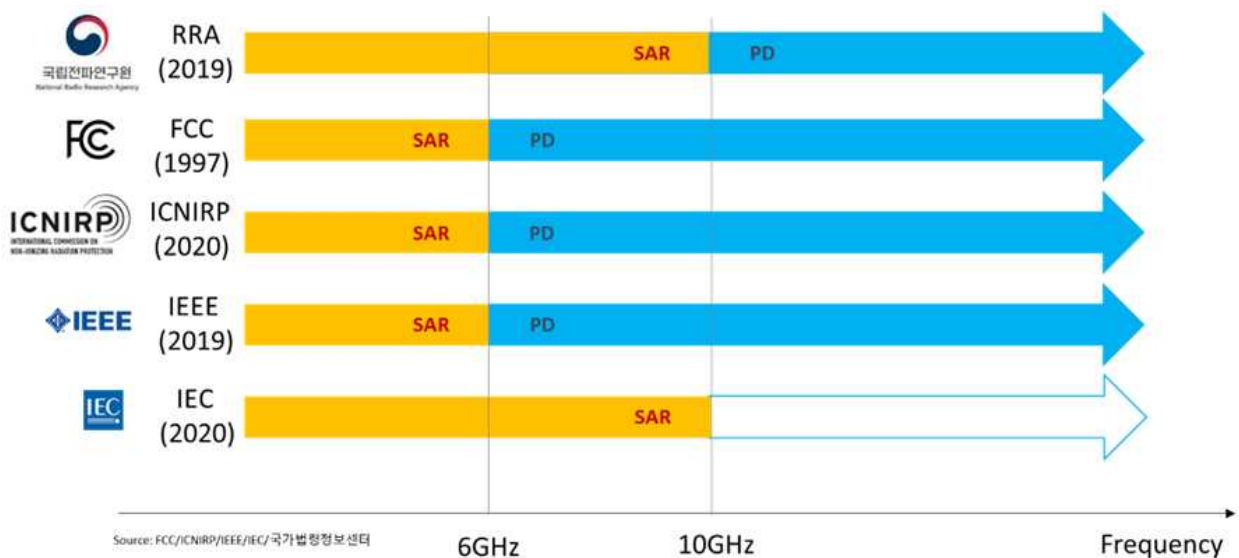


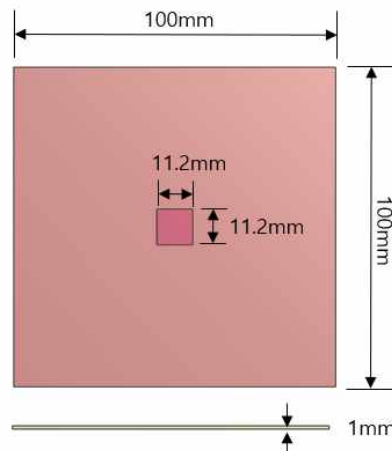
그림 3-3. 인체노출 기준주파수 (Yellow: SAR, Blue: PD)

6 GHz, 10 GHz, 30 GHz 주파수의 패치안테나 외 30 GHz 대역의 흡수전력밀도 및 입사 전력밀도 측정 시스템에서 사용 중인 혼 형태의 기준 안테나에 대한 설계 및 시뮬레이션을 통해 안테나 구조 및 전력밀도 해석에 적용 가능성을 확인한다. 이러한 안테나 조건별 설계를 바탕으로 흡수전력밀도에 대한 시뮬레이션 및 결과에 대한 분석을 진행하고 고주파 흡수전력밀도 기반의 평가방법에 대한 연구를 진행한다.

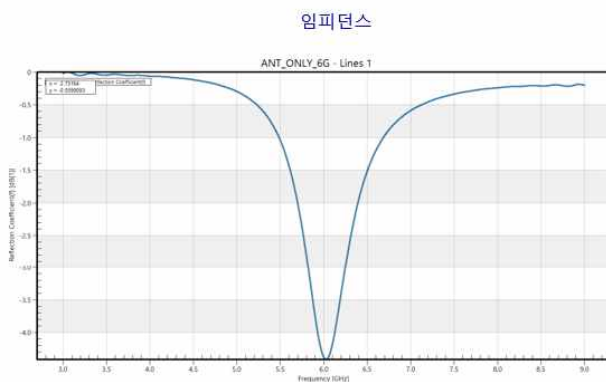
2. 안테나 구조

가. 6 GHz 패치 안테나

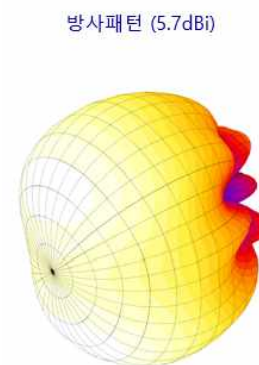
그림 3-4는 자유공간에서 6 GHz 패치 안테나 구조 및 성능을 나타낸다. 그림 3-4 (a)는 안테나 형상을 나타내며 거치 편차를 최소화하기 위해 패치 안테나의 외곽 사이즈는 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 로 설정하였다. 패치 안테나의 유전체는 FR4를 적용하였고, 두께는 1 mm 이다. 안테나 패치 요소의 크기는 $11.2\text{ mm} \times 11.2\text{ mm}$ 이다. 그림 3-4 (b)는 패치 안테나의 공진 주파수를 나타내며 6 GHz에 형성됨을 알 수 있다. 그림 3-4 (c) 는 패치 안테나의 방사패턴을 나타내며, 패치 안테나의 법선방향으로 최대 안테나 이득이 발생함을 알 수 있고, 그 값은 5.7 dBi 이다.



(a) 안테나 형상



(b) 임피던스

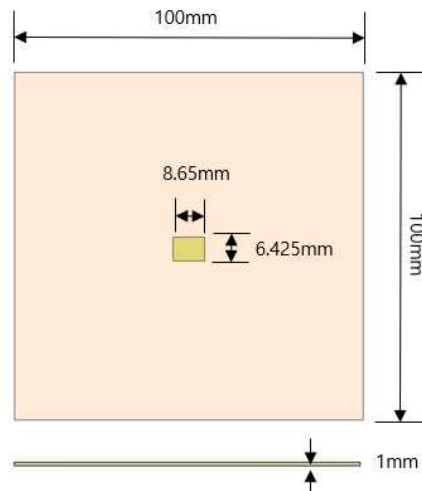


(c) 방사패턴

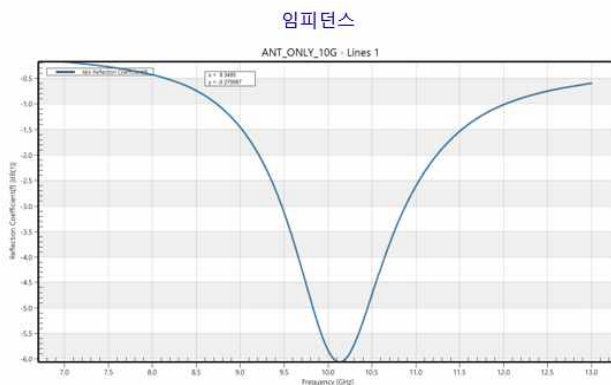
그림 3-4. 패치 안테나 (6 GHz)

나. 10 GHz 패치 안테나

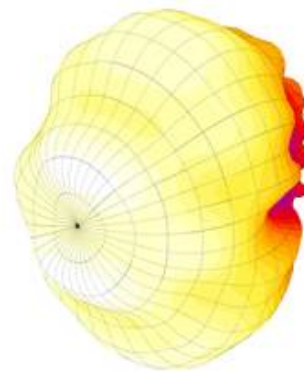
그림 3-5는 자유공간에서 10 GHz 패치 안테나 구조 및 성능을 나타낸다. 그림 3-5 (a)는 안테나 형상을 나타내며 거치 편차를 최소화하기 위해 패치 안테나의 외곽 사이즈는 100 mm × 100 mm 로 설정하였다. 패치 안테나의 유전체는 FR4를 적용하였고, 두께는 1 mm 이다. 안테나 패치 요소의 크기는 8.65 mm × 6.425 mm 이다. 그림 3-5 (b)는 패치 안테나의 공진 주파수를 나타내며 10 GHz에 형성됨을 알 수 있다. 그림 3-5 (c)는 패치 안테나의 방사패턴을 나타내며, 패치 안테나의 범선방향으로 최대 안테나 이득이 발생함을 알 수 있고, 그 값은 6.4 dBi 이다.



(a) 안테나 형상



(b) 임피던스

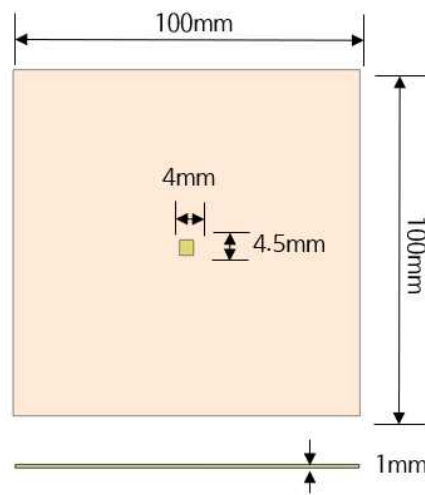


(c) 방사패턴

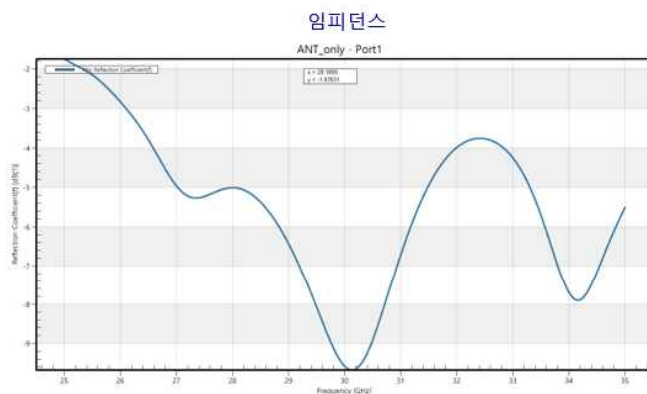
그림 3-5. 패치 안테나 (10 GHz)

다. 30 GHz 패치 안테나

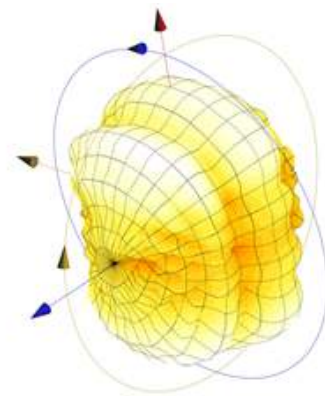
그림 3-6은 자유공간에서 30 GHz 패치 안테나 구조 및 성능을 나타낸다. 그림 3-6 (a)는 안테나 형상을 나타내며 거치 편차를 최소화하기 위해 패치 안테나의 외곽 사이즈는 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 로 설정하였다. 패치 안테나의 유전체는 FR4를 적용하였고, 두께는 1 mm 이다. 안테나 패치 요소의 크기는 $4\text{ mm} \times 4.5\text{ mm}$ 이다. 그림 3-6 (b)는 패치 안테나의 공진 주파수를 나타내며 10 GHz에 형성됨을 알 수 있다. 그림 3-6 (c)는 패치 안테나의 방사패턴을 나타내며, 패치 안테나의 법선방향으로 최대 안테나 이득이 발생함을 알 수 있고, 그 값은 7.49 dBi 이다.



(a) 안테나 형상



(b) 임피던스



(c) 방사패턴

그림 3-6. 패치 안테나 (30 GHz)

라. 혼 안테나

전자파 흡수전력밀도 (APD)와 입사전력밀도 (IPD)의 측정 시스템 검증을 위해서 혼 안테나 형태의 기준안테나가 사용된다. 그림 3-7은 Speag 사 전력밀도 측정 시스템에 사용되는 혼안테나의 사양을 나타낸다 [21].

H30GVx는 Ka-band 혼안테나와 Gunn 발진기(Gunn oscillator)를 하나의 정육면체 하우징에 통합한 시스템 검증용 송신 장비로, 전자파 인체 노출량 (IPD/APD) 측정을 위한 30 GHz 주파수 송신원으로 사용된다. 이 장비는 ISO 17025 기준으로 주파수가 교정되어 있으며, IPD/APD 평가 시스템의 정밀도 검증 및 안정성 평가에 이용된다. 전원 공급 장치가 포함되어 있어 독립적으로 동작 가능하다. 주요 사양으로는, 중심 주파수는 30 GHz이며, 주파수 정확도는 ± 100 MHz, 전기장(E-field) 편파는 선형(linear polarization)으로 설정되어 있다. 고조파 억제 특성은 -20 dBc 수준이며, 방사 전력은 약 14 dBm(약 25 mW)이다. 크기는 $100 \times 100 \times 100$ mm, 무게는 1 kg으로 설계되어 소형 경량 구조이다.



그림 3-7. 혼안테나 (Ka-band) [21]

그림 3-8은 그림 3-7의 사양을 모사한 시뮬레이션 구조 형상을 나타낸다. 그림 3-7 안테나의 외형은 육면체 형태이나 내부에 Ka 대역을 지원하는 혼안테나가 내장되어 있으므로 혼안테나 구조를 유사하게 모사하였다. 외부 육면체의 크기도 실제 크기와 동일하게 $100 \times 100 \times 100$ mm으로 설계하였다. 그림 3-9는 그림 3-8 내부에 실장된 혼안테나의 형상을 나타낸다. 혼 안테나의 개구면의 크기는 43.2×34 mm 이고 혼안테나의 전체 길이는 99.7 mm로 설계하였다.

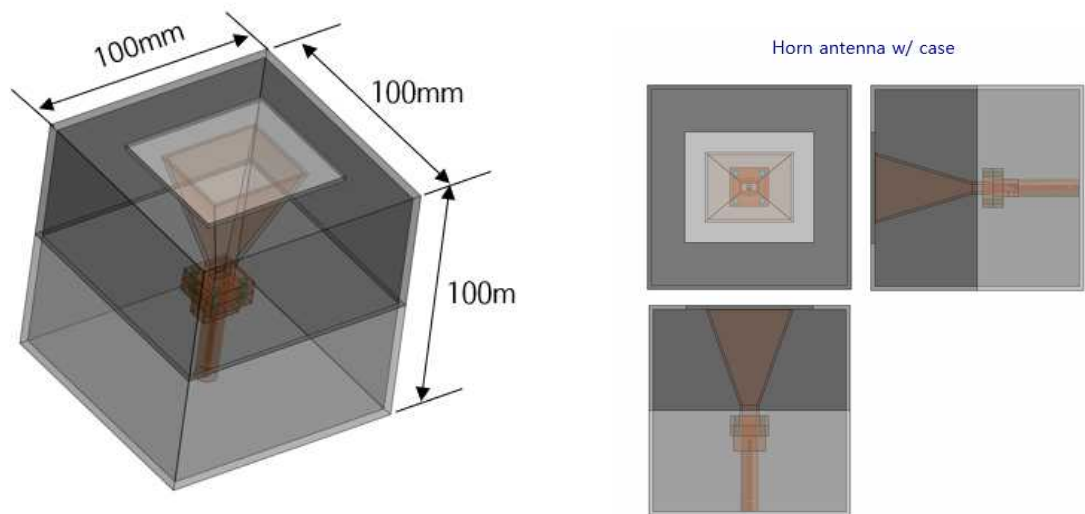


그림 3-8. 혼안테나 모사구조 (케이스 포함)

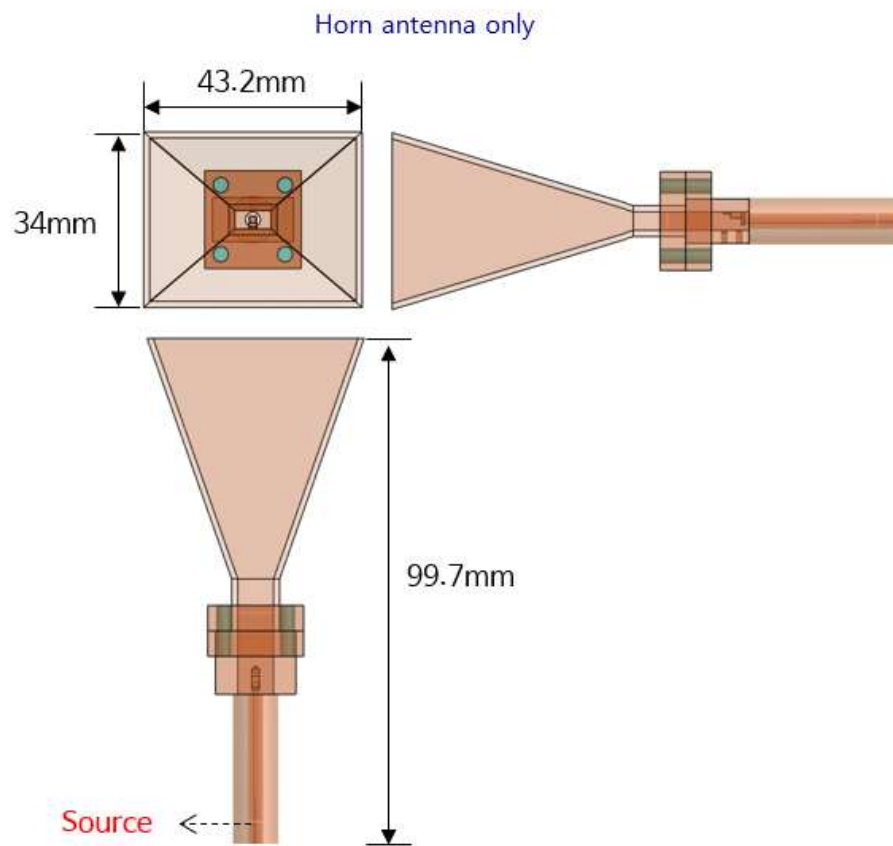
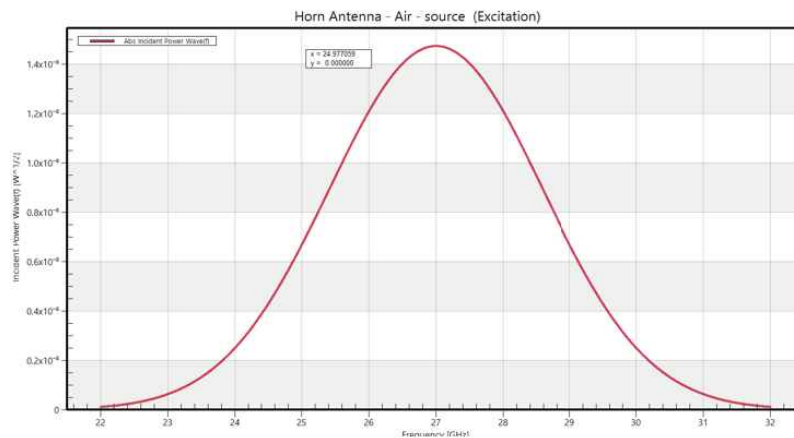


그림 3-9. 혼안테나 모사구조 (케이스 제거)

그림 3-10과 그림 3-11은 그림 3-9의 혼안테나의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 3-10은 혼 안테나의 입력파와 반사파를 나타내며, 혼안테나의 공진이 27 GHz에 형성됨을 알 수 있다. 그림 3-11 (a)는 혼안테나에서 발생하는 전기장의 평균값에 대한 단면 분포를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 혼안테나 개구면에서 방사되는 전기장이 집중됨을 알 수 있고 이는 혼안테나가 지향성이 높음을 의미한다. 그림 3-11 (b)는 혼안테나에서 발생하는 전기장의 실수값에 대한 단면 분포를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 혼안테나 입력부의 도파관 형상에 의해 전기장의 모드가 형성됨을 알 수 있다.

Incident power wave



Reflected power wave

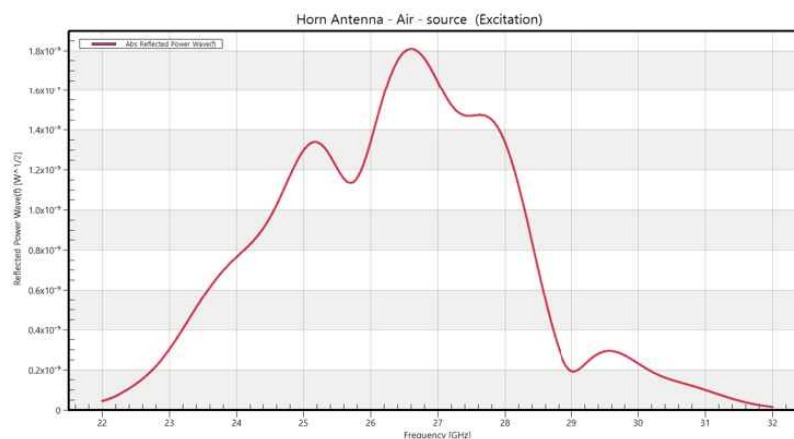
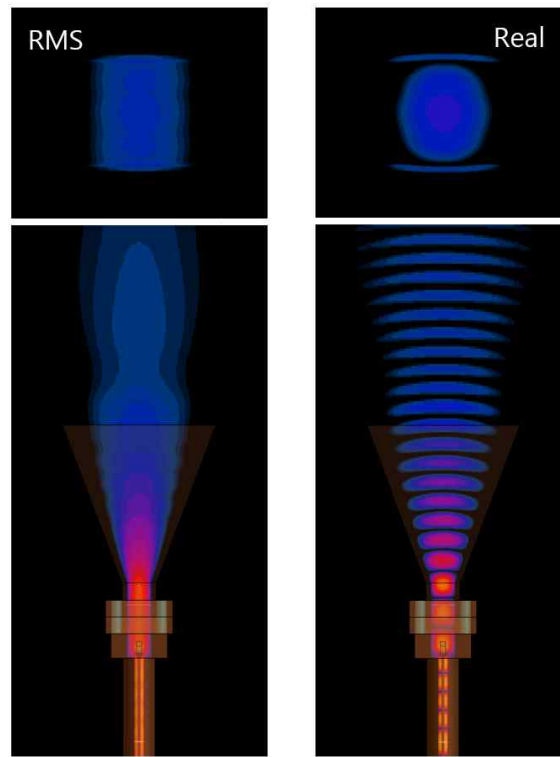


그림 3-10. 혼안테나 입력파와 반사파

Electric field



(a) RMS

(b) Real

그림 3-11. 혼안테나 전기장 분포 (27 GHz)

제3절 흡수전력밀도(APD) 시뮬레이션

1. 수치해석 조건

가. 평가기술에 대한 수치해석 조건

전자파흡수율(SAR), 전자파 흡수전력밀도(APD), 입사전력밀도(IPD)의 상관성 분석을 위해 10 GHz 패치 안테나에 대한 전자파 인체영향 시뮬레이션을 진행한다. 전자파 흡수전력밀도(APD)와 전자파흡수율(SAR)은 모의인체 구조가 필요하며, 전자파 입사전력밀도(IPD)는 모의인체 구조 없이 자유공간에서 해석을 진행하고 그림 3-12에 해석 구조를 표현하였다. 그림 3-12 (a)는 해석을 위한 10 GHz 패치 안테나, 그림 3-12 (b)는 전자파 흡수율(SAR)과 전자파 흡수전력밀도(APD)에 대한 시뮬레이션 모델링, 그림 3-12 (c)는 입사전력밀도(IPD)의 시뮬레이션 모델링을 나타낸다. 입사전력밀도 (IPD)의 경우 모의인체 구조가 없어 시뮬레이션을 위한 경계조건이 흡수전력밀도(APD)에 비해 작아도 되지만 비교 해석을 정확성을 높이기 위해 동일한 크기의 자유공간 경계조건을 반영하였다. 안테나와 모의인체간 이격거리에 의한 반사효과를 제거하기 위해 안테나와 모의인체간 이격거리는 0mm로 설정하였다.

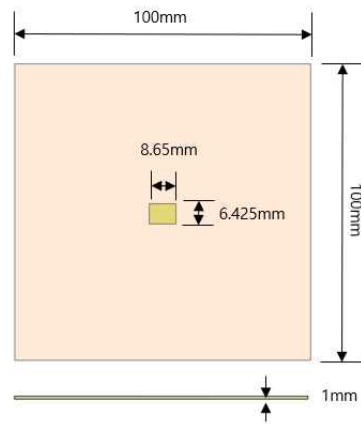
전자파흡수율(SAR), 전자파 흡수전력밀도(APD), 입사전력밀도(IPD)에 대한 수치해석을 수행하기 위해서는 시뮬레이션의 입력 조건으로 안테나에 인가되는 전력(Conducted Power)을 설정해야 한다. 주파수에 따라 안테나의 이득이 상이하게 나타나므로, 각 주파수 대역에서 동일한 출력 조건을 유지하기 위해서는 안테나의 최종 출력 기준으로 전력을 정규화하는 것이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 유효복사전력(EIRP: Effective Isotropically Radiated Power)을 기준으로 설정을 통일하였으며, 모든 주파수에서 EIRP를 18 dBm으로 고정하였다.

EIRP는 입력전력과 안테나 이득의 합(logarithmic sum)으로 정의되므로, 주파수별로 이득이 다를 경우 해당 이득을 보정하는 방식으로 입력전력을 조정하여 동일한 EIRP 조건을 만족시킬 수 있다. 이러한 방식은 주파수 변화에 따른 출력 경향성을 비교 분석하는 데 유리한 기준을 제공한다.

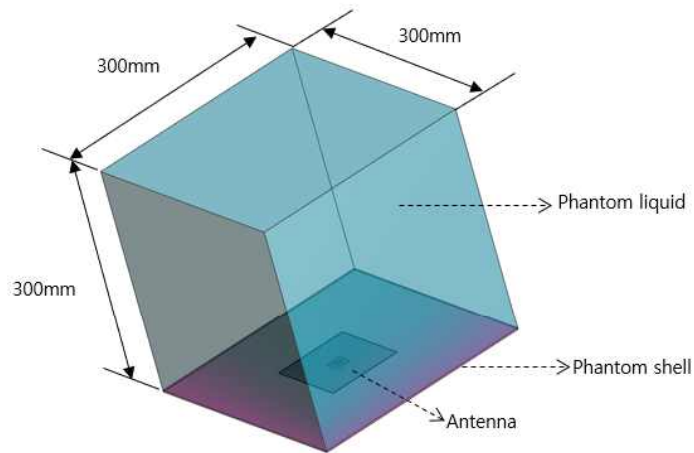
한편, 실제 이동통신 단말기의 출력 성능은 보통 총 복사 전력(Total Radiated Power, TRP)으로 표현되며, 이는 안테나 효율과 입력전력을 기반으로 산정된다. 하지만 TRP는 안테나의 전방위 복사 에너지에 대한 평균값을 포함하므로, 패치 안테나처럼 특정 방향으로 에너지가 집중되는 방사 특성을 적절히 반영하지 못할 수 있다. 즉, 평균화된 효율을 적용할 경우, 국부적으로 강한 전자기장이 발생하는 주요 방향의 영향이 상대적으로 저평가될 가능성이 있다.

이에 따라 본 연구에서는 이러한 제한점을 보완하고자, 가장 높은 전자기장이 방출되는

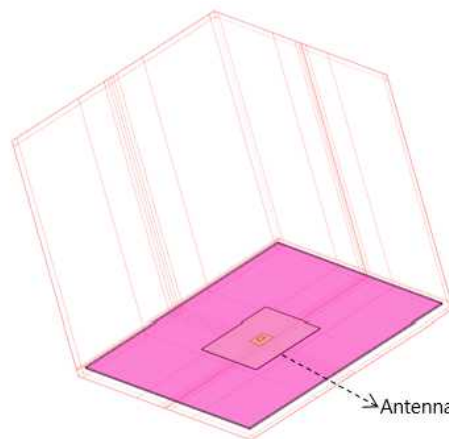
방향을 기준으로 정의되는 EIRP를 중심으로 시뮬레이션 해석을 수행하였다. 이를 통해 실제 인체 노출 평가 시 보다 보수적이고 정확한 분석이 가능하도록 한다.



(a) 패치 안테나 (10 GHz)



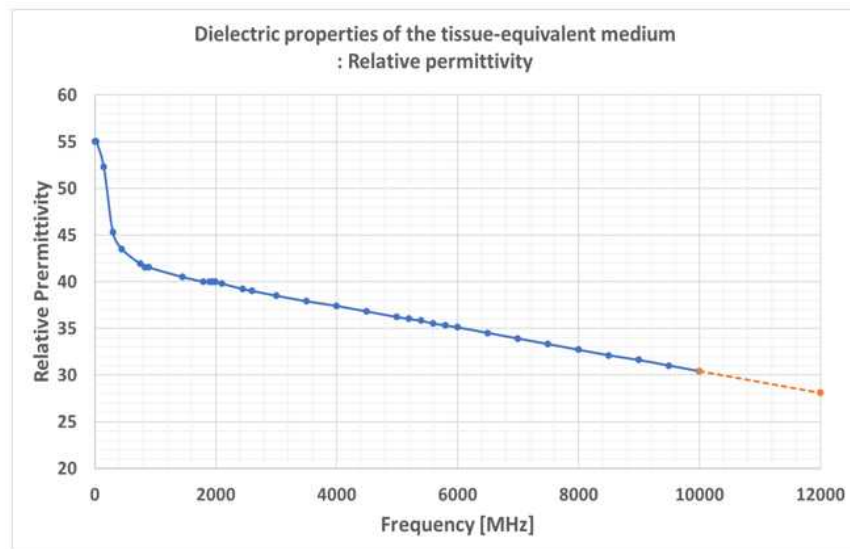
(b) SAR, APD 해석구조 (모의인체 포함)



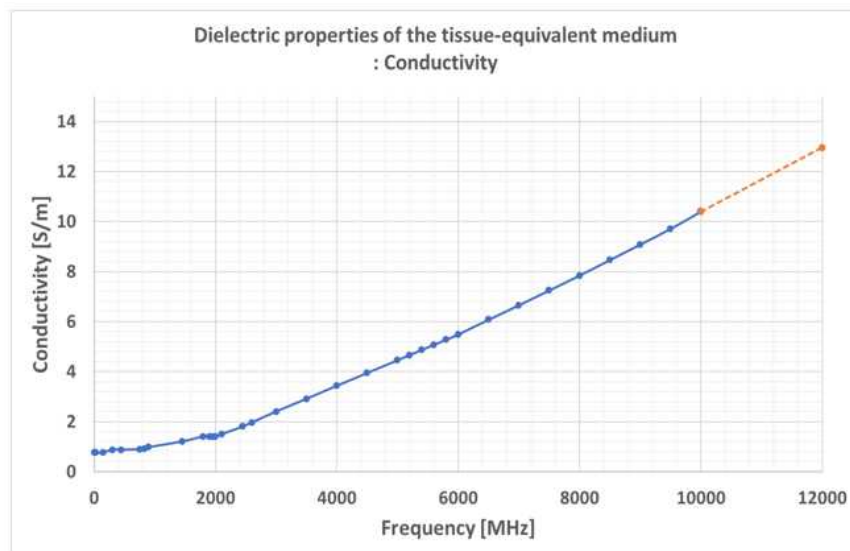
(c) IPD 해석구조 (모의인체 미포함)

그림 3-12. 시뮬레이션 해석 구조

전자파 흡수율(SAR) 및 전자파 흡수전력밀도(APD)에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 모의 인체(phantom)의 형상 설정뿐만 아니라, 해당 모형에 적용할 유전 특성의 정의가 필수적이다. 본 연구에서는 인체의 유전 특성값으로 IEC/IEEE 62209-1528 표준에서 제시한 데이터를 활용하였다. 해당 표준은 최대 10 GHz까지의 주파수 범위에 대해서만 유전 특성을 명시하고 있어 10 GHz 기준 결과를 분석한다. 그림 3-13은 IEC/IEEE 62209-1528 데이터를 기반으로 주파수에 따라 변화하는 인체 모형의 유전 특성(복소 유전율 등)을 시각적으로 나타낸 것이다 [8][26].



(a) 비유전율



(b) 도전율

그림 3-13. 모의 인체 유전특성 [8]

나. 투과율 및 투과계수

그림 3-14는 전기장의 수직편파에 대한 입사, 투과 현상을 시각적으로 나타낸 것이다.

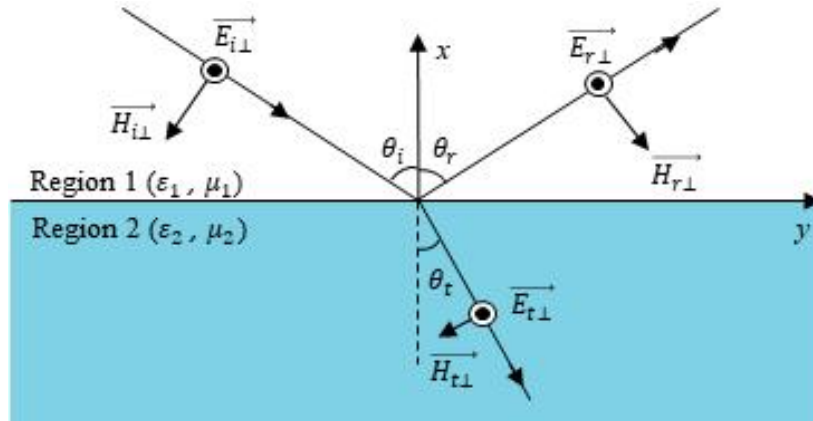


그림 3-14. 전기장의 입사, 반사, 투과 현상 (수직편파)

전기장의 입사와 E_i 가 매질 1 (ϵ_1, μ_1)에서 매질 2 (ϵ_2, μ_2)로 전달되는 과정에서 발생하는 반사와 E_i 와 투과파 E_t 의 상관 관계는 식 (3-3), 식 (3-4)을 통해 정의된다. 이때 Γ 는 반사계수(Reflection coefficient), τ 는 투과계수(Transmission coefficient)이며 두 물리량 모두 전기장의 비율로 표현된다 [8].

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} \quad \text{식 (3-3)}$$

$$\tau = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} \quad \text{식 (3-4)}$$

식 (3-3), 식 (3-4)에서 θ_i , θ_r , θ_t 는 전기장의 입사각, 반사각, 투과각을 의미하며, 각 매질의 특성 임피던스 η_1 , η_2 는 $\eta_1 = \sqrt{\mu_1/\epsilon_1}$, $\eta_2 = \sqrt{\mu_2/\epsilon_2}$ 로 표현될 수 있다. 모의 인체 주변에서 수행되는 흡수전력밀도 해석의 경우, 파면이 거의 수직으로 입사한다고 가정할 수 있으므로 입사각과 투과각을 0 ($\theta_i = \theta_t = 0$)으로 설정할 수 있다. 이러한 조건에서는 위의 일반적인 투과계수의 표현식이 단순화되어 다음과 같이 재정의된 식 (3-5)로 나타낼 수 있다.

$$\tau = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1}, \theta_i = \theta_t = 0 \quad \text{식 (3-5)}$$

투과계수는 전기장에 대한 함수이므로 흡수전력밀도(APD)와 입사전력밀도(IPD)를 고려한 전력에 대한 함수로 표현하면 식 (3-6), 식 (3-7)와 같이 표현할 수 있다. R 은 반사율 (Reflectance), T 는 투과율 (Transmittance)이다 [8][27].

$$R = \frac{P_r}{P_i} = |\Gamma|^2 \quad \text{식 (3-6)}$$

$$T = \frac{P_t}{P_i} = \left(\frac{\eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i} \right) |\tau|^2 \quad \text{식 (3-7)}$$

식 (3-6), 식 (3-7)에서 θ_i , θ_t 는 전력의 입사각, 투과각을 나타내며, 특성 임피던스 η_1 , η_2 는 $\eta_1 = \sqrt{\mu_1/\epsilon_1}$, $\eta_2 = \sqrt{\mu_2/\epsilon_2}$ 이다. 인체모형에 근접하는 경우, 입사각 및 투과각이 0 ($\theta_i = \theta_t = 0$)으로 가정할 수 있으므로 투과율 T 는 식 (3-8)와 같이 표현할 수 있다 [21].

$$T = \frac{P_t}{P_i} = \frac{4\eta_1\eta_2}{(\eta_2 + \eta_1)^2}, \theta_i = \theta_t = 0 \quad \text{식 (3-8)}$$

그림 3-12의 해석 구조처럼 모의인체와 안테나 간의 이격거리가 0 mm 인 경우 동일한 안테나를 사용할 때 모의인체 유무의 결과를 비교하면 모의인체의 투과율을 간이적으로 확인할 수 있다. 평가면적 1 cm², 4 cm²에 대한 주파수별 흡수전력밀도(APD)와 입사전력밀도(IPD) 비율을 식 (3-9)의 모의해석 투과율(*Simulated T*)로 정의하고 각각의 결과를 분석한다 [8].

$$\text{Simulated } T = \frac{APD}{IPD} \quad \text{식 (3-9)}$$

모의인체와 안테나 간의 이격거리가 0 mm 가 아닌 경우 DUT 안테나와 모의인체 사이에 레이어가 추가되어 2개 층의 반사 및 투과 효과가 발생할 수 있고 이에 따라 투과율의 결과가 달라질 수 있다.

2. 흡수전력밀도 시뮬레이션

전자파 흡수전력밀도(APD)와 입사전력밀도(IPD) 수치해석 결과를 통해 모의인체 기반의 투과율을 간이적으로 도출할 수 있다. 그러나 안테나의 경우 안테나 주변에 유전체의 유무에 따라 실제 설계된 안테나 공진이 이동할 수 있어 유전체로 최대의 전력이 전달되지 않을 가능성이 있다. 본 연구에서는 10 GHz 패치 안테나에 대하여 안테나 공진을 자유공간 조건에서 공진을 설계한 경우와 안테나 공진을 모의인체 조건에서 설계한 경우로 나누어 투과율을 도출하고 결과를 분석한다.

가. 안테나 단독 공진 최적화 (CASE 1)

안테나 단독 조건에서 10 GHz 안테나 공진을 설계하는 경우 모의인체에 의한 안테나 공진의 이동은 필연적이다. 그림 3-15는 안테나 단독 조건에서 공진 최적화된 안테나의 임피던스와 모의인체가 적용된 경우의 임피던스 변화를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 안테나 단독 조건에서 공진주파수는 10 GHz 이나 모의인체가 적용된 경우 450 MHz 이동한 10.45 GHz 에서 형성됨을 알 수 있다.

그림 3-16은 안테나 단독 조건과 안테나와 모의인체 통합 조건에서의 안테나 공진, 기준 주파수인 10 GHz에서의 임피던스와 이득을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 안테나 단독조건에서 10 GHz 공진 최적화 설계를 하였으므로 안테나 임피던스 - 11.94 dB로 모의인체 통합조건 임피던스 - 5.02 dB 대비 우세하다. 안테나 이득의 경우 안테나 단독조건 대비 안테나와 모의인체 통합 조건에서 모의인체 손실에 의해 14.35 dB 감쇄됨을 확인하였다. EIRP 18 dBm 기준 설정을 위해 안테나 단독조건 기준으로 입력전력은 11.6 dBm으로 설정하였다.

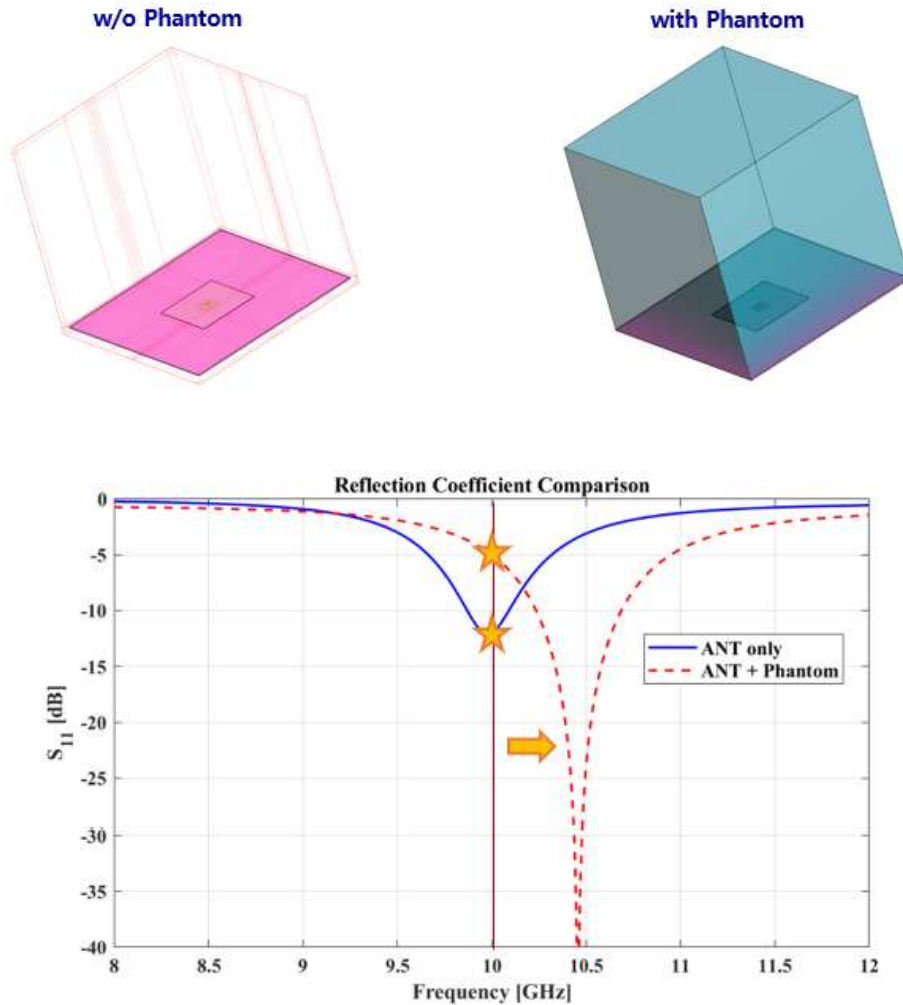


그림 3-15. 안테나 단독 공진 최적화 조건에서의 임피던스

	안테나 공진	S11 @ 10 GHz	Gain @ 10 GHz	Conduction pwr @ 10 GHz
Antenna only	10 GHz	-11.94dB	6.40dBi	11.60dBm
Antenna + Phantom	10.45 GHz	-5.02dB	-7.95dBi	-

그림 3-16. 안테나 단독 공진 최적화 조건에서의 파라미터

그림 3-17은 안테나 단독 공진 최적화 조건에서 흡수전력밀도(APD), 입사전력밀도(IPD), 전자파 흡수율(SAR) 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 흡수전력밀도와 입사전력밀도의 평가면적은 1 cm^2 , 4 cm^2 , 전자파 흡수율의 평가체적은 1g, 8g, 10g 조건에서 진행하였다.

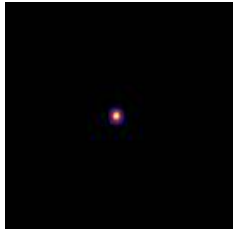
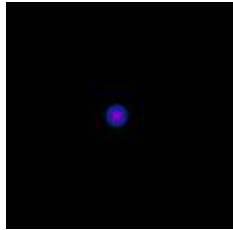
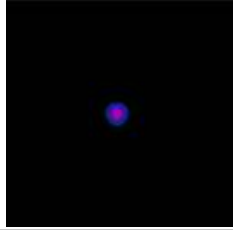
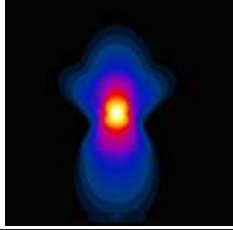
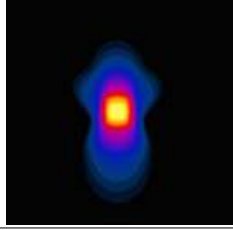
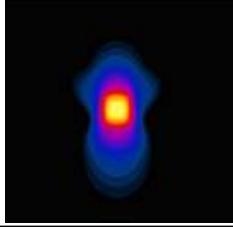
	Avg. area	Value	Field distribution
APD [W/m ²]	1cm ²	77.09	
	4cm ²	26.59	
IPD [W/m ²]	1cm ²	188.91	
	4cm ²	73.07	
SAR [W/kg]	1g	6.32	
	8g	1.05	
	10g	0.86	

그림 3-17. APD/IPD/SAR (안테나 단독 공진 최적화 조건)

그림 3-18은 전자파 흡수율과 전자파 흡수전력밀도 간의 상관관계를 나타낸다. 10 GHz 주파수에서 전자파 흡수전력밀도는 전자파 흡수율에 그림 2-5의 변환계수를 적용하여 도출하였다. 전자파 흡수전력밀도의 평가면적 1 cm^2 조건은 전자파 흡수율 1g 결과를 활용하고, 흡수전력밀도의 평가면적 4 cm^2 조건은 전자파 흡수율 8g 결과를 활용한다. APD using SAR은 변환계수를 활용하여 도출한 결과, APD_{simulation} 는 실제 전자파 수치해석으로 도출한 결과를 나타낸다. 두 결과의 차이는 18~20% 이며 전자파 수치해석 결과가 높은 흡수전력밀도를 나타낸다. SAR과 변환계수를 활용하여 도출한 흡수전력밀도는 SAR 해석 시 체적조건에서 흡수된 전력을 면적으로 치환하므로 실제 평가면적에서 해석한 결과보다 상대적으로 낮은 결과를 나타낸다.

그림 3-19는 흡수전력밀도와 입사전력밀도 간의 상관관계를 나타낸다. 흡수전력밀도와 입사전력밀도의 비율을 식 (3-9)의 투과율로 환산하고 식 (3-8)을 이용하여 실제 이론적인 투과율을 도출하여 비교할 수 있다. 10 GHz 조건에서 이론적인 투과율은 0.52이며, 흡수전력밀도와 입사전력밀도의 비율과는 21.5~30% 차이가 발생한다.

APD [W/m^2]		
	1cm^2	4cm^2
APD using SAR	63.24	20.96
APD _{simulation}	77.09	26.59
Error	17.9%	21.2%

그림 3-18. APD와 SAR 상관관계 (안테나 단독 공진 최적화 조건)

Transmittance		
	1cm^2	4cm^2
APD/IPD	0.41	0.36
Transmittance	0.52	
Error	21.5%	30.0%

그림 3-19. APD와 IPD 상관관계 (안테나 단독 공진 최적화 조건)

나. 안테나와 모의인체 통합 공진 최적화 (CASE 2)

안테나와 모의인체 통합 조건에서 10 GHz 안테나 공진을 설계하는 경우 모의인체에 의한 안테나공진 이동을 고려하여 설계해야 한다. 그림 3-20은 안테나와 모의인체 통합 조건에서 공진 최적화된 안테나의 임피던스와 안테나 단독 조건의 임피던스 변화를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 안테나와 모의인체 통합 조건에서 공진주파수는 10 GHz 이나 안테나 단독 조건에서 370 MHz 이동한 9.63 GHz 에서 형성됨을 알 수 있다.

그림 3-21은 안테나 단독 조건과 안테나와 모의인체 통합 조건에서의 안테나 공진, 기준 주파수인 10 GHz에서의 임피던스와 이득을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 안테나와 모의인체 통합 조건에서 10 GHz 공진 최적화 설계를 하였으므로 안테나 임피던스 -14.27 dB로 안테나 단독조건의 임피던스 -4.18 dB 대비 우세하다. 안테나 이득의 경우 안테나 단독조건 대비 안테나와 모의인체 통합 조건에서 모의인체 손실에 의해 14.95 dB 감쇄됨을 확인하였다. EIRP 18 dBm 기준 설정을 위해 안테나 단독조건 기준으로 입력전력은 11.53 dBm으로 설정하였다.

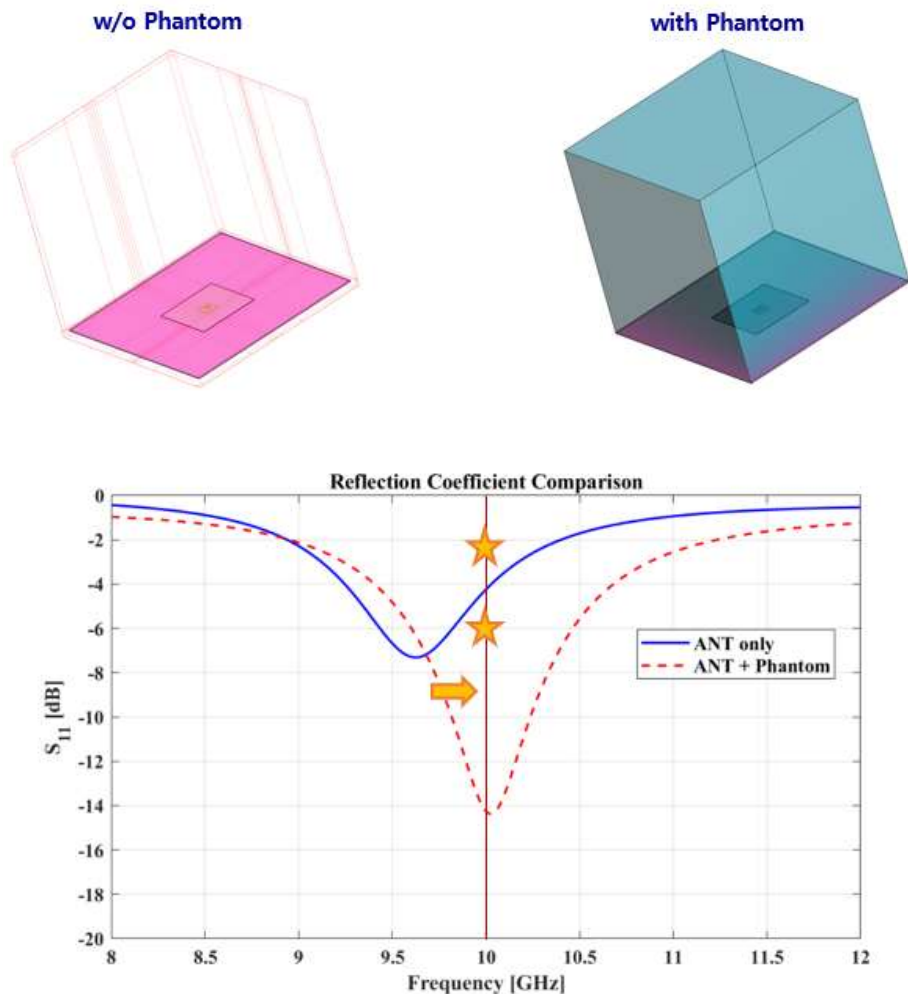


그림 3-20. 안테나와 모의인체 통합 조건에서의 임피던스

	안테나 공진	S11 @ 10 GHz	Gain @ 10 GHz	Conduction pwr @ 10 GHz
Antenna only	9.63 GHz	-4.18dB	6.47dBi	11.53dBm
Antenna + Phantom	10 GHz	-14.27dB	-8.48dBi	-

그림 3-21. 안테나와 모의인체 통합 조건에서의 파라미터

그림 3-22는 안테나와 모의인체 통합 조건에서 흡수전력밀도(APD), 입사전력밀도(IPD), 전자파 흡수율(SAR) 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 흡수전력밀도와 입사전력밀도의 평가면적은 1 cm^2 , 4 cm^2 , 전자파 흡수율의 평가체적은 1g, 8g, 10g 조건에서 진행하였다.

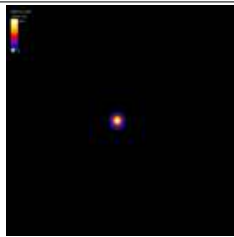
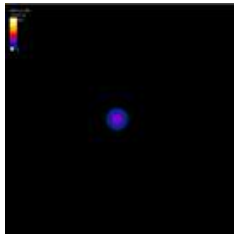
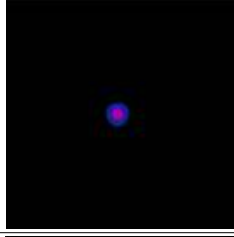
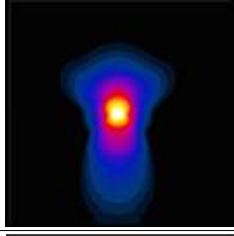
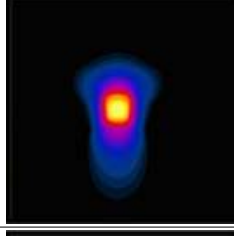
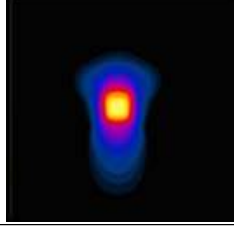
	Avg. area	Value	Field distribution
APD [W/m ²]	1cm ²	103.99	
	4cm ²	34.08	
IPD [W/m ²]	1cm ²	112.23	
	4cm ²	46.17	
SAR [W/kg]	1g	8.35	
	8g	1.35	
	10g	1.10	

그림 3-22. APD/IPD/SAR (안테나와 모의인체 통합 조건)

그림 3-23은 전자파 흡수율과 전자파 흡수전력밀도 간의 상관관계를 나타낸다. 10 GHz 주파수에서 전자파 흡수전력밀도는 전자파 흡수율에 그림 2-5의 변환계수를 적용하여 도출하였다. 전자파 흡수전력밀도의 평가면적 1 cm^2 조건은 전자파 흡수율 1g 결과를 활용하고, 흡수전력밀도의 평가면적 4 cm^2 조건은 전자파 흡수율 8g 결과를 활용한다. APD using SAR은 변환계수를 활용하여 도출한 결과, $\text{APD}_{\text{simulation}}$ 는 실제 전자파 수치 해석으로 도출한 결과를 나타낸다. 두 결과의 차이는 20% 이며 전자파 수치해석 결과가 높은 흡수전력밀도를 나타낸다. SAR과 변환계수를 활용하여 도출한 흡수전력밀도는 SAR 해석 시 체적조건에서 흡수된 전력을 면적으로 치환하므로 실제 평가면적에서 해석한 결과보다 상대적으로 낮은 결과를 나타낸다.

그림 3-24는 흡수전력밀도와 입사전력밀도 간의 상관관계를 나타낸다. 흡수전력밀도와 입사전력밀도의 비율을 식 (3-9)의 투과율로 환산하고 식 (3-8)을 이용하여 실제 이론적인 투과율을 도출하여 비교할 수 있다. 10 GHz 조건에서 이론적인 투과율은 0.52이며, 흡수 전력밀도와 입사전력밀도의 비율과는 42~78% 차이가 발생한다. 상기 조건에서 투과율과 흡수전력밀도와 입사전력밀도의 비율 간의 상관관계는 낮은 경향을 보인다.

APD [W/m^2]		
	1cm^2	4cm^2
APD using SAR	83.50	26.99
$\text{APD}_{\text{simulation}}$	103.99	34.08
Error	19.7%	20.8%

그림 3-23. APD와 SAR 상관관계 (안테나와 모의인체 통합 조건)

Transmittance		
	1cm^2	4cm^2
APD/IPD	0.93	0.74
Transmittance	0.52	
Error	78.2%	41.9%

그림 3-24. APD와 IPD 상관관계 (안테나와 모의인체 통합 조건)

다. CASE 1과 CASE 2 통합분석

CASE 1 및 CASE 2에서 도출한 투과율은 20%에서 70% 수준으로 실제 이론 투과율과 상당히 상이한 결과를 보인다. 이는 안테나 단독 조건에서의 공진과 안테나와 모의인체 통합 조건에서의 공진이 상이하여 모의인체로 투과 또는 반사되는 전자기장의 양이 다르기 때문이다. 여기서 두 가지 시뮬레이션 조건(CASE 1, CASE 2)에서 모의인체에 투과되는 전자기장의 양이 가장 높은 경우를 각각 추출하여 그 결과의 조합을 통해 투과율을 도출한다.

그림 3-25는 CASE 1과 CASE 2의 APD와 IPD 결과 중 조건별 가장 높은 값을 표시한 결과이다. CASE 1은 안테나 단독 조건에서 최적화되었으므로 IPD 결과가 10 GHz 주파수에서 가장 높은 방사성능을 보이며, CASE 2는 모의인체 통합조건에서 최적화되어 모의인체가 포함된 APD 조건과 SAR 조건에서 모의인체에 높은 전달성능을 보인다.

10GHz	APD [W/m ²]		IPD [W/m ²]		SAR [W/kg]		
Avg. area	1cm ²	4cm ²	1cm ²	4cm ²	1g	8g	10g
CASE 1: ant tuning	77.09	26.59	188.91	73.07	6.32	1.05	0.86
CASE 2: phantom tuning	103.99	34.08	112.23	46.17	8.35	1.35	1.10

그림 3-25. CASE 1과 CASE 2 결과

그림 3-26은 CASE 2의 APD와 CASE 1의 IPD를 이용하여 도출한 투과율을 나타내며, 이론적 모델과의 비교를 통해 계산된 오차율은 약 6~10% 수준이다. 각각의 단독 조건에서 도출된 절대적 오차율을 살펴보면, CASE 1에서는 21.5~30%, CASE 2에서는 42~78% 수준과 비교할 때 이론값과 매우 유사함을 알 수 있다. 다만 이러한 결과의 신뢰성을 확보하기 위해, 6 GHz 및 30 GHz 대역에서 시뮬레이션 기반 해석뿐만 아니라 실측 기반의 추가 검증이 필요하다.

Transmittance		
	1cm ²	4cm ²
APD/IPD	0.55	0.46
Transmittance	0.52	
Error	5.86%	10.3%

그림 3-26. APD와 SAR 상관관계 (CASE 1과 CASE 2 통합)

제4절 흡수전력밀도(APD) 측정

전자파 흡수전력밀도(APD)와 입사전력밀도(IPD) 측정 시 동일 안테나에 대한 공진 주파수의 이동 및 두 물리량의 상관관계를 분석하기 위해 측정을 진행한다. 본 연구에서는 시뮬레이션에서 검증된 10 GHz 대역은 측정 시스템 불확도 등의 문제가 있어 8 GHz 대역에 대한 전자파 흡수전력밀도(APD)와 입사전력밀도(IPD)를 측정하고 투과율 도출한다. 또 28 GHz와 같은 고주파 대역에서 측정 가능한 신규 APD 장비를 이용하여 전자파 흡수전력밀도(APD)를 측정하고 입사전력밀도(IPD) 측정결과와 비교한다.

1. 8 GHz 흡수전력밀도 측정

그림 3-27은 전자파 흡수전력밀도(APD)와 입사전력밀도(IPD) 측정을 위한 패치 안테나 형상을 나타낸다. 패치 안테나의 공진 주파수는 8 GHz 이며, 그림 3-27 (a)는 시뮬레이션 기반의 안테나 구조를 나타내며, 그림 3-27 (b)는 구현된 패치 안테나 형상을 나타낸다.

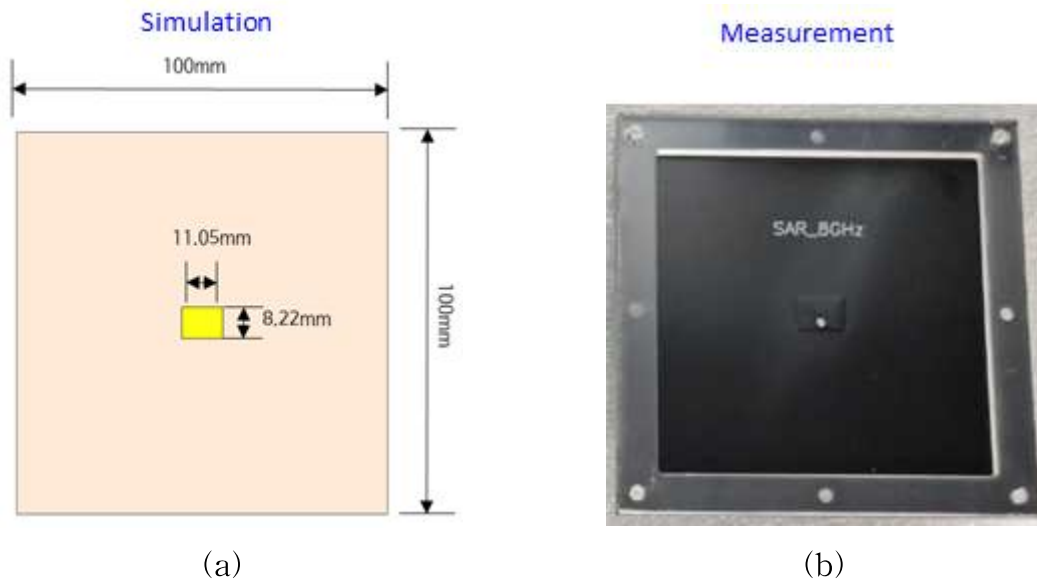


그림 3-27. 8 GHz 패치 안테나 구조

그림 3-28과 그림 3-29는 그림 3-27 (b) 패치 안테나의 방사성능 측정을 위한 전자파 무반향실 구조 및 임피던스, 방사패턴을 나타낸다. 패치 안테나의 측정 임피던스는 8 GHz이고, 공진 주파수의 측정 안테나 이득은 5.29 dBi 이다.

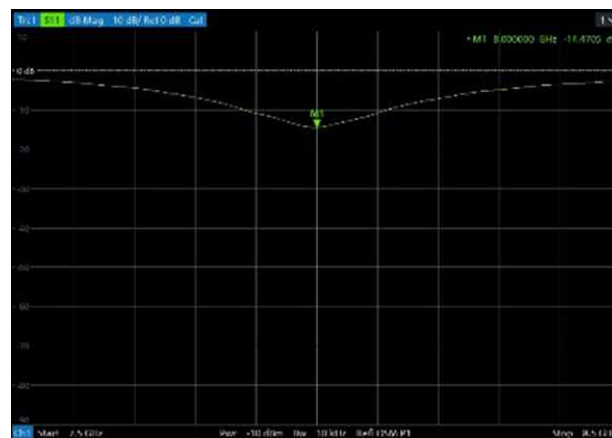


(a) 챔버 구조

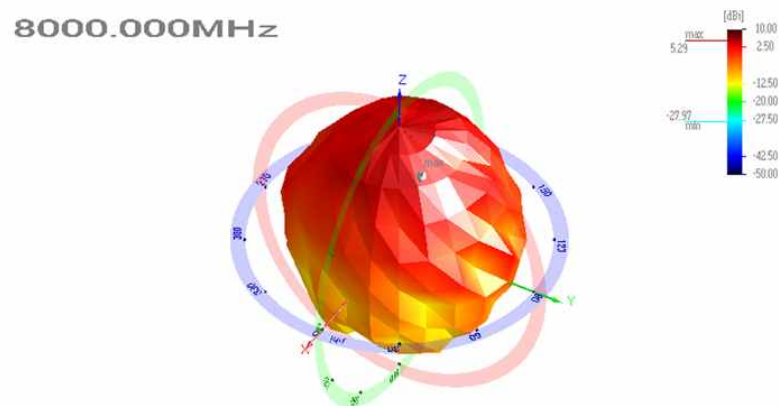


(b) 안테나 거치

그림 3-28. 전자파 무반향실 구조 및 안테나 거치



(a) 임피던스



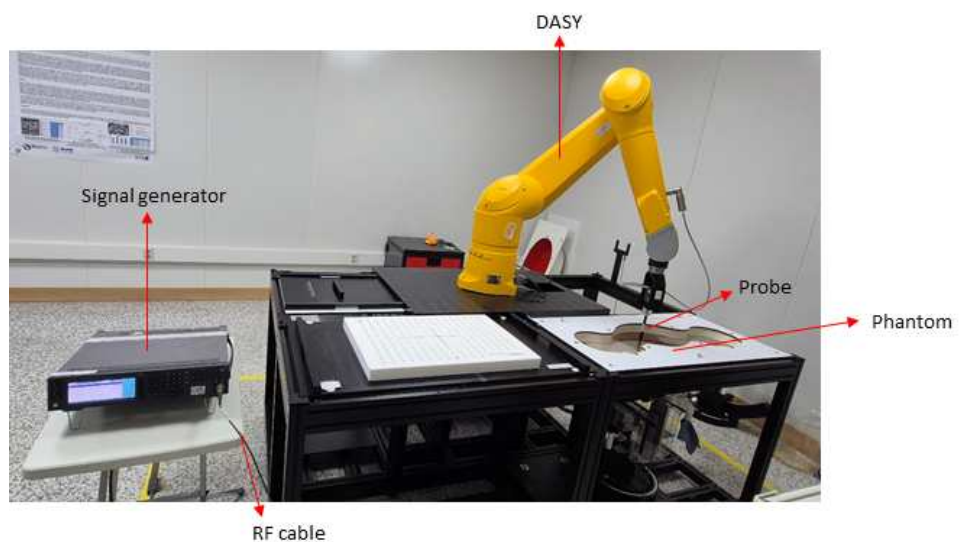
(b) 방사패턴

그림 3-29. 안테나 임피던스 및 방사패턴

그림 3-30은 8 GHz 패치 안테나에 대한 전자파 흡수전력밀도 (APD) 측정 시스템 및 안테나 거치, 측정 구성을 나타낸다. 측정 시스템은 전자파 인체 등가용액 기반 측정 시스템이며, 전자파 흡수율 (SAR) 측정 시스템과 동일하다. 전자파 인체 등가용액의 주파수 범위의 한계에 따라 10 GHz 미만의 주파수에 대하여 측정 가능하며, 측정 시 거치 편차를 최소화하기 위해 평면형 모의인체를 적용하였다. 전자파 흡수전력밀도 (APD) 측정 시스템은 전력이 있는 기기에 한해서 측정이 가능하므로 수동소자인 안테나에 급전을 전달하기 위해 신호 발생기(signal generator)를 적용하였다.



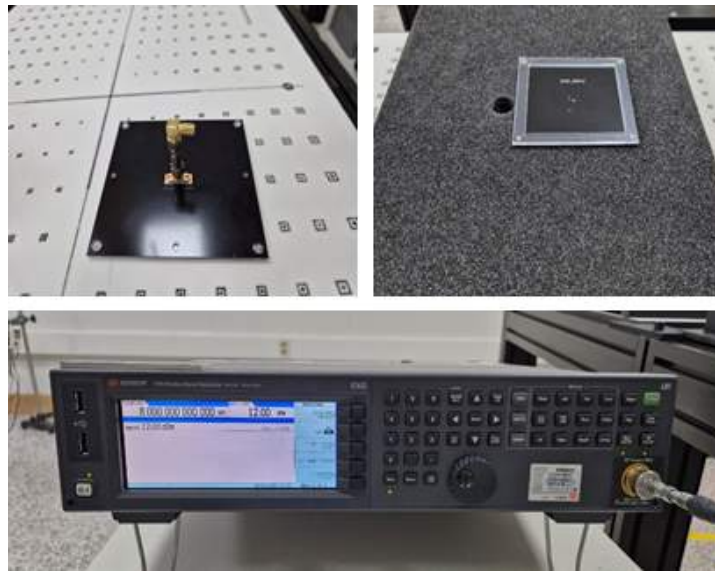
(a) 안테나 거치



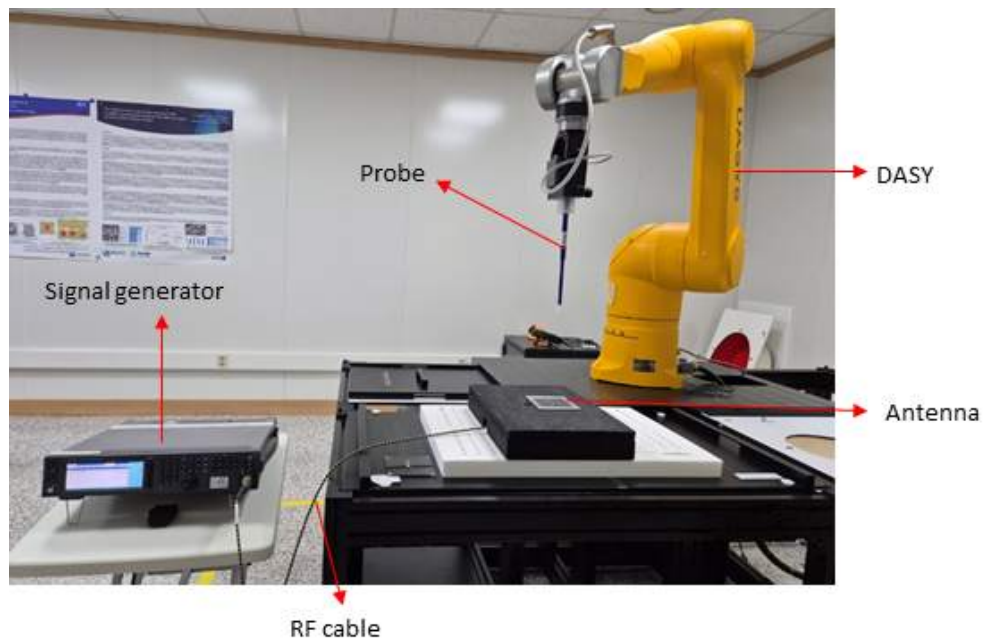
(b) 시스템 구성

그림 3-30. 전자파 흡수전력밀도 (APD) 측정 시스템 구성

그림 3-31은 8 GHz 패치 안테나에 대한 전자파 입사전력밀도 (IPD) 측정 시스템 및 안테나 거치, 측정 구성을 나타낸다. 측정 시스템은 6 GHz 주파수부터 측정 가능하며, 자유공간 기반 IPD 측정 시스템이다. 전자파 흡수전력밀도 (APD) 측정 시스템과 동일하게 전자파 입사전력밀도 (IPD) 측정 시스템 역시 전력이 있는 기기에 한해서 측정이 가능하므로 수동소자인 안테나에 급전을 전달하기 위해 신호 발생기(signal generator)를 적용하였다.



(a) 안테나 구성 및 신호 발생기



(b) 시스템 구성

그림 3-31. 전자파 입사전력밀도 (IPD) 측정 시스템 구성

그림 3-32는 8 GHz 패치 안테나를 대상으로 전자파 흡수전력밀도(APD) 및 전자파 입사전력밀도(IPD) 측정 시스템을 이용하여 전력 투과율(Transmittance) 특성을 정량적으로 검증한 결과를 나타낸다. 이를 위해 두 개의 독립된 시험실(Measurement Lab#1, Lab#2)에서 동일한 실험 조건을 적용하되, 각각의 장비 구성과 조직 등가액(tissue-equivalent liquid)의 특성을 그대로 반영하여 실제적인 변동 요인을 포함한 측정 데이터를 확보하였다. 본 절의 목적은 두 시스템 간 측정값의 일치도와 이론값(Transmittance = 0.505)과의 비교를 통해 APD/IPD 기반 투과율 평가의 타당성을 분석하는 데 있다.

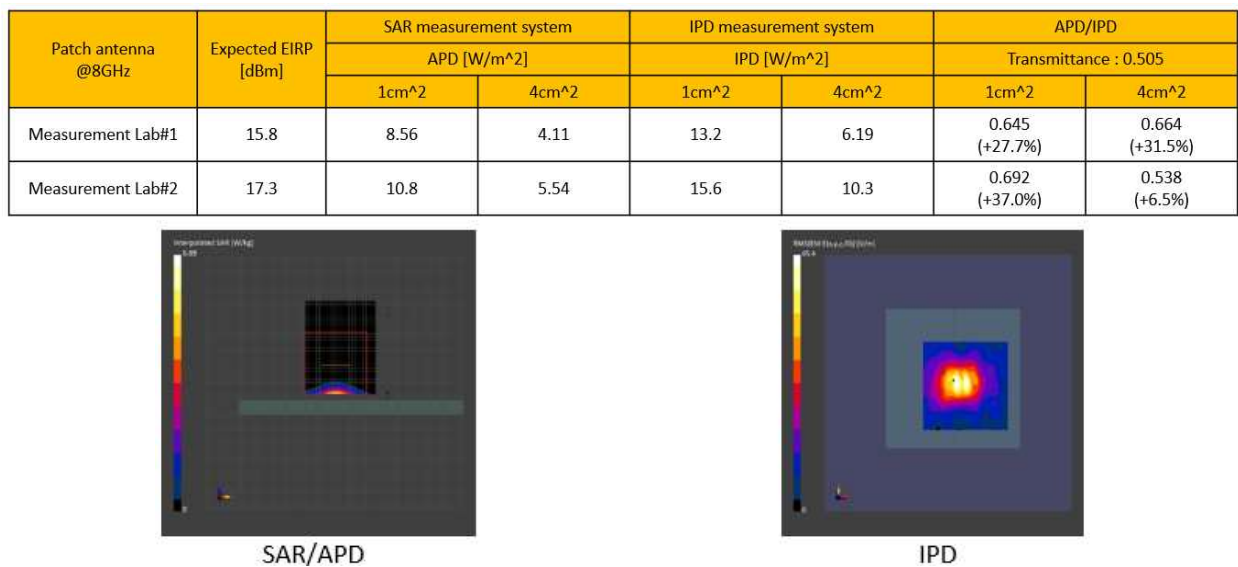


그림 3-32. APD 및 IPD 측정결과 (8GHz)

측정 결과를 요약하면, 두 시험실 모두에서 이론값 대비 약 $\pm 30\%$ 범위의 편차가 확인되었다. 이는 전자파 흡수전력밀도(APD) 측정에서 전자파 인체 등가용액의 유전율에 의해 공진 주파수가 이동하는 것이 주요한 요소이며, 측정 시스템 간의 정렬오차 등의 복합적인 영향도 고려할 수 있다. 이에 따라 실제 최대값을 형성하는 APD 값과 IPD 값이 공진 주파수의 이동에 따라 달라질 수 있다.

Lab#1과 Lab#2에서 실측된 전자파 흡수전력밀도(APD) 값은 각각 8.56/4.11 W/m², 10.8/5.54 W/m²(1 cm² 및 4 cm² 평균화 기준)로 나타났다. 두 시험실 간 절대값은 다소 차이가 있으나, 평균화 면적이 증가할수록 APD 값이 절반 수준으로 감소하는 일관된 경향을 모두 확인할 수 있었다. 이는 평균화 영역 확대에 따라 국부적인 최고점(peak)이 완화되는 전형적인 현상으로서, APD 측정시스템이 정상적으로 동작하고 있음을 보여준다.

또한 Lab#2에서 다소 높은 APD 값이 얻어진 것은 해당 시험실에서 관측된 EIRP가

17.3 dBm으로 Lab#1의 15.8 dBm보다 높았기 때문이다.

전자파 입사전력밀도(IPD) 측정 결과 역시 두 시험실에서 유사한 경향을 보였다. Lab#1의 IPD 값은 13.2/6.19 W/m², Lab#2는 15.6/10.3 W/m²로 확인되었으며, 이는 전자파 흡수전력밀도(APD)와 마찬가지로 평균화 면적 증가 시 값이 감소하는 전형적 특성을 나타낸다. SAR 시스템에서 관측된 APD peak와 IPD 시스템에서 측정된 peak의 위치가 미세하게 달라질 수 있으며, 이는 두 시스템의 좌표 정렬(alignment) 과정, 프로브 위치 보정 정밀도, 공진점 이동 등이 복합적으로 작용한 결과이다.

측정된 APD/IPD 비율을 통해 계산한 전력 투과율은 다음과 같다.

Lab#1: 1 cm²: 0.645 → 이론 대비 +27.7% , 4 cm²: 0.664 → 이론 대비 +31.5%

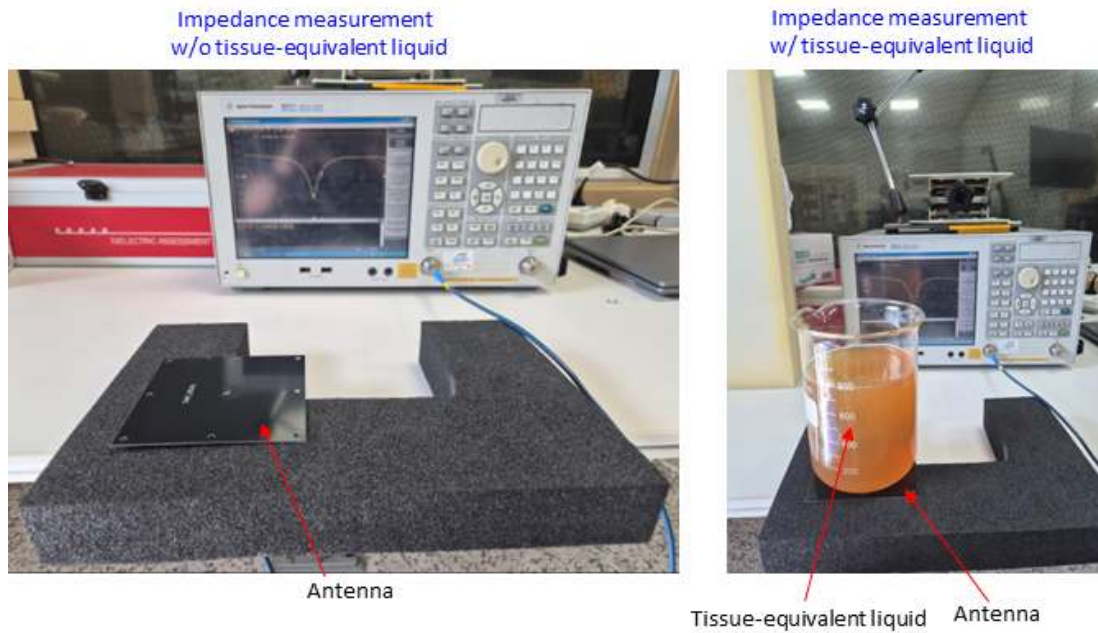
Lab#2: 1 cm²: 0.692 → 이론 대비 +37.0% , 4 cm²: 0.538 → 이론 대비 +6.5%

전반적으로 1 cm² 평균화 영역에서는 이론값 대비 25~40% 높은 값이 산출되는 반면, 4 cm²에서는 일부 편차가 상대적으로 줄어들었다. 이는 전자파 흡수전력밀도(APD) 조건에서 공진 주파수가 이동하면서 이론값 대비 높은 편차를 보일 수 있다. 다만, 4 cm² 조건에서 이론값 대비 7% 수준은 거치 등의 오차 및 peak 위치에서 평균 면적이 커지면서 APD/IPD 비율과 이론값과의 차이가 상대적으로 줄어들었기 때문이다. 즉 평균 영역이 넓어질수록 APD와 IPD 간 peak 위치 미세 불일치가 상쇄되고, 국부적인 분포 차이가 완화되기 때문에 나타나는 경향으로 볼 수 있다.

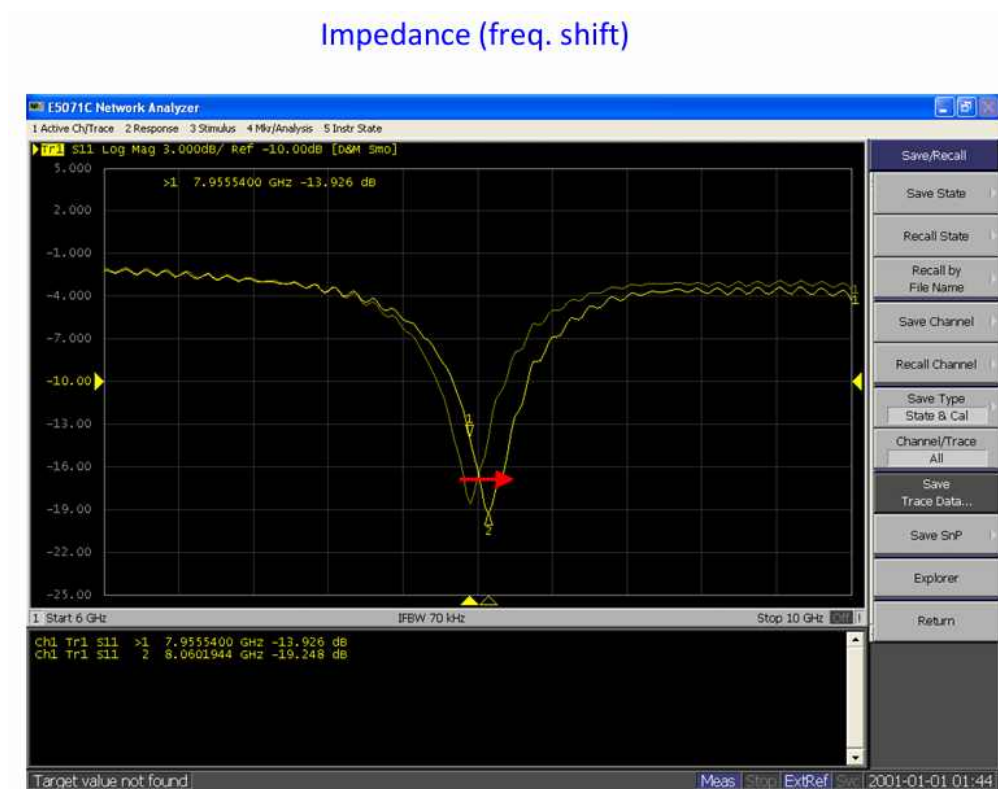
이론적 투과율과 실측값 간 ±30% 이내의 편차는 RF 인체노출 실험에서 일반적으로 발생 가능한 수준이며, 두 시험실 모두 동일한 경향을 반복적으로 보여 장비·환경 간 신뢰성은 충분히 확보될 수 있다. 조직 등가액의 유전율 변화로 인한 공진주파수 시프트는 측정 오차의 핵심 요인으로 볼 수 있으며, 이에 대한 실제 검증이 필요하다.

그림 3-33은 8 GHz 패치 안테나가 전자파 인체등가용액 (tissue-equivalent liquid)과 접촉했을 때 공진 주파수의 변화를 실험한 결과를 나타낸다. 그림 3-33 (a)는 측정 구성도, 그림 3-33 (b)는 안테나에 등가용액 접촉 전후의 임피던스 결과를 나타낸다. 그림 3-33에서 알 수 있는 바와 같이 안테나와 등가용액 접촉 시 공진주파수가 상향 이동하는 현상을 확인하였다. 전자파 인체등가용액은 GHz 대역에서 매우 높은 전도도(several S/m)와 유전손실을 갖는 고손실(high-loss) 매질로, 일반적인 고유전율 유전체와는 달리 강한 손실 성분이 안테나 주변에 존재하게 되면 패치 면에서 형성되는 전계가 액체 내부로 깊이 침투하지 못하고 표면에서 급격히 감쇠한다. 즉, 전계가 확장되어야 할 영역이 손실로 인해 제한되면서 안테나의 유효 전기 길이(electrical length)가 오히려 짧아지는 효과가 발생한다. 이러한 현상은 안테나가 유전율이 높은 매질에 부하/loading)되었을 때 일반적으로 나타나는 ‘공진 하향 이동’과는 다른 메커니즘으로, 조직 등가액처럼 유전율은 높지만

손실이 매우 커서 전자기장이 실질적으로 매질 내부에 저장되지 못할 경우에 특이적으로 관찰된다.



(a) 전자파 인체등가용액과 안테나 간 접촉 실험



(b) 임피던스 변화

그림 3-33. 전자파 인체등가용액 접촉 전후의 임피던스 변화

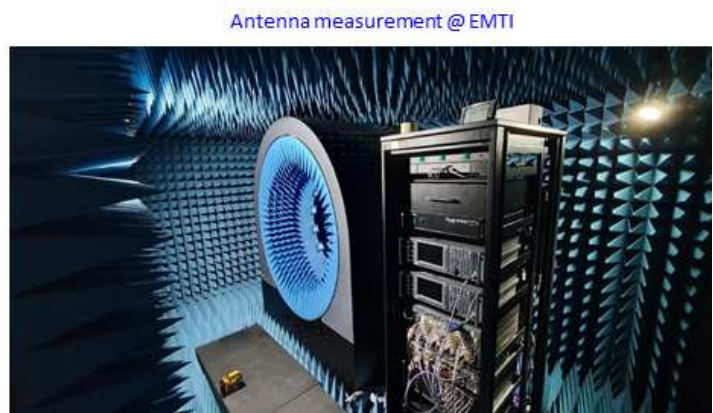
네트워크 분석기로 S11을 측정한 결과, 조직 등가액이 없는 상태에서는 약 7.96 GHz 부근에서 공진이 발생하였으나, 등가용액이 접촉되면 공진점이 더 높은 주파수 방향인 약 8.06 GHz로 이동함을 알 수 있다. 이는 전자파 인체등가용액이 패치 안테나의 표면 전계를 흡수하면서 패치의 유효 경계 조건을 변화시키고, 결과적으로 패치의 유효 길이가 짧아진 것과 동일한 효과를 만들기 때문이다. 또한 손실이 큰 매질이 근접하면 안테나 주변에서 저장되는 전자기 에너지가 감소하고, 반응성 리액턴스(reactive component)가 변하여 입력 임피던스의 공진 조건이 더 높은 주파수에서 만족되도록 변형되는 것으로 해석된다. 이런 이유로 조직 등가액의 접촉은 안테나 공진점을 상승시키는 방향으로 작용하게 된다. 실제 측정 결과에서도 조직 등가액과 접촉한 후 S11 공진 주파수의 위치가 상향 주파수로 이동한 것을 확인할 수 있었으며, 이는 단순한 공진 이동을 넘어, 액체의 전도도, 손실 등이 안테나의 실효 방사특성에 직접적으로 영향을 미친다는 사실을 보여준다. 이러한 현상은 APD/IPD 측정에서 관찰된 값의 차이나 편차의 근본 원인 중 하나로 작용할 수 있으며, 인체노출평가 환경에서는 안테나-인체등가용액 상호작용을 반드시 고려해야 한다는 점을 시사한다.

2. 28 GHz 흡수전력밀도 측정

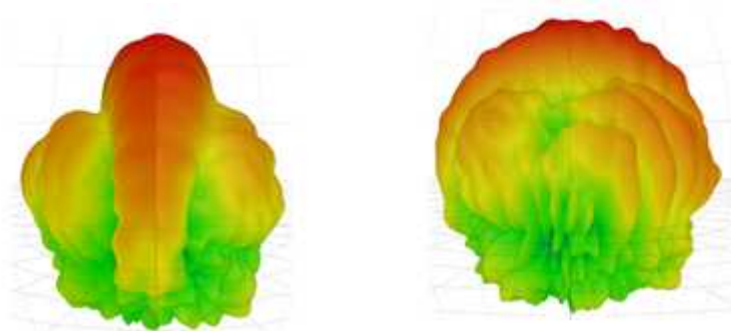
그림 3-34는 전자파 흡수전력밀도(APD)와 입사전력밀도(IPD) 측정을 위한 1×4 배열 패치 안테나 형상을 나타낸다. 1×4 배열 패치 안테나의 공진 주파수는 28 GHz 이며, 그림 3-34 (a)는 안테나 구조를 나타내며, 그림 3-34 (b)는 구현된 1×4 배열 패치 안테나의 방사패턴 측정 시스템, 그림 3-34 (c)는 측정된 방사패턴 형상을 나타낸다. 안테나는 1×4 배열 패치 구조로 구성되며, 별도의 PCB 그라운드 구조를 포함하여 측정 시 거치의 오차를 최소화하고자 하였다. 밀리미터파 측정 시스템은 전방향으로 측정 프로브가 포함되어 빠르게 방사패턴 측정을 진행할 수 있다. 그림 3-34 (c)의 안테나 방사패턴은 전형적인 1×4 배열 안테나 구성에 의해 빔폭이 좁아지면서 안테나 이득이 증가하는 구조이며, 측정 안테나 이득은 12 dBi 수준이다.



(a) 안테나 형상



(b) 밀리미터파 대역 측정시스템



(c) 28 GHz 방사패턴

그림 3-34. 28 GHz 1×4 배열 패치 안테나 및 측정 시스템, 방사패턴

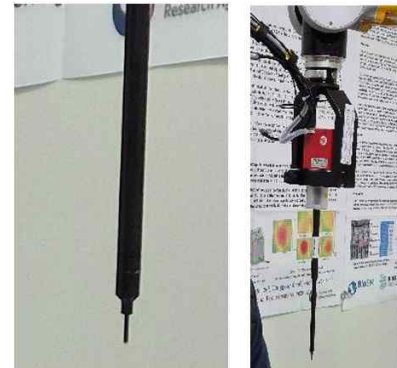
그림 3-35는 신규 전자파 흡수전력밀도(APD) 측정 시스템 구성을 나타낸다. 신규 APD 측정 시스템은 인체용액기반 프로토타입으로 Speag사에서 개발한 제품이다. 그림 3-35 (b)는 신규 APD 측정시스템의 전체적인 형상을 나타낸다. 측정 시스템의 형태는 기존 전자파 흡수율 (SAR) 구성과 동일하게 로봇 팔과 프로브, 인체용액을 포함하는 모의인체 구조로 구성된다. 그림 3-35 (b)는 측정 프로브의 형상을 나타내며 기존 입사 전력밀도(IPD) 측정 시스템의 프로브와 유사한 형태이나 인체용액 내부 측정 시 프로브 센서 공진 이동을 고려하여 다소 축소되었다. 그림 3-35 (c)는 인체등가용액용 용기 형태의 모의인체형상을 나타낸다. 모의인체 형상은 육면체 형상이며, 고주파 조건에서 인체등가 용액을 넣는 경우 증발에 의한 인체특성 변화를 방지하기 위해 용액증발방지용 볼이 추가되었다. 그림 3-35 (d)는 신규 APD 측정시스템의 모의인체 하단부를 나타내며, 유전체 형태의 평면형 거치 구조 형태를 보이고 있다.

DASY8 APD 측정 시스템 @ RRA 2025



(a) 고주파 APD 측정시스템

프로브 (직접 전원인가, 배터리교환없음)



(b) 신규 APD 측정용 프로브

팬텀



용액증발방지 볼



(c) 측정용 모의인체와 증발방지용 볼

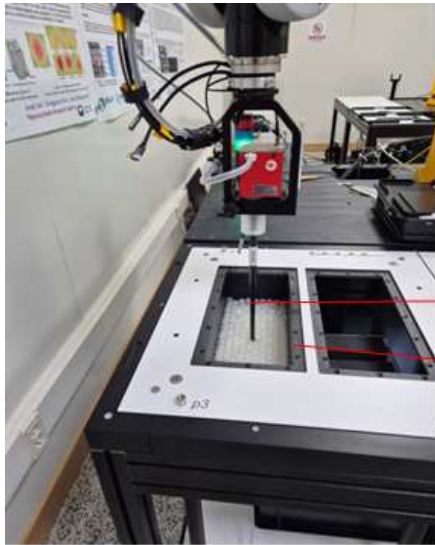
폼 구조



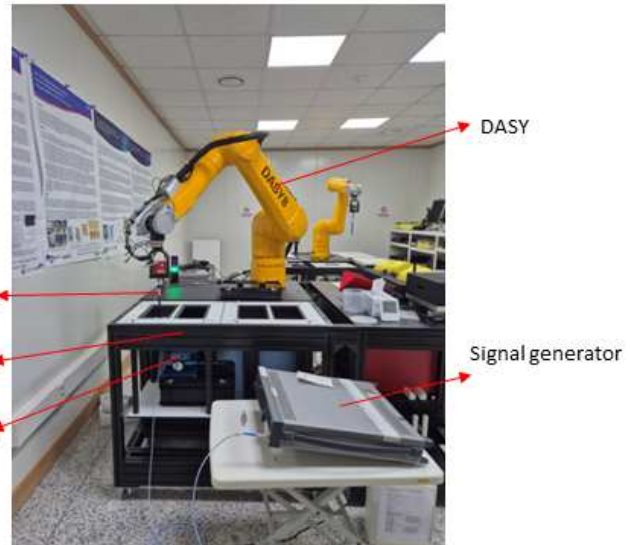
(d) 모의인체 하단부

그림 3-35. 신규 APD 측정 시스템

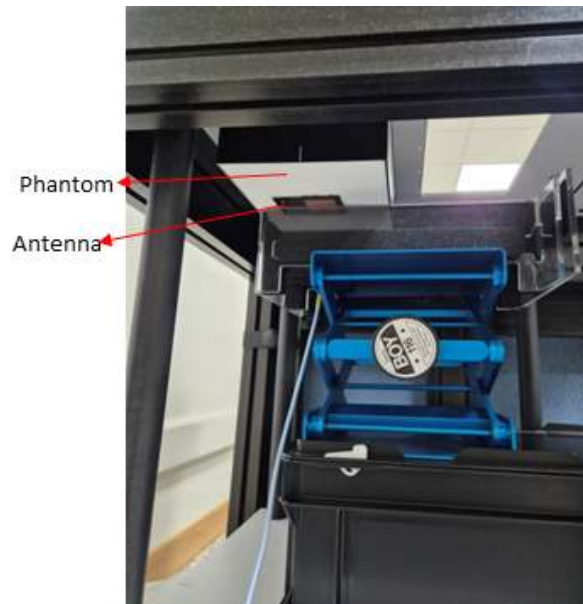
그림 3-36은 28 GHz 대역을 측정할 수 있는 전자파 흡수전력밀도(APD) 측정 시스템과 측정용 안테나 거치형상을 나타낸다. 그림 3-36 (a)는 24GHz 이상의 고주파 대역에서 전자파 흡수전력밀도 (APD)를 측정할 수 있는 인체등가용액 기반 신규 측정시스템 구조를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 모의인체의 형상은 평면형 거치가 가능한 구조이며 모의인체 내부에 고주파 APD 측정을 위한 인체등가용액이 채워져 있다. 28 GHz에 대한 인체등가용액은 비유전율 $\epsilon_r=5.2$, 전도도 $\sigma=3.23$ S/m 의 특성을 가진다. 고주파 인체등가용액의 경우 주파수가 높아짐에 따라 측정 위치 및 용액의 용량 변화에 민감해지므로 용액 위에 증발 방지용 플라스틱 공을 투입하여 측정 시 발생할 수 있는 인체 용액의 증발을 방지한다. 그림 3-36 (b)는 신규 고주파 전자파 흡수전력밀도 (APD) 측정을 위한 구성을 나타낸다. 1×4 배열 패치 안테나는 수동소자이므로 신호발생기 (signal generator)를 연결하여 실제 동작구성을 할 수 있도록 구성한다. 입력 전력은 20 dBm 으로 설정하였다. 그림 3-36 (c)는 신규 APD 측정 시스템의 모의인체 하단에 안테나를 거치하는 형상을 나타낸다. 측정 거치의 편차를 최소화하기 위해서 거치용 지그를 활용하였다.



(a) 고주파 APD 측정시스템



(b) 28 GHz 안테나 APD 측정구성



(c) 28 GHz 안테나 거치

그림 3-36. 28 GHz 안테나 APD 측정 구성

그림 3-37은 28 GHz 배열 안테나에 대한 전자파 흡수전력밀도 (APD)와 전자파 입사 전력밀도 (IPD) 측정결과 및 APD/IPD 비율을 나타낸다. 28 GHz 측정 결과, 인체조직 등가용액 조건에서 APD와 IPD 비율 기반 투과율을 측정한 결과, 실측값은 약 0.95로 나타났으며 이는 이론적 투과율 값인 0.85 대비 약 7% 편차를 보였다. 특히 해당 측정에서는 인체조직 등가용액 접촉에 따른 공진주파수 변동이 존재했음에도 불구하고, 안테나의 충분한 대역폭 확보로 인해 APD/IPD 비율이 이론적 투과율과 매우 유사한 값을 나타내었다는 점이 중요한 의미를 가진다. 이는 APD/IPD 기반 투과율 접근법이 고주파

(mmWave) 대역에서도 실측 조건과 잘 일치함을 보여주는 결과이다.

Patch array antenna @28GHz	APD measurement system		IPD measurement system		APD/IPD	
	APD [W/m ²] _{normal}		IPD [W/m ²] _{normal}		Transmittance : 0.85	
	1cm ²	4cm ²	1cm ²	4cm ²	1cm ²	4cm ²
Measurement Lab#1	13.3	8.37	14	-	0.95 (+7.1%)	-

그림 3-37. APD 및 IPD 측정결과 (28GHz)

본 측정에서 더 흥미로운 점은 투과율 결과가 앞서 수행된 8 GHz 대역 측정값(약 0.5 수준)보다 28 GHz에서 오히려 더 높게 나타났다는 점이다. 직관적으로 주파수가 증가하면 전자기장의 조직 침투 깊이(skin depth)가 감소하고 내부 흡수(SAR)는 줄어드는 경향이 있으므로 APD 또한 감소해야 할 것처럼 보일 수 있다. 그러나 실험적 투과율(APD/IPD)은 조직 내부 깊이에서의 흡수를 나타내는 SAR의 개념과 다르며, 경계면 반사(reflection), 매질 임피던스(η), 표면에서의 흡수 특성에 의해 지배되는 물리량이다. 이는 낮은 주파수와 높은 주파수에서 투과율 결과가 단순히 감소하거나 증가하는 단조적 경향을 보이지 않음을 의미한다.

식 (3-8)과 식 (3-9)를 비교해 볼 때 28 GHz 대역의 인체등가용액 ($\epsilon_r=5.2$, 전도도 $\sigma=3.23$ S/m)의 복소 임피던스를 계산하면 $\eta_2 \simeq 156 + j30 \Omega$ 이며, 이는 8 GHz와 같은 저주파 인체등가용액($\epsilon_r \approx 25 \sim 35$, $\sigma = 4 \sim 6$ S/m)보다 절대값이 공기 임피던스에 더 가까운 값이다. 즉, 고주파(mmWave) 팬텀은 실제 인체 특성 및 표피층 모델링을 위해 상대적으로 더 낮은 유전율과 적당한 전도도를 갖도록 구성되어 있어, 공기 - 매질 계면에서의 반사가 줄어들고 더 많은 전력이 표면으로 전달될 수 있는 조건이 형성된다.

이 이론적 특성은 고주파에서 조직 내부 침투는 줄어들지만, 표면 임피던스 매칭이 개선되면서 계면 투과율이 증가함을 의미한다. 즉, 내부 전자파 흡수전력밀도는 감소하지만 표면에 많은 전력이 형성되어 표면 APD/IPD 기반 투과율은 오히려 증가할 수 있으며, 28 GHz와 같은 mmWave 대역에서는 이러한 현상이 더욱 명확하게 나타난다. 28 GHz 인체조직 등가용액의 임피던스가 공기 임피던스와 유사하여 경계면 반사가 줄어들고, 안테나로부터 입사된 전력 중 더 많은 비율이 표면에서 흡수되었기 때문에 투과율 이론값은 약 0.85가 되었고, 실제 측정된 APD/IPD 값인 0.95 역시 이 범위와 어느 정도 수렴함을 알 수 있다.

그리고 mmWave 안테나 설계 시 저주파 대비 상대적으로 임피던스 대역폭 확보가 용이하므로 인체등가용액이 안테나에 접촉하는 경우 임피던스가 변화하더라도 안테나 대역폭 범위 내에 포함될 수 있다. 그림 3-38은 그림 3-34 (a) 안테나에 인체등가용액을 접촉할 때 임피던스 공진의 변화를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 넓은 대역

폭을 갖는 안테나 임피던스에 의해 등가용액에 대한 공진이 이동하더라도 측정 대역에서 유사한 임피던스 성능을 보임을 알 수 있다. 이러한 효과는 공진변화에 따른 APD/IPD 간의 전력밀도 변화가 일부 상쇄할 수 있다.



그림 3-38. 28GHz 대역 인체조직 등가용액 접촉유무에 따른 임피던스 변화

“이면은 공백임”

제4장 동시노출 간소화 평가기술 연구

제1절 동시노출 인체영향 평가

1. 기본 개요

현대의 모바일 기기들은 다양한 무선통신 기술을 동시에 사용하도록 설계되고 있으며, 이러한 기술적 변화는 단일 송신기 기반의 기존 인체노출 평가 방법으로는 충분히 반영하기 어려운 특성을 나타낸다. 예를 들어 스마트폰과 연동할 수 있는 스마트워치, 무선 이어폰과 같은 웨어러블 디바이스는 Wi-Fi, Bluetooth, LTE, 5G NR 등 서로 다른 주파수 대역과 송수신 모드를 갖는 복수의 송신기(Tx)를 동시에 작동시키는 것이 일반적이다. 특히 스마트폰은 셀룰러 모듈과 Wi-Fi 모듈이 상시 활성화되어 있으며, 사용자는 스마트워치나 무선이어폰과 연결하여 Bluetooth 송신을 지속적으로 수행한다. 이와 같이 서로 다른 무선 모듈이 동시에 동작하는 환경에서는 단일 송신기 기반으로 전자파 인체노출량을 평가했던 기존 방식과는 다른 접근이 필요하다.

동작 주파수가 상이한 복수 송신기 동시 동작(simultaneous transmission)은 인체 주변에 존재하는 전자기장 분포의 중첩(superposition)으로 고려할 수 있으며, 송신 경로별 출력, 변조 방식, 사용 주파수 대역에 따라 각 송신기의 기여도가 달라진다. 따라서 실제 사용 시나리오에서 발생하는 총 인체노출량은 단일 송신기의 노출량과 단순히 동일하거나 비례하지 않으며, 복수 송신기의 전자기장의 분포 형상 및 위치 등을 고려한 평가가 필수적으로 요구된다. 여기에 추가적으로 시간의 변화에 따른 입력전력의 변화를 반영할 수 있는 평가방법 역시 고려되어야 한다. 이는 무선기기 사용 환경이 통신 기술 고도화와 함께 점차 복잡해지고 있는 현대 사회에서 인체 안전성을 확보하기 위한 핵심 요소로 볼 수 있다.

그림 4-1은 이러한 전자파 동시노출 시나리오를 시각적으로 제시한 사례로, 스마트폰 사용자가 무선 이어폰과 스마트워치를 동시에 착용한 일반적 사용환경을 나타낸다. 스마트폰은 LTE 및 5G 모듈을 통해 셀룰러 통신을 수행하고, Wi-Fi를 통해 데이터 연결을 유지하며, 동시에 Bluetooth를 통해 무선 이어폰 및 스마트워치와 지속적으로 송수신을 수행한다. 즉, 단일 기기 내에서도 네 가지 이상의 무선 송신기들이 실시간으로 활성화될 수 있으며, 사용자가 착용한 주변 기기들까지 포함하면 실제 인체 주변에는

다양한 주파수 성분과 전자기장이 동시에 존재하게 된다. 이러한 현실적인 사용환경을 고려할 때, 다중 송신기 기반 인체노출 평가 방법의 정립이 필수적이며, 단일 송신기 기반 평가만으로는 충분한 안전성 판단을 제공할 수 없다는 점이 명확하다. 그러나 복수의 동시노출 조건에 대하여 각각의 단일 송신기 조건의 전자파 인체노출량 평가기준을 단순 합산하는 등의 접근은 무선 휴대기기 단말기의 통신 품질을 저하시킬 수 있으므로 평가 방법에 대한 신중한 접근이 필요하다.

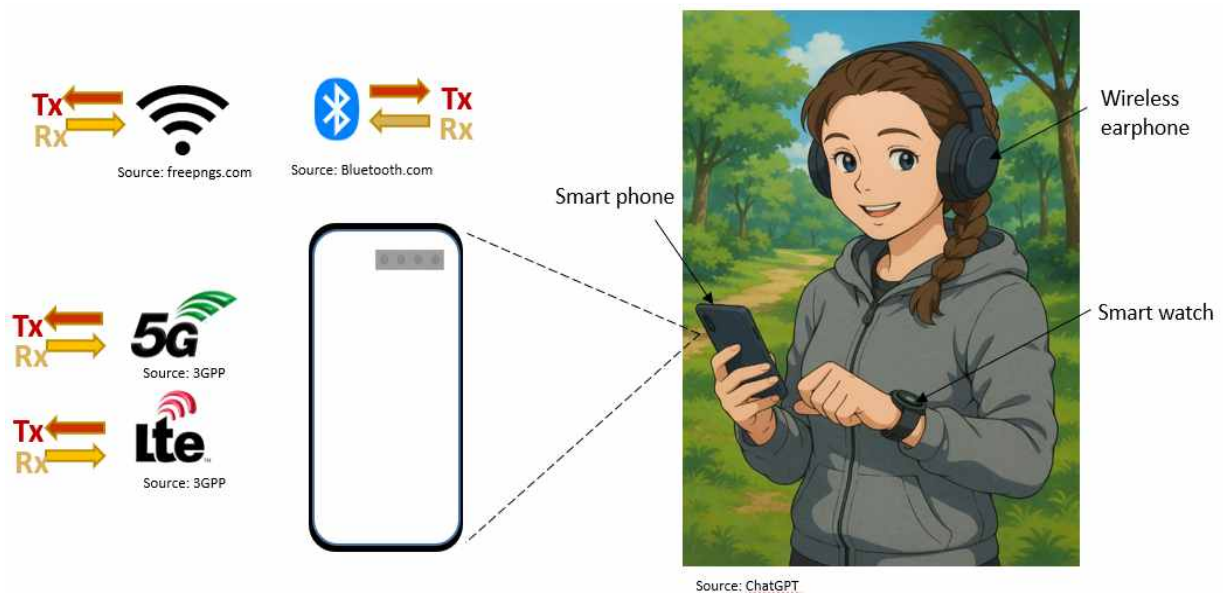


그림 4-1. 무선 휴대기기의 전자파 동시노출 사례

2. IEC/IEEE 62209-1528

다중 송신기를 내장한 무선 휴대기기의 전자파 흡수율 SAR 평가에서는 개별 송신기의 노출량을 단순히 분리하여 평가하는 기존의 단일 송신기 기준 방식만으로는 실제 인체 노출을 정확히 반영하기 어렵다. 이에 따라 IEC/IEEE 62209-1528 국제표준에서는 다중 송신기 조건에서의 SAR 평가를 위한 네 가지 대안적 접근 방법을 제시하고 있으며, 각 방법은 적용 조건, 보수성 수준, 측정 복잡성에서 차이를 보인다. 그림 4-2는 이 네 가지 방법(Alternative 1 - 4)에 대한 요약을 제공하고 있으며, 아래와 같이 보다 상세하게 설명할 수 있다 [26].

가. Alternative 1: psSAR 값의 단순 합 (Summation of psSAR values)

첫 번째 방법은 각 송신기로부터 측정된 psSAR(peak spatial-averaged SAR) 값을 단순히 합산하여 전체 SAR을 추정하는 방식이다. 이 방법은 적용이 가장 쉽고 별도의 추가 측정이 필요하지 않기 때문에 규제 현장에서 널리 활용된다. 그러나 송신기별 SAR 분포가 인체 내부에서 중첩되지 않는 경우에도 값이 그대로 누적되므로 실제 인체 노출보다 과대평가하는 경향이 있으며, 다중 송신기 조건에서 가장 보수적인 접근으로 분류된다. 그림 4-2는 Alternative 1의 대표 형상을 나타낸다.

Combined SAR=psSAR1+psSAR2

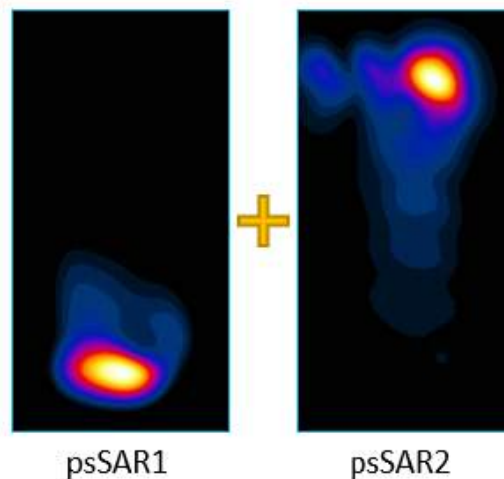


그림 4-2. IEC/IEEE 62209-1528 Alternative 1

나. Alternative 2: 가장 높은 psSAR 값 선택 (Selection of highest assessed psSAR)

두 번째 방법은 여러 송신기 중 가장 높은 psSAR 값을 가진 하나의 송신기만을 대표값으로 사용하는 방식이다. 이는 SAR 분포가 서로 겹치지 않을 때 유효한 방법으로, Alternative 1에 비해 과대평가 문제를 줄일 수 있다. 다만 송신기 간의 동시사용으로 인해 실제 총 SAR이 단일 송신기보다 더 커질 수 있는 상황에서는 보수성이 부적절하게 낮아질 수 있으므로 적용 조건이 제한된다. 그림 4-3은 Alternative 2의 대표 형상을 나타낸다.

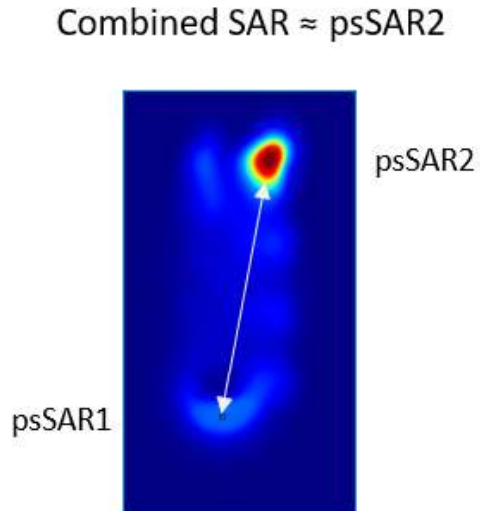


그림 4-3. IEC/IEEE 62209-1528 Alternative 2

다. Alternative 3: 기존 스캔 데이터를 활용한 Combined Volumetric SAR 산출

세 번째 방법은 이미 측정된 개별 송신기의 volumetric SAR 분포를 기반으로, 이들을 재구성(interpolation)하여 합성 SAR 분포를 계산하는 방식이다. 이 방법은 psSAR 단순 합산보다 실제 분포의 공간적 중첩을 고려할 수 있어 정확도가 높으며, Alternative 4 (직접 측정)보다 측정 자원과 시간을 절약할 수 있는 절충안으로 평가된다. 다만, SAR 지도의 재구성 과정에서 내삽 정확도, 측정 포인트 간격, 불확도 문서화 등 추가적인 기술적 고려가 필요하다. 그림 4-4는 Alternative 3의 대표 형상을 나타낸다.

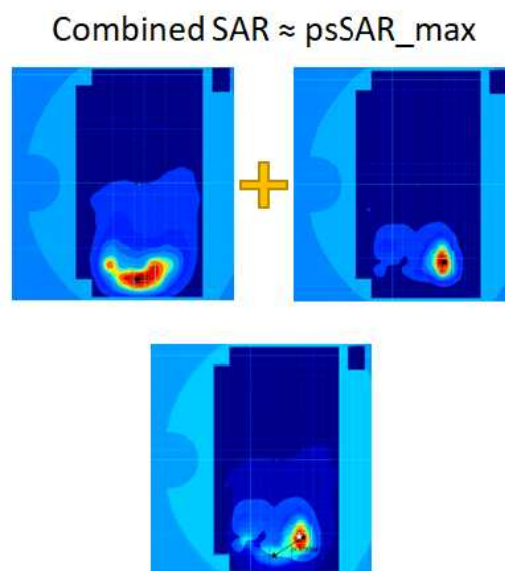


그림 4-4. IEC/IEEE 62209-1528 Alternative 3

라. Alternative 4: 전송기 동시구동 기반 Volumetric Scanning

네 번째 방법은 모든 송신기를 실제 동작 조건 그대로 동시에 구동한 상태에서 SAR을 직접 volumetric scan으로 측정하는 방식으로, 다중 송신기 환경에서 가장 정확하고 보수성이 낮은 평가 방법이다. 실제 인체에서 발생할 수 있는 송신기 간 상호작용을 그대로 반영할 수 있어 과소평가 또는 과대평가 가능성을 최소화한다. 그러나 전체 송신기를 동시에 동작시키며 전 영역 SAR을 측정해야 하므로 측정 자원이 가장 많이 소요되고 시간, 비용 측면에서 가장 부담이 큰 방법이다. 그림 4-5는 Alternative 4의 대표 형상을 나타낸다.

Combined SAR $\approx$ psSAR_{max}

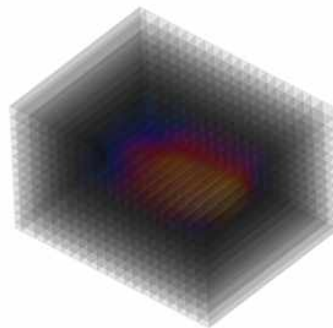


그림 4-5. IEC/IEEE 62209-1528 Alternative 4

이와 같이 네 가지 대안은 보수성(conservativeness), 정확도(accuracy), 측정 효율성(measurement efficiency)이 서로 다른 trade-off 관계를 형성하고 있으므로, 실제 제품 특성과 설계 의도, 송신 구조의 복잡성, 규제 요구사항을 종합적으로 고려하여 적절한 평가 방법을 선택하는 것이 중요하다.

3. 전자파 동시노출 평가 절차

다중 송신기를 탑재한 모바일 기기에서 발생하는 동시 SAR 노출을 효율적으로 평가하기 위한 실무적 절차를 정리하였다. 그림 4-5의 흐름도는 IEC/IEEE 62209-1528 등 국제표준의 기본 틀을 참고하되, 실제 시험소, 규제기관에서 운용 가능한 형태로 재구성한 것으로, 특히 동시노출 면제(exemption) 임계값의 적용 방식이 규제기관마다 다를 수 있다는 점을 전제로 하고 있다.

평가 절차는 우선 각 송신기를 개별적으로 측정하는 단계에서 시작된다. 모바일 기기 내부에는 셀룰러, Wi-Fi, Bluetooth 등 복수의 송신기가 존재하므로, 먼저 Transmitter

#1, Transmitter #2, ..., Transmitter #N에 대해 각각 독립적인 SAR 측정(SAR measurement #1, #2, ..., #N)을 수행하여 주파수별, 사용 모드별 psSAR 또는 볼륨 스캔 기준의 SAR 값을 확보한다. 이 개별 측정 결과를 이용하여 전체 동시노출 수준을 1차적으로 가늠하기 위해 TER(Total Exposure Ratio)을 산출한다. TER은 각 송신기의 SAR 기여도를 노출 기준값으로 정규화하여 합산한 지표로, $TER < 1$ 인 경우에는 모든 송신기의 동시동작을 가정하더라도 규정된 SAR 한계를 초과하지 않는 것으로 판단할 수 있다. 이 경우 추가적인 동시노출 평가가 필요하지 않으며, 시험 대상 기기는 SAR 기준을 만족하는 것으로 판정된다.

반대로 $TER \geq 1$ 인 경우에는 단순 합산으로는 기준 만족 여부를 보장할 수 없으므로, 보다 정밀한 동시노출 평가 단계로 진입한다. 일반적으로 규제기관 또는 표준에서 정의하는 동시노출 면제 임계값(exemption threshold)에 대한 기준은 거의 없거나 일부 규제기관에서 한정적으로 적용하고 있다. 일부 규제기관은 개별 송신기의 출력, 동작 듀티비, 공간적 분리 정도 등을 고려해 동시노출 평가를 생략할 수 있는 조건을 제시하고 있으며, 이러한 조건을 모두 만족하는 경우에는 실제로 동시 구동 측정을 수행하지 않고도 SAR 기준을 만족하는 것으로 인정할 수 있다.

그러나 $TER \geq 1$ 이면서 면제 조건도 만족하지 못하는 경우에는 실제 동시 구동 조건에서의 SAR 분포를 직접 평가해야 한다. 이를 위해 Transmitter #1과 #2(필요 시 #N까지)를 동시에 동작시킨 상태에서 각각의 볼륨 스캔을 수행하여, 각 송신기의 전자기장이 중첩된 분포에 대한 합성 SAR 분포를 획득한다. 이 단계는 그림 4-4, 그림 4-5에서 설명한 Alternative 3 또는 Alternative 4의 개념에 해당하며, 실제 사용 조건에서의 최대 SAR (SAR_{max})을 직접 계측할 수 있다는 장점이 있다.

동시 동작조건에서 도출한 볼륨 스캔 결과로부터 산출된 최대 SAR 값 (SAR_{max})은 이후 노출 기준과 비교된다. SAR_{max}가 규제에서 허용하는 제한값 이하로 나타나는 경우에는, 다중 송신기가 동시에 동작하더라도 인체 노출 기준을 만족하는 것으로 판단한다. 반면 SAR_{max}가 제한값을 초과하면, 단순 측정·평가만으로는 문제를 해결할 수 없고 제품 설계 관점에서의 개선이 요구된다. 그림 4-6의 흐름도에서는 이 경우 TAS(Time-averaged SAR), 전송 전력 감소(Power reduction), 안테나 구조 재설계(Antenna redesign) 등의 후속 조치를 통해 시간 평균 출력 제어 또는 안테나 특성 최적화로 노출량을 저감한 뒤, 다시 동일 절차에 따라 평가를 반복해야 함을 나타내고 있다.

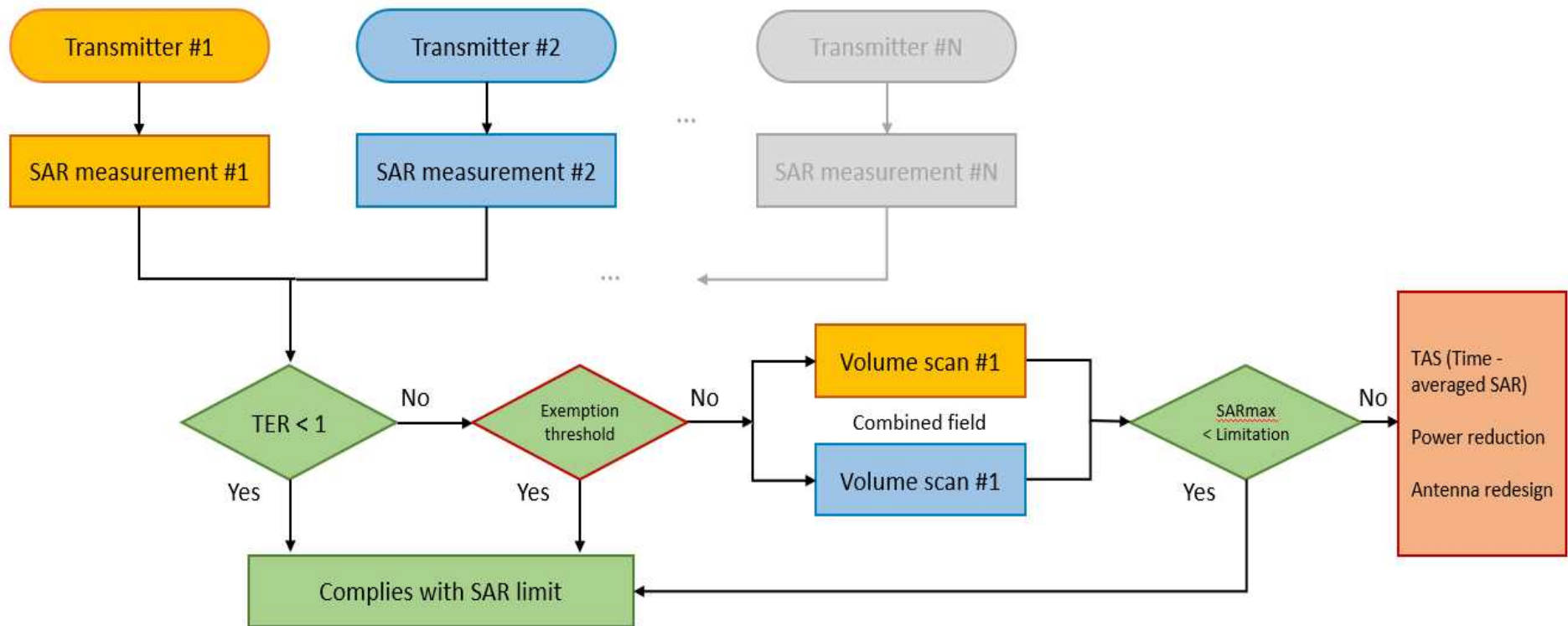


그림 4-6. 전자파동시노출 평가절차

실제 국내에서 판매되는 최신 무선 휴대 단말기의 경우 많은 경우 다른 주파수 조건에서 동시노출 시나리오가 빈번하여 Alternative 1 방법을 적용하는 경우 많은 시나리오에서 인체노출 평가기준을 만족하는 것이 어려우며, 많은 경우 Alternative 3 또는 Alternative 4의 방법을 적용하여 진행한다. 그러나 Alternative 3 및 Alternative 4 적용을 위해 단일 주파수에서 국소영역의 SAR 측정 대비 단일 주파수 전체 볼륨스캔 시 최대 4~6배이상 측정 시간이 소요될 수 있다. 최신 무선통신 휴대기기의 경우 2G/3G/4G/5G 및 WiFi 등 다양한 통신 기술이 적용되므로 실제 측정해야 하는 통신 주파수 대역은 중심 주파수 기준 30개 이상이다. 대역별 low, mid, high 주파수를 측정해야 하는 경우 측정 주파수의 양은 3배 이상 늘어날 수 있으며 이는 단말기 전체 영역에 대해 전체 주파수 대역의 볼륨 스캔을 진행하는 것은 많은 시간 및 비용이 발생할 수 있다. 따라서 Alternative 3 및 Alternative 4 방법을 적용하기 전 동시노출 면제 임계값 (exemption threshold)에 대한 기준을 마련하여 평가절차의 우선 처리를 진행한다면 실제 Alternative 3 및 Alternative 4 방법 적용이 필요한 시나리오만 측정할 수 있어 평가 절차를 효율화 할 수 있다.

제2절 SAR 분포 특성

1. SAR 분포 분석 : 시뮬레이션

전자파흡수율 (SAR)은 단위 부피당 흡수되는 전력량을 나타내는 물리량으로, 이는 국부적인 전기장 분포(E-field distribution)에 기초하여 계산된다. 따라서 SAR 분포를 수치적으로 모델링하기 위해서는 먼저 전기장 강도와 SAR 간의 관계를 명확히 이해하고 해석할 필요가 있다.

그림 4-7은 휴대단말 목업 기준 전기장 분포와 대응되는 SAR 분포를 동시에 보여준다. 전기장은 주로 급전부 주변에서 높게 형성되며, 이 외에도 안테나 구조의 끝단 및 전류 불연속이 발생하는 경계부(예: 오른쪽 분절 끝)에서도 높은 전기장 강도가 관찰된다. 이는 안테나의 구조적 특성과 전류 분포의 기하학적 영향으로 해석할 수 있다.

그러나 SAR은 단순한 전기장 값이 아닌, 단위 부피 내 전력량을 평균한 결과로 정의되므로, 해당 분포는 전기장 패턴과 일치하지 않는 양상을 보인다. 실제로 SAR 분포는 전기장이 집중된 급전부 인근에서 가장 높게 나타나며, 그 외 국소적으로 높은 전기장이 존재하는 영역에서는 부피 평균화에 의해 상대적으로 값이 낮아지거나 평탄화된 형태로 나타난다. 즉, 전기장이 급격히 변동하는 구조에서도 SAR은 단위 부피 기준 평균화 과정을 거치므로, 결과적으로 보다 연속적이고 완만한 공간 분포 형태를 갖게 된다. 이와 같은 특성은 SAR 모델링 시 전기장 기반 해석 결과와의 정합성 확보에 중요한 기준으로 작용하며, 고주파 대역에서의 인체노출 예측에 있어 고려되어야 할 핵심 요소이다 [28].

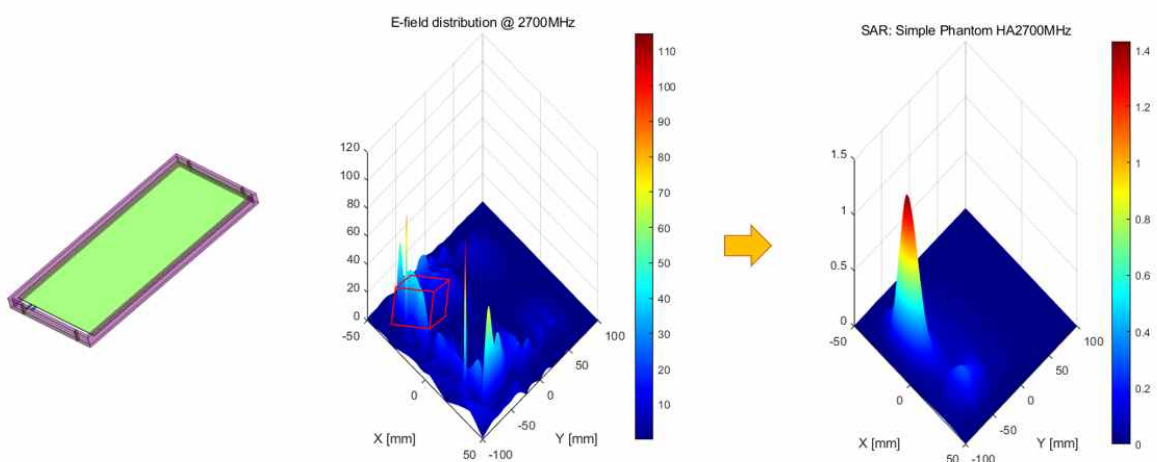


그림 4-7. 전기장 분포와 SAR 분포 비교 [28]

그림 4-8은 서로 다른 주파수 조건에서 도출된 SAR 분포의 공간적 특성을 비교한

결과를 보여준다. 해당 그림에서 확인할 수 있듯이, 주파수가 증가함에 따라 SAR 분포는 전반적으로 더 부드럽고 연속적인 형상을 나타내며, 이와 같은 경향은 고주파수 영역으로 갈수록 더욱 뚜렷하게 나타난다. 이는 고주파 대역에서 전자기장이 인체 표면에서 급격히 감소하면서 국부적인 전력 밀도 분포가 보다 균일하게 평균화되는 특성과 관련이 있으며, 주파수 증가에 따른 전자파 침투 깊이 감소와도 밀접한 연관이 있다.

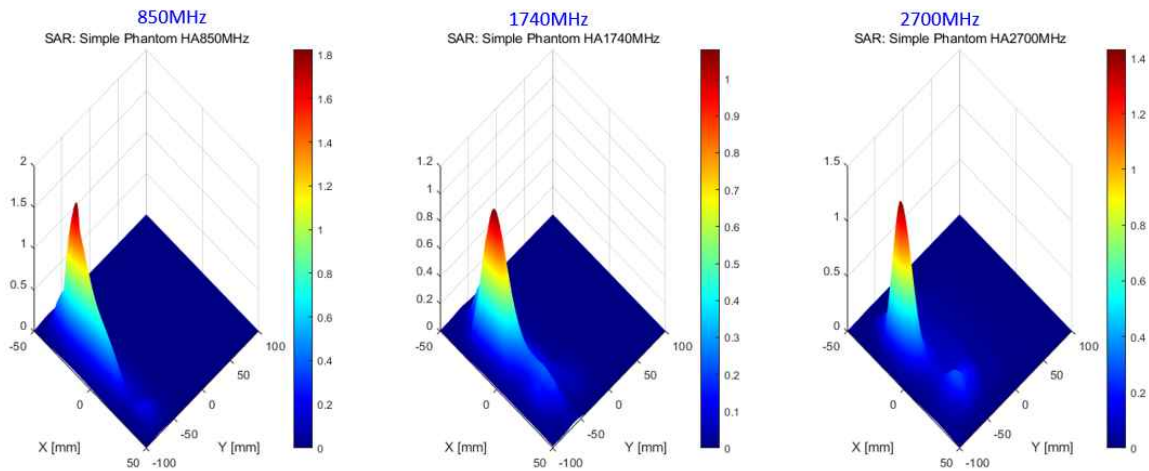


그림 4-8. 주파수별 SAR 분포 형태 [28]

또한, 그림 4-9에 제시된 2차원 평면 상의 SAR 분포를 살펴보면, 주파수가 증가할수록 최대값(peak)을 중심으로 하는 분포 형태가 보다 대칭적인 원형 구조에 가까워지는 경향을 확인할 수 있다. 이러한 양상은 고주파 대역에서 전자기장의 침투 깊이가 얕아지고, 에너지 흡수가 국부 표면에 집중됨에 따라 공간적으로 균일한 방향성을 가지는 전력 흡수 패턴이 형성되기 때문으로 해석된다. 결과적으로, 고주파에서는 SAR 분포가 보다 축 대칭적이고 집중된 형태를 보이며, 이는 저주파 대역에서 관찰되는 비대칭적이고 확산된 분포와는 명확히 구분된다. mmWave 대역에 대한 전력밀도(PD)의 경우 고주파 대역 SAR 분포와 유사한 분포 형태를 보이므로 전자파 인체 동시노출 평가방법을 동일하게 적용할 수 있다 [28].

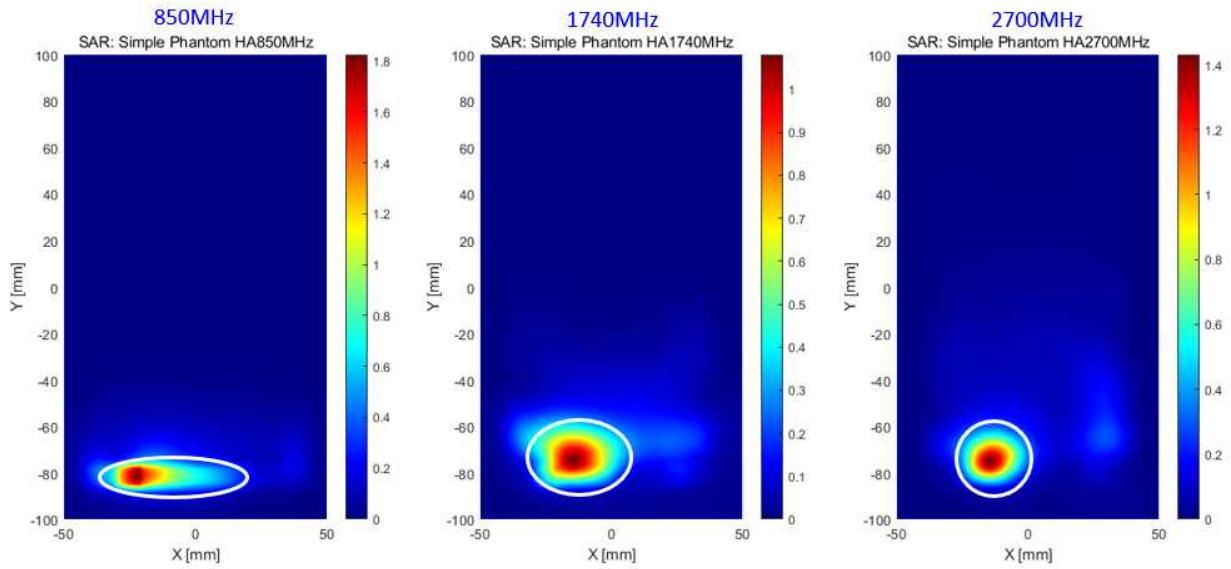
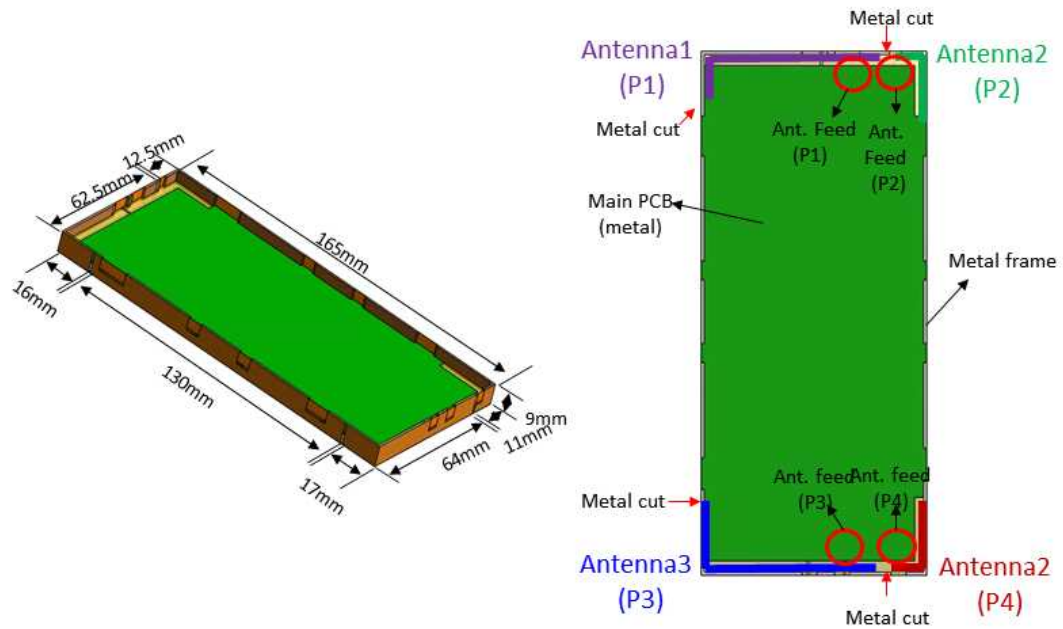


그림 4-9. 주파수별 SAR 분포 형태 (평면도) [28]

2. SAR 분포 분석 : 측정

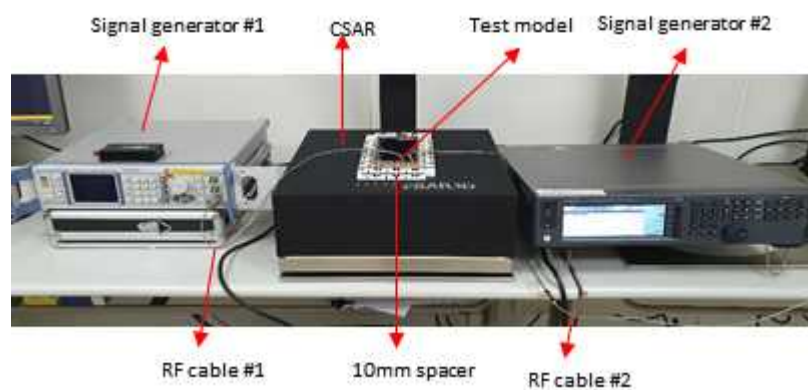
그림 4-10은 휴대기기 단말기 형태의 목업 (mockup) 구조를 나타낸다. 그림 4-10 (a)에서 단말기 형태의 목업크기는 실제 단말기 형상과 유사하게 75 mm × 165 mm × 9 mm 로 설계하였고 단말 구조의 하단과 상단에 금속 프레임 안테나를 배치하였다. 그림 4-10 (b)는 설계된 목업구조를 측정을 위해 제작한 형상을 나타낸다. 하단 및 상단에 각각 2개의 안테나가 배치되어 있고 급전은 안테나 방사에 영향을 최소화하기 위해 측면부로 케이블을 통해 결합하였다. 목업 제작 후 그림 4- 10(c)와 같이 Speag사의 CSAR 시스템 장비를 이용하여 SAR 동시노출 조건에 대한 측정을 진행하였다. 안테나는 수동소자이므로 신호발생기를 이용하여 안테나 급전에 전력을 공급하였다.



(a) 목업 설계



(b) 목업 제작



(c) SAR 측정 시스템

그림 4-10. SAR 측정 분석 시스템 [28]

그림 4-11은 휴대기기 단말기 형태의 목업 (mockup) 구조에 대한 전자파 수치해석 시뮬레이션과 측정 결과를 나타낸다. 주파수는 835 MHz, 1710 MHz, 2535 MHz, 3550 MHz 로 무선 휴대단말기가 사용하는 대표적인 low, mid high 대역 주파수로 선정하였다. 주파수가 높아짐에 따라 SAR 분포 형상이 타원에서 원형으로 변화하며 이는 단말기에 배치된 안테나 길이 및 구조와 관련이 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시뮬레이션과 측정 조건에서 SAR 분포가 유사함을 알 수 있다.

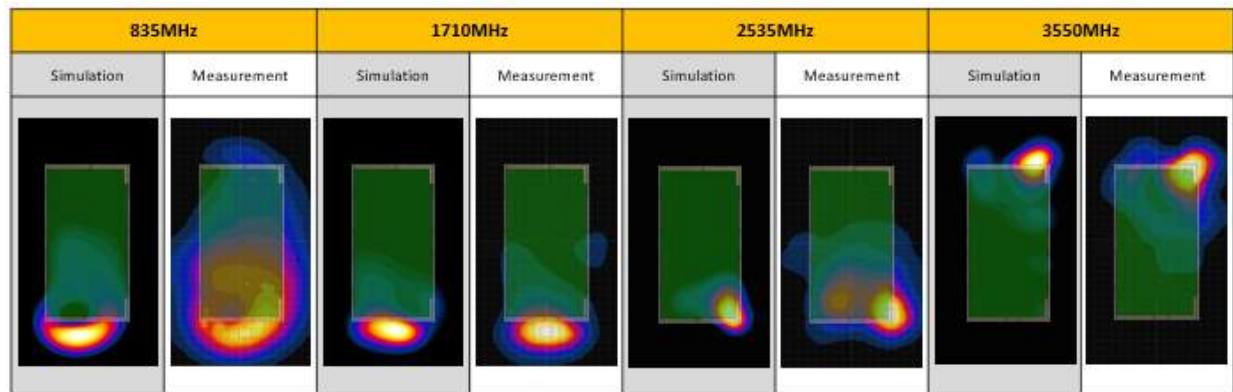


그림 4-11. SAR 분포 비교 (시뮬레이션 vs. 측정)

제3절 1차원 SAR 분포 모델링 및 합성

1. 1차원 SAR 분포 모델링

가. 1D 가우시안 분포

SAR 시뮬레이션을 통해 도출된 분포 특성을 분석해보면, 전기장(E-field)에 대해 단위 부피 기준으로 평균화가 적용되기 때문에, 대부분의 SAR 분포는 극대값(peak)을 중심으로 연속적이고 완만한 곡선 형태로 나타나는 경향이 있다. 이러한 형상은 통계적으로 가우시안 분포(Gaussian distribution)와 유사한 특징을 가지며, 본 연구에서는 SAR 분포를 정량적으로 표현하기 위해 식 (4-1)과 같은 함수 형태로 근사하였다.

$$SAR(x) = A \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad \text{식 (4-1)}$$

이때, 일반적인 1차원 가우시안 함수의 구성 요소인 A , μ , σ 는 각각 다음과 같은 물리적 의미로 해석될 수 있다.

- 1) μ 는 분포의 중심 좌표로, SAR 분포의 경우 최대값이 발생하는 위치, 즉 급전부(fed point) 근방과 밀접한 관련이 있다.
- 2) σ 는 표준편차로서, SAR 분포의 공간적 확산 정도, 즉 분포의 넓이를 의미하며, 이는 안테나의 길이 또는 단말기 구조의 물리적 길이와 연관된다.
- 3) A 는 함수의 최대값으로, SAR의 peak 값을 나타내며, 이는 단말기 입력 전력(conducted power)이나 안테나 효율 등의 시스템 파라미터에 의해 결정된다.

이러한 구성은 특정 단말기 모델에 대해 SAR 분포의 정규화된 근사 함수를 구성하는데 유용하지만, 다양한 단말기 형상 및 구조적 특성을 반영하기 위해서는 각 파라미터(A , μ , σ)에 대한 추가적인 실험적 분석 및 보정 연구가 요구된다.

그림 4-12는 식 (4-1)에 따라 모델링된 1차원 SAR 분포의 예시를 나타내며, 시뮬레이션 기반 SAR 결과의 통계적 해석 가능성을 제시한다.

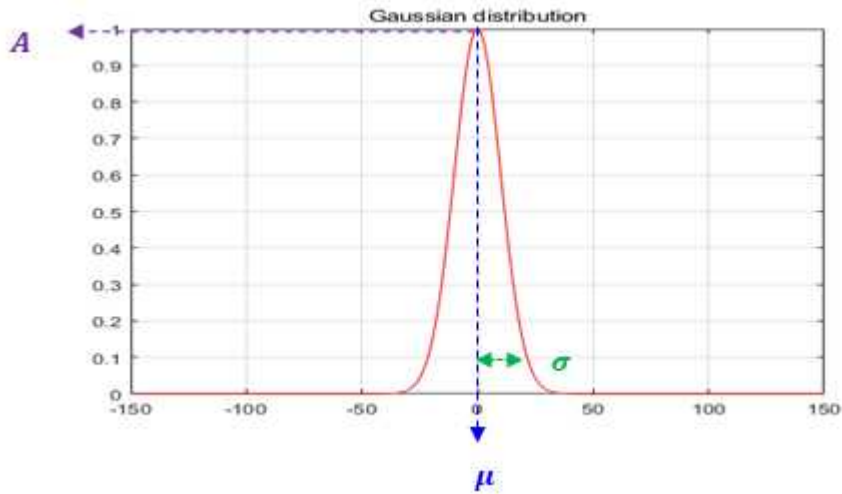


그림 4-12. 1차원 SAR 분포 모델링

나. 1D 가우시안 분포 합성

SAR 분포가 단일 급전원에 의해 형성되는 경우, 해당 분포는 일반적으로 하나의 1차원 가우시안 함수로 근사할 수 있으며, 이는 연속적이고 대칭적인 형태를 띤다. 그러나 다수의 급전 위치가 존재하거나, 여러 송신 안테나가 일정 간격을 두고 배치된 구조에서는 SAR 분포가 두 개 이상의 피크를 가지는 다중 극값 형태로 나타날 수 있다. 이러한 경우 SAR 분포는 복수의 가우시안 분포 함수의 합성(superposition)으로 표현하는 것이 보다 적절하다.

두 개의 급전원이 각각 독립적인 전자기장을 형성한다고 가정할 때, 전체 SAR 분포는 두 개의 1D 가우시안 함수의 중첩으로 근사할 수 있으며, 이는 식 (4-2) 표현된다.

$$SAR_{Combined}(x) = A_1 \exp\left(-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad \text{식 (4-2)}$$

그림 4-13은 식 (4-2)로 표현된 2개의 가우시안 분포를 합성한 결과를 나타낸다.

- 1) μ_1, μ_2 는 각각의 가우시안 분포의 중심 위치로, 각 급전 위치 또는 안테나 중심과 관련되며,
- 2) σ_1, σ_2 는 각 분포의 확산 정도로, 국지적인 전기장 퍼짐이나 안테나 구조의 물리적 길이와 관련된다.
- 3) A_1, A_2 는 각 분포의 최대값(SAR peak)으로, 급전 전력의 크기 또는 안테나 효율 차이에 따라 결정된다.

그림 4-12와 유사한 방식으로 시각화된 합성된 가우시안 SAR 분포는, 중첩 거리에 따라 다양한 형태를 가지게 된다. 두 분포 간 중심 간격이 충분히 클 경우, 두 개의 개별

피크가 뚜렷이 구분되며, 이는 이격된 송신원의 독립적인 전자기장 영향으로 해석된다. 반면, 중심 간격이 짧아지는 경우 두 분포는 서로 겹치며, 결합된 단일 피크 또는 비대칭형 분포로 나타나게 된다.

이러한 합성 가우시안 모델은 다중 송신 구조, MIMO 안테나, 또는 안테나 복합 방사 구조에서 나타나는 SAR 분포를 효과적으로 해석할 수 있는 수단이며, SAR hotspot 간 이격 거리, 평균 전력 분포, 결합 패턴 등을 정량적으로 분석하는 데 유용하다.

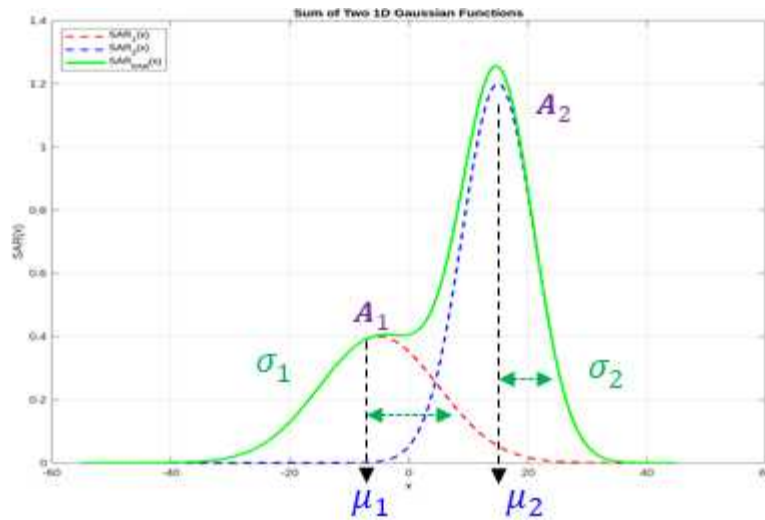


그림 4-13. 1D 가우시안 분포 합성

2. 1차원 SAR 분포 모델링 기반 최대 위치 근사방법

동일한 무선 단말기 내에 두 개 이상의 송신 안테나가 장착되는 경우, 각각의 송신원에 의해 생성되는 SAR 분포는 서로 중첩되어 인체에 복합적인 영향을 미치게 된다. 이러한 동시노출 조건 하의 인체 노출량 평가를 보다 간결하고 효율적으로 수행하기 위해, 본 연구에서는 1차원 가우시안 분포 기반의 SAR 모델을 활용한 합성 분석 기법을 적용하였다.

구체적으로는, 각 송신 안테나에서 유도되는 SAR 분포가 공간적으로 일정한 규칙성을 갖는다는 점에 착안하여, 이를 각각 가우시안 함수로 근사하고, 두 함수의 중첩을 통해 전체 SAR 분포의 최대값이 형성되는 위치를 추정하는 방식이다. 특히, 송신 안테나 간의 이격거리 변화에 따라 합성 SAR 분포의 형상 및 극대값의 위치가 달라지는 특성을 반영하여, 동시노출 조건에서 발생 가능한 최대 SAR 좌표를 수치적으로 예측할 수 있는 기반을 마련한다. 이러한 분석은 복잡한 전자파 해석을 모두 수행하지 않더라도, 각 송신원의 특성만을 활용하여 최대 노출 지점을 간편하게 예측할 수 있는 장점이 있다. 이에 따라 다양한 송신 조건 및 단말기 구조에 대한 비교적 빠른 초기 평가가 가능하며, 동시노출 평가의 간소화 및 설계 초기 단계에서의 위험도 예측에도 유용하게 적용될 수 있다.

본 절에서는 전자파 동시노출 조건의 합성 SAR 중 최대값을 찾기위한 간소화 방법을 제시한다. 그림 4-14와 같이 간소화 방법은 2개의 가우시안 분포가 합성될 때 가장 큰 값을 갖는 좌표값을 예측하여 최대 SAR 값을 도출하는 방법으로 가중 평균방법과 1차 미분에 기반한 근사법을 제시한다.

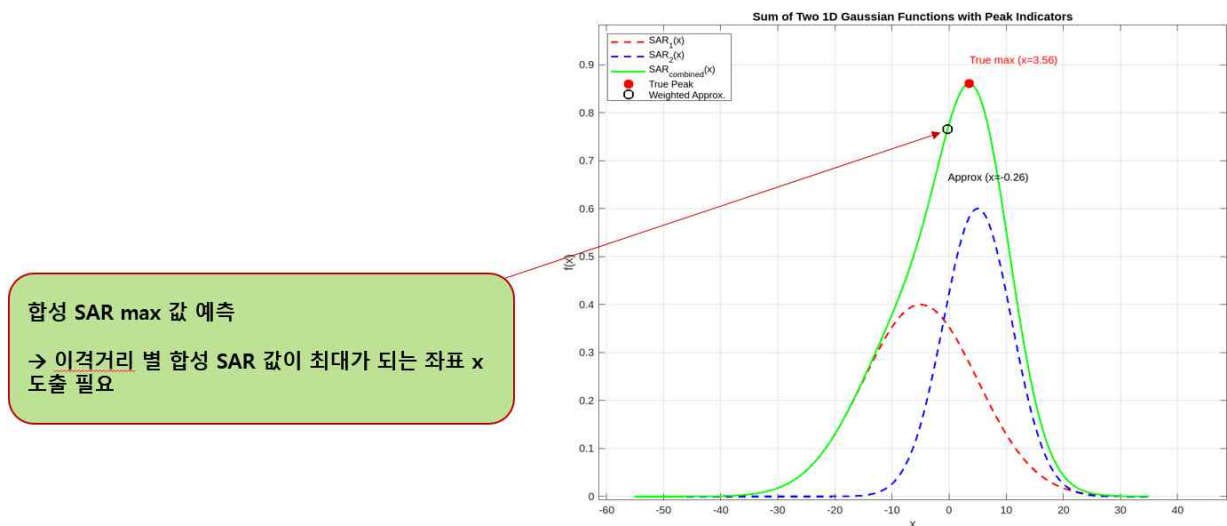


그림 4-14. 1D 가우시안 분포 합성 시 최대위치

가. 가중 평균 근사식

복수의 송신 안테나를 탑재한 단말기의 동시노출 조건에서, 각 안테나에 의해 유도되는 SAR 분포는 개별적으로 국지적인 피크를 가지며, 이들이 중첩될 경우 전체 SAR 분포의 형상과 최대값의 위치가 변동될 수 있다. 이러한 상황을 모델링하기 위해 본 연구에서는 각 SAR 분포를 1차원 가우시안 함수로 근사하고, 이들을 선형적으로 합성하여 복합 SAR 분포를 구성하였다.

두 개의 SAR 분포가 서로 다른 위치에서 발생할 경우, 전체 SAR 분포의 최대값은 일반적으로 두 중심값 사이의 어느 한 지점에서 나타나게 된다. 이때 복합 SAR 분포의 극대값이 발생하는 위치를 보다 단순하게 추정하기 위해, 가중평균 기반 근사식을 적용할 수 있다. 이는 물리적 직관에 기반한 방법으로, 두 분포의 크기(A), 폭(σ), 위치(μ)를 고려하여 식 (4-3)과 같이 근사 표현된다:

$$x_{peak}^{app.} = \frac{A_1 \cdot \sigma_1 \cdot \mu_1 + A_2 \cdot \sigma_2 \cdot \mu_2}{A_1 \cdot \sigma_1 + A_2 \cdot \sigma_2} \quad \text{식 (4-3)}$$

이 식은 질량중심(center of mass) 개념과 유사하게 해석할 수 있으며, 각각의 가우시안 분포를 하나의 ‘질량(m)’으로 간주하고 중심 위치를 μ , 분포의 폭을 질량 분포의 범위로 고려함으로써, 두 질량 중심의 평형점을 계산하는 방식이다. 그림 4-15는 질량 중심 가중 평균을 나타낸다.

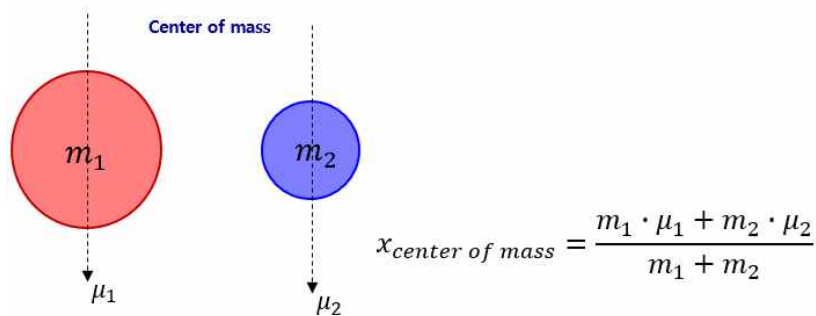


그림 4-15. 가중평균 예시

실제 사례에서 이 근사식은 복합 SAR 분포의 최대값 좌표를 상당히 정확하게 예측할 수 있으며, 복잡한 수치 최적화 과정을 거치지 않고도 SAR 분석의 초기 평가나 설계 단계에서 유용한 근사 해법으로 활용될 수 있다. 그림 4-16은 두 개의 가우시안 분포와 이들의 합성 결과를 시각적으로 나타내며, 가중평균 근사식에 의해 예측된 피크 위치가 실제 SAR 합성곡선의 최대값과 유사한 위치임을 알 수 있다.

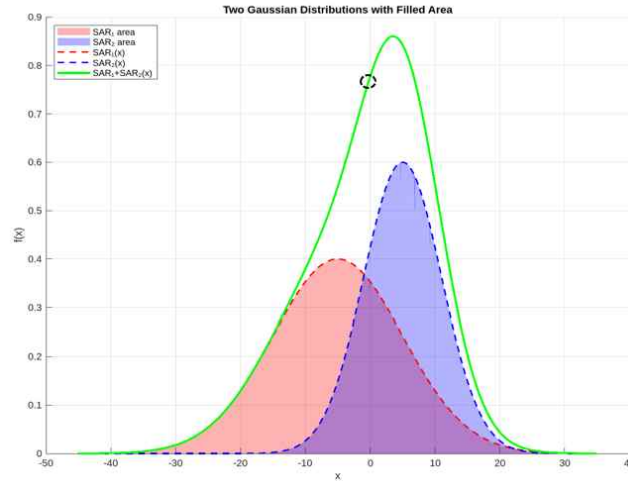
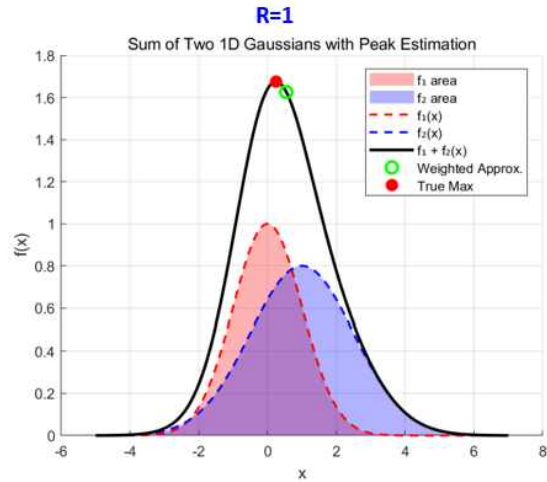
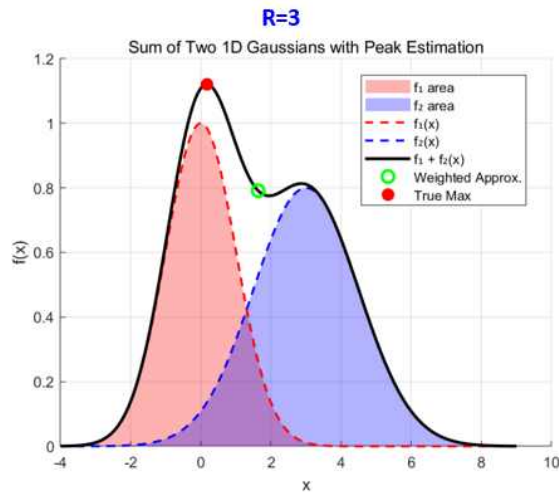


그림 4-16. 가중평균을 통한 합성 가우시안 분포 최대값

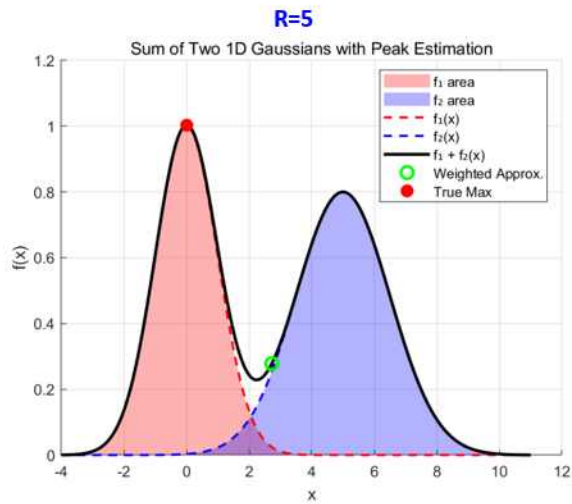
그림 4-17은 2개의 가우시안 분포의 거리에 따른 가중평균을 이용한 좌표 위치의 차이를 나타낸다. 그림에서 붉은색 점선은 첫 번째 가우시안 분포, 파란색 점선은 두 번째 가우시안 분포, 검정색 실선은 합성 가우시안 분포를 나타낸다. 검정색 합성 가우시안 분포 그래프 상의 붉은색 원은 실제 합성 SAR의 최대값, 연두색 원은 가중평균 근사식을 이용한 합성 SAR의 최대값 위치를 나타낸다. 그림 4-17 (a)는 두 가우시안 분포의 최대 위치 간 거리가 1인 경우이며, 실제 합성 SAR의 최대값과 가중평균 예측결과와 매우 유사함을 알 수 있다. 그림 4-17 (b)는 두 가우시안 분포의 최대 위치 간 거리가 3인 경우이며, 실제 합성 SAR의 최대값과 가중평균 예측결과가 상당한 차이를 보이고 있다. 그림 4-17 (c)는 두 가우시안 분포의 최대 위치 간 거리가 5인 경우이며, 실제 합성 SAR의 최대값 대비 가중평균 예측결과는 두 가우시안 분포의 각각 최대값의 중간에 위치하고 있어 실제 결과와 매우 큰 차이를 보이고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 가중평균 근사식을 이용하여 합성 SAR 결과를 도출하는 경우 두 가우시안 분포가 근접한다면 실제 결과와 매우 유사한 값을 얻을 수 있다. 그러나 두 가우시안 분포의 위치가 멀어질수록 가중평균 근사식에 의한 합성 SAR 결과는 정확도가 떨어짐을 알 수 있다.



(a) 가우시안 최대값 간격 $R=1$



(b) 가우시안 최대값 간격 $R=3$



(c) 가우시안 최대값 간격 $R=5$

그림 4-17. 거리별 가중평균을 통한 합성 가우시안 분포

나. A/σ^k 가중 평균 근사식

단순 가중평균 근사식을 이용하여 합성 SAR의 최대값을 도출하는 경우 두 가우시안 분포의 거리에 따라 실제 최대값과 편차가 크게 발생함을 알 수 있다. 이를 개선하기 위해 가우시안 분포의 크기와 폭에 대한 가중치를 추가한 가중평균 근사식을 고려할 수 있다. 가중치는 A/σ^k 이고 파라미터 k 는 1, 2, 3을 적용한다. $k=1$ 의 경우 가우시안 분포의 최대값에 가중치를 두는 방법이고, 식 (4-4)으로 표현할 수 있다. $k=2$ 는 가우시안 분포의 면적당 밀도에 가중치를 두며, 식 (4-5)로 표현된다. $k=3$ 은 가우시안 분포에 대해 좁은 폭의 형상을 가중치로 활용하는 방법이며 식 (4-6)로 표현할 수 있다.

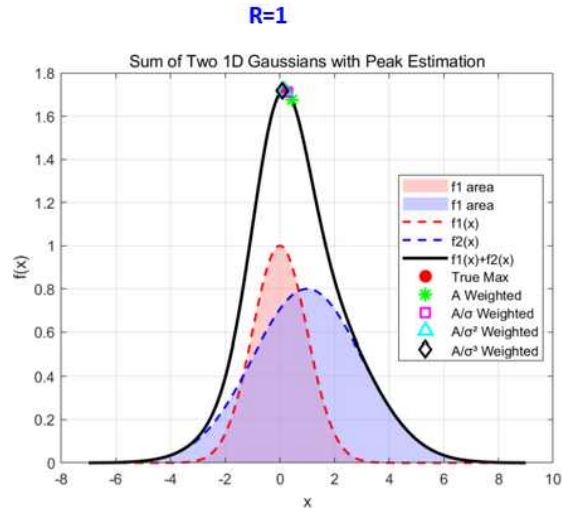
$$x_{peak}^{app.} = \frac{\left(\frac{A_1}{\sigma_1}\right) \cdot \mu_1 + \left(\frac{A_2}{\sigma_2}\right) \cdot \mu_2}{\left(\frac{A_1}{\sigma_1}\right) + \left(\frac{A_2}{\sigma_2}\right)} \quad \text{식 (4-4)}$$

$$x_{peak}^{app.} = \frac{\left(\frac{A_1}{\sigma_1^2}\right) \cdot \mu_1 + \left(\frac{A_2}{\sigma_2^2}\right) \cdot \mu_2}{\left(\frac{A_1}{\sigma_1^2}\right) + \left(\frac{A_2}{\sigma_2^2}\right)} \quad \text{식 (4-5)}$$

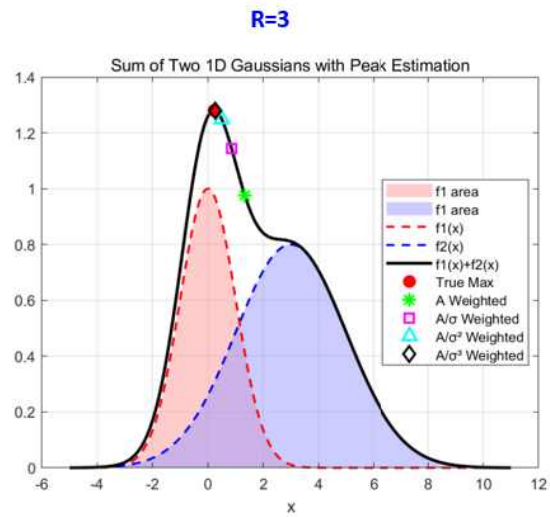
$$x_{peak}^{app.} = \frac{\left(\frac{A_1}{\sigma_1^3}\right) \cdot \mu_1 + \left(\frac{A_2}{\sigma_2^3}\right) \cdot \mu_2}{\left(\frac{A_1}{\sigma_1^3}\right) + \left(\frac{A_2}{\sigma_2^3}\right)} \quad \text{식 (4-6)}$$

그림 4-18은 2개의 가우시안 분포의 거리에 따른 A/σ^k 가중평균을 이용한 좌표 위치의 차이를 나타낸다. 그림에서 붉은색 점선은 첫 번째 가우시안 분포, 파란색 점선은 두 번째 가우시안 분포, 검정색 실선은 합성 가우시안 분포를 나타낸다. 검정색 합성 가우시안 분포 그래프 상의 붉은색 원 표시는 실제 합성 SAR의 최대값, 연두색 원 표시는 단순 가중평균 근사식을 이용한 합성 SAR의 최대값, 분홍색 사각형 표시는 A/σ 가중평균 근사식을 이용한 합성 SAR의 최대값, 하늘색 삼각형 표시는 A/σ^2 가중평균 근사식을 이용한 합성 SAR의 최대값, 검정색 마름모 표시는 A/σ^3 가중평균 근사식을 이용한 합성 SAR의 최대값 위치를 나타낸다. 그림 4-18 (a)는 두 가우시안 분포의 최대 위치간 거리가 1인 경우이며, 실제 합성 SAR의 최대값과 단순 가중평균 예측결과, A/σ^k 가중

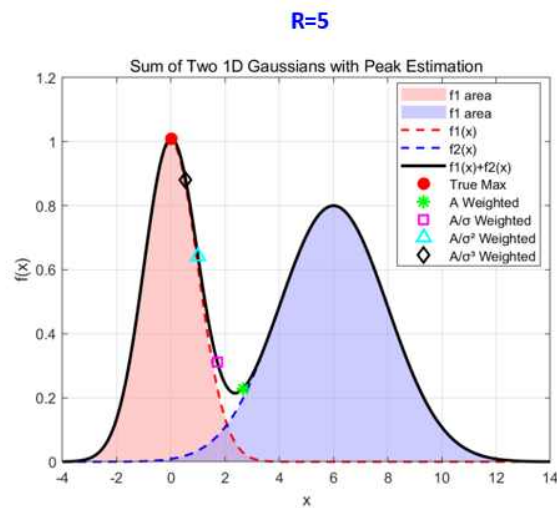
평균을 예측결과가 매우 유사함을 알 수 있다. 그림 4-18 (b)는 두 가우시안 분포의 최대 위치 간 거리가 3인 경우이며, 실제 합성 SAR의 최대값과 A/σ^3 가중평균, A/σ^2 가중평균은 매우 유사한 결과를 보이고, A/σ 가중평균, 단순 가중평균의 순으로 k 값에 따라 예측결과가 상당한 차이를 보이고 있다. 그림 4-18 (c)는 두 가우시안 분포의 최대 위치 간 거리가 5인 경우이며, 실제 합성 SAR의 최대값과 A/σ^3 가중평균이 유사한 경향을 보이고, A/σ^2 가중평균, A/σ 가중평균, 단순 가중평균의 순으로 k 값에 따라 예측결과가 상당한 차이를 보이고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 A/σ^k 가중평균 근사식을 이용하여 합성 SAR 결과를 도출하는 경우 두 가우시안 분포가 근접한다면 실제 결과와 매우 유사한 값을 얻을 수 있고, 두 가우시안 분포의 위치가 멀어지더라도 k 값에 따라 실제 최대값과 유사한 경우가 있음을 알 수 있다. 그러나 A/σ^k 가중평균 근사식은 가우시안 분포의 진폭에 따라 최대 위치의 오차가 발생할 수 있어 추가 검증이 필요하다.



(a) 가우시안 최대값 간격 $R=1$



(b) 가우시안 최대값 간격 $R=3$



(c) 가우시안 최대값 간격 $R=5$

그림 4-18. 거리별 A/σ^k 가중평균을 통한 합성 가우시안 분포

다. 1차 미분 기반 근사식

1차원 공간상에서 두 개의 서로 다른 송신원 또는 급전 위치로부터 발생한 SAR 분포는, 각각의 전자기장 영향에 따라 개별적인 피크를 형성하며, 그 결과 전체 SAR 분포는 두 개의 가우시안 함수의 합으로 근사될 수 있다. 이와 같은 합성 SAR 분포는 타식 (4-2)로 정의된다. 식 (4-2)로 표현되는 합성함수의 최대값을 구하기 위해 함수 x 에 대한 미분 후 극대값을 찾을 수 있다.

두 항의 합으로 이루어진 함수 식 (4-2)를 미분하면 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$f(x) = SAR_{Combined}(x) = A_1 \exp\left(-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad \text{식 (4-7)}$$

$$\frac{d}{dx}f(x) = f'_1(x) + f'_2(x) \quad \text{식 (4-8)}$$

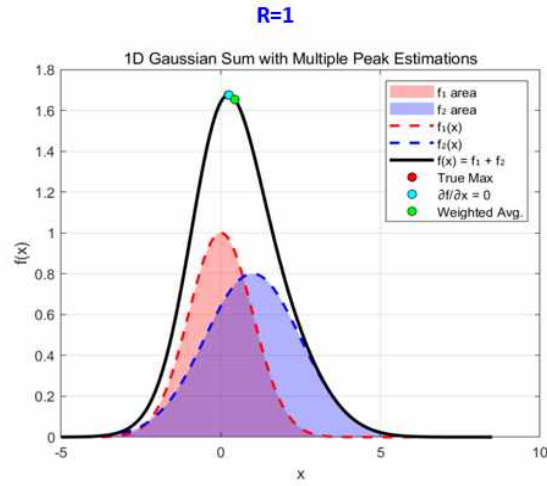
$$f'(x) = -f_1(x) \frac{(x-\mu_1)}{\sigma_1^2} - f_2(x) \frac{(x-\mu_2)}{\sigma_2^2} \quad \text{식 (4-9)}$$

$$f'(x) = -A_1 \exp\left(-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) \frac{(x-\mu_1)}{\sigma_1^2} - A_2 \exp\left(-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) \frac{(x-\mu_2)}{\sigma_2^2} \quad \text{식 (4-10)}$$

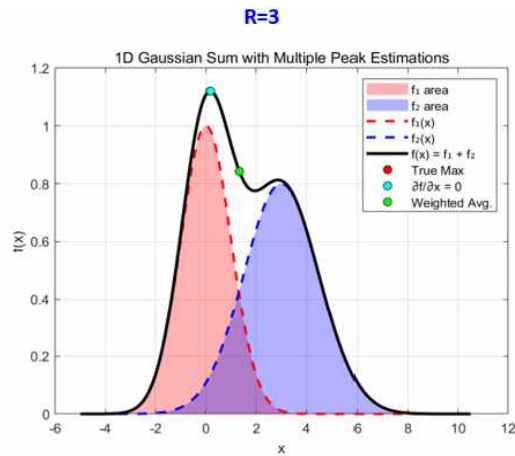
1차 미분의 최종 방정식은 식 (4-10)과 같다. 이는 비선형 방정식이므로 일반적인 해석적 해를 도출하기는 어렵지만, 수치적인 방법을 통해 합성 가우시안 분포의 최대값 좌표를 정밀하게 추정할 수 있다. 이 미분 기반 접근은 두 가우시안 중심 사이의 간격이 클수록 합성 SAR 분포가 비대칭적일 수 있다는 점에서 유용하다. 특히, 가중평균 근사식이 정확한 위치를 예측하기 어려운 경우, 미분을 활용한 정밀 분석을 통해 최대 노출 위치를 정확히 도출할 수 있으며, 동시노출 상황에서의 hotspot 관리 또는 worst-case 평가에 활용될 수 있다.

그림 4-19는 2개의 가우시안 분포의 거리에 따른 1차 미분 근사식을 이용한 좌표 위치의 차이를 나타낸다. 그림에서 붉은색 점선은 첫 번째 가우시안 분포, 파란색 점선은 두 번째 가우시안 분포, 검정색 실선은 합성 가우시안 분포를 나타낸다. 검정색 합성 가우시안 분포 그래프 상의 붉은색 원 표시는 실제 합성 SAR의 최대값, 연두색 원 표시는 단순 가중평균 근사식을 이용한 합성 SAR의 최대값, 하늘색 원 표시는 1차 미분 근사식을 이용한 합성 SAR의 최대값 위치를 나타낸다. 그림 4-19 (a)는 두 가우시안 분포의 최대 위치간 거리가 1인 경우이며, 실제 합성 SAR의 최대값과 1차 미분 근사식 예측결과가 매우 유사함을 알 수 있다. 그림 4-19 (b)는 두 가우시안 분포의 최대 위치간 거리가 3인 경우이며, 실제 합성 SAR의 최대값과 1차 미분 근사식 예측결과 역시 매우 유사함을 알 수 있다. 그림 4-19 (c)는 두 가우시안 분포의 최대 위치간 거리가 5인 경우이며,

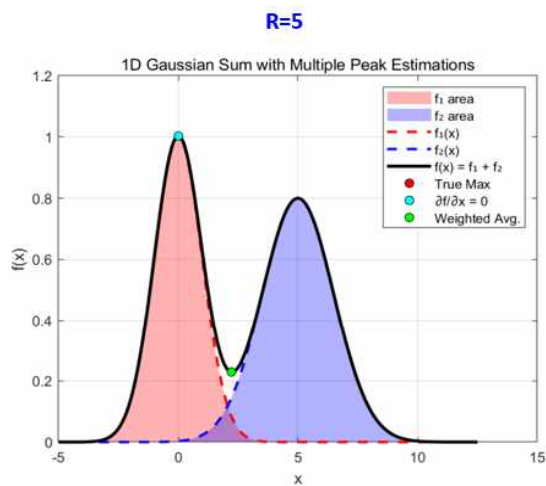
실제 합성 SAR의 최대값과 1차 미분 근사식 예측결과가 거의 동일함을 알 수 있다. 1차 미분 근사식은 해석적 방법으로 해를 얻을 수 없으므로 수치해석적 방법을 활용해야한다.



(a) 가우시안 최대값 간격 R=1



(b) 가우시안 최대값 간격 R=3



(c) 가우시안 최대값 간격 R=5

그림 4-19. 거리별 1차 미분근사식을 통한 합성 가우시안 분포

3. 2차원 SAR 분포 모델링

가. 2D 가우시안 분포

1차원 가우시안 분포를 활용하여 SAR 분포를 해석하는 경우 대상 단말기 형상의 길이 방향, 폭 방향에 대하여 각각 SAR 분포 모델링 진행이 필요하다. 실제 SAR 분포 형상은 2차원 분포이므로 2차원 SAR에 대한 모델링은 필수적이며, 길이 방향, 폭 방향에 대한 1차원 SAR 분포 모델링에 대한 구성을 활용하여 2차원 SAR 분포를 근사화 할 수 있다. 1차원 SAR 분포와 유사하게 전계에 대한 단위 부피당 평균이 적용되므로 2차원 SAR 분포도 peak를 중심으로 폭과 길이 방향으로 연속적이며 매끄러운 곡선으로 구성할 수 있다. 이러한 특성과 가장 유사한 분포는 다변량 가우시안 분포(multivariate gaussian distribution)이며, SAR 분포에 맞추어 식 (4-11)처럼 표현할 수 있다.

$$SAR(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}) = ps SAR \exp \left[-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}) \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \right] z \quad \text{식 (4-11)}$$

$$\mathbf{x} = (x, y), \quad \boldsymbol{\mu} = (\mu_x, \mu_y) : ps SAR \text{ peak location}$$

$$\boldsymbol{\Sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \rho \sigma_x \sigma_y \\ \rho \sigma_x \sigma_y & \sigma_y^2 \end{bmatrix}$$

식 (4-11)에서 $\mathbf{x}$ 는 SAR 분포의 좌표, $\boldsymbol{\mu}$ 는 SAR 분포의 최대위치 좌표, $psSAR$ 은 SAR의 최대값, $\boldsymbol{\Sigma}$ 는 SAR 분포의 공분산 행렬 (covariance matrix)이며 가우시안 분포에 기반한 SAR 분포 형상을 표현한다. 그림 4-20과 같이 $\boldsymbol{\Sigma}$ 에서 σ_x 는 가우시안 분포 기반의 가로축 길이 요소, σ_y 는 가우시안 분포 기반의 세로축 길이요소, ρ 는 분포의 회전요소를 나타내며, 식 (4-12)에서 알수 있는 것처럼 σ_x 와 σ_y 는 주파수에 따라 달라진다.

$$\begin{aligned} 2\sigma_x &= \frac{\lambda}{4}, \quad 2\sigma_y = \frac{\lambda}{8} & (Frequency < 1GHz) \\ 2\sigma_x &= \frac{\lambda}{4}, \quad 2\sigma_y = \frac{\lambda}{8} & (1GHz < Frequency < 1GHz) \quad \text{식 (4-12)} \\ 2\sigma_x &= \frac{\lambda}{4}, \quad 2\sigma_y = \frac{\lambda}{4} & (Frequency > 2GHz) \end{aligned}$$

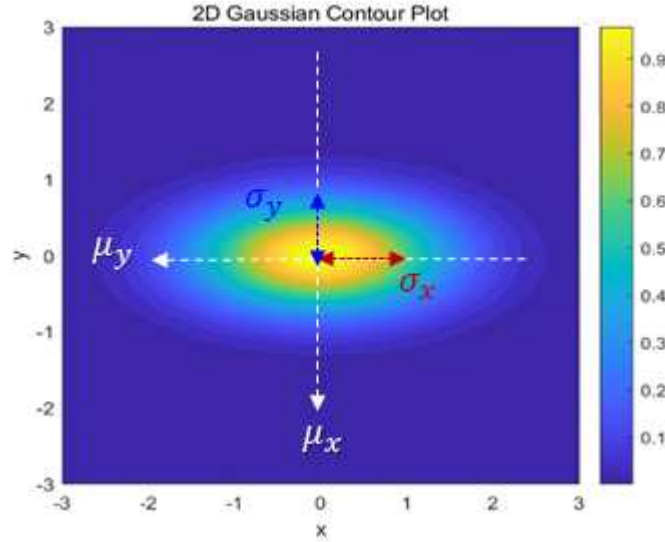


그림 4-20. 2D 가우시안 분포 모델링

SAR 시뮬레이션을 통해 도출된 2차원 분포 특성과 비교해볼 때 전기장(E-field)의 공간적 분포에 대해 단위 면적 또는 부피 기준의 평균화 처리가 이루어짐에 따라, 대부분의 SAR 분포는 극대값(peak)을 중심으로 연속적이며 점차적으로 감소하는 2차원 곡면 형태를 보인다. 이러한 분포는 그림 4-20으로 유사하게 표현할 수 있으며 식 (4-11)은 식 (4-13)으로 다시 표현할 수 있다.

$$SAR(x,y) = psSAR \exp\left(-\left[\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right]\right) \quad \text{식 (4-13)}$$

이 함수는 두 개의 공간 축(x, y)을 기준으로 분포가 독립적으로 퍼지는 경우를 가정하며, 다음과 같은 물리적 의미를 지닌 파라미터로 구성된다.

- 1) μ_x , μ_y : 각각 x축과 y축 방향에서의 평균값(peak 위치)을 의미하며, 이는 SAR 분포의 중심점에 해당한다. 일반적으로 급전부(fed region) 혹은 안테나 방사 중심과 일치하며, 전자파 노출의 가장 큰 영향을 받는 위치를 나타낸다.
- 2) σ_x , σ_y : 각 축 방향으로의 표준편차로, SAR 분포의 공간적 확산 정도를 의미한다. 안테나의 전기적 길이, 구조물의 대칭성, 혹은 단말기 형상 등에 따라 이 값은 비등방성을 가질 수 있다.
- 3) $psSAR$: 함수의 최대값 계수로, SAR 분포의 peak 값에 해당하며, 이는 입력 전력(conducted power), 안테나 이득, 방사 효율 등 시스템의 RF 특성에 의해 결정된다.

이러한 2차원 정규분포 모델은 단순화된 구조를 통해 SAR 분포의 통계적 해석 및 공간적 경향성을 빠르게 파악할 수 있게 하며, 다양한 단말 구조에 대응한 SAR 분석의 기반 모델로 활용될 수 있다.

나. 2D 가우시안 분포 합성

SAR 분포가 단일 급전원 또는 단일 안테나 구조에 의해 형성되는 경우, 해당 분포는 일반적으로 하나의 2차원 가우시안 함수로 근사할 수 있으며, 이는 중심을 기준으로 대칭적이며 완만한 곡면 형태를 갖는다. 그러나 두 개 이상의 급전 위치가 존재하거나 복수의 송신 안테나가 이격 배치된 구조에서는 SAR 분포가 다중의 극대값(peak)을 갖는 구조로 형성되며, 이 경우 단일 함수로의 근사가 적합하지 않을 수 있다. 이러한 복합적인 분포 특성은 복수의 2D 가우시안 함수의 중첩(superposition)을 통해 보다 정밀하게 모델링할 수 있다.

서로 다른 두 급전원이 독립적으로 전자기장을 형성한다고 가정하면, 전체 SAR 분포는 두 개의 2차원 가우시안 함수의 합으로 표현될 수 있으며, 이는 다음의 식 (4-14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$SAR(x,y) = psSAR_1 \exp\left(-\left[\frac{(x-\mu_{x1})^2}{2\sigma_{x1}^2} + \frac{(y-\mu_{y1})^2}{2\sigma_{y1}^2}\right]\right) + psSAR_2 \exp\left(-\left[\frac{(x-\mu_{x2})^2}{2\sigma_{x2}^2} + \frac{(y-\mu_{y2})^2}{2\sigma_{y2}^2}\right]\right) \quad \text{식 (4-14)}$$

- 1) $(\mu_{x1}, \mu_{y1}), (\mu_{x2}, \mu_{y2})$ 는 각각의 가우시안 분포의 중심 위치로, 각 급전 위치 또는 안테나 중심과 관련되며,
- 2) $(\sigma_{x1}, \sigma_{y1}), (\sigma_{x2}, \sigma_{y2})$ 는 각 분포의 확산 정도로, 국지적인 전기장 퍼짐이나 안테나 구조의 물리적 길이와 관련된다. 특히 두 분포의 확산 범위가 다를 경우, 비대칭적인 결합 분포가 형성될 수 있다.
- 3) $psSAR_1, psSAR_2$ 는 각 분포의 최대값(SAR peak)으로, 급전 전력의 크기 또는 안테나 효율 차이에 따라 결정된다.

그림 4-21은 식 (4-14)로 표현된 2개의 가우시안 분포를 합성한 결과를 나타낸다. 식 (4-14)를 기반으로 생성된 SAR 분포는 각 가우시안 중심 간 거리와 방향에 따라 매우 다양한 형상을 가지게 된다. 중심 간 거리가 충분히 크고 상호 간섭이 적을 경우, 두 개의 분리된 peak가 뚜렷이 구분되며, 이 경우 독립적인 전자기장의 중첩 효과를 확인할 수 있다. 반면, 두 중심 간 거리가 가까운 경우에는 각 분포가 중첩되어 단일 피크

형태로 나타나거나, 비대칭형의 분포가 생성되기도 한다.

이러한 2D 합성 가우시안 모델은 MIMO 구조, 다중 안테나 단말, 빔포밍 기반 송신 장치 등 복합 방사 특성을 갖는 구조에서의 SAR 분포 해석에 효과적이며, 각 hotspot의 상대 위치, 결합 패턴, 영향 영역 등을 정량화하여 시뮬레이션 기반 SAR 평가의 간소화 및 정밀화를 가능하게 한다. 또한 주파수별, 안테나 구성별 SAR 변화 분석을 위해서도 유용한 기반 모델로 적용될 수 있다.

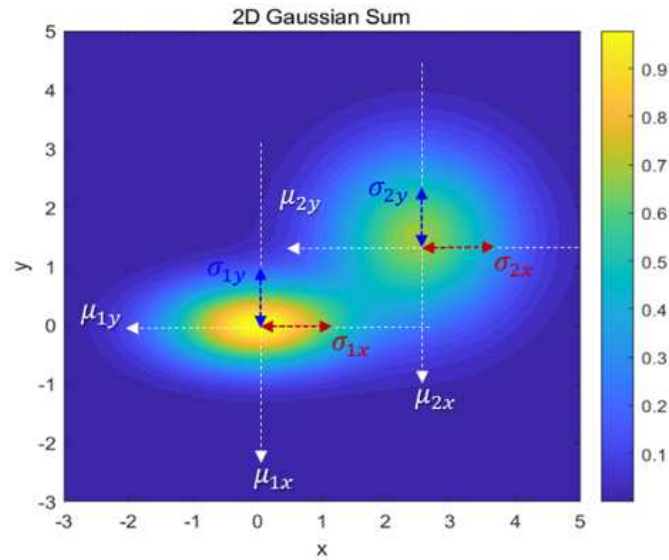


그림 4-21. 2D 가우시안 분포 합성

4. 2차원 SAR 분포 모델링 기반 최대 위치 근사방법

본 연구에서는 이러한 복잡한 SAR 분포를 효율적으로 분석하기 위해 2차원 가우시안 분포 기반의 모델링 기법을 적용하였다. 각 송신 안테나에 의해 발생하는 SAR 분포는 공간적으로 일정한 규칙성을 가지며, 중심을 기준으로 대칭적인 곡면 형태를 나타내는 점에 착안하여 이를 2차원 가우시안 함수로 근사하였다. 이후, 두 개의 2D 가우시안 함수를 중첩(superposition)하여 전체 SAR 분포를 구성하고, 이로부터 합성된 분포의 극대값(peak) 위치를 추정하는 방법론을 도출하였다.

특히 본 접근법은 송신 안테나 간의 상대 위치 및 이격 거리 변화에 따라 SAR 분포의 형상과 최대값의 위치가 어떻게 변화하는지를 수치적으로 분석할 수 있는 장점을 가진다. 예를 들어, 두 송신원이 충분히 떨어져 있는 경우 각기 독립적인 피크가 형성되며, 중심이 가까워질수록 두 분포가 중첩되어 단일 피크 또는 비대칭 형태의 분포가 나타날 수 있다. 이러한 관계는 실제 무선 단말기의 구조나 빔포밍, MIMO 구성 등과 밀접한 관련이 있으며, 설계 조건별 SAR hotspot 예측에 유용한 정보를 제공한다.

그림 4-22에서와 같이, 제안된 분석 방식은 두 개의 2차원 가우시안 함수의 조합을 기반으로 하여, 합성된 분포에서의 최대 SAR 좌표를 도출하는 것을 목표로 한다. 이때, 가중 평균 기반 추정 기법 및 수치적 최적화 방법(예: 2차원 편미분 기반 근사)을 적용함으로써 복잡한 전자기 시뮬레이션 없이도 동시노출 조건에서의 최대 노출 지점을 비교적 간단히 예측할 수 있다.

이러한 2차원 SAR 합성 모델은 다양한 무선 통신 환경에서의 초기 안전성 평가, 안테나 배치 최적화, 규제 대응 분석 등에서 활용 가능하며, 동시노출 평가 절차의 간소화 및 정량화에 기여할 수 있는 기반 기술로 적용될 수 있다.

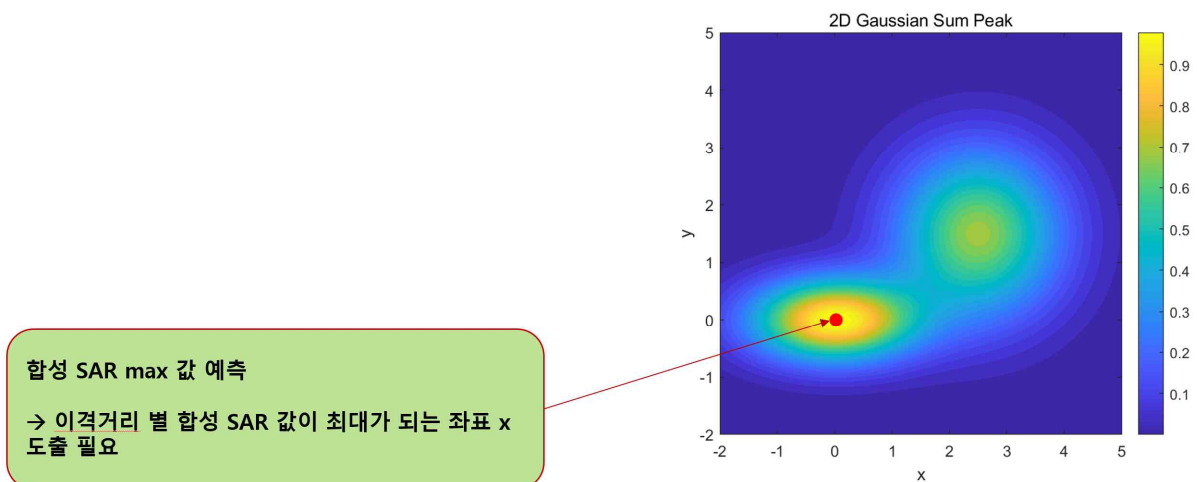


그림 4-22. 2D 가우시안 분포 합성 시 최대위치

가. A/σ^k 가중 평균 근사식

단순 가중평균 근사식을 이용하여 합성 SAR의 최대값을 도출하는 경우 두 가우시안 분포의 거리에 따라 실제 최대값과 편차가 크게 발생함을 알 수 있다. 이를 개선하기 위해 가우시안 분포의 크기와 폭에 대한 가중치를 추가한 가중평균 근사식을 고려할 수 있다. 가중치는 A/σ^k 이고 파라미터 k 는 1, 2, 3을 적용한다. $k=1$ 의 경우 가우시안 분포의 최대값에 가중치를 두는 방법이고, 식 (4-15)로 표현할 수 있다. $k=2$ 는 가우시안 분포의 면적당 밀도에 가중치를 두며, 식 (4-16)으로 표현된다. $k=3$ 은 가우시안 분포에 대해 좁은 폭의 형상을 가중치로 활용하는 방법이며 식 (4-17)로 표현할 수 있다.

$$x_{peak}^{app.} = \frac{\left(\frac{A_1}{\sigma_{x1}}\right) \cdot \mu_{x1} + \left(\frac{A_2}{\sigma_{x2}}\right) \cdot \mu_{x2}}{\left(\frac{A_1}{\sigma_{x1}}\right) + \left(\frac{A_2}{\sigma_{x2}}\right)}, \quad y_{peak}^{app.} = \frac{\left(\frac{A_1}{\sigma_{y1}}\right) \cdot \mu_{y1} + \left(\frac{A_2}{\sigma_{y2}}\right) \cdot \mu_{y2}}{\left(\frac{A_1}{\sigma_{y1}}\right) + \left(\frac{A_2}{\sigma_{y2}}\right)} \quad \text{식 (4-15)}$$

$$x_{peak}^{app.} = \frac{\left(\frac{A_1}{\sigma_{x1}^2}\right) \cdot \mu_{x1} + \left(\frac{A_2}{\sigma_{x2}^2}\right) \cdot \mu_{x2}}{\left(\frac{A_1}{\sigma_{x1}^2}\right) + \left(\frac{A_2}{\sigma_{x2}^2}\right)}, \quad y_{peak}^{app.} = \frac{\left(\frac{A_1}{\sigma_{y1}^2}\right) \cdot \mu_{y1} + \left(\frac{A_2}{\sigma_{y2}^2}\right) \cdot \mu_{y2}}{\left(\frac{A_1}{\sigma_{y1}^2}\right) + \left(\frac{A_2}{\sigma_{y2}^2}\right)} \quad \text{식 (4-16)}$$

$$x_{peak}^{app.} = \frac{\left(\frac{A_1}{\sigma_{x1}^3}\right) \cdot \mu_{x1} + \left(\frac{A_2}{\sigma_{x2}^3}\right) \cdot \mu_{x2}}{\left(\frac{A_1}{\sigma_{x1}^3}\right) + \left(\frac{A_2}{\sigma_{x2}^3}\right)}, \quad y_{peak}^{app.} = \frac{\left(\frac{A_1}{\sigma_{y1}^3}\right) \cdot \mu_{y1} + \left(\frac{A_2}{\sigma_{y2}^3}\right) \cdot \mu_{y2}}{\left(\frac{A_1}{\sigma_{y1}^3}\right) + \left(\frac{A_2}{\sigma_{y2}^3}\right)} \quad \text{식 (4-17)}$$

그림 4-23은 2개의 가우시안 분포의 거리에 따른 A/σ^k 가중평균을 이용한 좌표 위치의 차이를 나타낸다. 그림에서 합성 가우시안 분포 그래프 상의 검정색 원 표시는 실제 합성 SAR의 최대값, 붉은색 주석 표시는 단순 가중평균 근사식을 이용한 합성 SAR의 최대값, 파란색 X 표시는 A/σ 가중평균 근사식을 이용한 합성 SAR의 최대값, 붉은색 X 표시는 A/σ^2 가중평균 근사식을 이용한 합성 SAR의 최대값, 노란색 X 표시는 A/σ^3 가중평균 근사식을 이용한 합성 SAR의 최대값 위치를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 A/σ^k 가중평균 근사식을 이용하여 합성 SAR 결과를 도출하는 경우 k 값이 높은 경우 실제 참값에 근접함을 알 수 있다. 그러나 A/σ^k 가중평균 근사식은 가우시안 분포의 진폭에 따라 최대 위치의 오차가 발생할 수 있다.

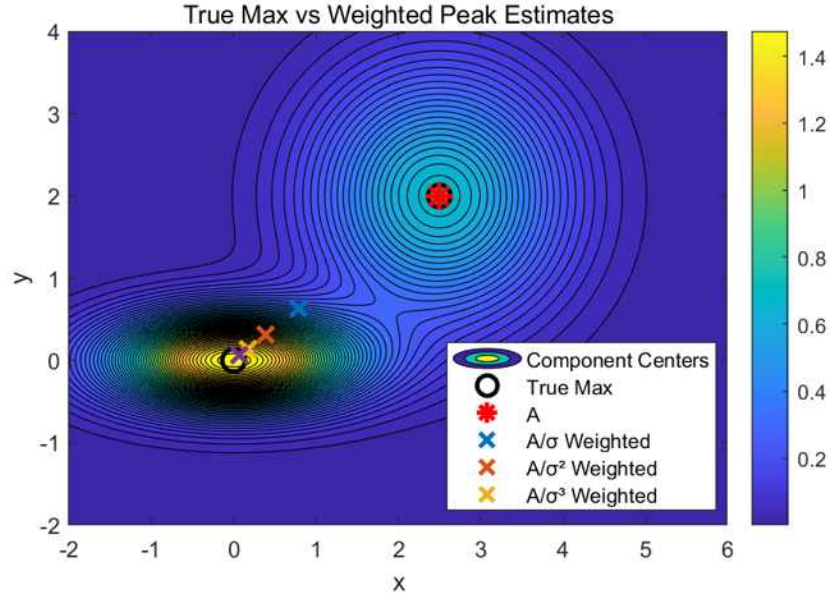


그림 4-23. A/σ^k 가중평균을 통한 2D 합성 가우시안 분포

나. 편미분 기반 근사식

2차원 공간상에서 두 개의 상이한 송신원 또는 급전 위치에서 방사된 전자기장은 각각의 영역에 독립적인 영향을 미치며, 이에 따라 개별적인 SAR 피크를 형성하게 된다. 이러한 분포 특성은 각각을 중심으로 하는 두 개의 2차원 가우시안 함수로 근사할 수 있으며, 전체 SAR 분포는 이 두 함수의 중첩으로 표현된다. 이와 같이 구성된 합성 SAR 분포는 다음과 같은 다변수 함수 식 (4-14)로 정의된다.

식 (4-14)는 각 가우시안 함수가 특정 중심 좌표 및 확산 범위(표준편차)를 가지며, 전자기장의 세기 및 안테나 이득 등에 따라 최대값이 결정되는 구조로 구성된다. 이러한 합성 SAR 분포의 극대값, 즉 인체에 유도되는 최대 전자파 흡수 위치를 찾기 위해서는 식 (4-14)를 변수 x 및 y 에 대해 편미분 후, 극값 조건을 만족하는 지점을 탐색함으로써 도출할 수 있다.

이때, 합성 함수는 두 항의 2차원 가우시안 항의 합으로 표현되며, 각 항에 대한 미분을 통해 전체 함수의 기울기 벡터를 도출할 수 있다. 이를 통해 최대값이 위치한 좌표 (x,y) 를 수치적으로 추정하는 접근이 가능하다.

$$SAR_i(x,y) = A_i \exp\left(-\left[\frac{(x-\mu_{xi})^2}{2\sigma_{xi}^2} + \frac{(y-\mu_{yi})^2}{2\sigma_{yi}^2}\right]\right) \quad \text{식 (4-18)}$$

$$SAR(x,y) = SAR_1(x,y) + SAR_2(x,y) \quad \text{식 (4-19)}$$

$$\frac{\partial SAR}{\partial x} = SAR_1 \cdot \left(-\frac{x - \mu_{x1}}{\sigma_{x1}^2}\right) + SAR_2 \cdot \left(-\frac{x - \mu_{x2}}{\sigma_{x2}^2}\right) \quad \text{식 (4-20)}$$

$$\frac{\partial SAR}{\partial y} = SAR_1 \cdot \left(-\frac{y - \mu_{y1}}{\sigma_{y1}^2}\right) + SAR_2 \cdot \left(-\frac{y - \mu_{y2}}{\sigma_{y2}^2}\right) \quad \text{식 (4-21)}$$

2차 미분의 최종 방정식은 식 (4-20)과 식 (4-21)을 통해 도출할 수 있다. 이는 비선형 방정식이므로 일반적인 해석적 해를 도출하기는 어렵지만, 수치적인 방법을 통해 합성 가우시안 분포의 최대값 좌표를 정밀하게 추정할 수 있다. 이 미분 기반 접근은 두 가우시안 중심 사이의 간격이 클수록 합성 SAR 분포가 비대칭적일 수 있다는 점에서 유용하다. 특히, 가중평균 근사식이 정확한 위치를 예측하기 어려운 경우, 미분을 활용한 정밀 분석을 통해 최대 노출 위치를 정확히 도출할 수 있으며, 동시노출 상황에서의 hotspot 관리 또는 worst-case 평가에 활용될 수 있다.

그림 4-24는 2개의 가우시안 분포의 거리에 따른 편미분 근사식을 이용한 좌표 위치의 차이를 나타낸다. 합성 가우시안 분포 그래프 상의 붉은색 원 표시는 실제 합성 SAR의 최대값, 연두색 원 표시는 단순 가중평균 근사식을 이용한 합성 SAR의 최대값, 파란색 삼각형 표시는 2차원 편미분 근사식을 이용한 합성 SAR의 최대값 위치를 나타낸다. 그림에서 실제 합성 SAR의 최대값과 2차원 편미분 근사식 예측결과가 거의 동일함을 알 수 있다. 2차원 편미분 근사식은 해석적 방법으로 해를 얻을 수 없으므로 수치해석적 방법을 활용해야 한다.

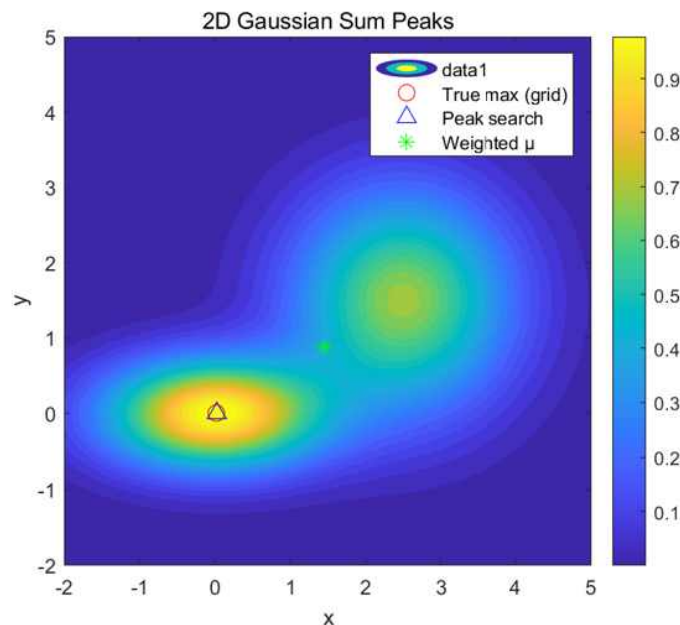


그림 4-24. 편미분 근사식을 통한 2D 합성 가우시안 분포

5. 동시노출 면제 조건 (exemption threshold)

본 연구에서는 앞서 언급된 동시노출 조건에서 볼륨 스캔 SAR 측정을 면제할 수 있는 조건 (exemption threshold)을 도출하기 위한 방법을 도출한다. 동시노출 면제조건에 대하여 2D 가우시안 모델링 기반 SAR 분포 모델을 이용한다. 2D 가우시안 기반 SAR 분포 모델을 사용하는 이유는 동시노출 조건에 대하여 합성된 SAR 분포를 해석적으로 분석할 수 있기 때문이다.

가. SAR 분포 비교

그림 4-25는 단순화된 스마트폰 구조를 기반으로 수행한 SAR 측정값, 전자파 시뮬레이션 결과, 그리고 2차원 가우시안 모델링 기반 SAR 예측 결과 간의 공간적 분포 유사성을 비교하였다. SAR 분포 비교는 835 MHz, 1710 MHz, 2535 MHz, 3550 MHz의 네 가지 주파수를 대상으로 수행되었으며, 각각의 결과는 전자파 시뮬레이션(Simulation), 실제 측정(Measurement), 그리고 제안된 가우시안 기반 모델링(Modeling) 결과를 동일 조건에서 배열하여 검토하였다.

835 MHz 대역에서는 단말기 하단부의 안테나 위치에 대응하여 SAR의 주된 전자기장 집중 영역이 기기 하부에 형성되었으며, 시뮬레이션, 측정, 모델링 간의 분포가 매우 유사하게 나타났다. 시뮬레이션에서는 기기 하단에서 강한 전기장 집중 패턴이 관찰되었고, 실제 측정에서는 동일 위치에서 확산된 형태의 SAR 분포가 나타났으며, 가우시안 모델링 결과 역시 측정 결과와 유사한 크기와 위치를 갖는 에너지 중심을 재현하였다. 이는 저주파 대역에서 전기장이 비교적 넓게 퍼지면서도 피크는 일관되게 기기 하부에 형성됨을 보여준다.

1710 MHz 대역에서도 전체적인 패턴은 835 MHz와 유사하게 하단 집중형 분포를 보였으나, 주파수 증가에 따라 SAR의 공간적 확산 범위가 다소 좁아지고 피크 강도가 더 국부화 되는 특성이 확인되었다. 세 가지 방법 모두 강한 SAR 피크가 스마트폰 하단 모서리 부근에 형성되며 분포 형태가 높게 일치하였다. 이는 모델링 절차가 주파수 상승에 따른 SAR 집중도의 증가 또한 잘 재현하고 있음을 나타낸다.

고주파 대역인 2535 MHz에서는 단말기 우하단에 국부적 멀티 피크 형태의 SAR 분포가 형성되었고, 이는 파장이 짧아짐에 따라 안테나 구조 및 근접 금속 부품의 영향이 더 직접적으로 SAR 패턴에 반영되기 때문이다. 시뮬레이션 결과는 높은 공간 해상도를 갖는 국부 집중 패턴을 나타냈으며, 실제 측정에서도 거의 동일한 위치에서 SAR 피크가 관찰되었다. 제안된 2D 가우시안 모델은 이러한 피크 구조를 단일 또는 다중 가우시안 조합으로 근사함으로써 전반적인 SAR 분포 형태를 효과적으로 재현하였다.

가장 높은 대역인 3550 MHz에서는 SAR의 공간 집중도가 더욱 제한적이고 국소적인

패턴이 관찰되었다. 시뮬레이션에서는 스마트폰 오른쪽 상단에 매우 좁고 강한 피크가 형성되었고, 측정 결과에서도 동일 영역에 SAR 최대값이 존재하는 분포가 재현되었다. 모델링 결과 또한 해당 위치에서 단일 고정밀 가우시안 형태로 SAR을 근사하여, 측정 및 시뮬레이션과의 공간적 일치도가 가장 높게 나타났다.

전체적으로 네 개의 주파수 대역에서 시뮬레이션, 측정, 모델링 결과를 비교한 결과, SAR 분포의 주요 특성—피크 위치, 분포 모양, 대역별 확산 범위 차이—가 모든 방법에서 매우 일관되게 나타났다. 특히 2D 가우시안 기반 모델링은 주요 피크 영역을 정확히 추종하며, SAR 분포의 전체적인 형태를 간단한 파라미터 기반으로 재현할 수 있어 복잡한 스마트폰 구조의 SAR 분석을 단순화하는 데 유효한 도구임이 확인되었다. 이는 SAR 분포를 빠르게 예측하거나 다중 송신기 SAR 합성 조건을 평가하는 과정에서 모델 기반 접근이 실측 및 시뮬레이션을 보완하는 활용 가능성을 시사한다.

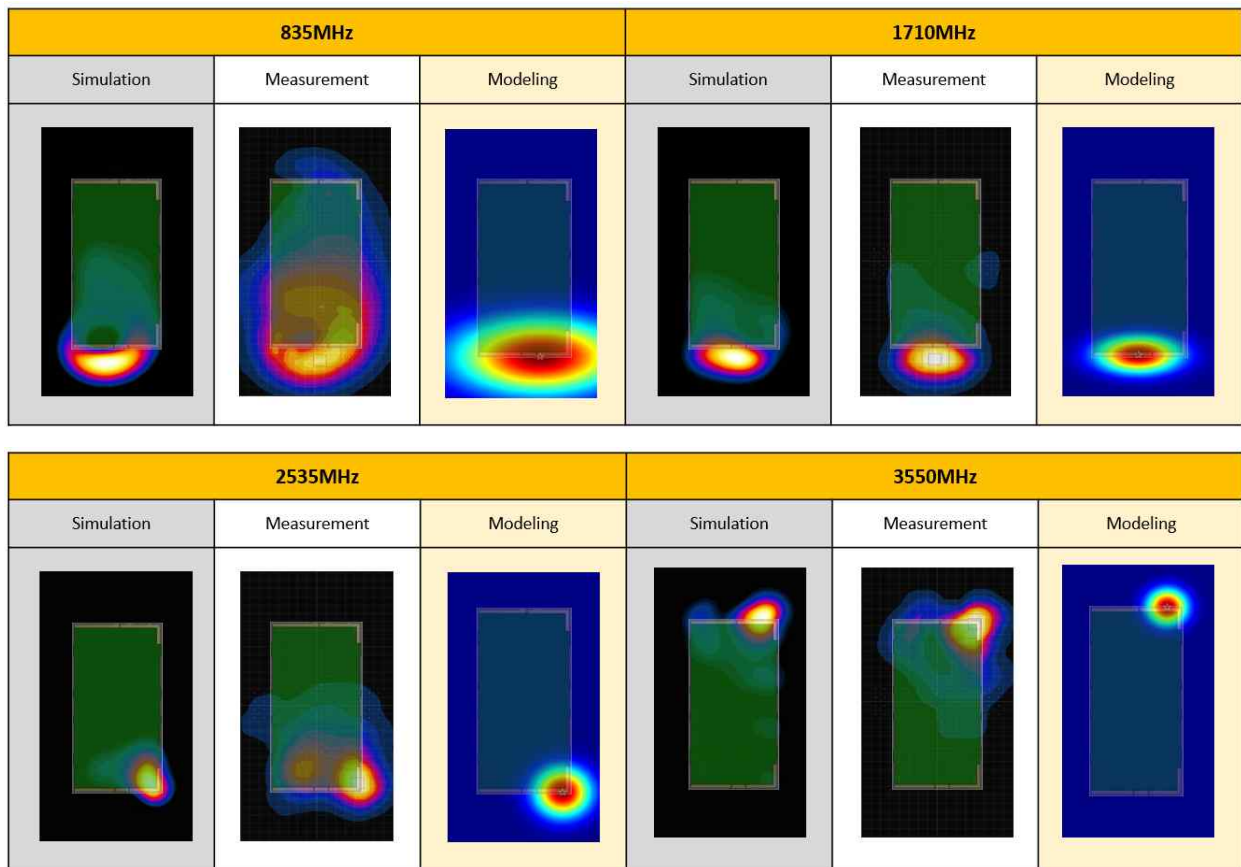


그림 4-25. SAR 분포 비교 (시뮬레이션, 측정, 가우시안 모델)

그림 4-26은 그림 4-25의 가우시안 모델 기반 SAR 분포의 합성결과와 측정결과를 나타내며, 다중 주파수 송신 조건에서의 SAR 분포를 측정값과 2차원 가우시안 기반 모델링 결과로 비교하여, 단순화된 모델을 활용한 SAR 예측 접근법의 타당성을 검증하였다. 835 MHz - 2535 MHz, 1710 MHz - 2535 MHz, 1920 MHz - 3550 MHz의 세 가지 다중대역 조합을 대상으로 SAR 분포와 최대값을 분석하였다. 그림에서는 각 케이스에 대해 실제 측정 결과(Measurement)와 가우시안 모델 기반 합성 SAR 결과(Modeling)가 나란히 제시되며, 두 방식의 공간적 분포 형태와 피크 위치, 피크 강도가 일관되게 유사함을 확인할 수 있다.

첫 번째 조합(835 MHz + 2535 MHz)에서는 두 주파수의 SAR 분포가 기기 하단 영역에서 중첩되며, 측정값은 약 0.488 W/kg의 피크를 나타냈다. 가우시안 모델링은 각 단일 밴드 분포를 개별 가우시안 형태로 근사한 뒤 선형 합성을 수행하여 약 0.535 W/kg의 피크를 도출하였다. 두 결과의 피크 위치가 동일 영역에 형성되었고 크기 또한 높은 상관성을 보였으며, 이는 저주파 - 중간 주파수 조합에서도 모델링 기법이 효과적으로 SAR 중첩을 재현할 수 있음을 나타낸다.

두 번째 조합(1710 MHz + 2535 MHz)에서는 보다 높은 주파수로 인해 SAR 분포가 국부적이며 피크가 하단 모서리 부근에 집중되는 형태를 보였다. 실제 측정에서는 0.924 W/kg의 피크가 관찰되었고, 모델링 결과에서는 1.139 W/kg로 나타나 측정 대비 약간 높은 값을 보였으나, 피크의 위치, 집중 패턴, 공간적 확산 형태는 측정결과를 정확히 반영하였다. 이는 높은 주파수 대역 간 조합에서도 가우시안 모델 기반 합성이 분포 특성을 적절히 유지함을 보여준다.

세 번째 조합(1920 MHz + 3550 MHz)에서는 두 고주파 신호가 각각 상단과 하단 부위에 국소적 피크를 형성하는 특성이 나타났다. 측정 결과에서는 하단 영역에서 약 1.02 W/kg의 피크가 발생하였으며, 모델링에서는 동일한 위치에 1.01 W/kg의 SAR 피크를 재현하였다. 특히 3550 MHz 구성 요소가 상부 모서리에 추가적인 SAR 피크를 유발하는 패턴까지 모델링이 성공적으로 반영하고 있어, 단순한 가우시안 기반 접근법이 복잡한 다중 피크 구조까지도 효과적으로 표현함을 확인할 수 있다.

전체적으로 세 가지 주파수 조합에서 측정값과 모델링 결과는 SAR 피크의 위치와 크기, 분포 형태에 대해 높은 일치도를 나타내었다. 이는 다중 송신기 조건에서의 SAR 합성을 단순화하기 위한 가우시안 기반 모델링 기법이 실제 측정 결과를 유의미하게 근사할 수 있음을 의미하며, 복잡한 기기 구조 및 다양한 주파수 조합에서도 유효한 접근법임을 시사한다.

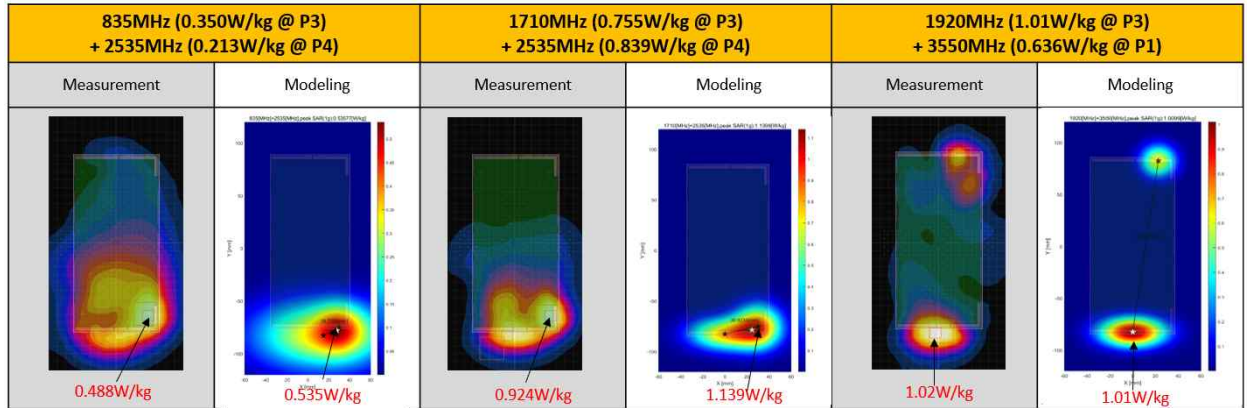


그림 4-26. 합성 SAR 분포 비교 (측정, 가우시안 모델)

나. 합성 SAR의 측정 면제조건 정의

동시 송신 조건에서 SAR을 평가할 때, 모든 송신기의 조합에 대해 일일이 볼륨 스캔을 수행하는 것은 시간과 비용 측면에서 비효율적이다. 이에 따라 일부 규제기관에서는 다수 송신기의 SAR 분포가 중첩되었을 때 특정 조건을 만족하는 경우, 즉 다른 송신기의 영향으로 기존 피크 위치에서 SAR 값이 τ % 이하로만 증가하는 경우, 동시 송신 볼륨 스캔(Combined volumetric SAR)을 면제할 수 있도록 허용하고 있다. 그림 4-27은 이러한 동시노출 SAR 측정 면제 기준 (exemption threshold) 개념을 시각적으로 설명한 것이다.

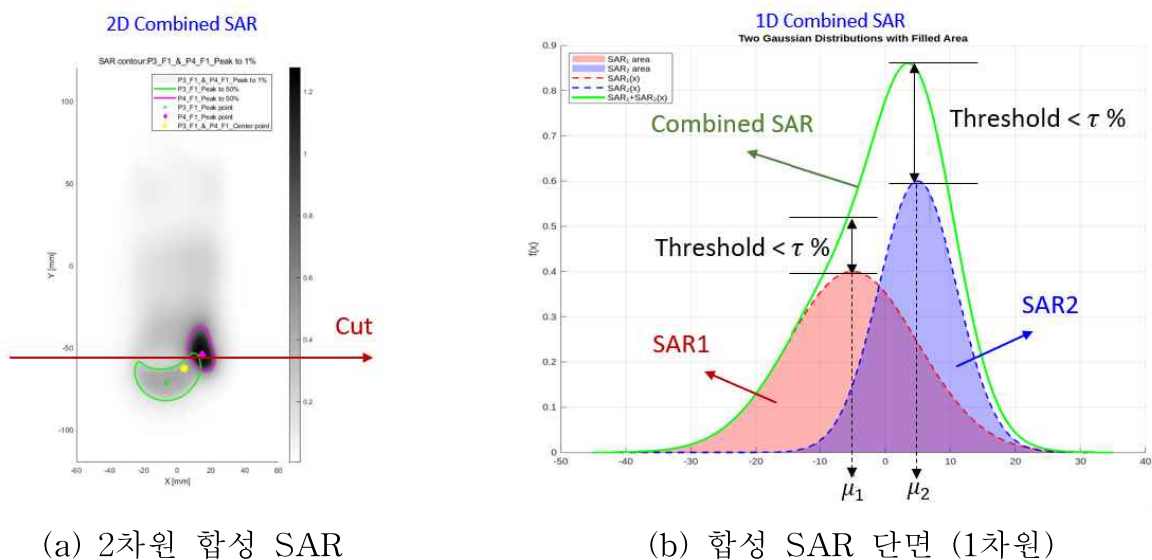


그림 4-27. 합성 SAR 모델의 측정 면제기준 개념

그림 4-27 (a)는 두 개의 송신기(예: 주파수 P3와 P4)의 SAR 분포가 겹쳐진 2차원

(2D) Combined SAR 분포를 보여준다. 합성 SAR 분포는 각 단일 송신기의 피크 지점과 그 주변 등고선이 표시되어 있으며, 특정 단면에서의 SAR 변화를 분석하기 위해 수평선 방향으로 절삭(cut)을 수행한다. 단면은 실제 피크 위치를 관통하도록 설정되며, 이를 통해 공간적 분포를 1차원 SAR 곡선으로 변환할 수 있다.

그림 4-27 (b)는 단면으로 얻어진 두 SAR 분포(SAR1, SAR2)를 1차원 가우시안 형태로 표현한 것으로, 두 분포가 중첩되었을 때 형성되는 합성 SAR 곡선도 함께 표시되어 있다. SAR1은 μ_1 을 중심으로 한 붉은색 가우시안 분포로, SAR2는 μ_2 를 중심으로 한 파란색 가우시안 분포로 나타나 있으며, 합성된 SAR은 녹색의 곡선으로 표현된다. 이 합성 SAR의 피크 값이 단일 송신기에서의 피크보다 τ % 이내로만 증가한다면, 이는 두 송신기의 상호작용이 SAR 평가에서 추가적인 위험을 발생시키지 않는다는 의미로 해석할 수 있다.

그림에서 표시된 바와 같이, τ % 기준은 합성 SAR 피크에서 단일 SAR 피크 대비 증가한 정도를 직접 비교하여 판단한다. 예를 들어 SAR1의 단일 피크 값과 합성 SAR 피크 값의 차이가 규제기관에서 정한 면제 기준(예: 5%, 10% 등)보다 작다면, 두 송신기가 동시에 동작하더라도 SAR의 증가가 매우 제한적이므로 동시노출 볼륨 스캔을 수행하지 않고도 SAR 규정 준수를 판단할 수 있다. 이는 실제 시험 과정에서 측정 시간을 크게 줄여주는 이점이 있다.

결과적으로, 그림 4-27은 2D SAR 분포를 1D 곡선 분석으로 단순화하여 동시 송신 SAR 증가량이 τ % 이내인지 판단하는 절차를 설명하고 있으며, 이는 동시노출 SAR 측정 면제 조건의 정의이다. 또한 가우시안 기반 모델링을 활용하면 SAR 분포 중첩에 따른 변화량을 계산적으로 예측할 수 있어, 실제 측정 이전에 면제 여부를 평가하거나 설계 단계에서 SAR 영향을 빠르게 추정하는 데에도 활용될 수 있다.

다. 모델링 기반 SAR 분포를 이용한 면제기준 요건 분석

(1) 2D 가우시안 기반 SAR 분포 모델

동시 송신 조건에서 SAR 분포의 중첩 양상을 정량적으로 분석하기 위해, 본 연구에서는 각 송신기의 SAR 분포를 2차원 가우시안 함수 모델링으로 등가하였다. 단일 송신기 i 의 SAR 공간 분포는 식 (4-22)와 같이 정의된다.

$$SAR_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}) = ps SAR_i \exp \left[-\frac{1}{2}(\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu}_i) \boldsymbol{\Sigma}_i^{-1} (\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu}_i)^T \right] \quad \text{식 (4-22)}$$

이를 독립된 x축, y축 분산으로 전개하면 식 (4-23)과 같은 일반적인 2D 가우시안 형태가

된다.

$$SAR_i(x,y) = ps SAR_i \exp\left(-\frac{(x-\mu_{ix})^2}{2\sigma_{ix}^2} - \frac{(y-\mu_{iy})^2}{2\sigma_{iy}^2}\right) \quad \text{식 (4-23)}$$

이 모델링은 실제 스마트폰 SAR 측정에서 관찰되는 국부적 강한 피크 중심 구조를 매우 효과적으로 재현하는 장점이 있다. 앞서 언급된 그림 4-22는 서로 다른 두 송신기의 SAR 피크 위치 (μ_1, μ_2) 와 SAR 분포의 분산 (σ_1, σ_2) 이 공간적으로 분리되어 있을 때의 합성 SAR을 시각적으로 나타낸 것이다.

(2) SAR1의 피크에서 SAR2의 영향이 τ % 이하일 조건

두 송신기 SAR1과 SAR2가 동시에 동작할 때 면제 조건을 판단하기 위해서는, SAR1의 피크 위치 (μ_{1x}, μ_{1y}) 에서 SAR2가 미치는 영향이 τ % 이하인지를 평가한다. SAR2가 SAR1의 피크 위치에 기여하는 값은 식 (4-24)와 같다.

$$SAR_2(\mu_{1x}, \mu_{1y}) = ps SAR_2 \exp\left(-\frac{(\mu_{1x}-\mu_{2x})^2}{2\sigma_{2x}^2} - \frac{(\mu_{1y}-\mu_{2y})^2}{2\sigma_{2y}^2}\right) \quad \text{식 (4-24)}$$

면제 조건은 식 (4-25)와 식 (4-26)과 같이 정의된다.

$$SAR_2(\mu_{1x}, \mu_{1y}) < \tau \cdot ps SAR_1 \quad \text{식 (4-25)}$$

$$ps SAR_2 \exp\left(-\frac{(\mu_{1x}-\mu_{2x})^2}{2\sigma_{2x}^2} - \frac{(\mu_{1y}-\mu_{2y})^2}{2\sigma_{2y}^2}\right) < \tau \cdot ps SAR_1 \quad \text{식 (4-26)}$$

즉, SAR1의 피크에서 SAR2가 미치는 영향이 SAR1의 피크 대비 τ % 미만이면, SAR 중첩의 영향이 충분히 작아 볼륨 스캔 없이도 평가가 가능하다는 의미이다.

(3) 분리거리 d 기반 면제 조건의 유도

두 SAR 피크 간의 거리 d 는 식 (4-27)과 같이 정의된다.

$$d^2 = (\mu_{1x}-\mu_{2x})^2 + (\mu_{1y}-\mu_{2y})^2 \quad \text{식 (4-27)}$$

SAR2의 기여 영향을 다시 정리하면 식 (4-28)과 같다. 식 (4-28)에서 σ_{2eff} 는 SAR

분포의 가로축 σ_{2x} 과 세로축 σ_{2y} 중 더 큰 값을 나타낸다.

$$psSAR_2 \exp\left(-\frac{d^2}{2\sigma_{2eff}^2}\right) < \tau \cdot psSAR_1 \quad \text{식 (4-28)}$$

면제거리 d 를 구하기 위해 정리하면 식 (4-29)와 같다.

$$-\frac{d^2}{2\sigma_{2eff}^2} = \ln\left(\tau \cdot \frac{psSAR_1}{psSAR_2}\right) \quad \text{식 (4-29)}$$

$$d^2 = 2\sigma_{2eff}^2 \ln\left(\tau \cdot \frac{psSAR_2}{psSAR_1}\right) \quad \text{식 (4-30)}$$

동일한 방식으로 SAR1이 SAR2에 미치는 영향도 계산할 수 있으며 식 (4-31)과 같다.

$$d^2 = 2\sigma_{1eff}^2 \ln\left(\tau \cdot \frac{psSAR_1}{psSAR_2}\right) \quad \text{식 (4-31)}$$

두 조건 중 더 엄격한(큰) 값을 선택해야 하므로 최종 면제 기준식은 식 (4-32)와 같이 정의된다.

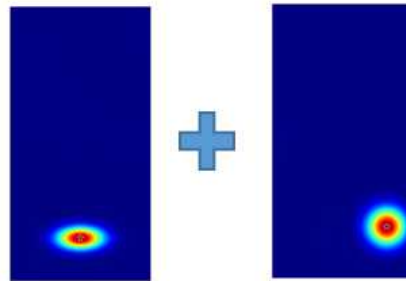
$$d^2 = \max\left[2\sigma_{1eff}^2 \ln\left(\tau \cdot \frac{psSAR_1}{psSAR_2}\right), 2\sigma_{2eff}^2 \ln\left(\tau \cdot \frac{psSAR_2}{psSAR_1}\right)\right] \quad \text{식 (4-32)}$$

즉, SAR 분포 간의 공간적 분리(d), 분산(σ), 그리고 psSAR 크기 비 ($psSAR_2/psSAR_1$)에 따라 동시노출 영향이 미미한 경우 τ % 기준으로 볼륨 스캔기반 SAR 측정에 대한 면제를 고려할 수 있다.

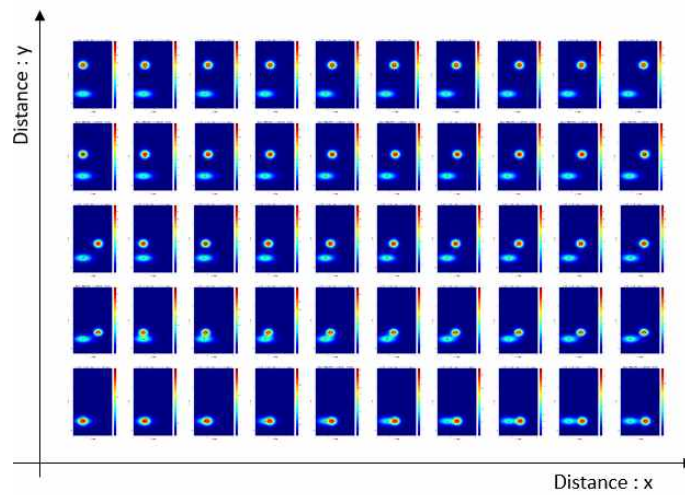
라. 다중 송신기 동작 시 분리거리에 따른 합성 SAR 특성 및 면제 기준 도출

동시 송신 환경에서 두 개의 SAR 분포가 서로 간섭하여 발생하는 합성 SAR (Combined SAR)의 크기는 두 분포 사이의 공간적 분리거리 (separation distance)에 크게 의존한다. 본 연구에서는 SAR 분포의 중첩이 실제 SAR 피크 값에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하고, 이를 기반으로 다중 송신 조건에서 적용 가능한 τ % SAR 면제 기준(exemption threshold)을 정의하고자 한다. 합성 SAR 분포의 해석을 용이하게 하기

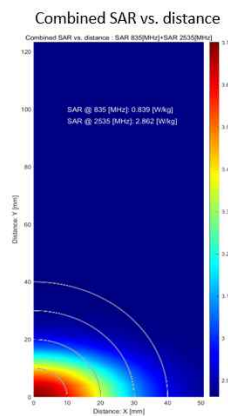
위해 2개의 가우시안 기반 SAR 분포 모델링을 거리별로 합성하고 heatmap을 구성하며 이를 그림 4-28로 표현한다.



(a) 2차원 SAR 합성



(b) 거리별 합성 SAR 구성



(c) 합성 SAR 기반 heatmap

그림 4-28. 합성 SAR 모델기반 heatmap 구성

마. 동시노출 SAR 면제 조건 사례 분석

(1) Mockup test : 835 MHz(P3)+ 2570 MHz(P4)

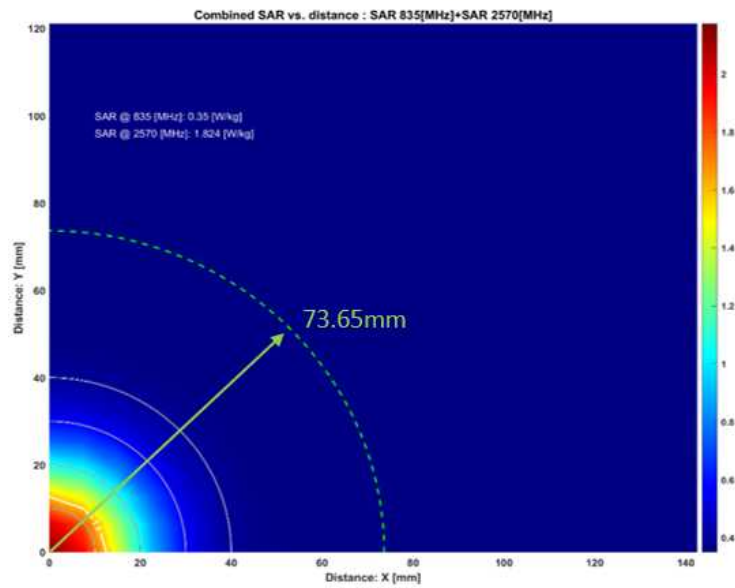
그림 4-29는 835 MHz에서 0.35 W/kg(P3), 2570 MHz에서 1.824 W/kg(P4)로 측정된 SAR 값을 대상으로, 제안된 가우시안 기반 SAR 분포의 분리된 거리에 대한 면제 기준 heatmap을 제시한다. 그림 4-29 (a)는 제안된 모델에 따라 두 SAR 분포가 동시에 존재할 때 P3 위치에서의 SAR 증가율이 $\tau = 5\%$ 를 초과하지 않도록 보장하기 위한 최소 분리 거리를 계산한 결과이다. 계산 결과, P3 피크 기준 약 73.65 mm의 분리거리가 확보될 경우 동시 송신으로 인한 SAR 증가량이 1.6 W/kg 규격 이내로 유지되는 것으로 분석되었다.

이러한 모델 기반 결과의 타당성을 검증하기 위해, 동일한 안테나 구조를 갖는 시험용 단말(mock-up)에 대하여 실제 SAR 동시노출 측정을 수행하였다. 개별 송신 측정에서는 835 MHz @P3에서 0.35 W/kg, 2570 MHz @P4에서 1.824 W/kg의 피크 SAR이 각각 확인되었다. 이후 두 주파수 송신을 동시에 가정하여 SAR 분포를 겹쳐 분석한 결과, Combined SAR vs. Distance 그래프에서 P3 기준 약 73.65 mm 거리에서 두 SAR 분포의 영향권이 교차하는 경향을 확인할 수 있었다.

규제 준수 여부를 판단하기 위해서는, P3 피크 위치에서 동시노출로 인해 증가한 SAR이 1.6 W/kg 이하로 유지되는지가 핵심이다. 실제 측정 결과, 약 37.5 mm 분리 조건에서 Combined SAR가 1.6 W/kg 이하로 유지됨이 확인되었으며, 이는 모델 기반 면제거리 예측값(73.65 mm)과 정성적으로 일치하면서도 실제 측정치가 보다 보수적 기준을 만족함을 보여준다.

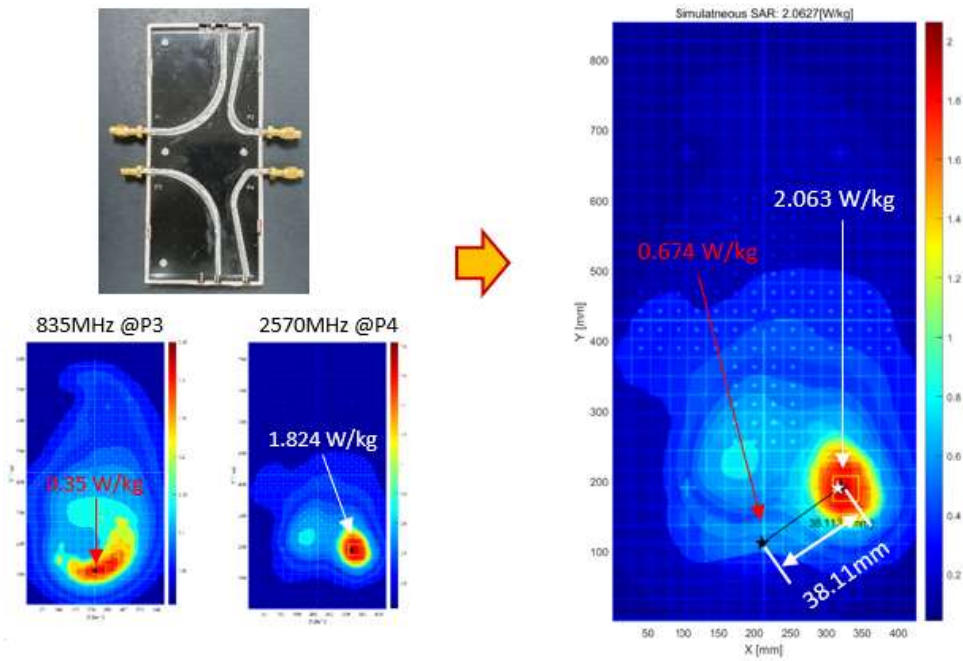
또한 실제 Combined SAR 측정에서는 최대 약 2.063 W/kg의 피크 SAR이 관찰되었으며, 분포 간 상호작용으로 인해 형성된 영향 폭은 약 38.1 mm로 계측되었다. 전반적으로 모델 예측 결과와 실측 결과 간 일치도가 높았으며, 제안된 분리거리 기반 SAR 면제 기준의 타당성이 실험적으로 검증되었다.

Separation Distance Criterion @ P3 peak point



(a) 가우시안 분포기반 heatmap

Combined SAR (Measurement)



(b) 합성 SAR 측정결과

그림 4-29. Mockup test : 835 MHz(P3)+ 2570 MHz(P4)

(2) Mockup test : 1920 MHz(P3)+ 2570 MHz(P4)

그림 4-30은 1920 MHz에서 1.01 W/kg(P3), 2570 MHz에서 1.824 W/kg(P4)의 개별 송신 SAR 데이터를 활용하여, 제안된 가우시안 기반 SAR 분포 모델이 동시노출 조건에서도 적절한 면제 기준에 대한 결과를 나타낸다. 그림 4-30 (a)는 두 송신기의 SAR 분포가 중첩될 때 P3 위치에서의 SAR 증가율이 $\tau = 5\%$ 를 초과하지 않도록 하기 위해 필요한 최소 분리거리를 계산한 heatmap을 나타낸다.

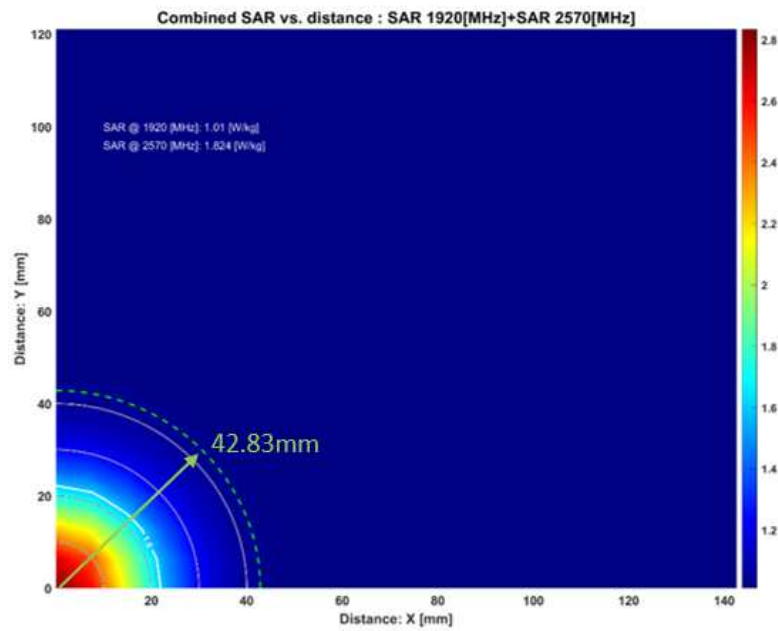
모델 기반 분석 결과, P3 피크 위치에서 $\tau = 5\%$ 조건을 만족하기 위해 필요한 최소 분리거리는 약 42.83 mm로 산출되었다. 이는 두 주파수 송신기의 SAR 분포 형태와 상대적 피크 강도 차이를 반영한 결과로, SAR 간섭의 영향을 제한하기 위한 기준 거리로 해석할 수 있다.

해당 예측값의 타당성을 확인하기 위해, 동일한 안테나 구조를 갖는 시험용 단말에 대해 동시노출 SAR 실측을 수행하였다. 개별 송신 측정에서는 1920 MHz @P3에서 1.01 W/kg, 2570 MHz @P4에서 1.824 W/kg의 피크 SAR이 각각 관찰되었다. 이후 두 송신을 동시에 고려한 Combined SAR 분석을 수행한 결과, P3 기준 약 37.5 mm 분리 거리 조건에서 SAR 값이 1.6 W/kg 이하로 유지되는 것으로 확인되었다. 이는 모델 기반 면제거리 예측값 (42.83 mm)과 정성적으로 일치함과 동시에, 실제 측정 결과가 규제 기준을 만족함을 보여준다.

또한 동시노출 조건에서 실측된 Combined SAR의 최대값은 약 2.079 W/kg으로 나타났다으며, SAR 중첩으로 인한 영향 거리는 약 37.546 mm로 평가되었다. 이는 두 SAR 분포의 결합 특성이 모델에서 예측한 경향과 유사하게 나타났음을 의미하며, 제안된 분리거리 기반 SAR 면제 기법의 실효성을 실험적으로 확인한 결과라 할 수 있다.

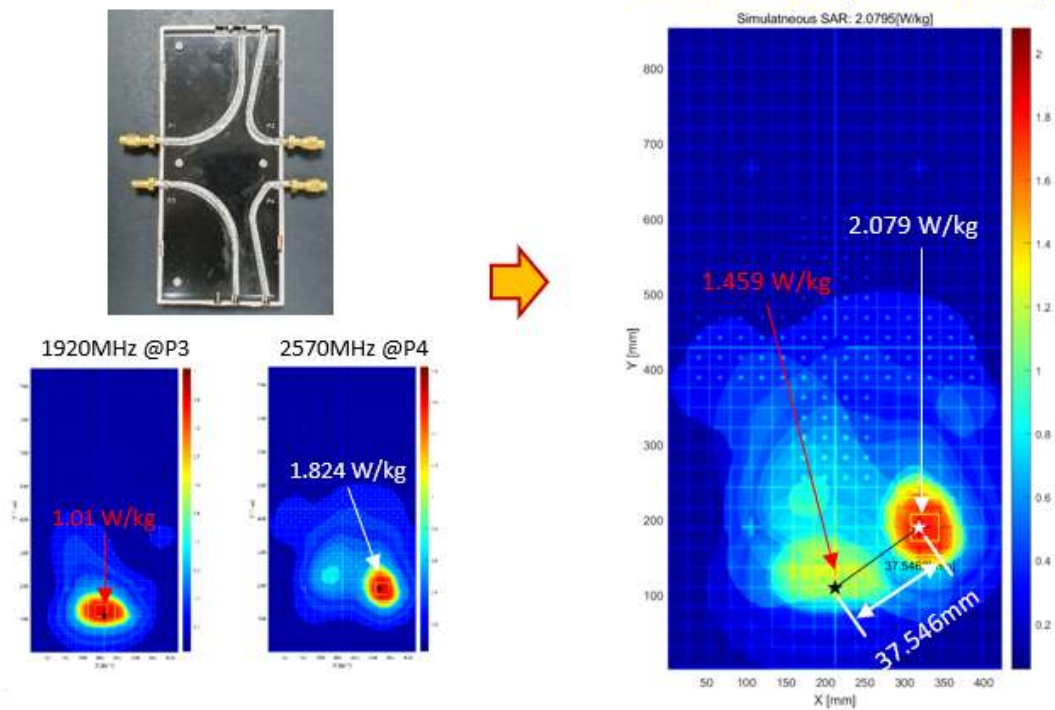
종합하면, 1920 MHz(P3) - 2570 MHz(P4) 동시송신 사례에서도 가우시안 기반 SAR 모델이 실제 측정 결과와 높은 일치성을 보였으며, 제안된 면제 기준이 실무 적용 가능성을 입증하였다.

Separation Distance Criterion @ P3 peak point



(a) 가우시안 분포기반 heatmap

Combined SAR (Measurement)

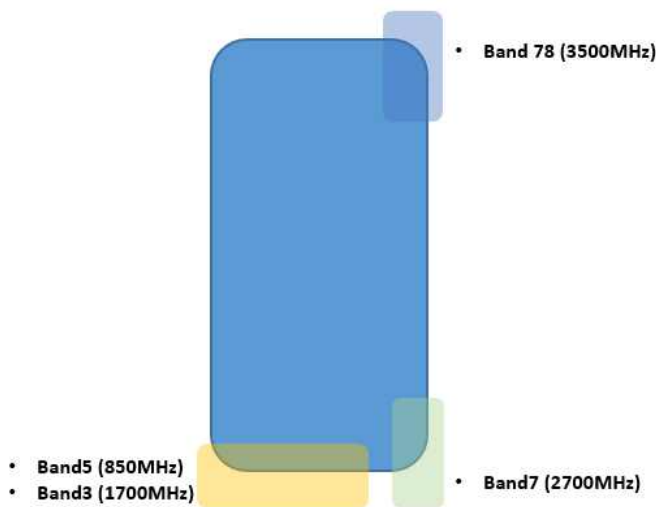


(b) 합성 SAR 측정결과

그림 4-30. Mockup test : 1920 MHz(P3)+ 2570 MHz(P4)

(3) Commercial model test : 835 MHz + 2570 MHz

본 연구는 실제 양산 단말기를 대상으로 수행된 SAR 볼륨스캔 측정 결과와 각 주파수 대역에서 얻어진 단일 스캔 데이터를 활용하여 두 송신기의 동시 동작 시 발생하는 합성 SAR(Combined SAR)을 분석하고, 이를 기반으로 분리거리(separation distance) 조건을 도출한 내용을 정리한 것이다. 분석에는 850 MHz, 1700 MHz, 2570 MHz, 3500 MHz 등 상용 단말기가 사용하는 주요 이동통신 대역의 SAR 분포가 사용되었으며, 각각의 대역은 실제 단말기 내부 안테나 배치에 따라 서로 다른 SAR 피크 위치를 형성한다. 이러한 피크의 공간적 차이는 동시노출 조건에서 SAR가 어떻게 중첩되어 증가하는지를 결정하는 핵심 요소로서, 본 연구에서는 바로 이 점을 활용하여 실제 단말기에 적용 가능한 면제(exemption) 기준을 평가하였다. 그림 4-31은 상용 단말기의 안테나 배치 및 SAR 측정 구성을 나타낸다.



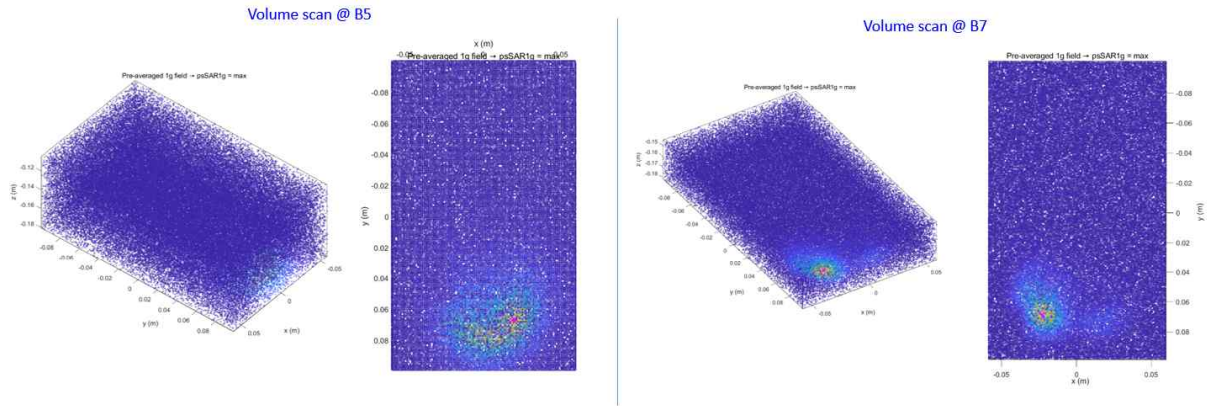
(a) 안테나 배치 구성



(b) 볼륨 스캔 SAR 측정 구성

그림 4-31. 상용 단말기 안테나 배치 및 측정 시스템 구성

그림 4-32는 Band 5 (835 MHz)와 Band 7 (2570 MHz) 대역에 대한 볼륨스캔 실측 결과를 나타낸다. Band 5 (835 MHz)와 Band 7 (2570 MHz) 대역 SAR 분포는 실제 단말기 내부 안테나 배치에 따라 뚜렷한 공간적 분리를 보인다. B5의 SAR 피크는 단말기 하단부 근처에서 강하게 형성된 반면, B7의 SAR 피크는 단말기 측면 또는 중간 높이 영역에 나타나 두 대역 간의 피크 위치가 충분히 이격되어 있었다. 이러한 구조적 특성은 두 SAR 분포가 중첩될 가능성을 크게 낮추며, 합성 SAR 증가가 매우 제한적일 것이라는 예측을 가능하게 한다.



(a) 835 MHz

(b) 2570 MHz

그림 4-32. 볼륨 스캔 측정결과 (835 MHz + 2570 MHz)

그림 4-33과 같이 실제 합성 SAR 분석에서는 B7의 분포를 B5의 피크 기준으로 다양한 x축 및 y축 방향으로 이동시키며 합성 SAR 변화를 heatmap으로 정량화하였다. Heatmap 구성 시 주파수별 SAR 값은 임의로 지정하였고 0.58 @ 835MHz와 1.22 @ 2570MHz 으로 적용하였다. 두 결과, 두 SAR 분포의 공간적 간섭은 매우 작았으며, 합성 SAR 증가율이 τ (1~5%) 이하로 유지되는 구간이 넓게 나타났다. 특히 SAR 증가량이 τ 조건을 초과하는 임계 지점은 비교적 큰 분리거리에서 발생하여, B5 + B7 조합의 경우 충분한 이격이 확보될 때 면제 기준을 적용하기 용이하다는 결론을 얻을 수 있었다.

실제 단말기의 합성 SAR 실측에서도 두 SAR 분포의 영향이 크게 중첩되지 않음을 확인하였다. 실측 합성 SAR의 피크 값은 단일 대역 SAR의 영향을 크게 벗어나지 않았으며, 이론적 가우시안 모델 기반 분석과 정성적, 정량적으로 유사한 경향을 보였다. 이는 제안된 τ 기반 분리거리 도출 방식이 실제 단말기 구조에도 잘 적용될 수 있음을 의미하며, B5 + B7 조합은 SAR 볼륨스캔 면제 조건을 검토할 수 있는 방법으로 검증할 수 있다.

● Combined SAR & exemption threshold (e.g. 0.58 @ 835MHz & 1.22 @ 2570MHz)

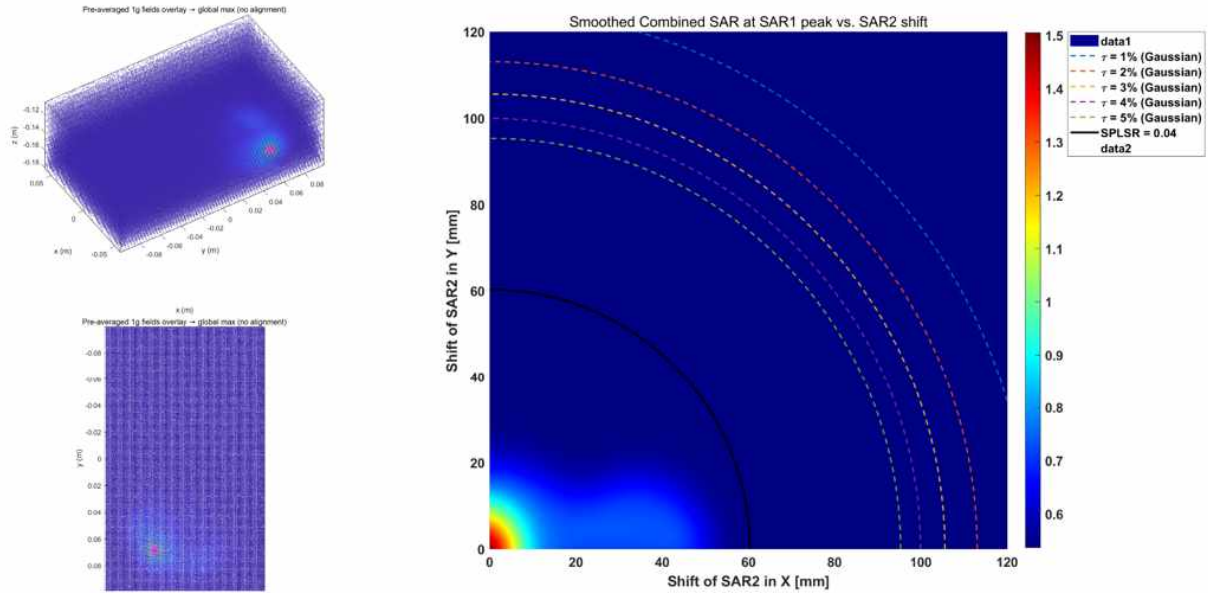


그림 4-33. 볼륨 스캔 측정결과 기반 heatmap (835 MHz + 2570 MHz)

(4) Commercial model test : 1710 MHz + 2570 MHz

그림 4-34는 Band 3 (1710 MHz)와 Band 7 (2570 MHz) 대역에 대한 볼륨스캔 실측 결과를 나타낸다. Band 3 (1710 MHz)와 Band 7 (2570 MHz) 대역 SAR 분포는 실제 단말기 내부 안테나 배치에 따라 다소 근접한 경향을 보인다. B3의 SAR 피크는 단말기 하단부 근처에서 강하게 형성된 반면, B7의 SAR 피크는 단말기 측면 또는 중간 높이 영역에 나타나 두 대역 간의 피크 위치가 충분히 이격되어 있었다. 이러한 구조적 특성은 두 SAR 분포가 중첩될 가능성을 크게 낮추며, 합성 SAR 증가가 매우 제한적일 것이라는 예측을 가능하게 한다.

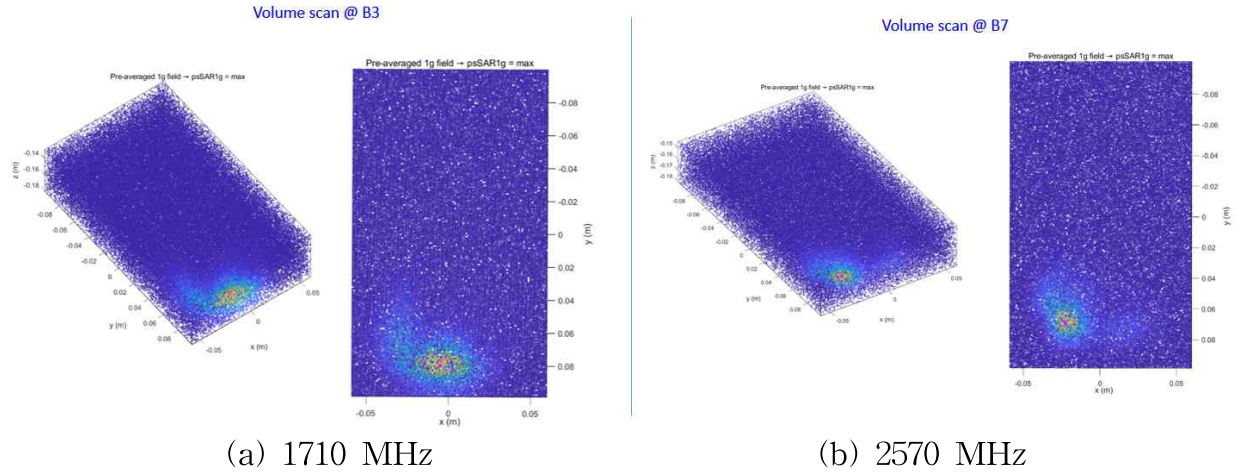


그림 4-34. 볼륨 스캔 측정결과 (1710 MHz + 2570 MHz)

그림 4-35와 같이 실제 합성 SAR 분석에서는 B7의 분포를 B3의 피크 기준으로 다양한 x축 및 y축 방향으로 이동시키며 합성 SAR 변화를 heatmap으로 정량화하였다. Heatmap 구성 시 주파수별 SAR 값은 임의로 지정하였고 1.16 @ 1710MHz와 1.22 @ 2570MHz 으로 적용하였다. 분석 결과 합성 SAR 증가율이 τ (%) 조건을 초과하는 임계 거리(d)가 B5 + B7 조합보다 훨씬 작은 값으로 나타났으며, 두 SAR 분포가 일정 거리 이하로 접근할 경우 합성 SAR 피크가 빠르게 증가하는 현상을 확인하였다. 특히 특정 방향에서는 두 SAR 패턴의 중첩이 강해져 합성 SAR가 단일 대역 SAR 대비 크게 상승하는 경우도 존재하였다.

실제 단말기에서 측정된 합성 SAR 역시 이러한 예측과 유사한 경향을 보였다. 측정 결과에서 합성 SAR 피크는 B3와 B7 각각의 단일 스캔 결과보다 더 높은 값으로 나타났으며, 두 SAR 피크가 겹치는 위치 근처에서 특히 증가가 두드러졌다. 이는 B3 + B7 조합이 구조적으로 안테나 배치의 영향에 민감하다는 점을 반영하며, τ 기준의 분리거리 확보가 필수적임을 보여준다.

이러한 결과는 단순 가우시안 모델 기반 분석과 실제 단말기 실측이 정량적으로 일치한다는 점을 다시 한번 확인시켜 주며, 제안된 분리거리 기반 면제 기준이 실제 단말기 구조의 특성을 반영하여 합리적인 규제 평가 수단으로 활용될 수 있음을 시사한다.

- Combined SAR & exemption threshold (e.g. 1.16 @ 1710MHz & 1.22 @ 2570MHz)

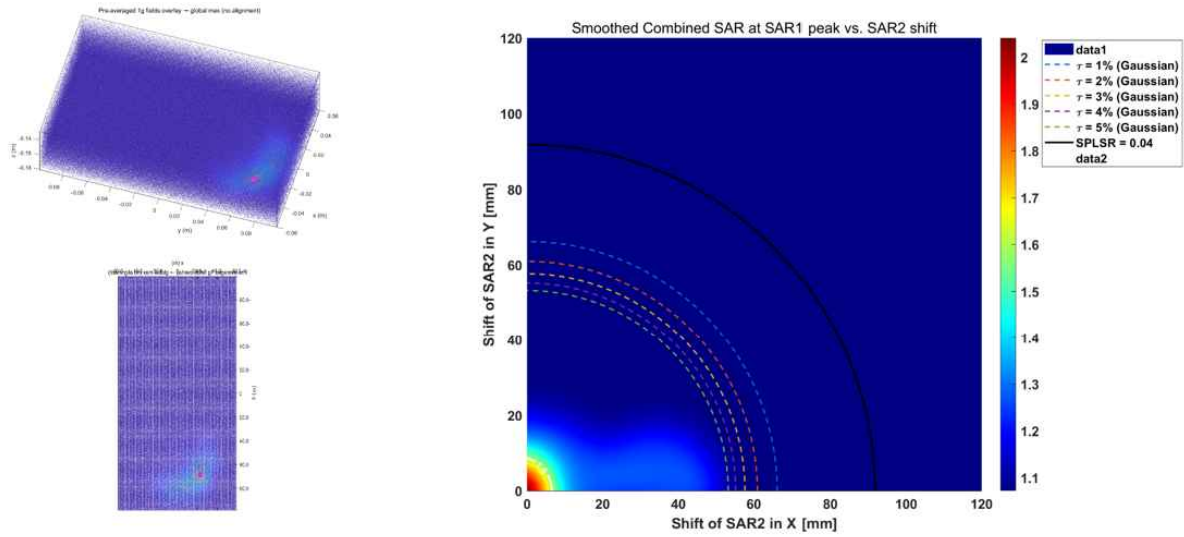


그림 4-35. 볼륨 스캔 측정결과 기반 heatmap (1710 MHz + 2570 MHz)

본 연구에서 분석한 B5+B7과 B3+B7 조합은 각각 상이한 SAR 중첩 특성을 보이며, 그에 따라 요구되는 분리거리와 면제 가능성이 달라진다. 두 경우 모두 실제 볼륨스캔 결과와 결합 모델 분석이 높은 일관성을 유지하였으며, 이는 제안된 방법론이 실제 단말기에 기반한 동시노출 SAR 평가의 신뢰성 있는 기준이 될 수 있음을 의미한다.

제5장 결론 및 향후 계획

제1절 고주파 전자파 흡수전력밀도 표준화 진행현황

다양한 주파수 대역을 사용하는 무선 이동통신 기기의 확산에 따라, 전자기장이 인체에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위한 기술 개발의 중요성이 커지고 있다. 특히 6 GHz 이상의 고주파 영역에서는 기존의 전자파 흡수율(SAR) 기준 외에도 새로운 물리량인 흡수전력밀도(APD)가 인체 노출 평가의 핵심 지표로 제안되고 있다. 이러한 흐름에 따라 국제표준화기구인 IEC, IEEE를 중심으로 APD 평가를 위한 측정 및 해석 기술 개발이 활발히 진행되고 있으며, 다양한 주파수 조건과 측정 목적에 맞는 다채로운 접근 방식이 연구되고 있다.

대표적으로는 IEC/IEEE DTR 63752를 중심으로 흡수전력밀도 (APD) 인체영향 평가 방법에 대한 표준화 연구개발이 진행 중이며, SAR 측정 결과에 변환계수를 적용하는 방법, 인체 등가용액 또는 고체 유전체 기반 모의인체를 이용한 직접 측정 방식, 적외선 열 영상 기반의 간접 측정 방식, 그리고 전자파 수치해석과 OTA 측정을 결합한 증강 OTA(OTAA) 기반 방식 등이 제안되고 있다. 이들 각각은 주파수 대역, 측정 정밀도, 적용 대상 기기의 특성에 따라 선택적으로 활용 가능하며, 현재 진행 중인 국제표준 개발에서도 이러한 기술들의 상호보완성과 유효성을 검증하기 위한 다양한 연구와 논의가 이어지고 있다. APD 평가기술의 표준화와 정밀화는 향후 고주파 기반 차세대 이동통신 기기의 안전성 확보와 인체보호 지침 마련에 필수적인 요소로 작용할 것이다.

제2절 수치해석 기반 고주파 흡수전력밀도 평가방법 연구

고주파 대역에서의 인체노출 평가기술을 APD(Absorbed Power Density)를 중심으로 체계적으로 분석하였고, APD의 물리적 의미, 측정 시 발생하는 변동 요인, 실제 측정 결과와 이론값 간의 차이에 대한 해석, 그리고 APD/IPD 간 상관성 검증을 핵심적으로 다루고 있다. 이에 대한 목적은 주파수 상승에 따라 기존 SAR 중심 평가가 갖는 한계를 보완하고, 고주파 인체노출 평가의 기준이 되는 APD의 적용 가능성과 타당성을 실험적으로 규명하는 데 있다.

인체 표면에서의 전력밀도(APD)는 전기장(E-field)의 국부적 집중에 의해 크게 좌우되며, 안테나와 인체 등가용액 사이의 이격, 매질 특성 변화, 주파수 이동 등의 요소가 APD 측정값에 직접적인 영향을 미친다. 실험적 분석에서는 8 GHz, 28 GHz 등 고주파 대역에서 실제 안테나를 이용하여 APD/IPD를 측정한 결과를 제시하였다. 측정값은 이론적

으로 기대되는 APD/IPD 비율(예: 0.505) 대비 약 $\pm 30\%$ 수준의 편차를 보였으며, 이는 주로 인체 등가용액의 복소 유전율에 따른 공진 주파수 이동, 근거리 결합의 강도 변화, 안테나의 비최적 임피던스 매칭 상태 등이 주요 원인으로 분석되었다. 특히 인체 등가용액과 근접 또는 접촉할 경우 안테나의 공진이 수십 ~ 수백 MHz 이동하는 현상이 관측되었고, 이러한 공진 변화는 APD, IPD 분포의 변형을 유발하여 측정값이 이론값과 차이를 보일 수 있다.

또한 본 연구에서는 APD와 IPD 간 상관성을 수식 및 실측을 통해 비교하였다. 이론적으로 APD는 입사전력밀도(IPD)에 투과율(transmittance)을 곱한 값으로 표현할 수 있지만, 실제 대표적인 인체 등가 매질에서는 매질의 손실, 반사계수, 근접장 형성 구조가 단순한 표면 파라미터로 환산되지 않기 때문에 두 값 사이에 일정한 비율이 유지되지 않는다는 점이 확인되었다. 실험 결과에서도 주파수가 상승할수록 APD/IPD 비율이 증가하는 경향이 나타났으며, 이는 고주파 대역에서 에너지가 더 얇은 깊이에 집중되기 때문에 표면 흡수량(APD)이 상대적으로 커지는 물리적 특성이 반영된 결과이다. 이 분석은 APD가 고주파 인체노출 평가에서 단순한 보조 지표가 아니라, 독립적으로 인체 노출량을 대표할 수 있는 주요 지표임을 뒷받침한다.

이러한 연구 내용은 APD 측정 표준화 방향에도 중요한 시사점을 제공한다. APD는 IPD 대비 측정 위치나 매질 변화에 민감하기 때문에, 기준 안테나의 대역폭을 확보하는 것이 필요하다.

제3절 동시노출 간소화 평가기술 연구

다중 송신기 환경에서의 SAR 동시노출 평가 문제를 해결하기 위한 새로운 면제기준(exemption criterion)을 제안하고, 이를 실측과 모델링 결과를 통해 검증한 내용을 다룬다. 기존 규제에서는 각 송신기의 SAR을 단순 합산하거나 가장 큰 값을 선택하는 보수적 방식이 적용되어 왔으나, 이러한 접근은 실제 인체 노출 특성과 무관하게 과대평가를 초래하는 한계가 있었다. 이러한 문제를 보완하기 위해 SAR 분포를 2D 가우시안 모델로 단순화하여 서로 다른 주파수, 안테나 위치에서 발생하는 SAR 분포 간의 상호영향을 정량적으로 평가하는 방법을 제안하였다.

핵심은 두 SAR 분포가 서로 간섭하여 상대 SAR의 피크 위치에서 증가시키는 영향이 $\tau\%$ 이하일 때, 해당 조합을 추가적인 볼륨 스캔없이 면제할 수 있다는 이론적 기준을 제시할 수 있다. 이를 위해 각 SAR 분포의 피크 위치, 표준편차(σ), 그리고 psSAR 값(peak spatial SAR)을 이용하여 분리거리(d)를 계산하는 해석적인 식을 제안하였다. 이 식은 두 가우시안 분포의 중첩에서 상대 SAR이 증가하는 값을 제한하는 형식으로 유도되며, 결과적으로 면제거리(d)는 두 분포 간의 수평적/수직적 거리뿐 아니라 각 SAR의 크기 비율에 의해 결정된다.

이론적으로 도출된 면제거리는 이후 실제 단말기 볼륨스캔 데이터와 3D 측정 결과를 통해 검증되었다. 특히 다양한 대역 조합(예: 835+2535 MHz, 1710+2535 MHz, 1920+3550 MHz 등)에 대한 측정 결과에서, 모델로 예측한 면제거리 근처에서 실제 측정된 Combined SAR 값이 규제 기준(예: 1.6 W/kg)을 만족하는지 비교하였다. 실험 결과, 모델이 예측한 면제거리와 실제 측정된 무제한 동작 가능거리 사이의 차이는 매우 작았으며, 대부분의 케이스에서 모델이 제시한 $\tau = 5\%$ 조건을 안정적으로 충족하였다. 이는 가우시안 기반 모델이 실제 단말 SAR 분포의 형태와 상호영향을 충분히 반영하고 있으며, 동시에 과대평가를 줄이는 합리적 근거가 될 수 있음을 의미한다.

또한 실측된 SAR 분포와 모델의 분포가 유사한 형태와 피크 위치를 보였다는 점도 중요한 결과이다. 이는 SAR 분포의 공간적 구조가 실제로 가우시안 형태에 근접한다는 사실을 뒷받침하며, 모델 기반의 면제기준이 단순한 수학적 근사에 그치지 않고 실제 물리현상을 반영하고 있음을 확인시켜 준다.

다중 송신기 기반 단말기의 SAR 동시노출 평가에서 과도하게 보수적인 기존 규제의 한계를 완화하고, 실제 인체 노출을 더 정확하게 반영하는 새로운 면제기준을 제시하였다. 가우시안 기반 모델은 SAR 분포의 형태적 특성을 잘 설명하며, 분리거리를 활용한 면제기준은 실측 검증을 통해 검증 데이터를 확보하였다. 이러한 결과는 향후 SAR 동시노출 평가 표준 개선 및 규제기관, 제조사 간 효율적 시험 프로세스 확립에 직접 기여할 수 있는 실질적 근거가 될 것이며, 복수 송신기 탑재가 일상화되는 무선 단말기 시대에 중요한 기술적 방향성을 제시할 수 있다.

“이면은 공백임”

제6장 참고 문헌

- [1] TTA 저널, 제45차 ITU-R WP5D 국제회의 결과, 212호, 2024
- [2] Samsung Research, Upper Mid-Band Spectrum for 6G: Opportunities and Key Enablers, 2024
- [3] IEC/IEEE TR 63572 ED1, Evaluation of Absorbed Power Density Related to Human Exposure to Radio Frequency Fields from Wireless Communication Devices Operating between 6 GHz and 300 GHz, 2024
- [4] IEC/IEEE DTR 63572, Evaluation of Absorbed Power Density Related to Human Exposure to Radio Frequency Fields from Wireless Communication Devices Operating between 6 GHz and 300 GHz, 2025
- [5] IEC/IEEE 63195-3: Assessment of Power Density of Human Exposure to Radio Frequency Fields from Wireless Devices in Close Proximity to the Head and Body (Frequency Range of 6 GHz to 300 GHz) Part 3: Measurement Procedures for Absorbed Power Density
- [6] IEC/IEEE 63195-4: Assessment of Power Density of Human Exposure to Radio Frequency Fields from Wireless Devices in Close Proximity to the Head and Body (Frequency Range of 6 GHz to 300 GHz) Part 4: Computational Procedures for Absorbed Power Density
- [7] IEC PAS 63446:2022, Conversion method of specific absorption rate to absorbed power density for the assessment of human exposure to radio frequency electromagnetic fields from wireless devices in close proximity to the head and body - Frequency range of 6 GHz to 10 GHz
- [8] 국립전파연구원, 전자파 흡수전력밀도 등 전자파 인체노출량 평가기술연구 보고서, 2024
- [9] IEC/IEEE 63195-1, Assessment of power density of human exposure to radio frequency fields from wireless devices in close proximity to the head and body (Frequency range of 6 GHz to 300 GHz)
Part 1: Measurement procedure, International Electrotechnical Commission (IEC), IEC Technical Committee 106, Geneva, Switzerland, 2022.
- [10] Ziane, M., M. Zhadobov, R. Sauleau. Exposure assessments in the near-field accounting for antenna/body interactions at millimeter waves: absorbed power density reconstruction from E-field vector. BioEM 2022, Nagoya, Japan, June 19-24, 2022.

- [11] Ziane, M., A. Boriskin, C. Leconte, L. Le Coq, M. Zhadobov. Novel Technique for In-Body Absorbed Power Density Assessment Based on Free-space E-field Measurement. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Dec. 2023
- [12] Ziane, M., M. Zhadobov, R. Sauleau. High-resolution power density measurement technique in the near-field accounting for antenna/body coupling at millimeter waves. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 20(11), pp. 2151–2155, Nov. 2021
- [13] Ziane, M., M. Zhadobov, R. Sauleau. Multi-physics technique for absorbed power density measurement above 6 GHz. *BioEM 2022*, Nagoya, Japan, June 19–24, 2022
- [14] Gabriel, S., Lau, R. W., & Gabriel, C., The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. *Physics in Medicine & Biology*, 41(11), 2271, 1996
- [15] Daisuke, N., R. H. B. M. Baharin, K. Sasaki, R. Suga, and O. Hashimoto, “Absorbed Power Density Assessments for 28 GHz Human Exposure Using Inverse Source Technique; Cross-Comparison of Several Phantoms,” *URSI GASS 2023*, Aug. 2023
- [16] Omi, S., Uno, T., Arima, T., & Wiart, J. (2018). Reconstruction of internal field of dielectric objects for noninvasive SAR measurement using boundary integral equation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 61(1), 48–56.
- [17] Sheng, X. Q., Jin, J. M., Song, J., Chew, W. C., & Lu, C. C. , Solution of combined field integral equation using multilevel fast multipole algorithm for scattering by homogeneous bodies. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 46(11), 1718–1726, 1988
- [18] Baharin, R. H. B. M., et al., “A Comparison of Non-corrected Planar and Spherical Near-Field Scanning for Absorbed Power Density Evaluation Using Inverse Source Technique,” *URSI GASS 2023*, Aug. 2023
- [19] B. Derat, T. Liebig, D. Schaefer, M. Celik and W. Simon, “Absorbed Power Density Assessment Using Simulation-Augmented Over-the-Air Measurement,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 28122–28140, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3368385.
- [20] ICNIRP, “ICNIRP guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100kHz to 300GHz)”, *Health Phys*, 118(5), 483 - 524, Mar. 2020.
- [21] SPEAG, Schmid & Partner Engineering AG, <https://www.speag.swiss>.

- [22] FCC, Selected Mobile and Portable Device RF Exposure Policies and Procedures, FCC TCB Workshop, Apr, 2021
- [23] 국가법령정보센터, <https://www.law.go.kr>.
- [24] FCC office of Engineering & Technology (OET), “Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields”, OET Bulletin No. 65, Aug. 1997.
- [25] IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, IEEE Standard. C95.1-2019 (Revision of IEEE Std. C95.1-2005), 2019
- [26] IEC/IEEE 62209-1528, Measurement procedure for the assessment of specific absorption rate of human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-worn wireless communication devices - Human models, instrumentation and procedures (Frequency range of 4 MHz to 10 GHz), 2020
- [27] https://www.brown.edu/research/labs/mittleman/sites/brown.edu.research.labs.mittleman/files/uploads/lecture13_0.pdf
- [28] 국립전파연구원, 웨어러블기기등 신기술 기기의 전자파 인체노출량 평가기술연구 보고서, 2021

고주파 대역 신규 전자파 인체노출량(APD)
등 전자파 인체영향 평가기술 연구



국립전파연구원
National Radio Research Agency

(58323) 전남 나주시 빛가람로 767

발 행 일 : 2025. 12.

발 행 인 : 정 창 립

발 행 처 : 국립전파연구원

전 화 : 061) 338-4567

인 쇄 : 동원문화사

Tel. 051) 623-0306

ISBN : 979-11-5820-287-3 < 비 매 품 >

주 의

1. 이 연구보고서는 국립전파연구원에서 수행한 연구결과입니다.
2. 이 보고서의 내용을 인용하거나 발표할 때에는 반드시 국립전파연구원 연구결과임을 밝혀야 합니다.

