발 간 등 록 번 호
11-1721137-000029-01

RRA-2018-HM-101

5G 이동통신기기의 전자파 인체노출 환경 예측 분석 연구

2018. 11.

국립전파연구원
National Radio Research Agency

인천대학교 산학협력단

비매품/무료
93560
9 791158 201067
ISBN 979-11-5820-106-7

제 출 문

본 보고서를 「5G 이동통신기기의 전자파 인체노출 환경 예측 분석 연구」 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2018. 11. 23.

연구책임자 : 강승택 (인천대학교)
연 구 원 : 김윤명 ((주)EMF Safety)
이창형 (인천대학교)
박희준 (인천대학교)
남궁광균 (인천대학교)
권진영 (인천대학교)

요 약 문

1. 과 제 명 : 5G 이동통신기기의 전자파 인체노출 환경 예측 분석 연구
2. 연 구 기 간 : 2018. 3. 27 ~ 2018. 11. 23.
3. 연구책임자 : 강승택
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	
가 o 빔 발생 및 조향각도 범위의 설정변경이 가능한 밀리미터파 기준 안테나 연구	강승택 이창형 박희준 남 궁 - 광균 권진영			■	■	■	■							
o 휴대전화기 플랫폼 탑재 크기의 4G/5G/밀리미터파 배열 안테나 시스템의 설계					■	■	■	■	■					
o 기지국 플랫폼 탑재 크기의 4G/5G/밀리미터파 배열 안테나 시스템의 설계								■	■	■	■			
o 제안된 5G 기준 안테나의 시제품 제작 및 성능 분석										■	■	■		
분기별 수행진도(%)														

세부내용	연구자	월별 추진계획												비 고
				3	4	5	6	7	8	9	10	11		
나. 휴대전화의 근거리에서의 전자파 측정기술 o 3 GHz, 28 GHz주파수 대역의 2종 3축 프로브 설계 및 제작	김윤명			■	■	■	■	■						
o 28 GHz 전파 발생 및 프로브 교정							■	■	■					
o 28 GHz 프로브를 이용한 근거리장 검출 및 분석								■	■					
o 28 GHz 전파에 대한 프로브의 감지 특성 측정									■	■	■			
o 측정기술 보완 및 보고서 작성											■	■		
분기별 수행진도(%)														

나. 세부 과제별 추진사항

1) 5G 이동통신용 빔포밍 안테나 설계 및 제작

○ 소형(휴대전화) 플랫폼 탑재 크기의 28 GHz 빔포밍용 배열안테나 시스템(급전 부 포함)의 설계

○ 5G 휴대전화의 전자파 분포특성 시뮬레이션 및 분석

○ 휴대전화의 근거리에서의 전자파(전력밀도 등) 측정법과 실측 연구

○ 5G 단말기 근거리 장 측정 기준안 작성에 필요한 기초자료 제공

2) 휴대전화의 근거리에서의 전자파 측정기술

○ 3 GHz, 28 GHz주파수대역의 2종 3축 프로브 설계 및 제작

○ 5G 휴대전화의 근거리 장 전자파 총 노출량 산출방법 연구
○ 28 GHz 전파 발생 및 프로브 교정
○ 28 GHz 프로브를 이용한 근거리장 검출 및 분석
○ 28 GHz 전파에 대한 프로브의 감지 특성 측정
○ 프로브 팁에 의한 필드 영향 분석

5. 연구 결과

1) 28 GHz 주파수 대역 안테나 설계

○ 배열 안테나(1×4, 2×2) 설계 및 제작

2) 안테나 측정・보간・외삽법 수행 및 검토

○ 유한제차분 보간기법, Cubic Spline 기법 수행

○ 쌍곡선 함수 및 쌍곡선 함수 평행이동 함수 검토

○ 안테나 방사영역 별 전력밀도 샘플링을 이용한 근거리 영역 보간 함수 검토

3) 안테나 별 공간 임피던스 기반 방사 영역 판정

○ 단일 패치 안테나, 1×4 배열 안테나, 2×2 배열 안테나, 다이폴 안테나, 혼 안테나에 대한 공간임피던스 산출 및 방사 영역 구분 판정 검토

4) 3 GHz, 28 GHz 주파수 대역의 2종 3축 프로브 설계 및 제작

○ 6 GHz 및 40 GHz 까지 측정 가능한 3축 프로브 설계 및 제작

5) 5G 휴대전화의 근거리 장 전자파 총 노출량 산출방법 연구

○ 4G & 5G 동시 노출에 의한 전자파 총 노출량 산출방법 연구

6) 28 GHz 전파 발생 및 프로브 교정

○ 광대역 혼안테나를 이용한 28 GHz 프로브 교정

7) 프로프 팁에 의한 필드 영향 분석

○ 프로브 팁 기판에 의한 필드 왜곡현상과 보정수행

8) 28 GHz 프로브를 이용한 근거리장 검출 및 분석

○ 28 GHz 1×4 배열 안테나에 대해 1×1 cm^2, 2×2 cm^2 면적의 근거리 전기장 측정 및 수치해석과의 비교 수행

○ 측정값에 대한 4차 다항식 외삽법 및 Cubic Spline 외삽법에 의한 수치해석 결과와 비교 분석

○ 목업(Mock-up) 폰에 대한 전력밀도 측정

6. 기대효과

1) 경제적 기대효과

○ 5G 이동통신 부품과 안테나를 개발하는 비용을 낮출 수 있음.

○ 국외 측정 장비업체가 판매하는 고정밀 혼 안테나 대신 이동통신 환경에서 실질적으로 필요한 안테나들을 활용하면 수입비용을 낮출 수 있게 됨

2) 산업적 기대효과

○ 수출입 규제책으로 작용하는 전자파 인체영향 수준을 5G용 전자기기들이 발생하는 전자파 문제에 대해 파악해내어, 기획과 설계단계에서부터 문제요인을 줄여, 궁극적으로 국내외 시장에 출시할 수 있게 함

3) 사회적 기대효과

○ 5G 이동통신의 근간을 마련하면, IoT, 빅데이터, 고속 데이터 전송, UHD, VR의 실현뿐만 아니라 방송기술의 성장, 지식과 고급교육의 보편화라는 파급효과를 얻게 될 것임.

○ 고주파의 인체영향에 대해 익숙한 국민들이 가질 밀리미터파에 대한 막연한 두려움을 불식시키기 위해 과학적 근거를 마련하여 계도하여 공공으로부터의 호응을 이끌어 냄

○ 기술적으로는, 밀리미터파 대역 5G 안테나 성능측정설비와 인체영향 측정설비 개발에 활용

○ 다른 5G 안테나(고집적도 MIMO 안테나 포함) 성능 평가와 인체와의 상호작용 데이터 확보에 활용

7. 기자재 사용 내역

시설·장비명	규 격	수량	용도	보유현황	확보방안	비 고
SPEAG SEMCAD X	Copy	1	인체 전자파 영향 해석	인천대		
CST-MWS	Copy	1	안테나 전자기 해석	인천대		
HFSS	Copy	1	안테나 전자기 해석	인천대		
AWR	Copy	1	회로망 해석	인천대		
Anritsu Shock-Line (VNA)	Device	1	회로와 안테나 측정	인천대		
Network Analyzer	300 kHz ~ 3 GHz	1	회로분석	EMF Safety		
Signal Generator	250 kHz ~ 20 GHz	1	회로분석	EMF Safety		
Oscilloscope	DC~ 250 MHz	2	신호 파형 검사	EMF Safety		
고속 SAR 측정장비	Flat Phantom	1	SAR 측정	EMF Safety		
고속 SAR 측정장비	SAM Phantom (Left, Right)	1	SAR 측정	EMF Safety		
SAR 측정장비	로보트 스캐닝형	1	SAR 측정	EMF Safety		
휴대폰 Call 장비	292 ~2700 MHz	1	SAR 측정	EMF Safety		

최종보고서 초록

<table>
<tr><td colspan="3">국문 초록</td></tr>
<tr><td colspan="3">본 연구과제에서는, 5G 이동통신기기에 대한 전자파 인체 노출 환경을 예측하고 분석하는 기초 연구가 수행되었다. 먼저, 28 GHz에서 동작하는 5G 이동통신용 마이크로스트립 단일 패치 및 소형 배열 안테나를 설계하고 제작하였다. 상기 평면 안테나들 및 표준 혼 안테나로부터 방사되는 방향의 거리에 따른 전기장과 전력밀도를 산출하고 측정하였으며, 그것을 기반으로 근거리 영역에 대한 전력밀도를 예측할 수 있는 보간 기법들을 제시하고 정확도를 분석하였다.</td></tr>
<tr><td colspan="3">영문 초록</td></tr>
<tr><td colspan="3">In this study, we conducted a basic research of predicting and analyzing the electromagnetic fields and waves of 5G mobile communication devices influencing the environment of humans as the users. Firstly, a single microstrip patch and small-sized patch arrays working at 28 GHz for 5G mobile communication equipment were designed and manufactured. Secondly, the electric fields and power density values were evaluated and measured at the increasing sample distance in the longitudinal direction from the planar antennas and a standard horn for the same frequency band. Thirdly, using the calculated and measured samples, we suggested extrapolation techniques to predict the power density in the near-field regions of the antennas under test and checked their accuracy.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어</td><td>한글</td><td>5G 이동통신기기, 전자파 인체 노출 환경, 전력밀도</td></tr>
<tr><td>영문</td><td>5G mobile devices, Human exposure to EMF, Power density</td></tr>
</table>

SUMMARY

차세대 이동통신이 요구하는 성능을 만족하기 위한 기술 개발이 끊임없이 이루어지고 있는 가운데 5G 이동통신 안테나 설계기술과 측정기술의 수요 또한 증가하고 있다. 그 중에서도 이동통신기기와 인체 사이에 전자파 노출 문제는 반드시 짚고 가야할 문제로, 이를 해결하지 않고서는 기술이 상용화 되는 단계에 이를 수 없게 된다. 따라서 5G 이동통신기기의 전자파 인체노출 환경에 대한 예측과 분석 및 연구가 요구되어진다.

본 연구에서는 28 GHz에서 동작하는 5G 이동통신용 패치 및 소형 평면 배열 안테나를 설계하였다. 시뮬레이션 결과의 타당성을 확인하기 위해 두 가지 상용 시뮬레이션 프로그램인 CST-MWS와 SEM CAD X를 이용하여 결과를 비교하였으며 두 시뮬레이션 상의 결과가 유사한 것을 확인하였다.

이에 기초하여 5G 이동통신용 배열안테나를 설계하고 제작하였으며 안테나 거리별 전기장과 전력밀도를 산출 및 측정하였다. 산출한 전력밀도에 대하여 종축상 특정 위치에서의 값을 이용해 보간법을 수행하여 전력밀도 값을 예측할 보간 함수들을 검토하였다. 유한제차분 보간기법, 스플라인 기법, 쌍곡선 평행이동 함수를 수행하였으며, 안테나 방사영역 별 전력밀도 샘플링을 이용한 근거리 영역 보간 함수 판정을 수행하였다. 또한 안테나 별 거리에 따른 공간 임피던스를 산출하였고 방사 영역을 구분을 검토하였다.

근거리영역 전기장을 검출하기 위해 다이오드를 이용한 검파형 프로브의 팁에 의한 필드 왜곡현상을 분석하였다. 또한 실제 사용되는 모델의 목업(Mock-up)을 적용해 전력밀도를 측정하고 이에 대한 근거리 외삽·보간 기법을 적용하였다.

목 차

표 목 차 ····· 11
그림목차 ····· 12

제 1 장 서 론 ····· 15
제 2 장 5G 이동통신용 안테나 설계 및 분석 ····· 18
제 1 절 5G 배열안테나 설계 ····· 18
제 2 절 5G 이동통신용 안테나의 공간상 전력밀도 변화 예측 연구 ···· 20
제 3 절 전력밀도 모의시험 및 측정 데이터 기반 외삽함수 비교 및 결정 ·· 27
제 4 절 공간 임피던스 기반 방사 영역 구분 ····· 43
제 3 장 근거리장 전자파 측정 기술 ····· 46
제 1 절 3 GHz, 28 GHz 주파수 대역의 프로브 설계 및 제작 ·· 46
제 2 절 3.5 GHz와 28 GHz 프로브 교정 ····· 48
제 3 절 5G 휴대전화의 근거리장 전자파 총노출량 산출방법 연구 ··· 52
제 4 절 프로브 팁에 의한 필드 영향 분석 ····· 52
제 5 절 28 GHz 전력밀도 측정 ····· 55
제 4 장 결 론 ····· 74

표 목 차

표 3-1 안테나 입력 파라미터 ····· 67
표 3-2 목업(Mock-up) 폰 앞면에 대한 전기장 및 전력밀도 측정값 ····· 72
표 3-3 Mock-up 폰 뒷면에 대한 전기장 및 전력밀도 측정값 ····· 73

그 림 목 차

그림 2-1 5G 이동통신용 패치 안테나의 시뮬레이션 비교 ····· 18
그림 2-2 1×4 안테나 및 시뮬레이션 결과 ····· 19
그림 2-3 2×2 안테나 및 시뮬레이션 결과 ····· 20
그림 2-4 전자기 모의시험 전력밀도 산출 결과 ····· 21
그림 2-5 2×2 배열안테나 전력밀도 분포도 ····· 23
그림 2-6 뉴턴 보간법을 사용한 보간 결과 ····· 24
그림 2-7 Cubic Spline 보간법을 사용한 보간 결과 ····· 26
그림 2-8 쌍곡선 함수와 4차 다항함수 외삽 비교(원거리 영역 샘플) ····· 28
그림 2-9 쌍곡선 함수와 3차 스플라인 외삽 비교(원거리 영역 샘플) ····· 29
그림 2-10 쌍곡선 함수와 쌍곡선 평행이동 외삽 비교(원거리 영역 샘플) ··· 29
그림 2-11 쌍곡선 함수와 4차 다항함수 외삽 비교(중거리 영역 샘플) ····· 31
그림 2-12 쌍곡선 함수와 3차 스플라인 외삽 비교(중거리 영역 샘플) ····· 31
그림 2-13 쌍곡선 함수와 쌍곡선 평행이동 외삽 비교(중거리 영역 샘플) ····· 32
그림 2-14 쌍곡선 함수와 4차 다항함수 외삽 비교(근거리 영역 샘플) ····· 33
그림 2-15 쌍곡선 함수와 3차 스플라인 외삽 비교(근거리 영역 샘플) ····· 34
그림 2-16 쌍곡선 함수와 쌍곡선 평행이동 외삽 비교(근거리 영역 샘플) ····· 34
그림 2-17 쌍곡선 함수와 4차 다항함수 외삽 비교(원거리 영역 샘플) ····· 36
그림 2-18 쌍곡선 함수와 3차 스플라인 외삽 비교(원거리 영역 샘플) ····· 36
그림 2-19 쌍곡선 함수와 쌍곡선 평행이동 외삽 비교(원거리 영역 샘플) ····· 37
그림 2-20 쌍곡선 함수와 4차 다항함수 외삽 비교(중거리 영역 샘플) ····· 38
그림 2-21 쌍곡선 함수와 3차 스플라인 외삽 비교(중거리 영역 샘플) ····· 39
그림 2-22 쌍곡선 함수와 쌍곡선 평행이동 외삽 비교(중거리 영역 샘플) ··· 39
그림 2-23 쌍곡선 함수와 4차 다항함수 외삽 비교(근거리 영역 샘플) ··· 41
그림 2-24 쌍곡선 함수와 3차 스플라인 외삽 비교(근거리 영역 샘플) ··· 41
그림 2-25 쌍곡선 함수와 쌍곡선 평행이동 외삽 비교(근거리 영역 샘플) ··· 42

그림 2-26 단일 패치안테나의 거리별 공간임피던스 ····· 43
그림 2-27 1×4 패치안테나의 거리별 공간임피던스 ····· 43
그림 2-28 2×2 패치안테나의 거리별 공간임피던스 ····· 44
그림 2-29 다이폴 안테나의 거리별 공간임피던스 ····· 44
그림 2-30 혼 안테나의 거리별 공간임피던스 ····· 45
그림 3-1 전기장 프로브 ····· 47
그림 3-2 3.5 GHz 전기장 프로브에 사용된 다이오드 특성 ····· 47
그림 3-3 28 GHz 전기장 프로브에 사용된 다이오드의 순방향 특성 ··· 47
그림 3-4 3축 전기장 프로브 ····· 48
그림 3-5 28 GHz 단축 전기장 프로브 설계도 ····· 48
그림 3-6 제작된 28 GHz 단축 전기장 프로브 ····· 48
그림 3-7 6 GHz 이하 SAR 프로브 교정 ····· 49
그림 3-8 3.5 GHz와 28 GHz 3축 전기장 프로브에 대한 28 GHz에서의 교정 ····· 49
그림 3-9 28 GHz 3축 전기장 프로브 교정 모습 ····· 50
그림 3-10 3축 프로브 등방성 및 교정 결과 ····· 50
그림 3-11 28 GHz 단축 프로브의 교정 ····· 51
그림 3-12 28 GHz 단축 프로브 교정 모습 ····· 51
그림 3-13 28 GHz 단축 프로브 등방성 및 교정 결과 ····· 51
그림 3-14 프로브 팁의 전기장 왜곡현상 수치해석 모델 ····· 53
그림 3-15 프로브 팁에 따른 혼 안테나의 전기장 분포 ····· 54
그림 3-16 프로브 팁에 의한 전기장 왜곡현상 분석 ····· 54
그림 3-17 프로브 팁 제거 전후 모습 ····· 55
그림 3-18 IEC 63170의 전자파흡수율 측정 체적 및 전력밀도 측정 면적 ··· 56
그림 3-19 4차 다항식f(x)의 일반식과 그래프 ····· 56
그림 3-20 f(x) 그래프 선상에서 x_1부터 x_n지점들의 f(x)값 ····· 57
그림 3-21 f(x) 그래프와 g(x)의 비교에 따른 Error ····· 57
그림 3-22 Square Error를 a_4, a_3, a_2, a_1, a_0로 편미분한 값이 0인 경우

의 그래프 ····· 58
그림 3-23 S(x)와 $s_i(x)$ 그래프 ····· 60
그림 3-24 $s_i(x_i)=s_{i-1}(x_i)$ 그래프 ····· 61
그림 3-25 $s'_i(x_i) = s'_{i-1}(x_i)$ 그래프 ····· 62
그림 3-26 설계된 1x4 배열 안테나 ····· 66
그림 3-27 28 GHz 전력밀도 측정 시스템 구성도 ····· 67
그림 3-28 1x4 배열 안테나 전력밀도 측정 모습 ····· 67
그림 3-29 근거리 전력밀도 외삽 방법 ····· 68
그림 3-30 1 x 1 cm^2 면적의 측정 포인트 ····· 68
그림 3-31 각 측정 포인트에 대한 외삽선 ····· 68
그림 3-32 Case 1에 의한 근거리 전력밀도 계산 ····· 70
그림 3-33 Case 2에 의한 근거리 전력밀도 계산 ····· 70
그림 3-34 수치해석 결과와 측정값 및 측정값에 대한 외삽 비교 ··· 71
그림 3-35 목업(Mock-up) 폰에 대한 전력밀도 측정 모습 ····· 71
그림 3-36 Mock-up 폰 앞면에 대한 전력밀도 외삽 결과 ····· 72
그림 3-37 Mock-up 폰 뒷면에 대한 전력밀도 외삽 결과 ····· 73

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 필요성

1. 연구개발과제의 중요성

○ 사회적 중요성

사회 구성원들 간의 광범위한 통신 네트워킹은 고속 데이터 전송을 추구하고 있다. Gbps급 데이터 전송을 위해 5G 이동통신기술의 개발이 요구되며, 시스템의 기초설계는 물론 성능측정과 인체 영향지표 설정에 부합하는 기반이 절실하여 조속히 이를 마련하여야 한다. 차세대 이동통신 분야에 진입하고 싶으나 설계능력이 부족하거나 높은 개발과 측정비용, EMC문제 해결을 감당하기 힘든 중소기업과 학교 연구실이 이용할 수 있는 환경 조성이 필요하다.

○ 문화적 중요성

표현을 중시하는 예술과 정신세계를 기록하는 문학작품은 당대의 과학기술과 함께 성장하며 문화를 형성해간다. 계층 내의 빠른 문화 확산과 계층 간의 문화적 교류와 융합은 마치 5세대 이동통신이 추구하는 고속 데이터 전송과 이종 네트워크들을 타고 다니는 결합기술과 일맥상통한다. 그 기술 구현에 필요한 무선통신 하드웨어의 설계와 검증을 위해, 5G 안테나 환경이 연구되고 실현 정착되어야 한다.

○ 경제적 중요성

기술의 성장과 그 관련 산업이 개화하면, 다양한 분야에 인력들이 필요하게 된다. 상기와 같은 사회적 및 문화적인 중요한 역할을 담당할 5G 이동통신 분야는 무선통신, 이종 네트워크, MIMO, IoT, Big Data, 통신용 하드웨어, 컨트롤 알고리듬과 소프트웨어, 측정을 포함한 기간설비산업 등의 개발자들이 필요하다. 그리고 중소기업과 학교 연구실의 5G 이동통신 안테나 설계기술과 측정환경에 대한 접근비용을 낮춰준다.

○ 5G 대용량 전송 시스템용 다중 안테나는 다수의 단말에게 전송 용량을 증대하기 위하여, 다중 빔 패턴을 형성하고 각 빔 간 간섭이 발생하지 않도록 신호를 조정하는 빔포밍 기술이 필수적이다

○ 현재 안테나 효율 및 이득을 측정하기 위해서는 기준안테나를 기준으로 평가하는 방식이므로 5G 안테나 시제품 성능검증을 위한 기준 안테나 연구개발이 필요하다.

○ 정부는 새로운 주파수와 무선링크 설정이 가져오는 공공의 안전문제 즉

생활공간을 전파하는 밀리미터파 에너지의 인체에 대한 영향을 미리 파악하고 위험수준 정의와 규제책을 마련해야 한다. 이에 대한 기초자료 확보가 필요하다.

2. 연구개발과제 수행의 제약요인

○ 초고주파(밀리미터파) 영역의 안테나 집적용 반도체 공정은 수율도 낮고 고가임. 5G 이동통신 시스템의 기준 안테나를 60 GHz나 77 GHz까지 개발하고 싶으나, 반도체 집적공정이 불가피하여 비용이 많이 들어감. 반도체 전문의 대기업과 FAB을 갖춘 대형 연구소가 레이더용이나 5G 통신용의 시제품을 선보이고 있으나, 성능이 기대 이하이고 공정이 고가임

○ 밀리미터파 영역의 정밀도 높은 측정장비가 고가이면서 보편화가 아직 되어 있지 않다. 5G 이동통신 시스템에는 6 GHz 이하의 안테나 시스템도 필요하나, 밀리미터파(준밀리미터파 포함) 부품과 안테나 측정용 회로망 분석기와 커넥터류는 정밀도와 동작영역에 높고 커짐에 따라 고가이다. 저변이 확대되어 있지 않아 큰 연구소를 제외하고는 갖추고 있지 못함

○ 밀리미터파 전자파 에너지가 공간과 인체와 어떤 상호작용을 일으키는지에 대한 연구사례는 접하기 힘듦. 6 GHz 이하 통신 서비스에 대한 인체 영향 기준을 그대로 도입할 수 없음

3. 연구개발과제 수행결과 기대효과

○ 경제적 기대효과

5G 이동통신 부품과 안테나를 개발하는 비용을 낮출 수 있음. 또한, 국외 측정 장비업체가 판매하는 고정밀 혼 안테나 대신 이동통신 환경에서 실질적으로 필요한 안테나들을 활용하면 수입비용을 낮출 수 있게 됨. 다양한 5G 이동통신 시나리오(기지국간 링크, 프론트홀, 백홀)에 따른 기준 안테나들은 수출하여 또 다른 수익원으로 작용.

○ 산업적 기대효과

LTE, LTE-A 이동통신 제품으로 국가의 위상을 높여온 우리 기술이 5G 무대의 부품기술. 모듈기술, 시스템 기술, 커넥터 기술, 측정요소기술에 적극적으로 뛰어들어 또, 한번 성장하는 계기가 될 것으로 예상됨. 또한, 수출입 규제책으로 작용하는 전자파 인체영향 수준을 5G용 전자기기들이 발생하는 전자파 문제에 대해 파악해내어, 기획과 설계단계에서부터 문제요인을 줄여, 궁극적으로 국내외 시장에 출시할 수 있게 함

○ 사회적 기대효과

5G 이동통신의 근간을 마련하면, IoT, 빅데이터, 고속 데이터 전송, UHD, VR의 실현뿐만 아니라 방송기술의 성장, 지식과 고급교육의 보편화라는 파급효과를 얻게 될 것임. 물론, 공학 내부에서도 이종 학문 간의 교류(소재와 부품기술의 결합, 알고리듬과 최적 설계기술의 결합)가 이뤄질 것으로 기대됨. 또한, 고주파의 인체영향에 대해 익숙한 국민들이 가질 밀리미터파에 대한 막연한 두려움을 불식시키기 위해 과학적 근거를 마련하여 계도하여 공공으로부터의 호응을 이끌어 냄

○ 기술적으로는, 밀리미터파 대역 5G 안테나 성능측정설비와 인체영향 측정설비 개발에 활용

○ 다른 5G 안테나(고집적도 MIMO 안테나 포함) 성능 평가와 인체와의 상호작용 데이터 확보에 활용

제 2 장 5G 이동통신용 안테나 설계 및 분석

○ 5G 이동통신용 안테나를 설계하였다. 중심 주파수는 28 GHz로 목표하였고, 시뮬레이션 상 안테나 이득은 약 6.8 dBi 이며, 효율은 약 61%로 산출되었다.

○ 시뮬레이션 결과의 타당성을 확인하기 위해 두 가지 상용 시뮬레이션 프로그램(CST MWS 와 SEMCAD X)를 이용하여 결과를 비교하였으며 두 시뮬레이션 상의 결과가 유사한 것을 확인하였다.

제 1 절 5G 배열안테나 설계(1×4 및 2×2)

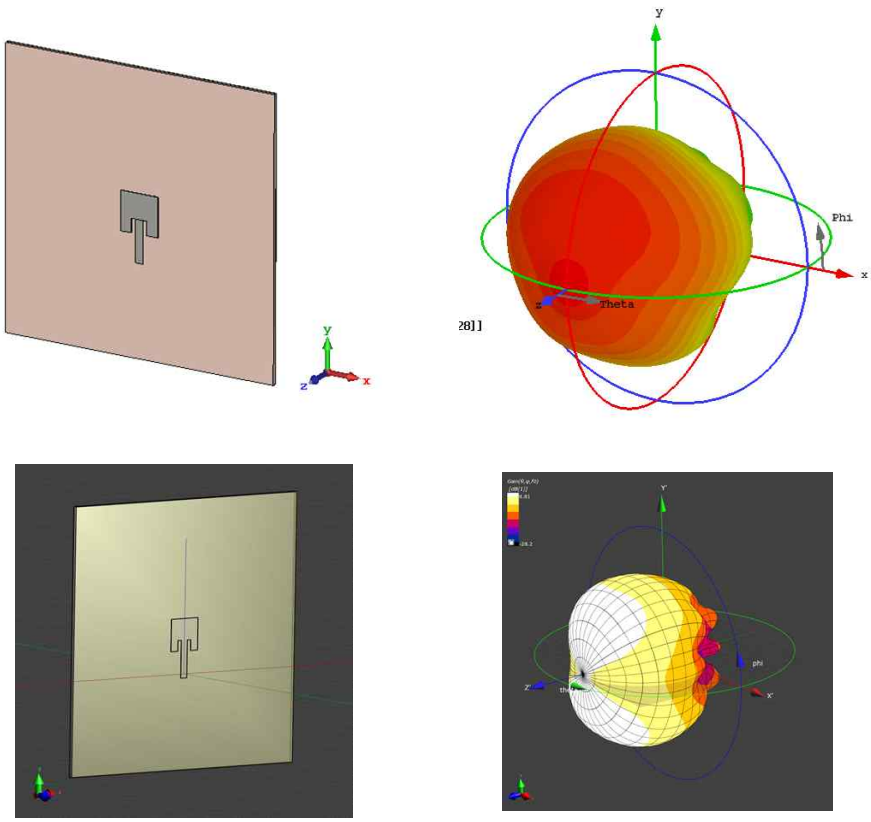


그림 2-1. 5G 이동통신용 패치 안테나의 시뮬레이션 비교
(위 : CST-MWS, 아래 : SEMCAD X)

1. 1×4 배열 안테나 설계

설계한 안테나를 배열화하여 배열안테나를 설계하였다. 배열형태는 1×4와 2×2 형태를 설계하였으며 목표주파수는 28 GHz로 설정하였다. 1×4 패치 배열안테나의 경우 안테나 이득은 약 10.4 dBi 이며, 효율은 약 83%로 산출되었다.

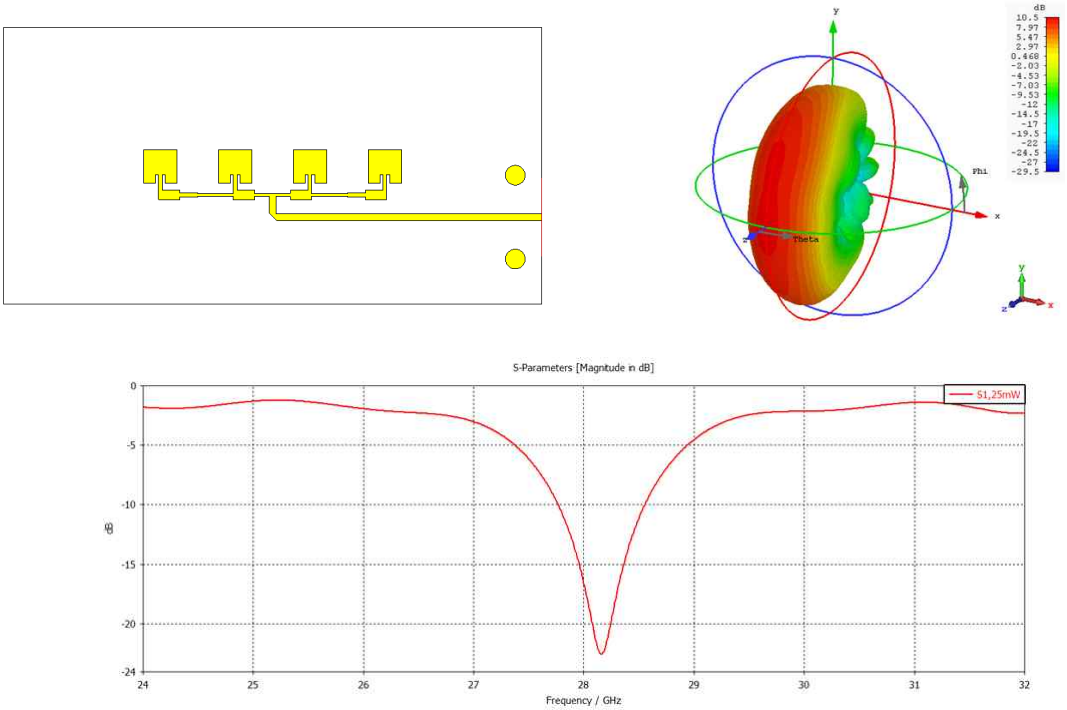


그림 2-2. 1×4 안테나 및 시뮬레이션 결과

2. 2×2 배열 안테나 설계

2×2 패치 배열 안테나의 경우 안테나 이득은 약 13.8 dBi이며, 효율은 약 82%로 산출되었다.

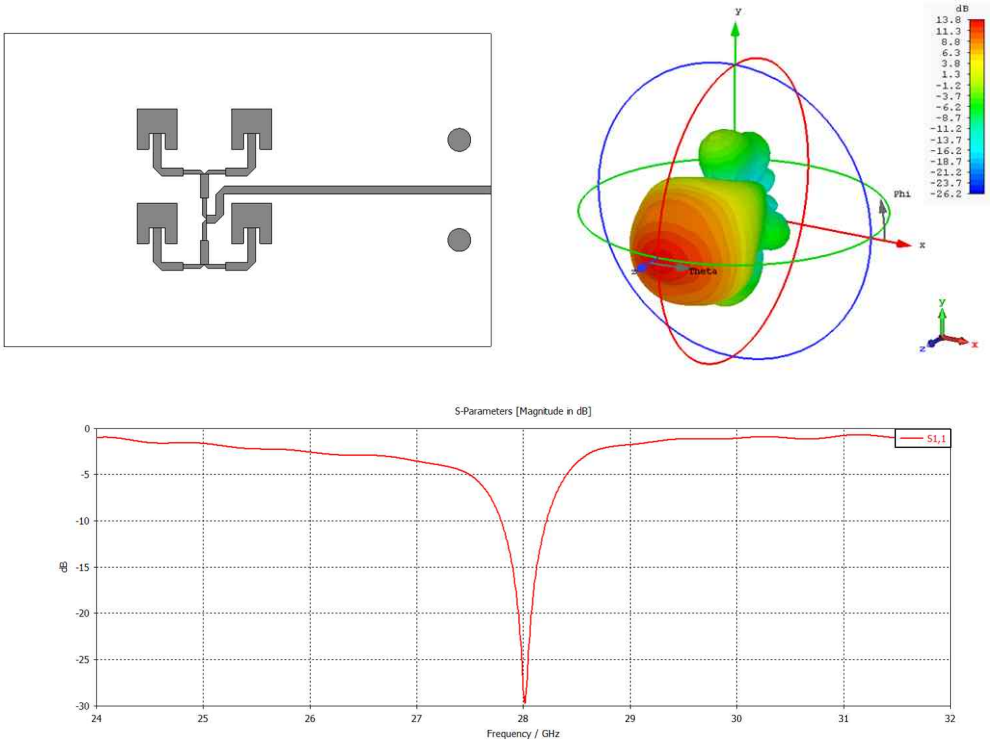


그림 2-3. 2×2 안테나 및 시뮬레이션 결과

제 2 절 5G 이동통신용 안테나의 공간상 전력밀도 변화 예측 연구

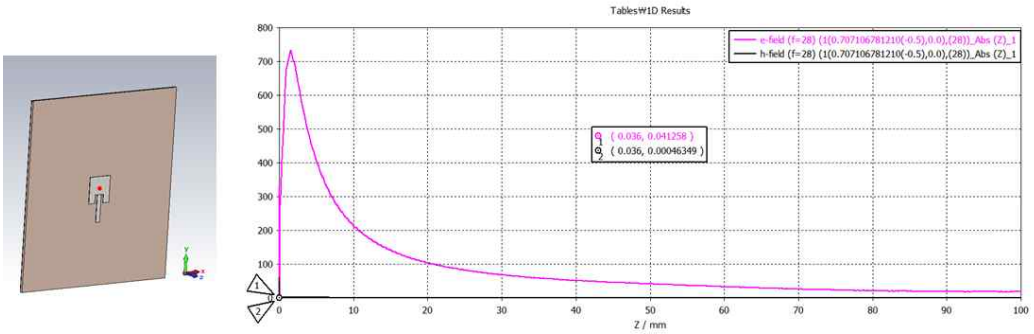
1. 안테나의 공간상 전력밀도 변화

안테나의 공간상 전력밀도 변화를 관찰한다. 전력밀도는 포인팅 벡터(Poynting Vector)로 정의할 수 있으며 계산식은 다음과 같다.

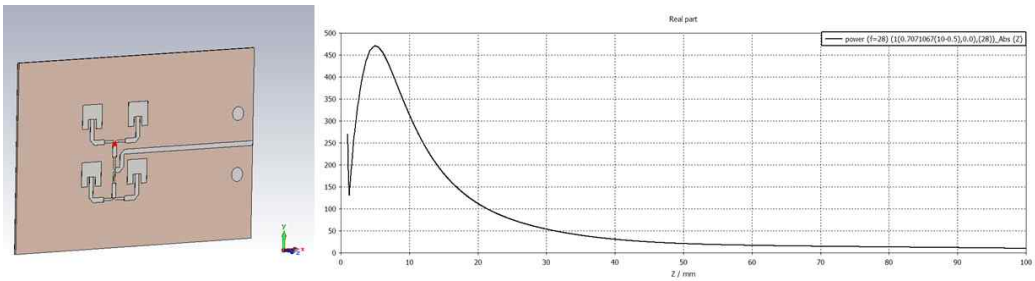
$$P(\theta,\phi) = E_{far}(\theta,\phi) \times H_{far}(\theta,\phi)_{avg}$$

$$\vec{S}(\vec{r}) = \frac{1}{2}(\vec{E}(\vec{r}) \times \vec{H}^{*}(\vec{r}))$$

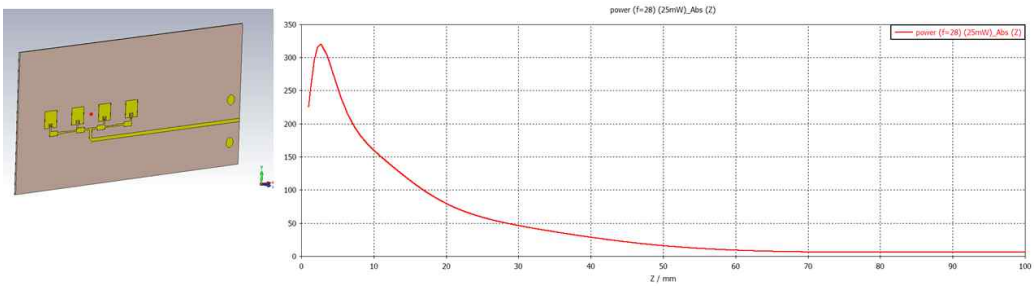
입력 파워는 각각 25 mW와 64 mW로 설정하였으며 안테나의 물리적 중심에서 종축상의 나타난 전력 밀도를 구하였다.



(a)



(b)



(c)

그림 2-4. 전자기 모의시험 전력밀도 산출 결과 (a) 단일 패치 안테나 (b) 2×2 배열안테나 (c) 1×4 배열안테나

산출한 전력밀도에 대하여 종축상 특정 위치에서의 값을 이용해 보간법을 수행하여 전력밀도 값을 예측한다. 추출하는 위치는 안테나로부터 1mm ~ 10mm 범위 내에서 1mm 단위로 거리를 증가시켰고, 10mm ~ 100mm 범위 내에서 10mm 단위로 거리를 변화시켜 값을 얻었다.

2. Newton Divided Difference Interpolation 기법

Newton Divided Difference Interpolation 기법을 사용하여 전기장의 변화를 보간하였고, 결과에 대한 보간 다항식을 산출하였다.

만일 (n+1)개의 데이터점이 존재하면 모든 점을 통과하는 차수가 n인 다항식은 유일하다. 1차 보간식은 선형 보간식 이라고도 하며, 두 점을 직선으로

연결하게 된다. 두 점 사이의 선형 보간식은 다음과 같이 정의된다.

$$f_1(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}(x - x_0)$$

2차 보간식은 점들을 연결시키는 선에 곡률을 도입하여 근사화시키게 된다. 2차 보간식은 다음과 같이 정의된다.

$$f_2(x) = b_0 + b_1(x - x_0) + b_2(x - x_0)(x - x_1)$$

여기서 $b_0 = f(x_0)$이며 $b_1 = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}$ 제차분이 된다.

n+1개의 데이터 점에 n차 보간 다항식을 적합 시키는 일반화된 식은 다음과 같다.

$$f_n(x) = b_0 + b_1(x - x_0) + \cdots + b_n(x - x_0)(x - 1)\cdots(x - x_{n-1})$$

$$\begin{aligned} b_0 &= f(x_0) \\ b_1 &= f[x_1, x_0] \\ b_2 &= f[x_{2,} x_{1,} x_0] \\ &\vdots \\ b_n &= f[x_{n,} x_{n-1,} \cdots, x_{1,} x_0] \end{aligned}$$

$*f[\cdots]$: 유한제차분 표현

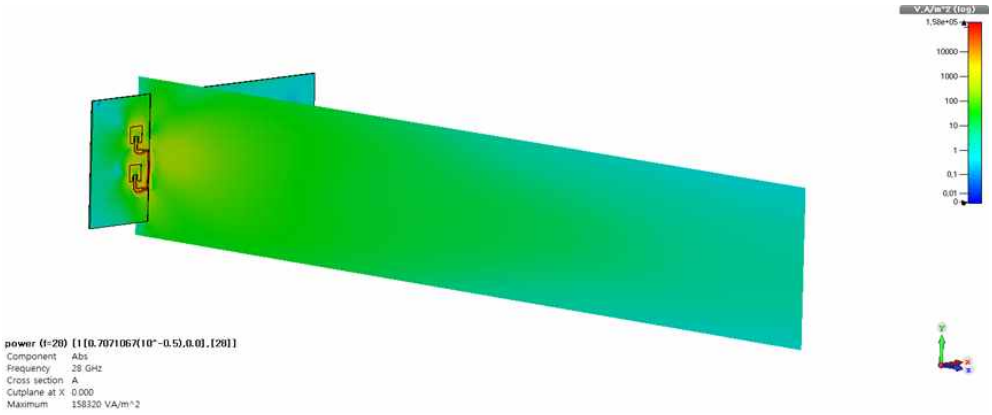
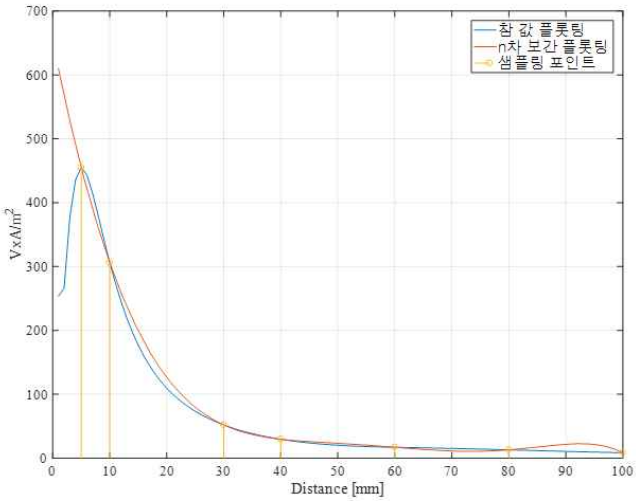


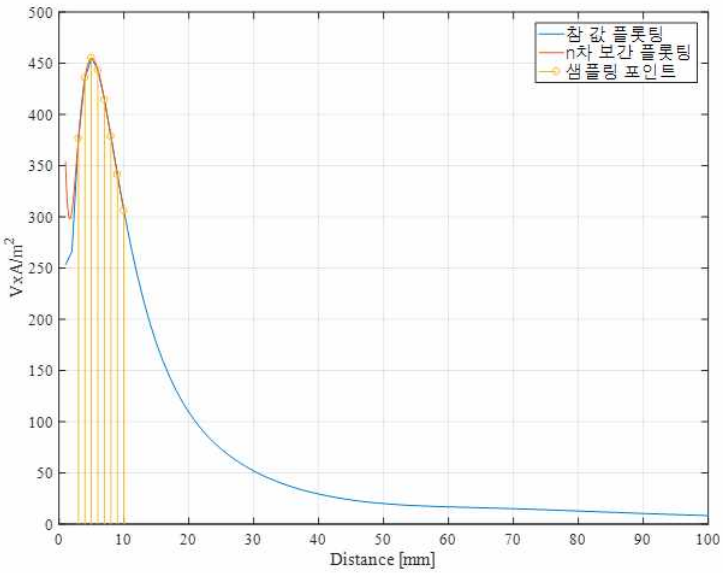
그림 2-5. 2×2 배열안테나 전력밀도 분포도

Divided Difference Interpolation 기법을 사용하는 경우 보간다항식의 차수는 보간할 데이터의 갯수 + 1로 계산된다. 2×2 배열 안테나의 대하여 보간구간을 Peak 지점을 포함한 원거리 구간과 근거리 구간으로 나누어 보간하였다.



$$f(x) = -7.8647 \times 10^{-9}x^6 + 1.8284 \times 10^{-6}x^5 - 9.0657 \times 10^{-5}x^4 - 0.00896x^3 + 1.1505x^2 - 45.3658x + 654.386$$

(a)



$$f(x) = -0.00201x^7 + 0.0998x^6 - 2.0869x^5 + 23.6128x^4 - 153.5315x^3 + 549.5628x^2 - 917.1785x + 853.4670$$

(b)

그림 2-6. 뉴턴 보간법을 사용한 보간 결과 (a) 1×4 배열안테나 (b) 2×2 배열안테나

3. Cubic spline을 이용한 보간 다항식 산출

○ 절점 사이의 각 구간에 대하여 3차 다항식들로 나타낸다.

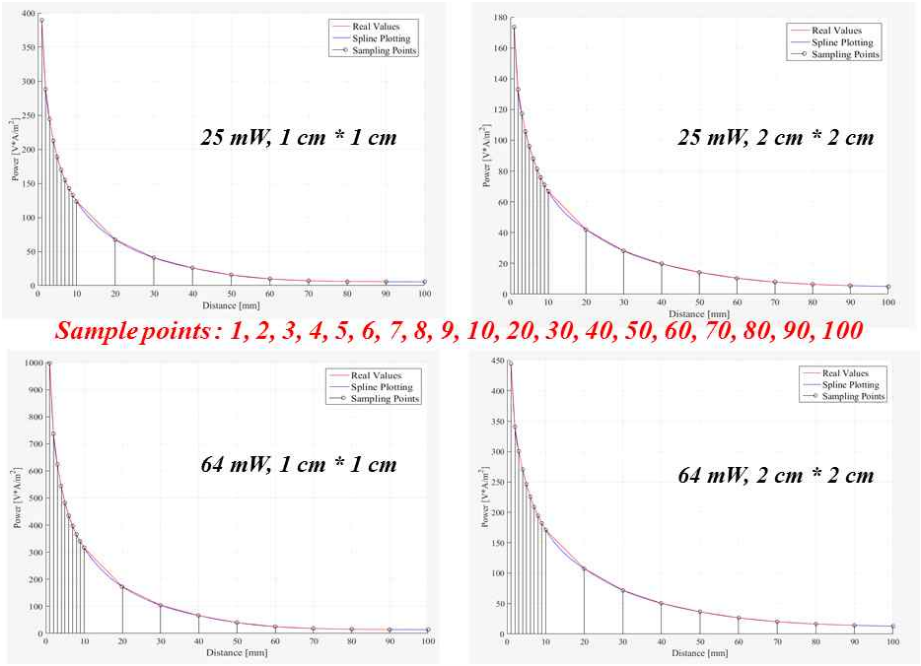
○ n+1개의 데이터점들에 대하여 n개의 구간이 존재하며, 4n 개의 미지수가 결정되어야 한다.
○ 4n개의 미지수를 구하기 위한 조건은 다음과 같다.
- 각 구간에서 다항식은 양단에서 함수값과 같아야 함
- 내부 절점에서의 1차 도함수는 같아야 함
- 내주 절점에서의 2차 도함수도 같아야 함
- 양 끝점에서의 2차 도함수는 0이어야 함
○ 각 구간에 대한 3차 방정식은 아래와 같이 구해진다.

$$f_i(x) = \frac{f_i''(x_{i-1})}{6(x_i - x_{i-1})}(x_i - 3)^3 + \frac{f_i''(x_i)}{6(x_i - x_{i-1})}(x - x_{i-1})^3$$
$$+ \left[\frac{f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} - \frac{f''(x_{i-1})(x_i - x_{i-1})}{6} \right](x_i - x)$$
$$+ \left[\frac{f(x_i)}{x_i - x_{i-1}} - \frac{f''(x_i)(x_i - x_{i-1})}{6} \right](x - x_{i-1})$$

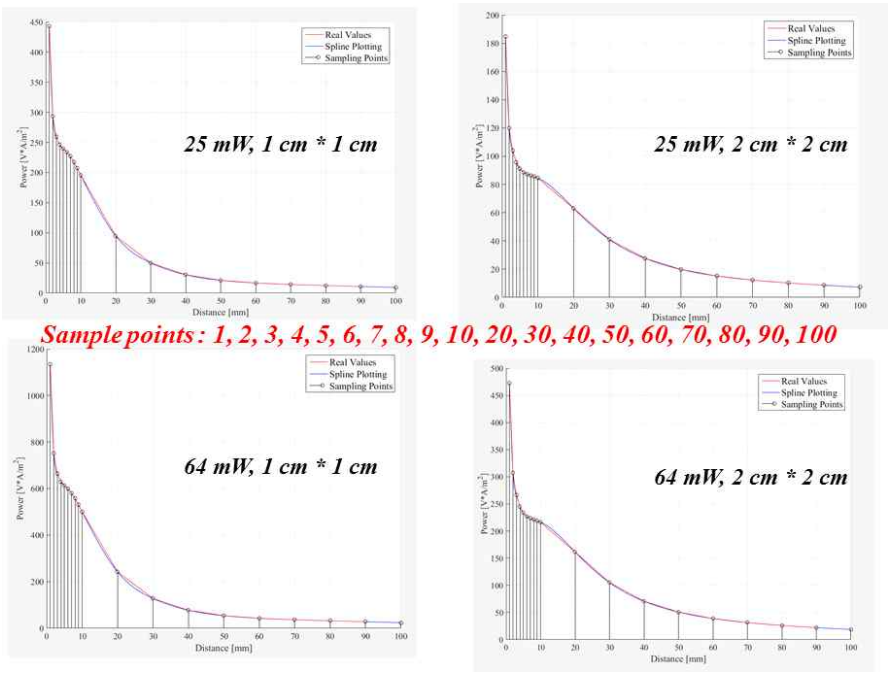
○ 다음 방정식을 사용하여 각 구간의 끝에서 2차 도함수를 계산한다.

$$(x_i - x_{i-1})f''(x_{i-1}) + 2(x_{i+1} - x_{i-1})f''(x_i) + (x_{i+1} - x_i)f''(x_{i+1})$$
$$= \frac{6}{x_{i+1} - x_i}[f(x_{i+1}) - f(x_i)] + \frac{6}{x_i - x_{i-1}}[f(x_{i-1}) - f(x_i)]$$

Cubic Spline 기법을 사용하여 종축상 위치에 따른 면적에 대한 전력밀도 데이터를 보간 하였다. 1×4 배열안테나와 2×2 배열안테나에 대해 수행하였으며 결과는 다음과 같다.



(a) 1×4 배열 안테나



(b) 2×2 배열 안테나

그림 2-7. Cubic Spline 보간법을 사용한 보간 결과 (a) 1×4 배열안테나 (b) 2×2 배열안테나

제 3 절 전력밀도 모의시험 및 측정 데이터 기반 외삽함수 비교 및 결정

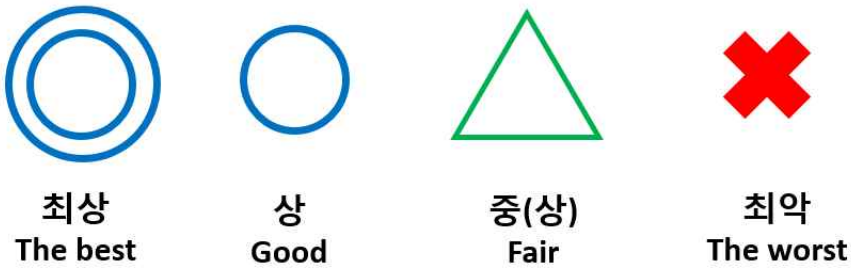
1. 전력밀도의 모의시험 및 측정 데이터에 기반한 외삽함수 비교

가. 쌍곡선 함수를 이용한 외삽함수 비교

○ 면적전력밀도 값 데이터 샘플이 위치한 영역에 따라 원거리, 중거리, 근거리로 영역을 구분하였다.

- 원거리 : 15 mm ~ 20 mm 상의 값
- 중거리 : 10 mm ~ 15 mm 상의 값
- 근거리 : 7 mm ~ 11 mm 상의 값

○ 구분된 세 가지 영역의 샘플을 이용하여 쌍곡선 함수와 스플라인 함수, 고차 다항함수와 비교 및 판정하였으며 아래 그래프 상에 다음과 같은 표시로 나타내었다.



2. 1×4 배열안테나

가. 원거리 영역 샘플

○ 쌍곡선 함수

$$1)\ \frac{1345.14}{r}$$

$$2)\ \frac{1345.14}{r+1}$$

$$3)\ \frac{1345.14}{r+2}$$

○ 4차 다항함수

$$1)\ 0.0009r^4 - 0.0788r^3 + 2.7026r^2 - 46.2540r + 394.8619$$

$$2)\ 0.0021r^4 - 0.1557r^3 + 4.6001r^2 - 66.8836r + 478.2741$$

○ 3차 스플라인

1) $0.0615(r-15)^3-5.5212r+172.4939$

2) $0.0996(r-10)^3-11.2411r+246.9558$

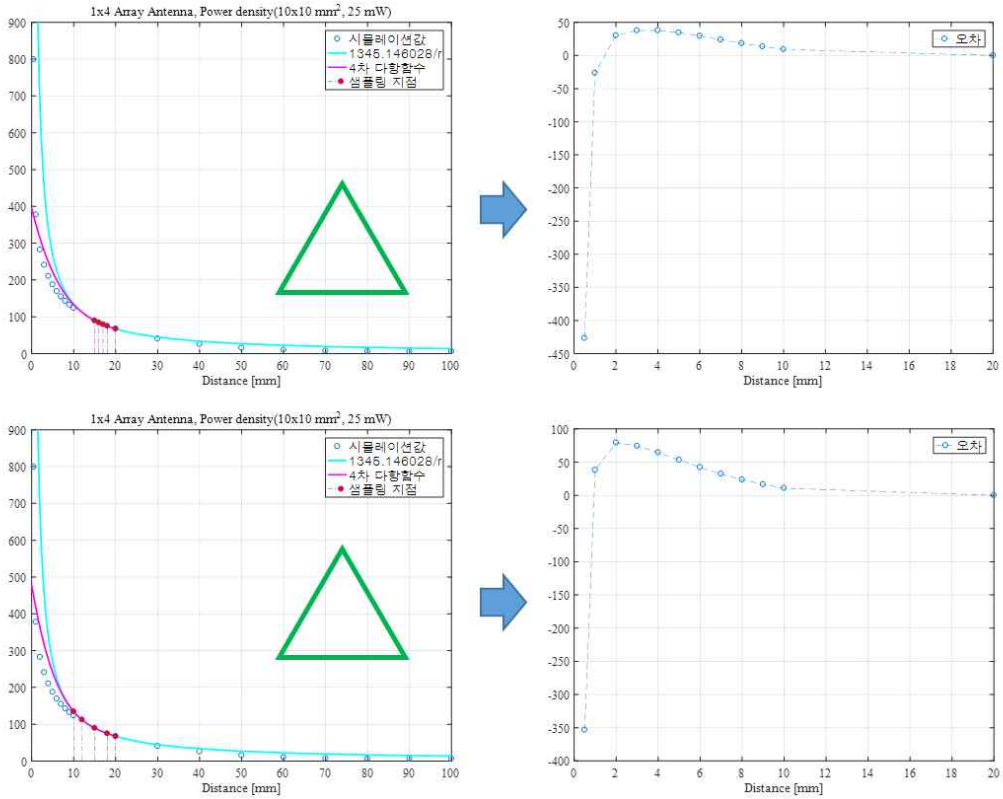


그림 2-8. 쌍곡선 함수와 4차 다항함수 외삽 비교(원거리 영역 샘플)

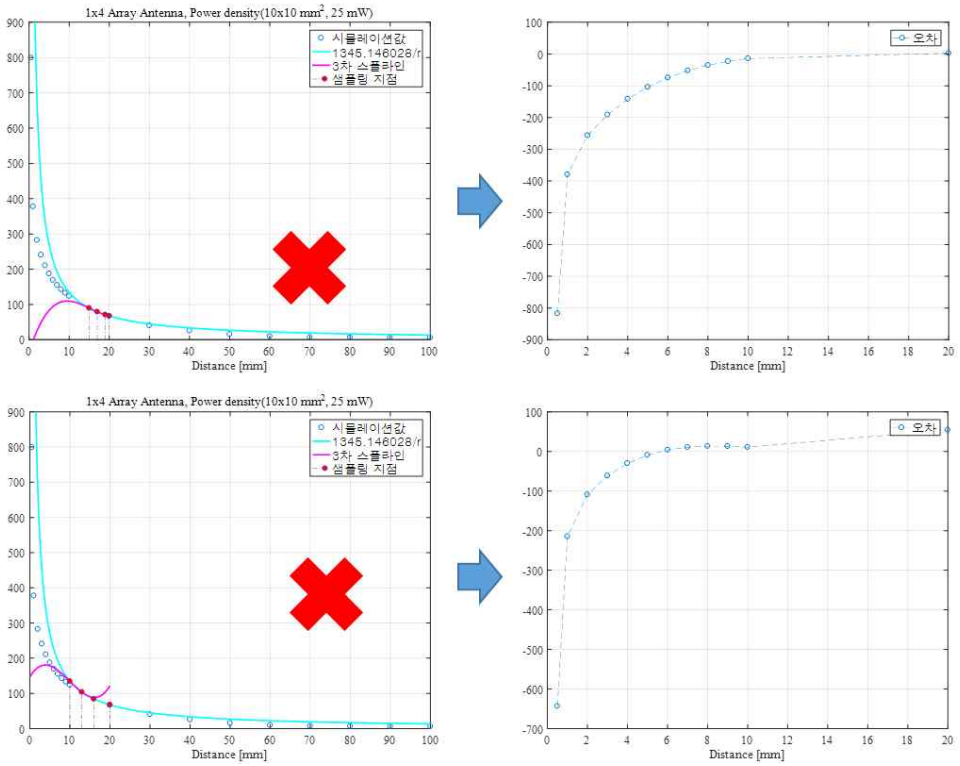


그림 2-9. 쌍곡선 함수와 3차 스플라인 외삽 비교(원거리 영역 샘플)

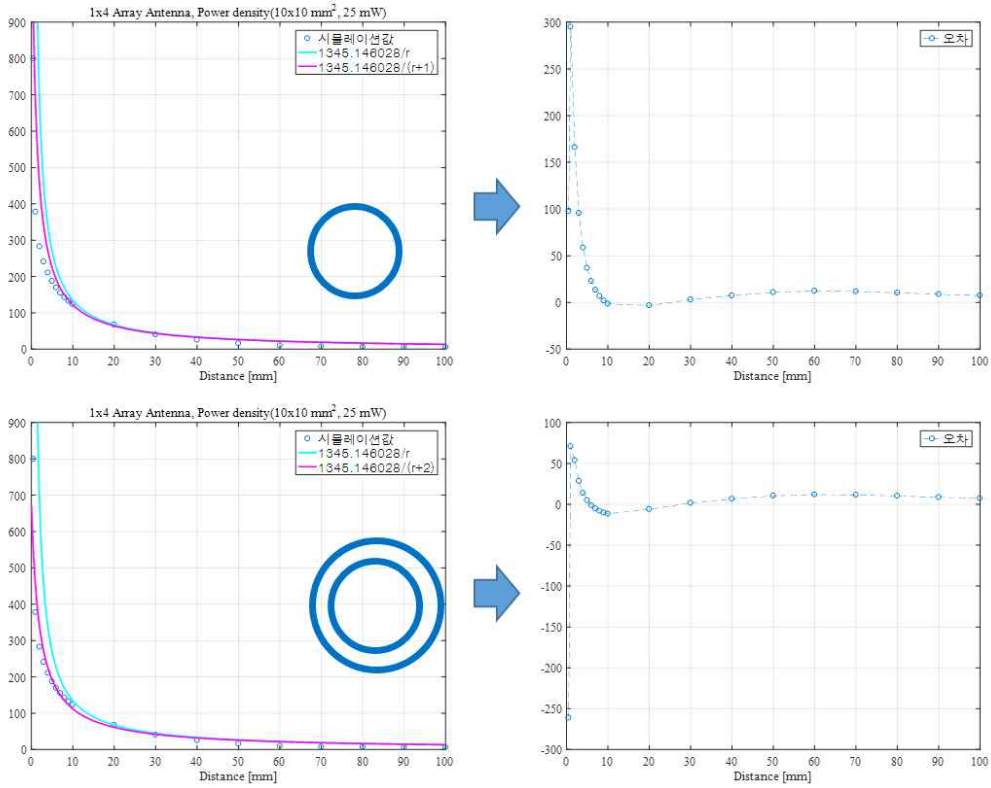


그림 2-10. 쌍곡선 함수와 쌍곡선 평행이동 외삽 비교(원거리 영역 샘플)

○ 원거리 지점 샘플 데이터를 이용한 외삽함수 평가 판정

- 3차 스플라인 함수의 오차가 가장 크게 나타났으며 쌍곡선 평행이동 함수의 경우가 오차가 가장 적은 것으로 나타났다.

나. 중거리 영역 샘플

○ 쌍곡선 함수

$$1)\ \frac{1237.30}{r}$$

$$2)\ \frac{1237.30}{r+1}$$

$$3)\ \frac{1237.30}{r+2}$$

○ 4차 다항함수

$$1)\ 0.0048r^4 - 0.2932r^3 + 7.1191r^2 - 86.0010r + 516.9864$$

$$2)\ 0.0144r^4 - 0.7499r^3 + 15.1419r^2 - 147.7269r + 692.2714$$

○ 3차 스플라인

$$1)\ 0.1674(r-10)^3 - 10.9804r + 233.5349$$

$$2)\ 0.4539(r-5)^3 - 35.0181r + 422.5518$$

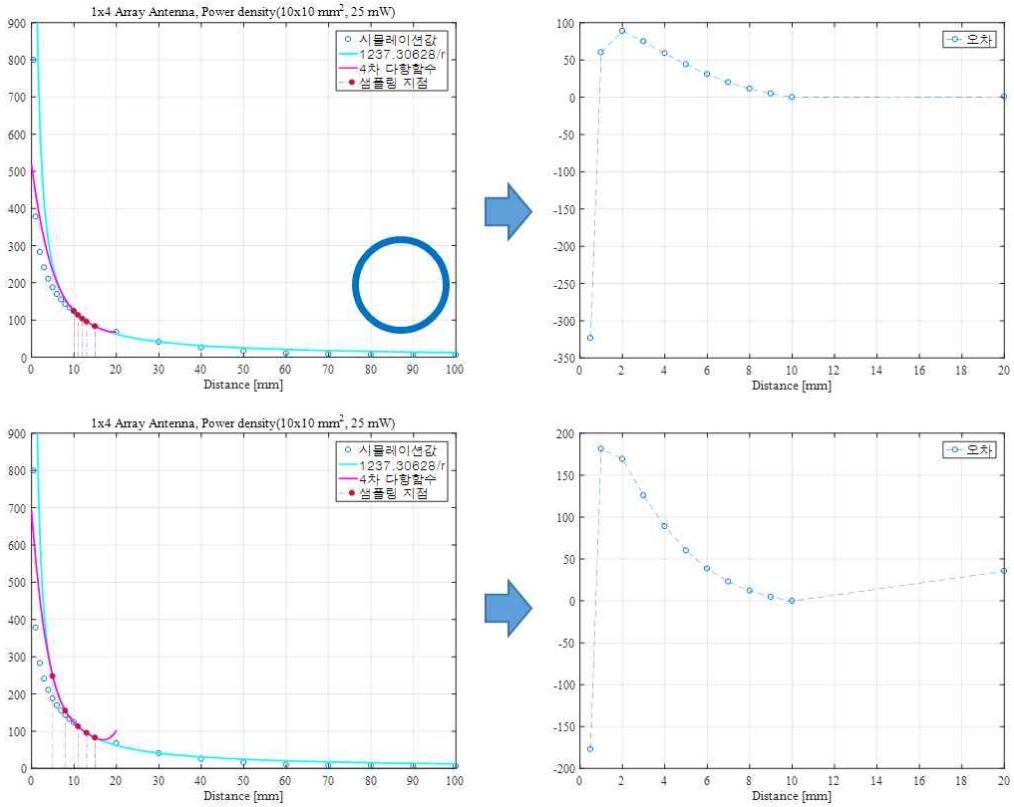


그림 2-11. 쌍곡선 함수와 4차 다항함수 외삽 비교(중거리 영역 샘플)

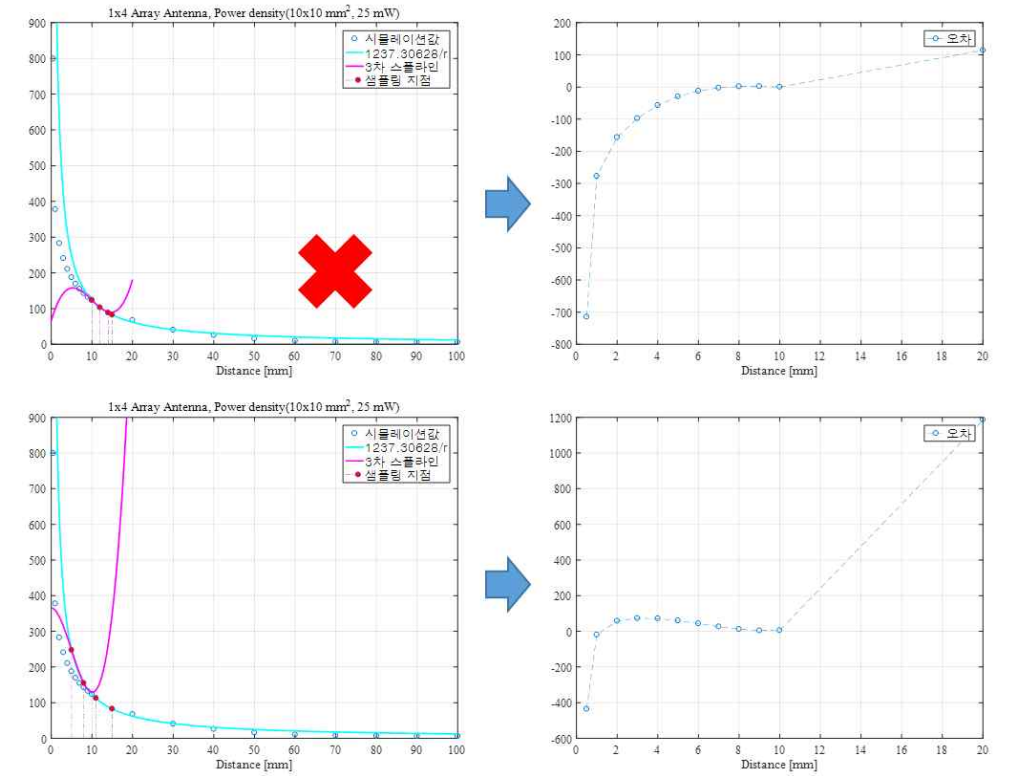


그림 2-12. 쌍곡선 함수와 3차 스플라인 외삽 비교(중거리 영역 샘플)

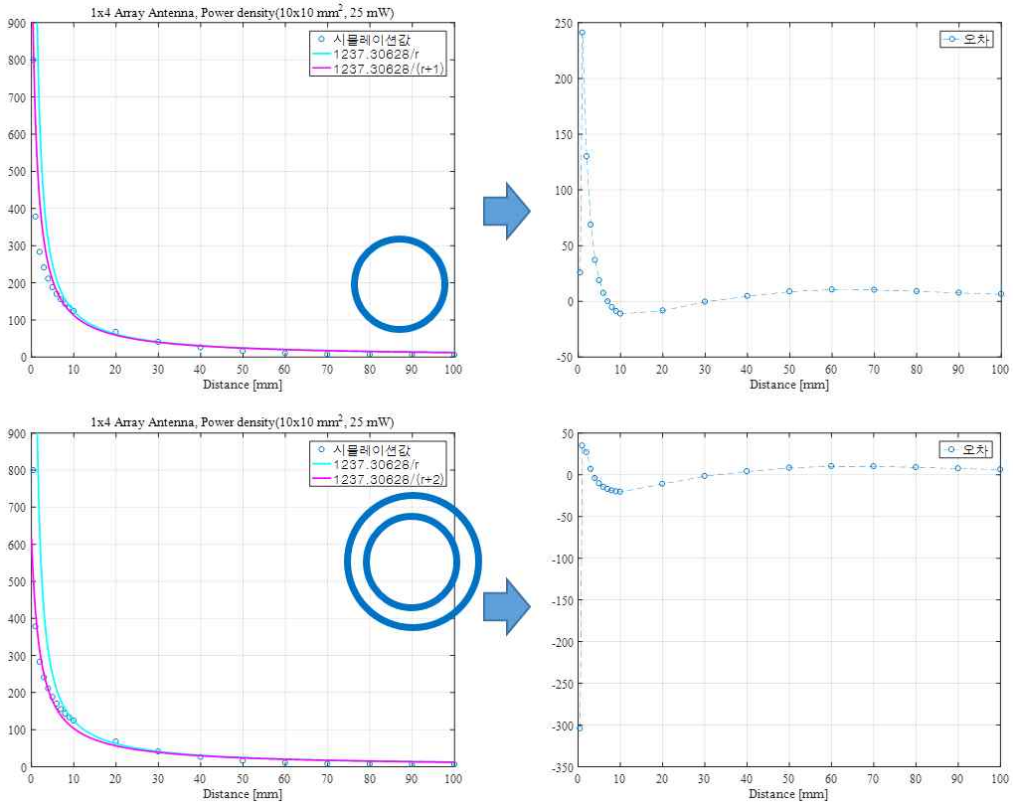


그림 2-13. 쌍곡선 함수와 쌍곡선 평행이동 외삽 비교(중거리 영역 샘플)

○ 중거리 지점 샘플 데이터를 이용한 외삽함수 평가 판정

- 3차 스플라인 함수의 오차가 가장 크게 나타났으며 쌍곡선 평행이동 함수의 경우가 오차가 가장 적은 것으로 나타났다.

다. 근거리 영역 샘플

○ 쌍곡선 함수

$$1)\ \frac{1083.50}{r}$$

$$2)\ \frac{1083.50}{r+1}$$

$$3)\ \frac{1083.50}{r+2}$$

○ 4차 다항함수

$$1)\ 0.0287r^4 - 1.1896r^3 + 19.6636r^2 - 161.8520r + 663.4312$$

2) $0.0502r^4 - 1.9062r^3 + 28.5423r^2 - 210.2800r + 761.4625$

○ 3차 스플라인

1) $0.9459(r-7)^3 - 20.2942r + 296.8457$

2) $0.8208(r-5)^3 - 34.2406r + 387.9038$

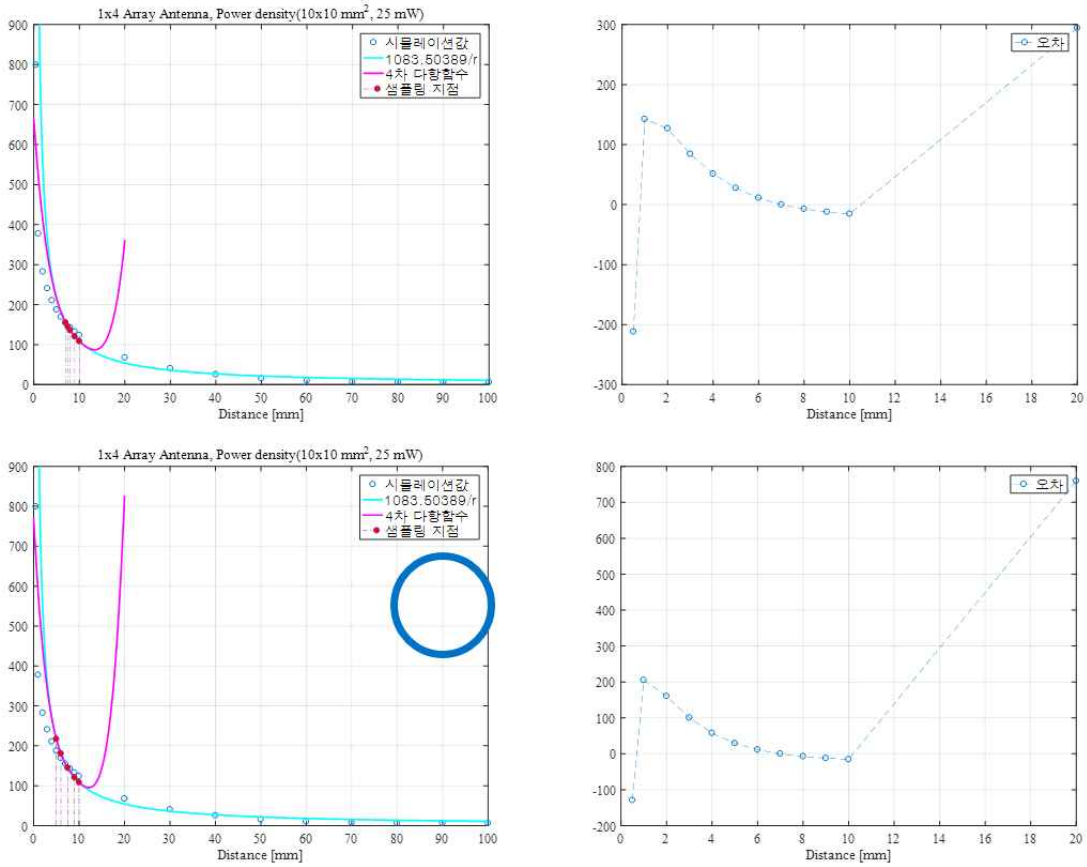


그림 2-14. 쌍곡선 함수와 4차 다항함수 외삽 비교(근거리 영역 샘플)

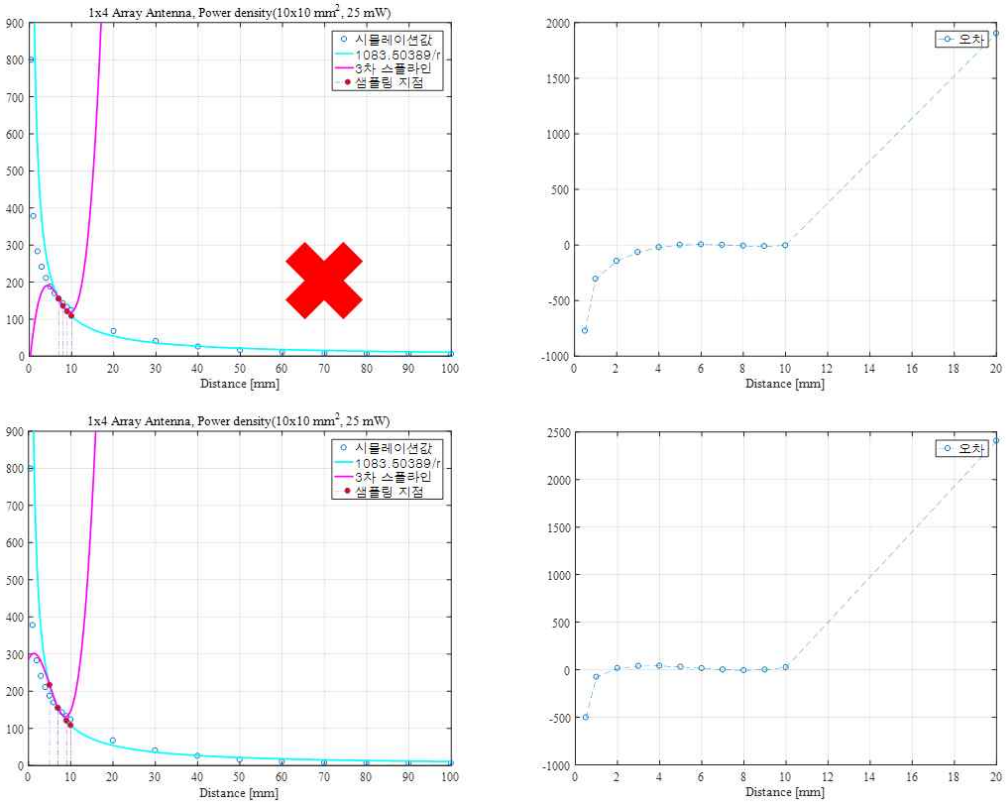


그림 2-15. 쌍곡선 함수와 3차 스플라인 외삽 비교(근거리 영역 샘플)

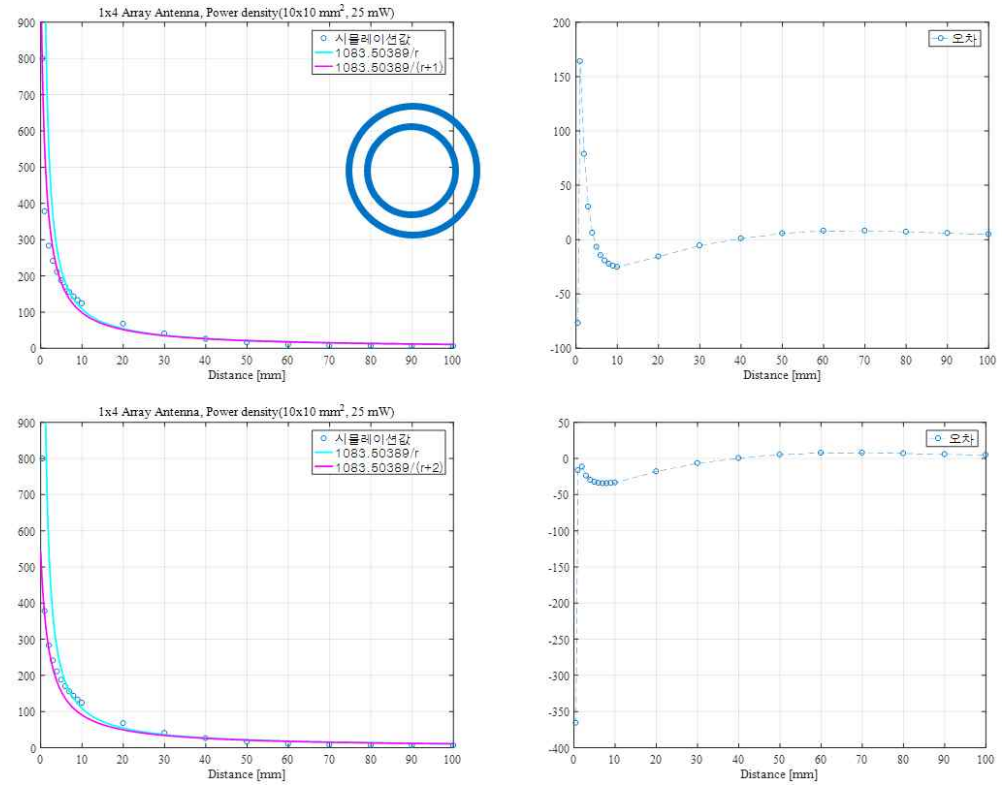


그림 2-16. 쌍곡선 함수와 쌍곡선 평행이동 외삽 비교(근거리 영역 샘플)

○ 근거리 지점 샘플 데이터를 이용한 외삽함수 평가 판정

- 3차 스플라인 함수의 오차가 가장 크게 나타났으며 쌍곡선 평행이동 함수의 경우가 오차가 가장 적은 것으로 나타났다.

3. 2×2 배열안테나

가. 원거리 영역 샘플

○ 쌍곡선 함수

$$1)\ \frac{1778.21}{r}$$

$$2)\ \frac{1778.21}{r+1}$$

$$3)\ \frac{1778.21}{r+2}$$

○ 4차 다항함수

$$1)\ 0.0012r^4 - 0.1041r^3 + 3.5726r^2 - 61.1454r + 521.6867$$

$$2)\ 0.0027r^4 - 0.2058r^3 + 6.0810r^2 - 88.4167r + 632.2533$$

○ 3차 스플라인

$$1)\ 0.0813(r-15)^3 - 7.2987r + 228.0279$$

$$2)\ 0.1317(r-10)^3 - 14.8641r + 3226.4626$$

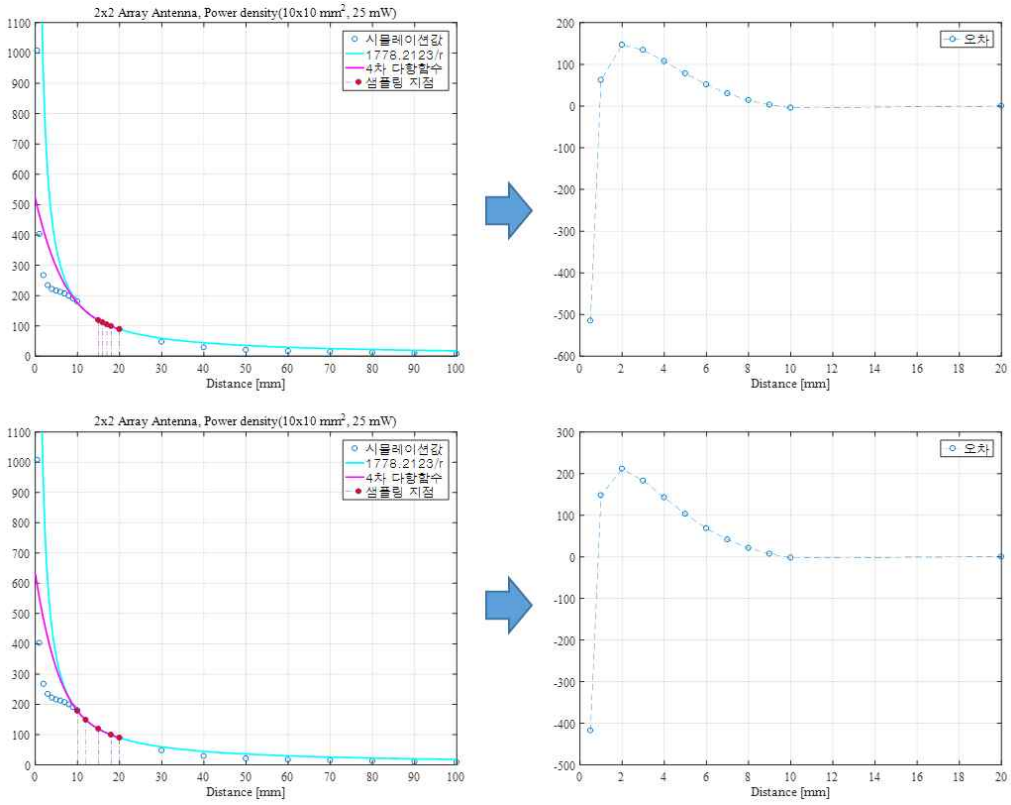


그림 2-17 쌍곡선 함수와 4차 다항함수 외삽 비교(원거리 영역 샘플)

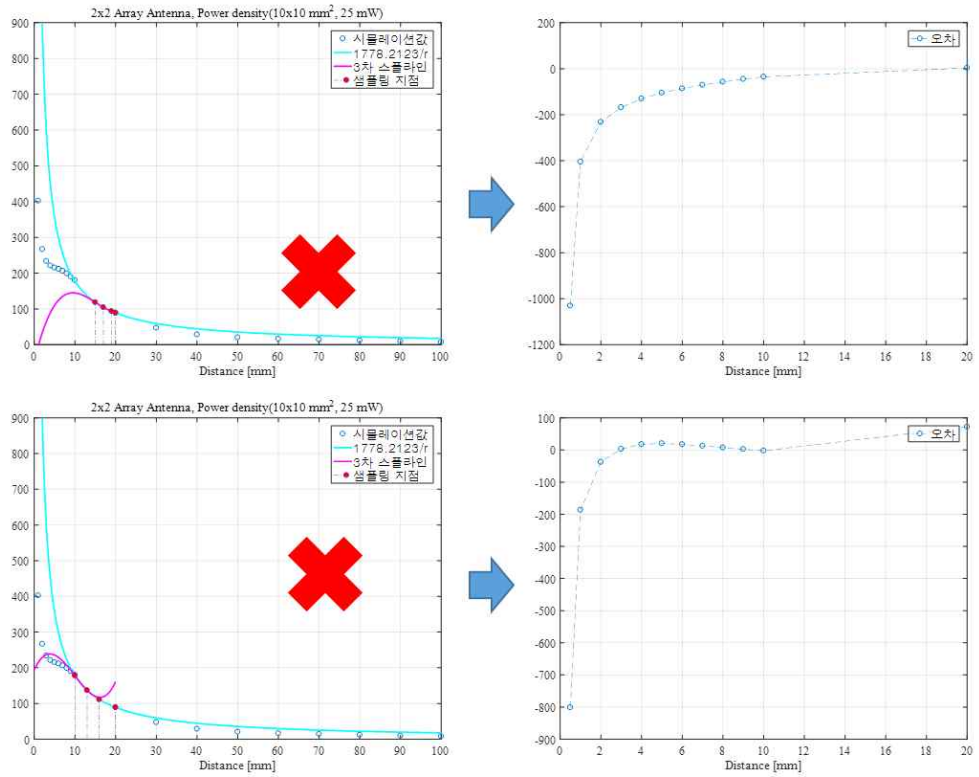


그림 2-18 쌍곡선 함수와 3차 스플라인 외삽 비교(원거리 영역 샘플)

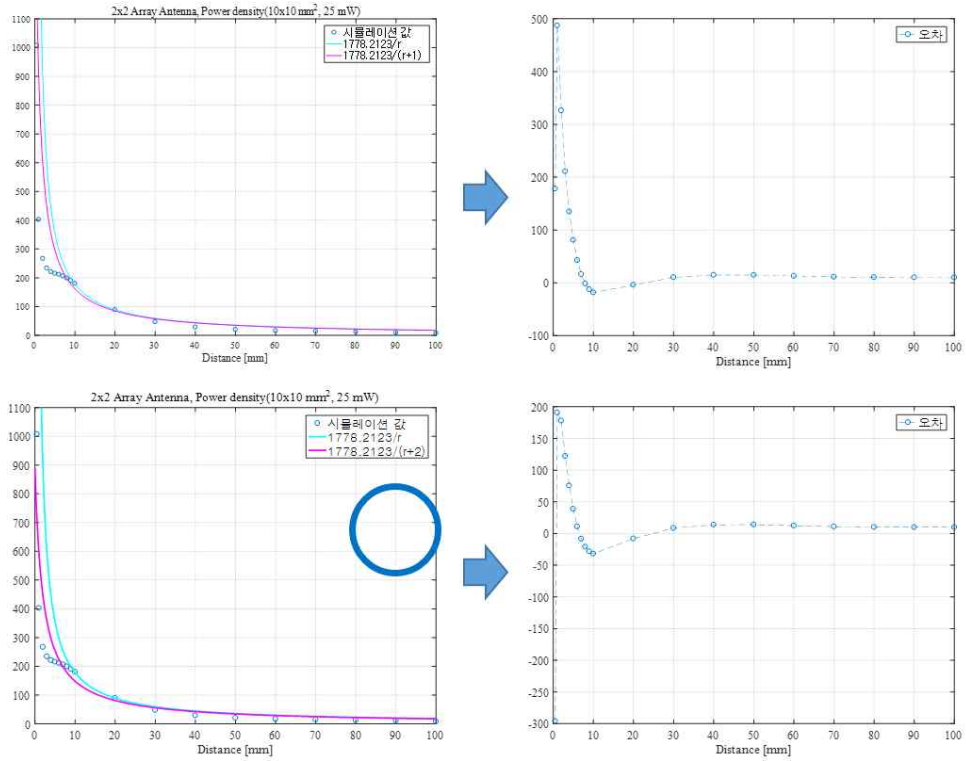


그림 2-19 쌍곡선 함수와 쌍곡선 평행이동 외삽 비교(원거리 영역 샘플)

○ 중거리 지점 샘플 데이터를 이용한 외삽함수 평가 판정

- 3차 스플라인 함수의 오차가 가장 크게 나타났으며 쌍곡선 평행이동 함수의 경우가 오차가 가장 적은 것으로 나타났다.

나. 중거리 영역 샘플

○ 쌍곡선 함수

$$1)\ \frac{1802.49}{r}$$

$$2)\ \frac{1802.49}{r+1}$$

$$3)\ \frac{1802.49}{r+2}$$

○ 4차 다항함수

$$1)\ 0.0070r^4 - 0.4269r^3 + 10.3653r^2 - 125.2160r + 752.7236$$

$$2)\ 0.0210r^4 - 1.0918r^3 + 22.0463r^2 - 215.0879r + 1007.9$$

○ 3차 스플라인

1) $0.2406(r-10)^3-15.7807r+335.6279$

2) $0.6524(r-5)^3-50.3268r+607.2763$

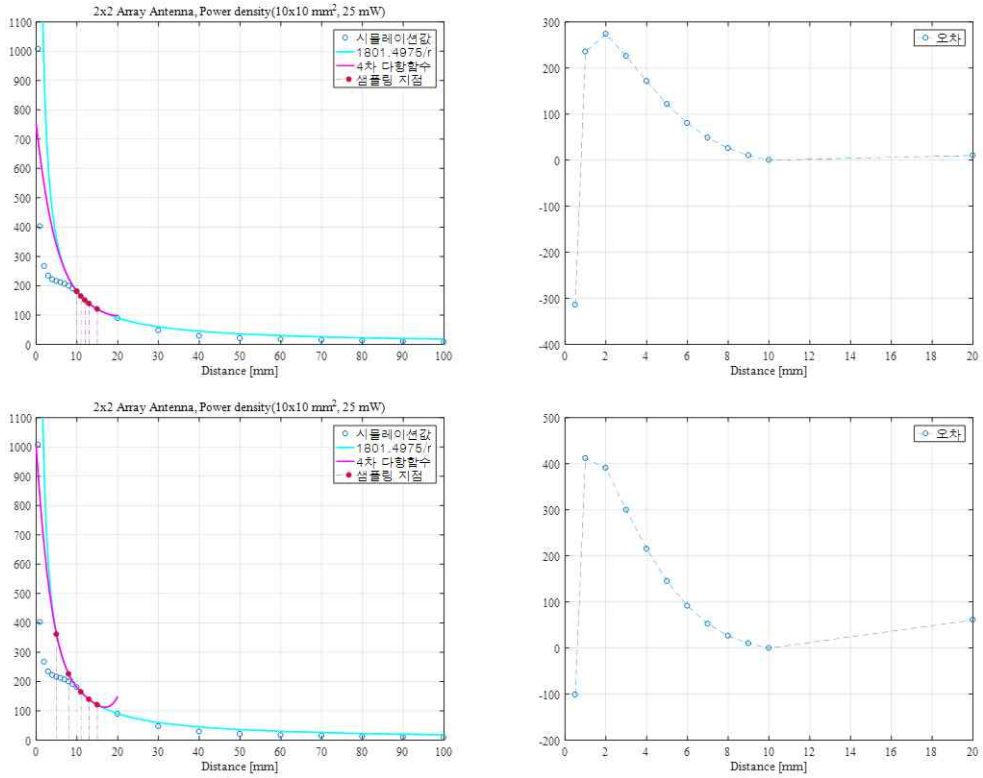


그림 2-20 쌍곡선 함수와 4차 다항함수 외삽 비교(중거리 영역 샘플)

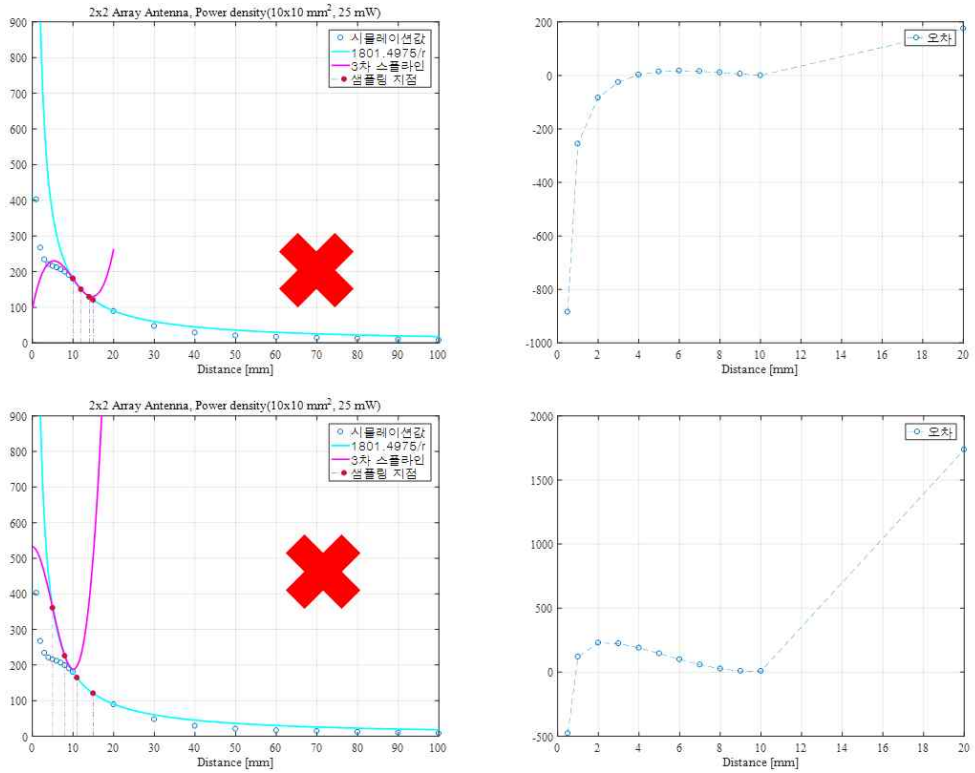


그림 2-21 쌍곡선 함수와 3차 스플라인 외삽 비교(중거리 영역 샘플)

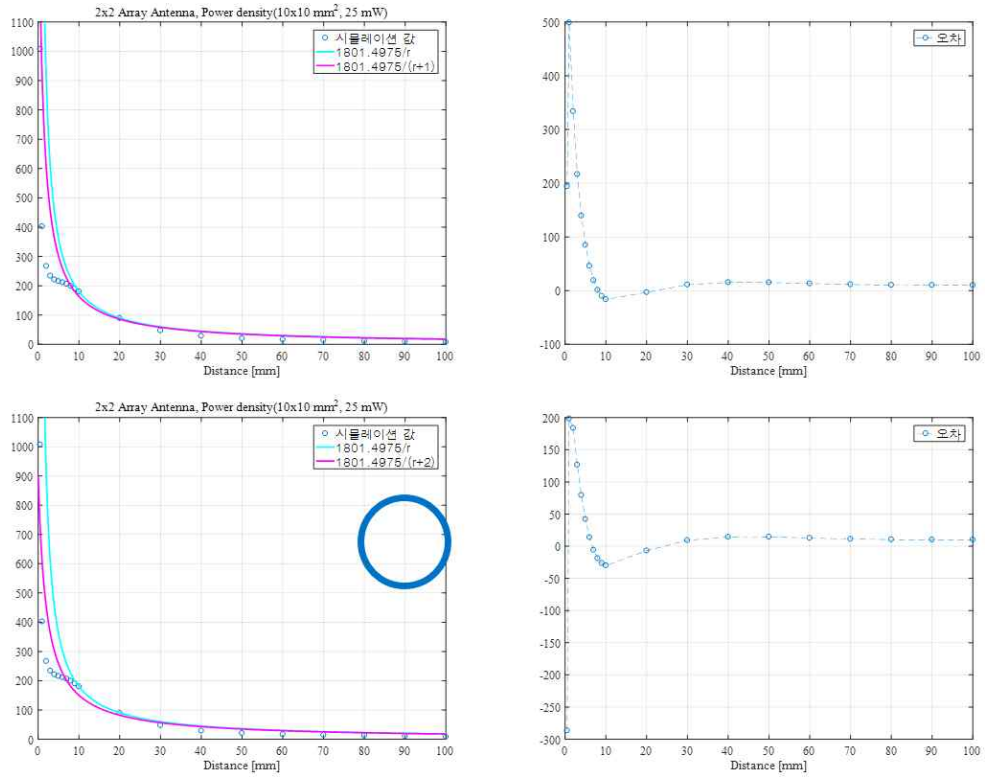


그림 2-22 쌍곡선 함수와 쌍곡선 평행이동 외삽 비교(중거리 영역 샘플)

○ 중거리 지점 샘플 데이터를 이용한 외삽함수 평가 판정

- 3차 스플라인 함수의 오차가 가장 크게 나타났으며 쌍곡선 평행이동 함수의 경우가 오차가 가장 적은 것으로 나타났다.

다. 근거리 영역 샘플

○ 쌍곡선 함수

1) $\frac{1442.68}{r}$

2) $\frac{1442.68}{r+1}$

3) $\frac{1442.68}{r+2}$

○ 4차 다항함수

1) $0.0382r^4 - 1.5839r^3 + 26.1821r^2 - 215.5063r + 883.3602$

2) $0.0763r^4 - 2.8243r^3 + 41.1433r^2 - 294.8732r + 1039.7$

○ 3차 스플라인

1) $1.5524(r-7)^3 - 33.3062r + 487.1737$

2) $3.3678(r-5)^3 - 62.6416r + 668.8503$

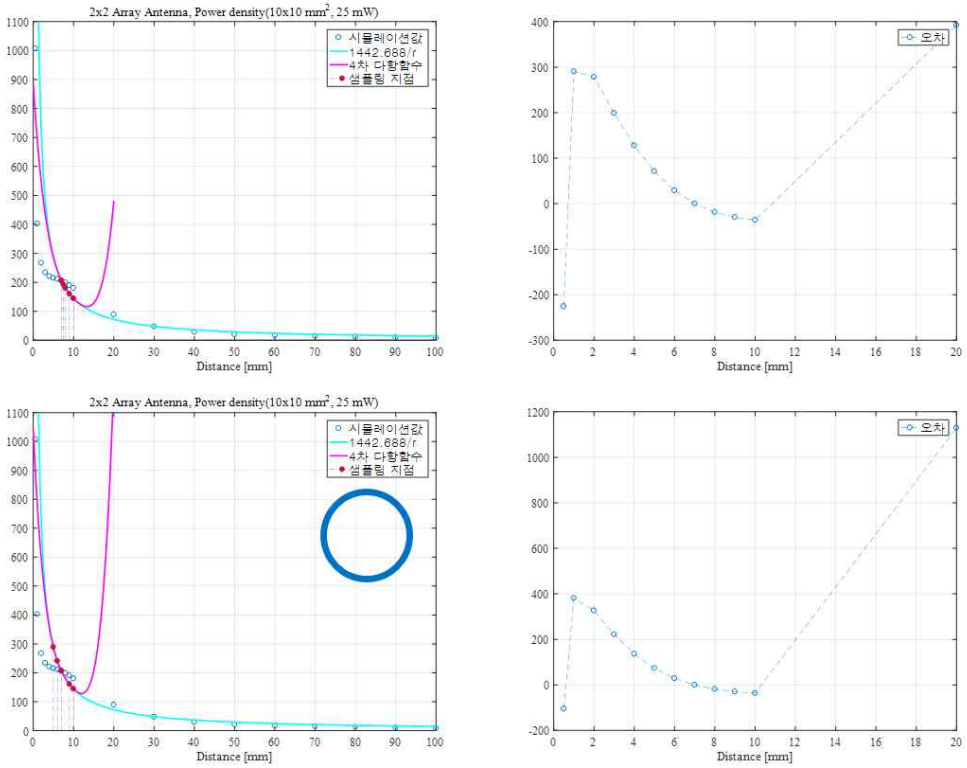


그림 2-23 쌍곡선 함수와 4차 다항함수 외삽 비교(근거리 영역 샘플)

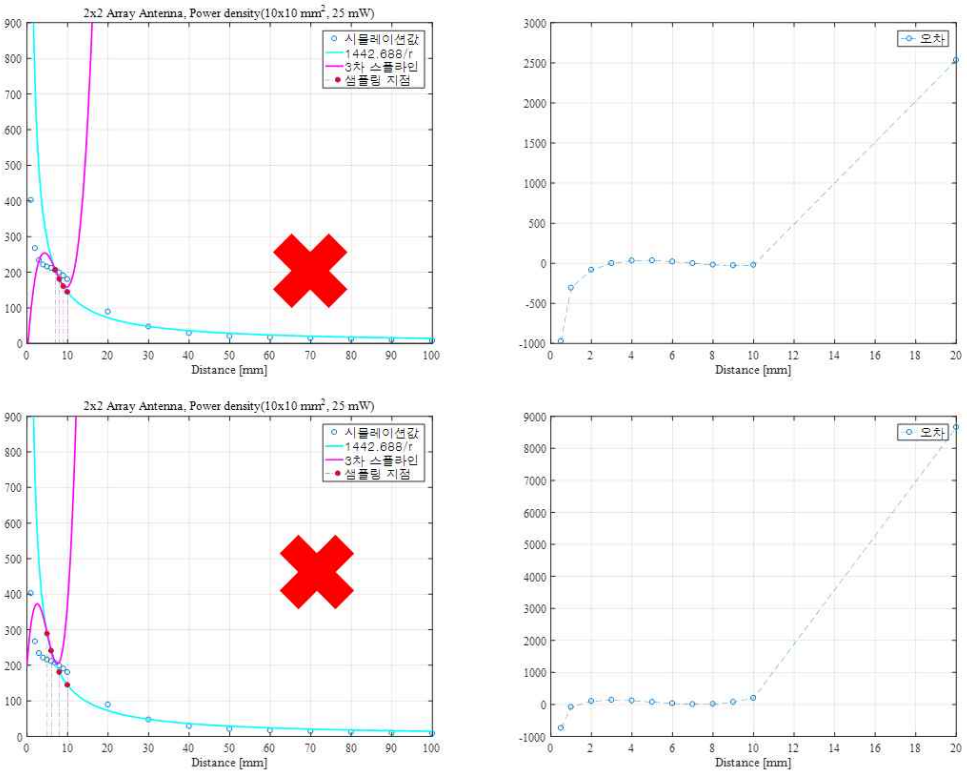


그림 2-24 쌍곡선 함수와 3차 스플라인 외삽 비교(근거리 영역 샘플)

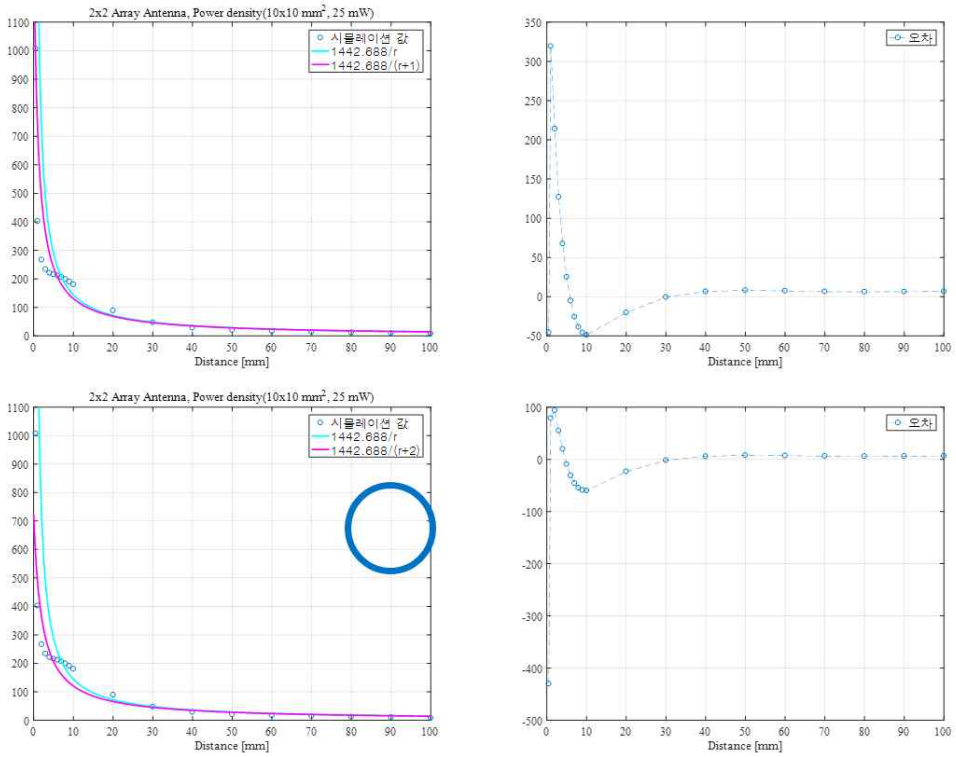


그림 2-25 쌍곡선 함수와 쌍곡선 평행이동 외삽 비교(근거리 영역 샘플)

○ 근거리 지점 샘플 데이터를 이용한 외삽함수 평가 판정

- 3차 스플라인 함수의 오차가 가장 크게 나타났으며 쌍곡선 평행이동 함수의 경우가 오차가 가장 적은 것으로 나타났다.

3. 외삽함수 평가 판정 결과

○ 고차 다항함수의 경우 근거리 영역에서 유사한 결과를 보이나, 샘플 데이터의 변화 폭에 민감하여 초과(Overshoot)가 나타날 가능성이 크다.

○ 스플라인의 경우 곡선의 기울기 변화가 크게 나타나며 근거리 영역에서 증가하는 전력밀도를 적합 시키기 어려운 것으로 나타났다.

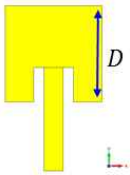
○ 쌍곡선 함수의 평행이동은 세 가지 영역에서 안정된 결과가 나타났으며 세 가지 외삽용 함수 중 오차가 가장 작은 것으로 나타났다.

제 4 절 공간 임피던스 기반 방사 영역 구분

1. 안테나 별 공간 임피던스 기반 방사 영역 판정

가. 패치 안테나 공간임피던스

○ 단일 마이크로스트립 패치안테나의 공간 상 임피던스를 추출하여 원거리 장 영역을 관찰하였다.



$D = 2.8\,mm, \quad \lambda_0 = 10.71\,mm$

$r_1 = 1.6\lambda = 17.136\,mm$

$r_2 = \frac{2D^2}{\lambda} = 1.464\,mm$

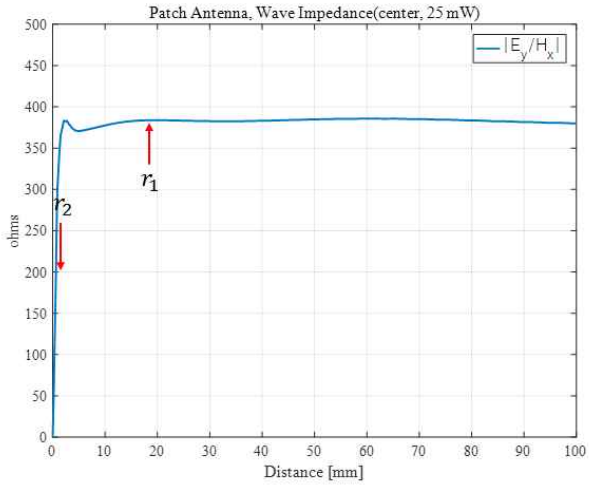
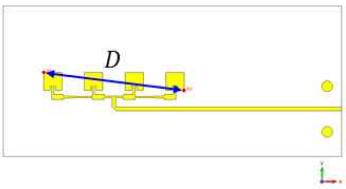


그림 2-26 단일 패치안테나의 거리별 공간임피던스

나. 1×4 패치 배열 안테나 공간임피던스

○ 1×4 마이크로스트립 패치 배열 안테나의 공간 상 임피던스를 추출하여 원거리 장 영역을 관찰하였다.



$D = 21.738491\,mm, \quad \lambda_0 = 10.71\,mm$

$r_1 = 1.6\lambda = 17.136\,mm$

$r_2 = \frac{2D^2}{\lambda} = 88.247\,mm$

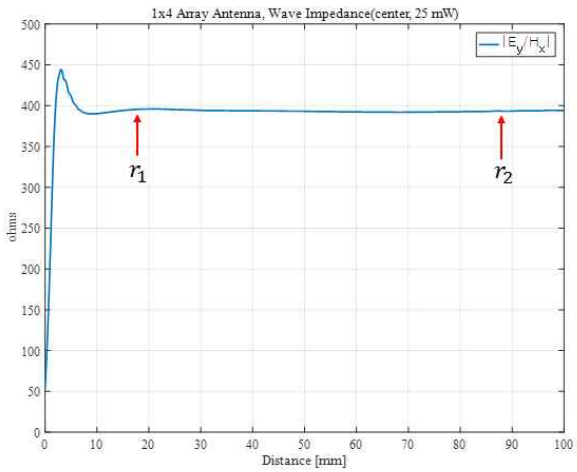
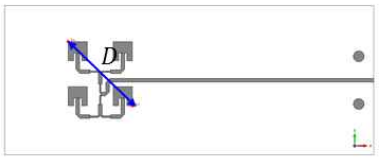


그림 2-27 1×4 패치안테나의 거리별 공간임피던스

다. 2×2 패치 배열 안테나 공간임피던스

○ 2×2 마이크로스트립 패치 배열 안테나의 공간 상 임피던스를 추출하여 원거리 장 영역을 관찰하였다.



$D = 13.293607\ mm, \quad \lambda_0 = 10.71\ mm$

$r_1 = 1.6\lambda = 17.136\ mm$

$r_2 = \frac{2D^2}{\lambda} = 33.001\ mm$

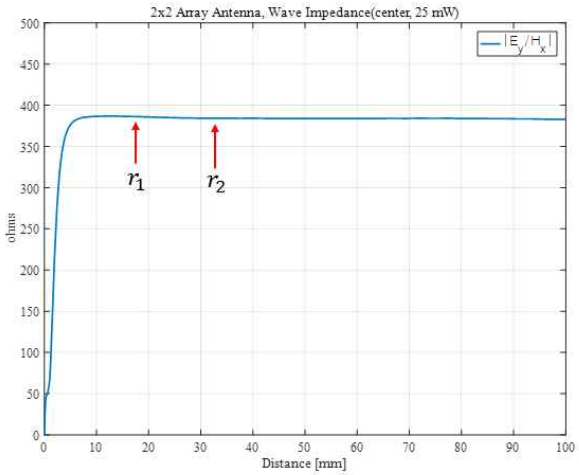
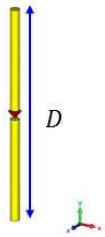


그림 2-28 2×2 패치안테나의 거리별 공간임피던스

라. 다이폴 안테나 공간임피던스

○ 다이폴 안테나의 공간 상 임피던스를 추출하여 원거리 장 영역을 관찰하였다.



$D = 4.6\ mm, \quad \lambda_0 = 10.71\ mm$

$r_1 = 1.6\lambda = 17.136\ mm$

$r_2 = \frac{2D^2}{\lambda} = 3.951\ mm$

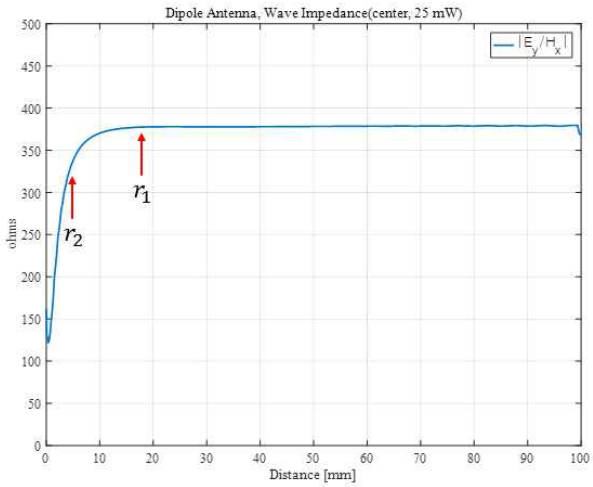


그림 2-29 다이폴 안테나의 거리별 공간임피던스

마. 혼 안테나 공간임피던스

○ 혼 안테나의 공간 상 임피던스를 추출하여 원거리 장 영역을 관찰하였다.

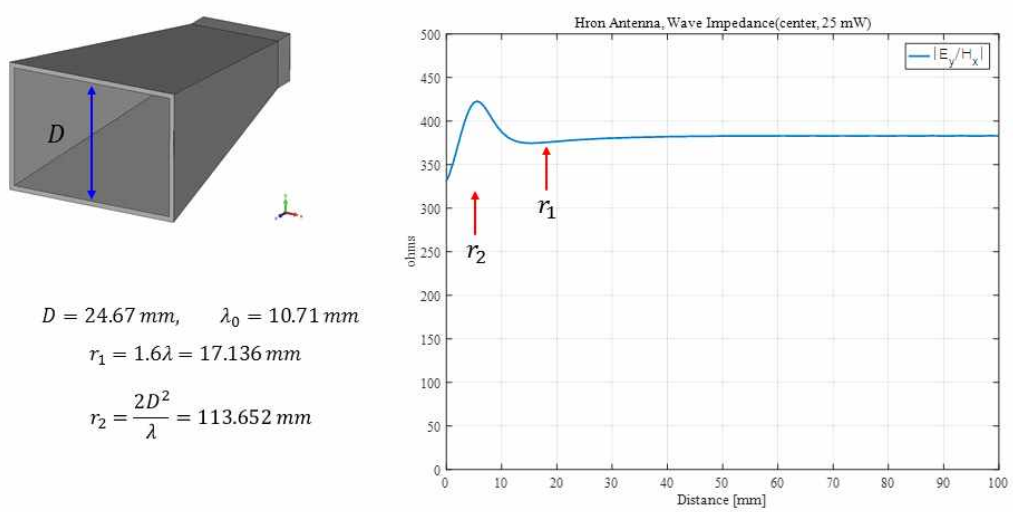


그림 2-30 혼 안테나의 거리별 공간임피던스

바. 공간임피던스 추출 결과

○ 안테나별 공간임피던스가 120π로 되는 지점은 안테나에 따라 다르고 널리 알려져 있는 식에 그대로 적용할 경우 원거리장 경계가 불분명할 수 있다.

○ 마이크로스트립 패치 배열 안테나의 면적 값 D의 기준에 따라 원거리장 경계가 달라질 수 있다.

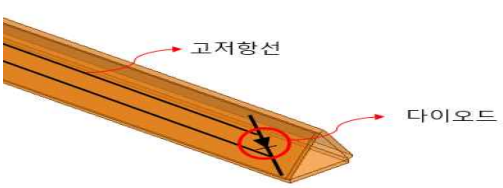
제 3 장 근거리장 전자파 측정 기술

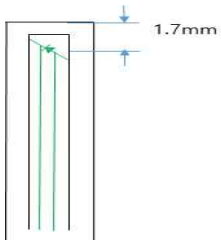
2019년 3월에 상용화를 준비하고 있는 5G 이동통신기술은 3.5 GHz와 28 GHz 대역을 사용한다. IEC와 IEEE에서는 휴대전화로부터 발생하는 전자파에 의한 인체 영향 평가에 대하여 주파수가 0.3 ~ 6 GHz에서는 전자파흡수율(SAR), 주파수가 6 GHz 이상에서는 전력밀도로 평가하도록 하고 있다. 6 GHz 이하에서의 SAR 평가 방법은 국내외의 표준에 명시되어 있지만 6 GHz 이상에서의 전력밀도 평가방법은 정의되어 있지 않아 IEC TC106에서 국제 표준을 만들기 위한 WG(Working Group)을 결성하였으며 현재는 IEC TR 63170이 나와 있다. 따라서 6 GHz 이상에서의 전력밀도 평가방법의 일환으로 28 GHz 대역에서의 전력밀도 측정을 위한 측정 방법을 연구하였다.

제 1 절 3 GHz, 28 GHz 주파수 대역의 프로브 설계 및 제작

1. 3축 프로브 제작

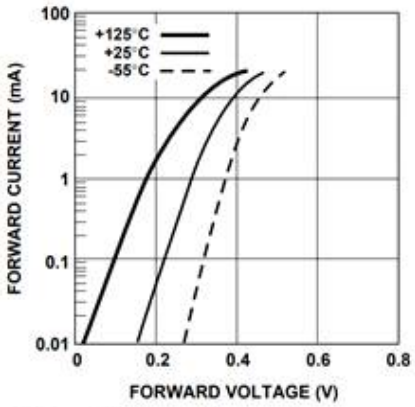
6 GHz 이하에서의 전자파흡수율 측정에서는 그림 3-1과 같이 다이오드 검파 방식의 3축 전기장 프로브를 사용하고 있다. 3.5 GHz 전기장 프로브와 28 GHz 전기장 프로브의 차이점은 그림 3-2과 그림 3-3에 나타낸 것과 같이 검파 다이오드의 특성에 차이가 있다. 그림 3-2에 보이는 바와 같이 3.5 GHz 전기장 프로브는 다이오프 검파 특성이 26 GHz까지 지원하고 있고, 28 GHz 전기장 프로브의 다이오드는 그림 3-3과 같이 40 GHz까지 검파 특성을 지원한다. 따라서 3.5 GHz 전기장 프로브와 28 GHz 전기장 프로브를 제작하여 28 GHz에서 프로브 특성을 측정하였다. 그림 3-4(a)는 제작된 3.5 GHz전기장 프로브를 그림 3-4(b)는 제작된 28 GHz 전기장 프로브 모습이다.





(a) 3축 프로브 모습 (b) 프로브 단면 모습

그림 3-1 전기장 프로브



(a) 어드미턴스 특성 (b) 순방향 특성

그림 3-2 3.5 GHz 전기장 프로브에 사용된 다이오드 특성

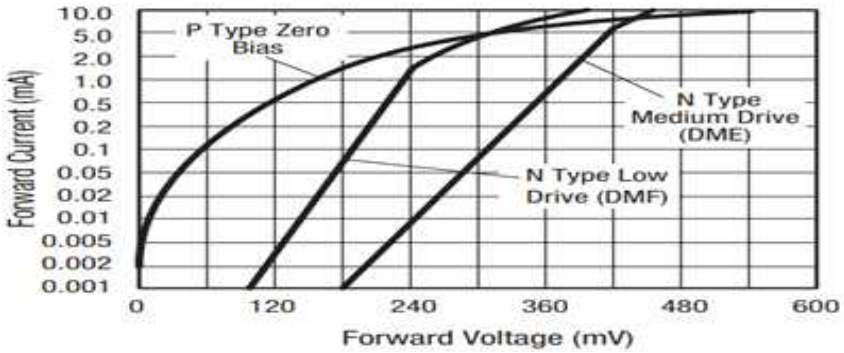


그림 3-3. 28 GHz 전기장 프로브에 사용된 다이오드의 순방향 특성

(a)제작된 3.5 GHz 3축 전기장 프로브

(b) 제작된 28 GHz 3축 전기장 프로브

그림 3-4 3축 전기장 프로브

2. 단축 프로브 제작

28 GHz 전기장 프로브에 대하여 그림 3-5와 같이 단축 프로브를 설계하였다. 28 GHz용 단축 프로브는 기존 3축 프로브의 프로브 팁보다 지름(3.2 mm)이 0.4 mm 작은 2.8 mm 이다. 그림 3-6은 제작된 단축 프로브의 모습이다.

그림 3-5 28 GHz 단축 전기장 프로브 설계도

그림 3-6 제작된 28 GHz 단축 전기장 프로브

제 2 절 3.5 GHz와 28 GHz 프로브 교정

1. 3축 프로브 교정

6 GHz 이하의 SAR 측정용 3축 프로브의 교정은 그림 3-7와 같이 54.7 도 기울어진 도파관에 프로브를 삽입하고 프로브를 360도 회전하며 전기장 측정을 통해 이루어진다. 이 때, 도파관 內의 전력밀도는 10 mW가 되도록 한

다.

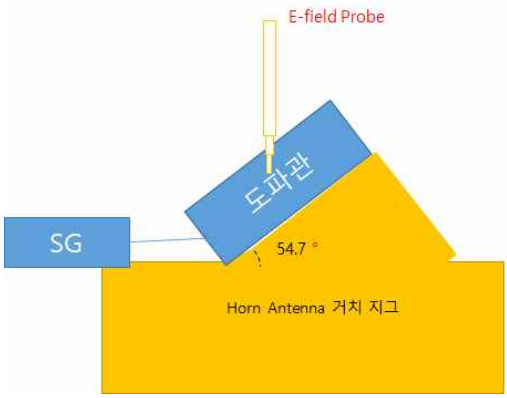


그림 3-7. 6 GHz 이하 SAR 프로브 교정

28 GHz 주파수에서 3.5 GHz와 28 GHz 3축 프로브에 대한 교정을 그림 3-7과 같이 도파관을 이용할 경우 28 GHz에 대한 도파관이 매우 작아지기 때문에 도파관에 프로브를 삽입하기 어렵다. 따라서 그림 3-8과 같이 도파관 대신 54.7도 기울어진 혼안테나를 이용하여 교정을 진행하였다. 그림 3-9는 3축 28 GHz에 대한 프로브 교정을 하는 모습이다.

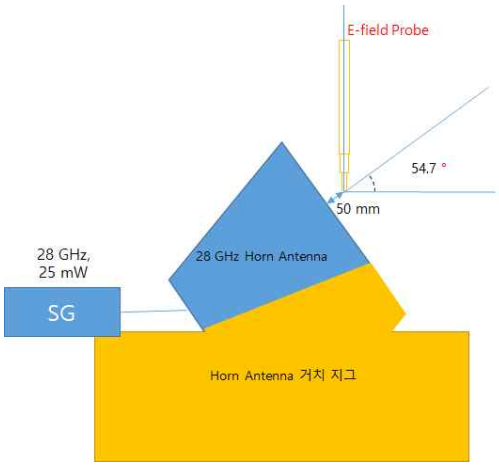
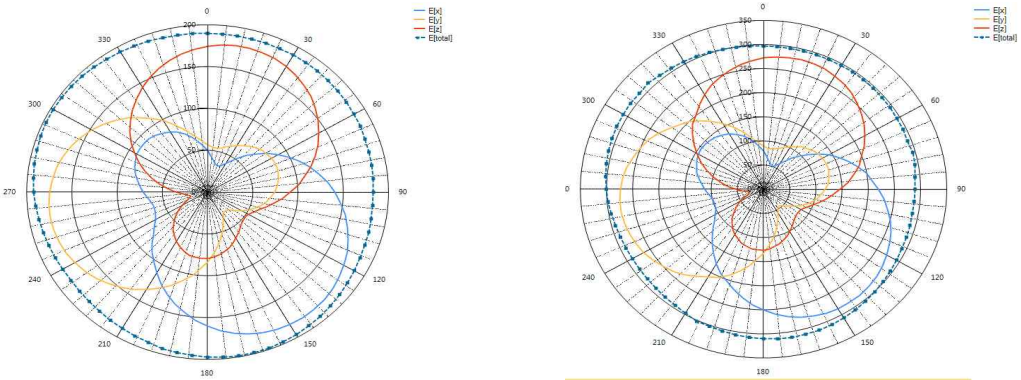


그림 3-8. 3.5 GHz와 28 GHz 3축 전기장 프로브에 대한 28 GHz에서의 교정

그림 3-9. 28 GHz 3축 전기장 프로브 교정 모습

그림 3-10은 3.5 GHz와 28 GHz 3축 전기장 프로브에 대한 교정 결과를 나타낸 것이다. 그림 3-10(a)의 3.5 GHz 전기장 프로브의 28 GHz에서의 등방성 편차는 7.6 %의 값을 갖는다. 그리고 그림 3-10(b)의 28 GHz 3축 전기장 프로브의 등방성 편차는 약 7.4 %이다. 따라서 3.5 GHz 3축 전기장 프로브 보다 28 GHz 3축 전기장 프로브가 특성이 더 좋은 것을 확인하였다.



(a) 3.5 GHz 3축 프로브 등방성 특성 (b) 28 GHz 3축 프로브 등방성 특성

그림 3-10. 3축 프로브 등방성 및 교정 결과

2. 단축 프로브 교정

단축 프로브에 대한 교정은 그림 3-11과 같이 지면으로부터 수직으로 세워진 혼 안테나 위에 프로브를 360° 돌려가며 교정 작업을 진행하였다. 이때 프로브가 도는 시작점이 0°와 90°인 경우에서의 360° 전기장을 합성하여 프로브의 등방성을 확인하였다. 그림 3-12는 단축 프로브의 등방성을 측정하는 사진이고, 그림 3-13은 단축프로브이 등방성을 나타낸 것이다. 그림 3-13

을 통해 단축 프로브의 등방성의 편차가 5.8 %이내의 값을 갖는 것을 확인하였다.

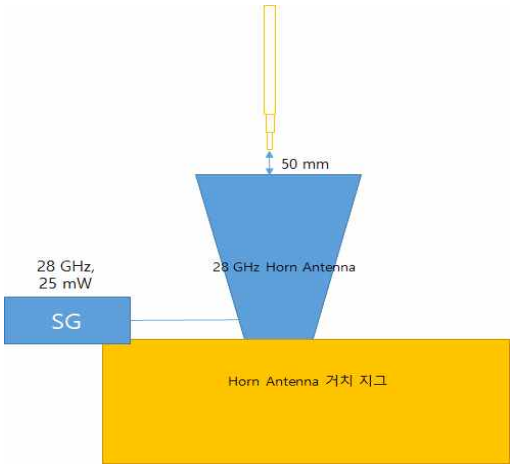


그림 3-11. 28 GHz 단축 프로브의 교정

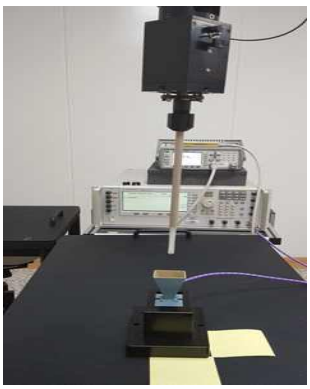


그림 3-12. 28 GHz 단축 프로브 교정 모습

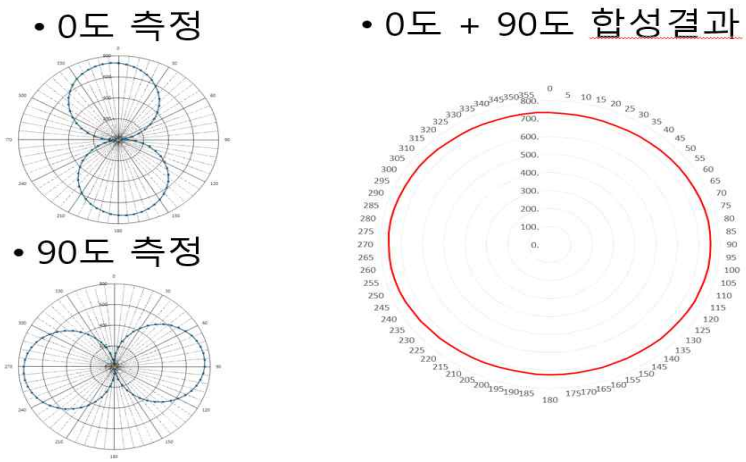


그림 3-13. 28 GHz 단축 프로브 등방성 및 교정 결과

제 3 절 5G 휴대전화의 근거리장 전자파 총노출량 산출방법 연구

5G 통신의 상용화에 따라서 4G 통신과 5G 통신이 동시에 사용되는 환경이 조성되게 된다. 이때 4G 통신은 6 GHz 이하의 주파수를 사용하고, 5G 주파수는 6 GHz 이상의 주파수를 사용한다. 따라서 4G와 5G의 전자파 인체 노출 평가 물리량이 달라진다. 따라서 이에 대한 총노출량 산출 방법이 필요하다. ICNIRP 1998에서는 다중 주파수에 의한 열적 효과(100 kHz 이상)의 노출량 평가는 노출 지수를 이용하여 아래식과 같이 정의하고 있다.

$$\sum_{i=100kHz}^{10GHz} \frac{SAR_i}{SAR_L} + \sum_{i=10GHz}^{300GHz} \frac{S_i}{S_L} \leq 1$$

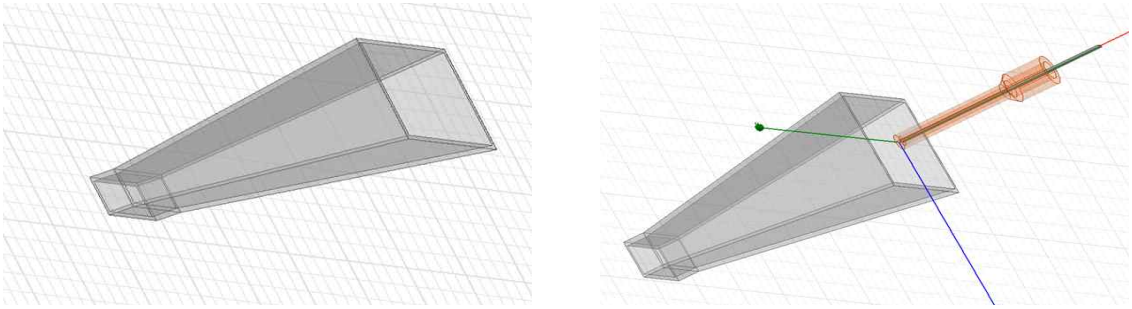
여기서

- SAR_i : 주파수 i에서의 SAR
- SAR_L : SAR 제한치
- S_i : 주파수 i에서의 전력밀도
- S_L : 주파수 i에서의 전력밀도 제한치

이다.

제 4 절 프로브 팁에 의한 필드 영향 분석

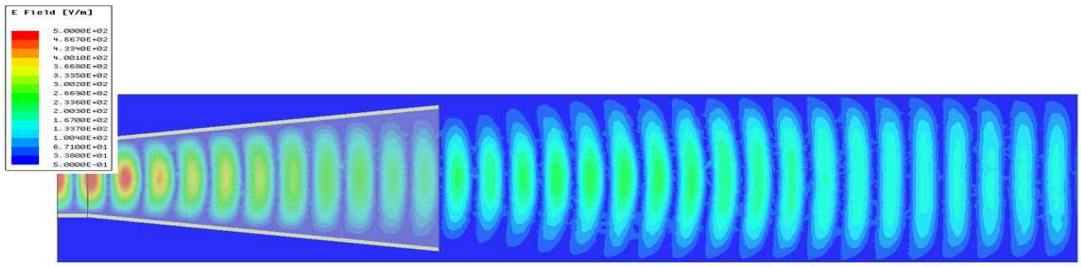
다이오드를 이용한 검파형 프로브를 보호하기 위하여 프로브 팁을 사용한다. 하지만 28 GHz의 파장은 10.7 mm로 매우 짧아 프로브의 팁과 안테나 기판에 의한 필드 왜곡현상이 있을 수 있다. 이에 대하여 수치해석을 통하여 왜곡현상을 분석하였다. 프로브 팁의 재질은 Rexolite 1422를 사용하고 있으며, Rexolite 1422의 Loss Tangent는 0.0005이고, 상대유전율은 2.54(@ 1 MHz ~ 500 GHz)이다. 그리고 안테나 기판는 Alumina 96pct를 사용하고 있으며, Loss Tangent는 0.006이고 상대유전율은 9.4이다. 이를 바탕으로 그림 3-14와 같이 혼 안테나 개구면에 프로브 팁과 안테나 을 위치시키고 프로브 팁과 안테나 기판의 유무에 따른 전기장 왜곡현상을 수치해석 하였다.



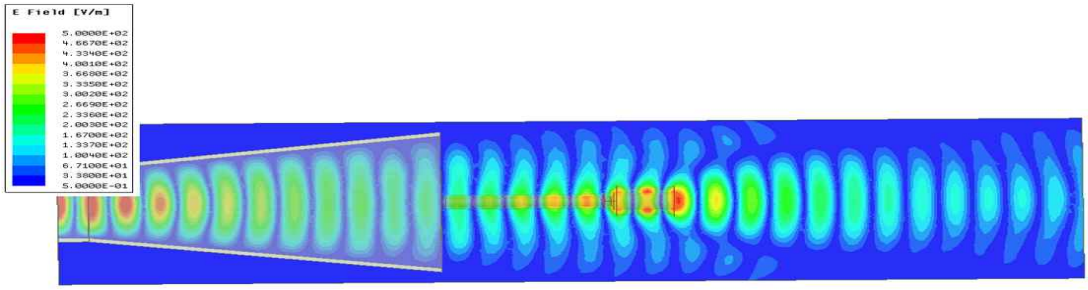
(a) 프로브 팁이 없는 경우 (b) 프로브 팁이 있는 경우

그림 3-14 프로브 팁의 전기장 왜곡현상 수치해석 모델

그림 3-15(a)는 프로브 팁이 없는 경우에 혼 안테나의 전기장 분포를 수치해석한 것이고 그림 3-15(b)는 프로브 팁이 있는 경우에 혼 안테나의 전기장 분포를 수치 해석한 결과이다. 그림 3-15에서 확인할 수 있듯이 프로브 팁의 유무에 따라서 전기장 왜곡이 발생하는 것을 확인하였다. 전기장 왜곡이 실제로 측정 안테나에서 얼마나 왜곡이 일어나는지 그림 3-16에 전기장 분포를 확대하여 비교하였다. 그림 3-16에서 보이는 바와 같이 프로프 팁에 의한 전기장이 프로브 팁이 없는 경우의 전기장보다 0.4 mm 앞으로 당겨지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 실제 측정에서 혼 안테나와 프로브 팁사이의 거리가 1 mm 거리의 필드를 측정하면 실제로는 1.4 mm 거리의 값을 측정하게 되는 것이다. 이는 근거리장 측정에서 무시할 수 없는 거리이므로 프로브 팁을 적용한 전기장 측정시 이에 대한 보정이 필요하다.

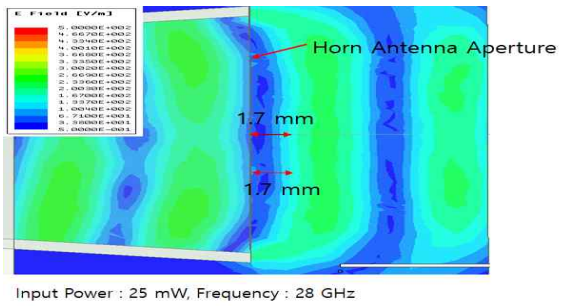


(a)프로브 팁이 없는 경우

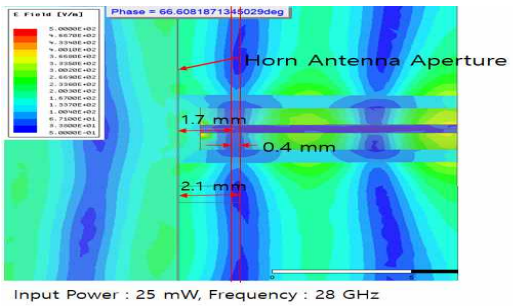


(b) 프로브 팁이 있는 경우

그림 3-15 프로브 팁에 따른 혼 안테나의 전기장 분포



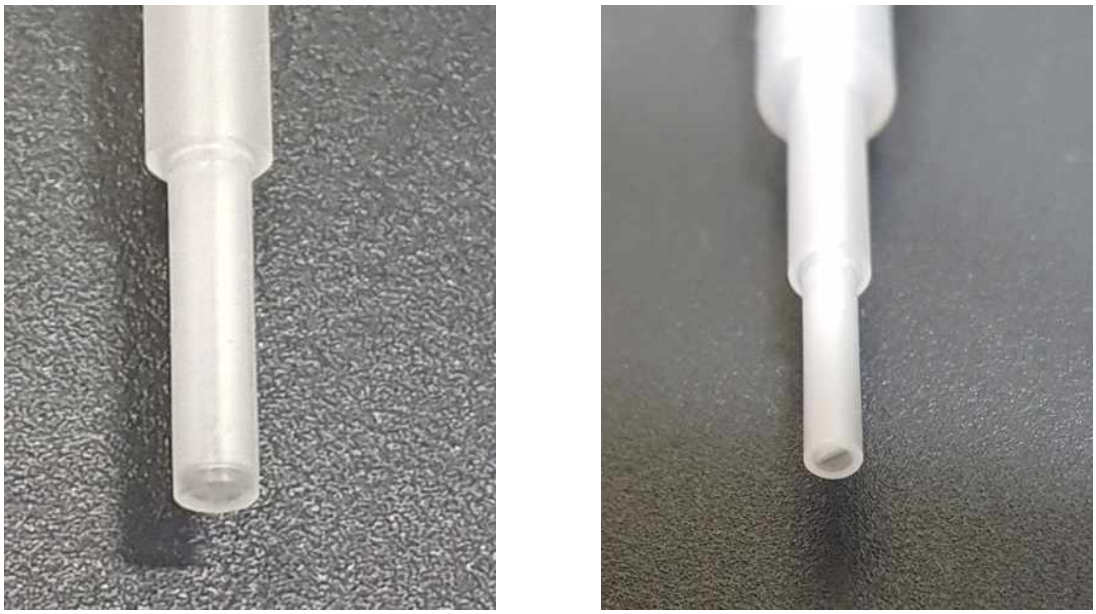
(a) 프로브 팁이 없을 경우



(b) 프로브 팁이 있을 경우

그림 3-16 프로브 팁에 의한 전기장 왜곡현상 분석

그림 3-17은 프로브 팁에 의한 필드의 왜곡 현상을 제거하기 위하여 프로브 끝 부분을 제거한 모습이다.



(a) 프로브 팁 제거 전 (b) 프로브 팁 제거 후

그림 3-17. 프로브 팁 제거 전후 모습

제 5 절 28 GHz 전력밀도 측정

1. 근거리 전력밀도 측정 면적

IEEE와 ICNIRP에서 28 GHz 대역의 전자파 인체영향 평가는 전력밀도로 하도록 하고 있다. 그림 3-18은 IEC 63170에서 제안하는 1 gram, 10 gram SAR 체적과 전력밀도 면적을 나타낸 것이다.

본 과제에서 IEC 63170에서 제안하는 2 x 2 cm^2와 1 x 1 cm^2에 대한 전력밀도를 측정하고 분석하였다.

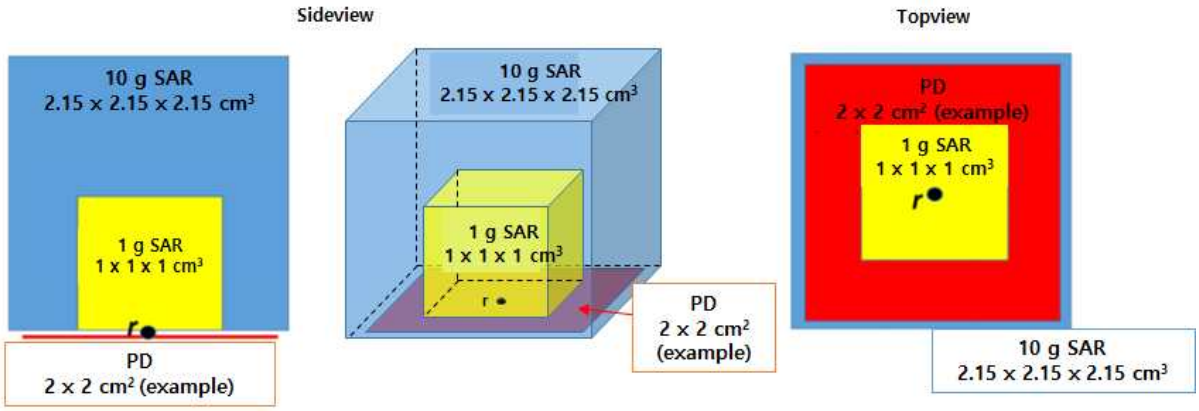


그림 3-18. IEC 63170의 전자파흡수율 측정 체적 및 전력밀도 측정 면적

2. 외삽법에 의한 전력밀도 계산

28 GHz는 mmWave로 파장이 짧아서 근거리장 영역에서 전기장 측정이 어렵다. 따라서 원거리장에서 측정된 전기장 값으로 전력밀도를 환산한 후에 외삽법에 의한 전력밀도 계산하는 방법에 대하여 검토하였다. IEC 62209-1,2에서는 4차 다항식에 의한 외삽법 권장하고 있으며, 일반적으로 Cubic Spline 방식도 사용한다. 아래는 4차 다항식 외삽법과 Cubic Spline 대하여 정리한 것이다.

가. 4차 다항식 외삽법

4차 다항식의 일반식은 (1)과 같다.

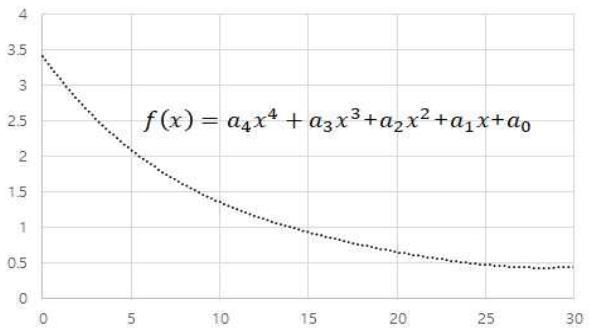


그림 3-19. 4차 다항식f(x)의 일반식과 그래프

$$f(x) = a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 \quad (1)$$

이때, a4, a3, a2, a1, a0는 미지수(unknown)이다. 추정하고자 하는 함수 f(x)를 구하기 위해 x값과 그에 대한 f(x)값을 다음과 같이 표현할 수 있다.

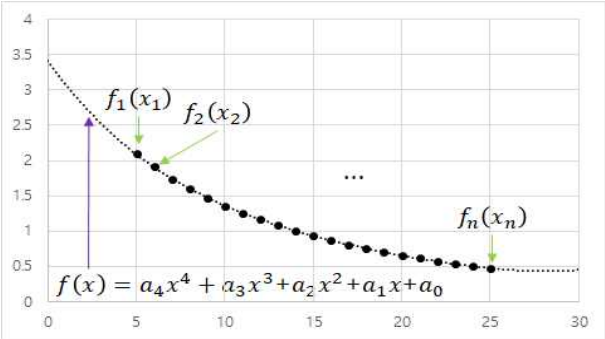


그림 3-20. f(x) 그래프 선상에서 x_1부터 x_n지점들의 f(x)값

$$\begin{aligned} f_1(x_1) &= a_4x_1^4 + a_3x_1^3 + a_2x_1^2 + a_1x_1 + a_0 \\ f_2(x_2) &= a_4x_2^4 + a_3x_2^3 + a_2x_2^2 + a_1x_2 + a_0 \\ &\vdots \\ f_n(x_n) &= a_4x_n^4 + a_3x_n^3 + a_2x_n^2 + a_1x_n + a_0 \end{aligned} \tag{2}$$

g(x)가 x에 대해 가지고 있는 데이터라고 하면 f(x)와 g(x)의 차이를 다음과 같이 표현할 수 있다.

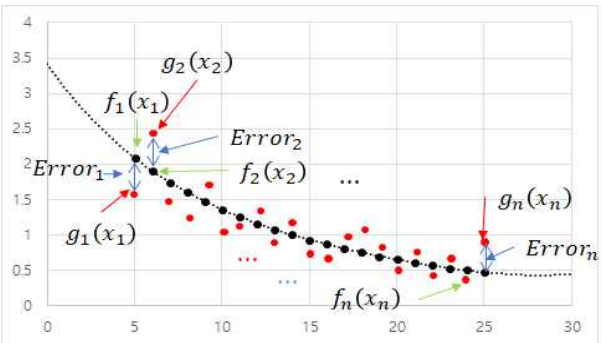


그림 3-21. f(x) 그래프와 g(x)의 비교에 따른 Error

$$\begin{aligned} (Error_1)^2 &= [f_1(x_1) - g_1(x_1)]^2 \\ (Error_2)^2 &= [f_2(x_2) - g_2(x_2)]^2 \\ &\vdots \\ (Error_n)^2 &= [f_n(x_n) - g_n(x_n)]^2 \end{aligned} \tag{3}$$

Square error를 모두 더하고 이를 a_4, a_3, a_2, a_1, a_0에 대해 편미분한 값이 0이 되면 least-square error가 된다.

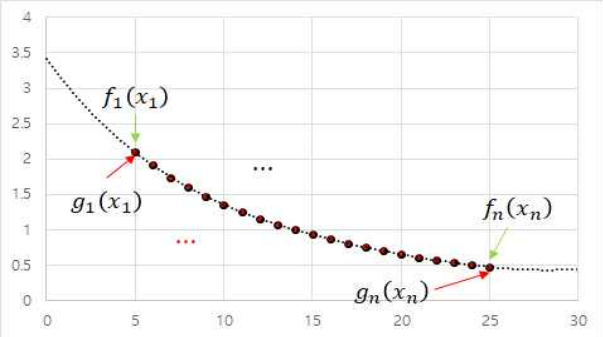


그림 3-22. Square Error를 a_4, a_3, a_2, a_1, a_0로 편미분한 값이 0인 경우의 그래프

$$\frac{\partial\left[\sum_{i=1}^{n}(Error_i)^2\right]}{\partial a_4}=\frac{\partial\left[\sum_{i=1}^{n}(Error_i)^2\right]}{\partial a_3}=\frac{\partial\left[\sum_{i=1}^{n}(Error_i)^2\right]}{\partial a_2}=\frac{\partial\left[\sum_{i=1}^{n}(Error_i)^2\right]}{\partial a_1}=\frac{\partial\left[\sum_{i=1}^{n}(Error_i)^2\right]}{\partial a_0}=0 \tag{4}$$

식 (4)을 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial\left[\sum_{i=1}^{n}(Error_i)^2\right]}{\partial a_4}&=2\sum_{i=1}^{n}[f_n(x_n)-g_n(x_n)]x_n^4=0\\
\frac{\partial\left[\sum_{i=1}^{n}(Error_i)^2\right]}{\partial a_3}&=2\sum_{i=1}^{n}[f_n(x_n)-g_n(x_n)]x_n^3=0\\
&\vdots\\
\frac{\partial\left[\sum_{i=1}^{n}(Error_i)^2\right]}{\partial a_0}&=2\sum_{i=1}^{n}[f_n(x_n)-g_n(x_n)]x_n^0=0
\end{aligned} \tag{5}$$

식 (5)를 식(6)으로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^{n}x_n^4f_n(x_n)&=\sum_{i=1}^{n}x_n^4g_n(x_n)\\
\sum_{i=1}^{n}x_n^3f_n(x_n)&=\sum_{i=1}^{n}x_n^3g_n(x_n)\\
&\vdots\\
\sum_{i=1}^{n}f_n(x_n)&=\sum_{i=1}^{n}g_n(x_n)
\end{aligned} \tag{6}$$

식 (6)을 행렬로 나타내면 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} x_i^8 & \sum_{i=1}^{n} x_i^7 & \cdots & \sum_{i=1}^{n} x_i^4 \\ \sum_{i=1}^{n} x_i^7 & \sum_{i=1}^{n} x_i^6 & \cdots & \sum_{i=1}^{n} x_i^3 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^{n} x_i^4 & \sum_{i=1}^{n} x_i^3 & \cdots & \sum_{i=1}^{n} x_i^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_4 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} x_n^4 g_n(x_n) \\ \sum_{i=1}^{n} x_n^3 g_n(x_n) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{n} g_n(x_n) \end{bmatrix} \tag{7}$$

식 (7)에서 $\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} x_i^8 & \sum_{i=1}^{n} x_i^7 & \cdots & \sum_{i=1}^{n} x_i^4 \\ \sum_{i=1}^{n} x_i^7 & \sum_{i=1}^{n} x_i^6 & \cdots & \sum_{i=1}^{n} x_i^3 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^{n} x_i^4 & \sum_{i=1}^{n} x_i^3 & \cdots & \sum_{i=1}^{n} x_i^0 \end{bmatrix} = [\sum x]$, $\begin{bmatrix} a_4 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_0 \end{bmatrix} = [a]$, $\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} x_n^4 g_n(x_n) \\ \sum_{i=1}^{n} x_n^3 g_n(x_n) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{n} g_n(x_n) \end{bmatrix} = [xg]$로 바꿔 표현하면 다음과 같다.

$$[\sum x][a] = [xg] \tag{8}$$

식 (8)에서 a행렬을 구하면 4th order polynomial function을 구할 수 있으므로 a를 구할 수 있게 식을 아래와 같이 전개한다.

$$[\sum x][a] = [xg]$$

$$[\sum x]^T[\sum x][a] = [\sum x]^T[xg] \tag{9}$$

$$[a] = ([\sum x]^T[\sum x])^{-1}[\sum x]^T[xg] \tag{10}$$

식 (9), (10)에서 $[\sum x]^T$의 T는 전치(轉置)행렬로 행과 열을 바꾸는 것을 의미한다.

식 (10)을 통해 구한 a행렬 內를 a_4, a_3, a_2, a_1, a_0를 수식 (1)에 대입하여 f(x)를 구한다. f(x)에 x값을 넣어 추정 값 f(x)를 얻을 수 있다.

※참고 : 위의 단계를 거쳐서 구한 f(x)에 보유한 측정 데이터의 x축 범위 外의 x값을 넣어 데이터를 얻는 것을 외삽법(extrapolation)이고 보유한 측정 데이터의 x축 범위 內 의 x값을 넣어 데이터를 얻는 것이 내삽법(interpolation)이다. 주의할 점은 내삽법으로 얻은 데이터보다 외삽법의 값으

로 얻은 데이터의 오차율이 크기 때문에 이를 인지하며 사용해야 한다.

3. Cubic Spline

Cubic spline은 데이터를 가진 지점 사이의 데이터를 찾기 위한 보간법으로 3차 다항식을 사용한다. 그리고 이 3차 다항식 cubic spline함수를 $[x_1,x_n]$의 구간에서 S(x)라고 했을 때, S(x), S′(x), S″(x)은 구간 [a,b]에서 연속이라는 전제 조건을 가진다. 식 (11)은 S(x)의 정의로 S(x)는 각 구간 $s_i(x_i)$ 다항식 (i = 1, 2, …, n-1)의 연속성을 지니고 있다.

$$S(x)=\begin{cases} s_1(x) & \text{if} \quad x_1 \le x < x_2 \\ s_2(x) & \text{if} \quad x_2 \le x < x_3 \\ \vdots & \\ s_{n-1}(x) & \text{if} \quad x_{n-1} \le x < x_n \end{cases} \tag{11}$$

구간 $[x_i, x_i+1]$에서 $s_i(x)$의 일반식은 다음과 같다.

$$s_i(x) = a_i(x-x_i)^3 + b_i(x-x_i)^2 + c_i(x-x_i) + d_i \tag{12}$$

이 때, i의 범위는 1 부터 n-1 까지 이다. 이를 그림 3-23에 나타내었다.

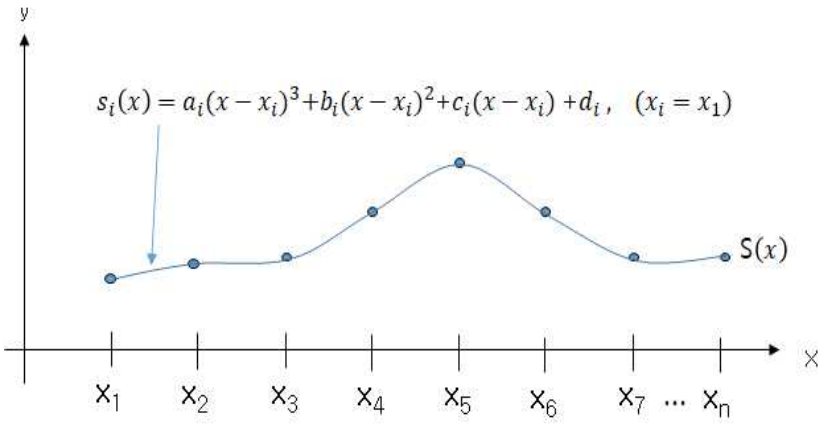


그림 3-23. S(x)와 $s_i(x)$ 그래프

$s_i(x)$의 도함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s_i'(x) = 3a_i(x-x_i)^2 + 2b_i(x-x_i) + c_i \tag{13}$$

$$s_i''(x) = 6a_i(x - x_i) + 2b_i \tag{14}$$

이 때, $s_i(x_i)$의 i 범위를 적용해야 하므로 i의 범위는 1 부터 n-1 이다.

i가 1부터 n인 경우의 (xi, yi)를 S(x)에 대입하면 다음과 같다.

$$S(x_i) = y_i \tag{15}$$

이때, x_i는 $[x_i, x_i+1]$에 포함되므로 $S(x_i)=S_i(x_i)$로 표현할 수 있다. 이를 식 (15)에 적용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_i = s_i(x_i) \tag{16}$$

$$y_i = d_i$$

이때, i의 범위는 1부터 n-1이다.

'S(x)는 연속이다' 전제를 이용하면 식 (17)과 같이 표현이 가능하다. 이를 그림 3-24에 나타내었다.

$$s_i(x_i) = s_{i-1}(x_i) \tag{17}$$

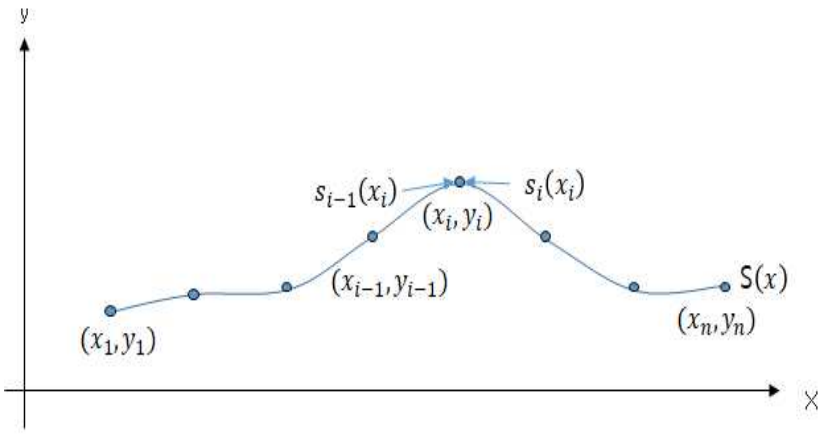


그림 3-24. $S_i(x_i)=S_{i-1}(x_i)$ 그래프

이때, $s_i(x)$가 $s_1(x)$부터 $s_{n-1}(x)$까지 정의했기 때문에 i의 범위는 2부터 n까지이다. 이 성질을 이용하여 식 (12)로부터 d_i를 구할 수 있다.

$$s_i(x_i) = a_i(x_i - x_i)^3 + b_i(x_i - x_i)^2 + c_i(x_i - x_i) + d_i$$
$$s_i(x_i) = d_i \tag{18}$$

그리고 식 (17)을 이용하여 d_i를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s_{i-1}(x_i) = a_{i-1}(x_i - x_{i-1})^3 + b_{i-1}(x_i - x_{i-1})^2 + c_{i-1}(x_i - x_{i-1}) + d_{i-1}$$
$$d_i = a_{i-1}(x_i - x_{i-1})^3 + b_{i-1}(x_i - x_{i-1})^2 + c_{i-1}(x_i - x_{i-1}) + d_{i-1} \tag{19}$$

이때, i의 범위는 2부터 n-1이다. 식 (19)의 $x_i - x_{i-1}$를 h_{i-1}로 표현하면 d_i는 다음과 같다.

$$d_i = a_{i-1}h_{i-1}^3 + b_{i-1}h_{i-1}^2 + c_{i-1}h_{i-1} + d_{i-1} \tag{20}$$

이때, i의 범위는 2부터 n-1이다.

S′(x)가 연속이라는 전제조건으로 식 (21)을 나타낼 수 있다. 이를 그림 3-25에 표현하였다.

$$s'_i(x_i) = s'_{i-1}(x_i) \tag{21}$$

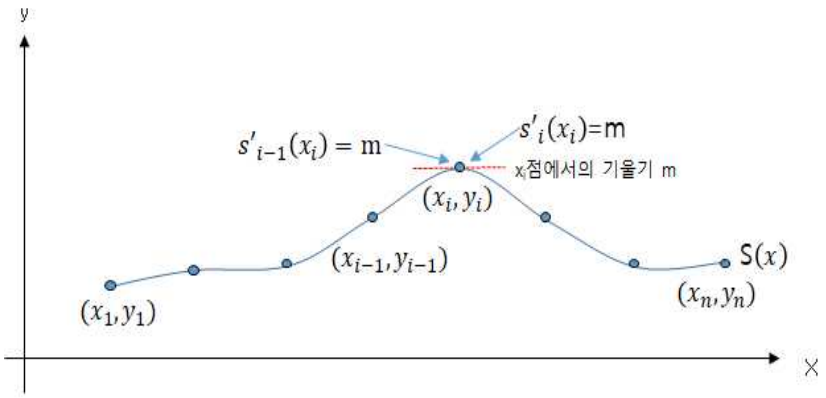


그림 3-25. $s'_i(x_i) = s'_{i-1}(x_i)$ 그래프

식 (13)에 식 (21) 성질을 이용하면 다음과 같다.

$$s'_i(x_i) = 3a_i(x_i - x_i)^2 + 2b_i(x_i - x_i) + c_i$$
$$s'_i(x_i) = c_i \tag{22}$$

그리고

$$s'_{i-1}(x_i) = 3a_{i-1}(x_i - x_{i-1})^2 + 2b_{i-1}(x_i - x_{i-1}) + c_{i-1}$$
$$c_i = 3a_{i-1}(x_i - x_{i-1})^2 + 2b_{i-1}(x_i - x_{i-1}) + c_{i-1}$$
$$c_i = 3a_{i-1}h_{i-1}^2 + 2b_{i-1}h_{i-1} + c_{i-1} \tag{23}$$

이때 x를 x_1부터 x_n까지, 그리고 $s_i(x)$가 $s_1(x)$부터 $s_{n-1}(x)$까지 정의했기 때문에 i의 범위는 2부터 n-1이다.

식 (14)에 x_i를 대입하여 다음 식을 얻을 수 있다.

$$s''_i(x_i) = 6a_i(x_i - x_i) + 2b_i$$
$$s''_i(x_i) = 2b_i \tag{24}$$

이때, i의 범위는 2부터 n-2까지 이다. 그 이유는 식 (22)에서 적용되는 i의 범위 때문이다.

마지막으로 $s''_i(x)$가 연속이라는 조건 '$s''_i(x)=s''_{i+1}(x_i)$'를 이용하여 식 (25)와 식 (26)을 나타낼 수 있다.

$$s''_i(x_{i+1}) = 6a_i(x_{i+1} - x_i) + 2b_i \tag{25}$$
$$s''_{i+1}(x_{i+1}) = 6a_i(x_{i+1} - x_i) + 2b_i \tag{26}$$

$x_{i+1} - x_i$를 h_i라고 하면 식 (24)과 식 (26)식에 의해 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$2b_{i+1} = 6a_ih_i + 2b_i \tag{27}$$

이 식들을 간략하게 표현하기 위해서 $s''_i(x_i)$를 M_i로 정리하면 다음과 같다.

$$s''_i(x_i) = 2b_i$$
$$M_i = 2b_i$$
$$b_i = \frac{M_i}{2} \tag{29}$$

식(16)을 통해 d_i는 y_i로 표현했기 때문에,

$$y_i = d_i$$

이다.
식 (27)에 식 (29)의 M_i와 M_{i+1}을 대입하면 a_i를 얻을 수 있다.

$$2b_{i+1} = 6a_ih_i + 2b_i$$
$$6a_ih_i = 2b_{i+1} - 2b_i$$

$$a_i = \frac{2b_{i+1} - 2b_i}{6h_i}$$
$$a_i = \frac{2(\frac{M_{i+1}}{2}) - 2(\frac{M_i}{2})}{6h_i}$$
$$a_i = \frac{M_{i+1} - M_i}{6h_i} \tag{30}$$

c_i는 식 (20)을 통해 구할 수 있다.

$$d_{i+1} = a_ih_i^3 + b_ih_i^2 + c_ih_i + d_i$$
$$c_ih_i = -a_ih_i^3 - b_ih_i^2 - d_i + d_{i+1}$$
$$c_i = \frac{-a_ih_i^3 - b_ih_i^2 - d_i + d_{i+1}}{h_i}$$
$$c_i = \frac{-a_ih_i^3 - b_ih_i^2}{h_i} + \frac{-d_i + d_{i+1}}{h_i}$$
$$c_i = (-a_ih_i^2 - b_ih_i) - \frac{d_i - d_{i+1}}{h_i}$$

$$c_i = -(\frac{M_{i+1}-M_i}{6h_i}h_i^2 + \frac{M_i}{2}h_i) - \frac{y_i - y_{i+1}}{h_i}$$

$$c_i = \frac{y_{i+1}-y_i}{h_i} - (\frac{M_{i+1}-M_i}{6h_i}h_i^2 + \frac{3M_i}{6}h_i)$$

$$c_i = \frac{y_{i+1}-y_i}{h_i} - (\frac{M_{i+1}+2M_i}{6})h_i \qquad (31)$$

a_i, b_i, c_i, d_i를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$a_i = \frac{M_{i+1}-M_i}{6h_i}$$

$$b_i = \frac{M_i}{2}$$

$$c_i = \frac{y_{i+1}-y_i}{h_i} - (\frac{M_{i+1}+2M_i}{6})h_i$$

$$d_i = y_i$$

이때, i의 범위는 a_i, b_i, c_i, d_i가 $s_i(x)$의 개수와 같은 값을 가져야 하므로 1부터 n-1이다.

미지수를 한 개로 만들기 위해 식 (23)을 이용하여 M_i과 y_i에 관한 식을 만들어 M_i를 구하면 일반식 $s_i(x)$을 구할 수 있다. 식 (32)은 식 (23)을 이용하여 M_i와 y_i에 관한 식으로 정리한 것이다.

$$c_{i+1} = 3a_ih_i^2 + 2b_ih_i + c_i$$

$$3(\frac{M_{i+1}-M_i}{6h_i})h_i^2 + 2(\frac{M_i}{2})h_i + \frac{y_{i+1}-y_i}{h_i} - (\frac{M_{i+1}+2M_i}{6})h_i = \frac{y_{i+2}-y_{i+1}}{h_{i+1}} - (\frac{M_{i+2}+2M_{i+1}}{6})h_{i+1}$$

$$3(\frac{M_{i+1}-M_i}{6h_i})h_i^2 + 2(\frac{M_i}{2})h_i - (\frac{M_{i+1}+2M_i}{6})h_i + (\frac{M_{i+2}+2M_{i+1}}{6})h_{i+1} = \frac{y_{i+2}-y_{i+1}}{h_{i+1}} - \frac{y_{i+1}-y_i}{h_i}$$

$$\frac{h_i}{6}M_i + (\frac{2h_i+2h_{i+1}}{6})M_{i+1} + \frac{h_{i+1}}{6}M_{i+2} = \frac{y_{i+2}-y_{i+1}}{h_{i+1}} - \frac{y_{i+1}-y_i}{h_i}$$

$$\frac{h_i}{6}M_i + (\frac{2h_i+2h_{i+1}}{6})M_{i+1} + \frac{h_{i+1}}{6}M_{i+2} = \frac{y_{i+2}-y_{i+1}}{h_{i+1}} - \frac{y_{i+1}-y_i}{h_i}$$

$$h_iM_i + 2(h_i+h_{i+1})M_{i+1} + h_{i+1}M_{i+2} = 6(\frac{y_{i+2}-y_{i+1}}{h_{i+1}} - \frac{y_{i+1}-y_i}{h_i}) \qquad (32)$$

i는 y_i의 개수가 n개 있으므로 1부터 n-2까지이다.

식 (32)에서 $2(h_i+h_{i+1})=v_i$, $6(\frac{y_{i+2}-y_{i+1}}{h_{i+1}}-\frac{y_{i+1}-y_i}{h_i})=u_i$라고 하고 i를 1부터 n-2까지 행렬로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} h_1 & v_1 & h_2 & & & \\ & h_2 & v_2 & h_3 & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & \ddots & \ddots & h_{n-2} \\ & & & & h_{n-2} & v_{n-2} & h_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \\ \vdots \\ \\ M_{n-1} \\ M_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{n-3} \\ u_{n-2} \end{bmatrix} \quad (33)$$

M_i의 계수행렬은 (n-2) × n, M_i의 행렬은 n × 1, u_i의 행렬은 (n-2) × 1 이다. M_i 계수행렬의 역행렬 계산을 편하게 위해서는 (n-2) × (n-2)여야 한다. 그래서 M_i계수 행렬을 (n-2) × (n-2)행렬로 바꾸고 M_i 행렬을 (n-2) × 1 로 바꿔야 한다. 즉, M_i 행렬에서 M_1과 M_n의 값을 임의의 값으로 변경해 줘야 한다.

4. 1x4 배열 안테나의 전력밀도 측정

그림 3-26과 같이 인천대학교에서 설계 및 제작한 28 GHz용 1x4 배열안테나에 대하여 전력밀도를 측정하였다. 그림 3-27은 전력밀도 측정시스템 구성도이고 그림 3-28은 1x4 배열안테나에 대한 측정 모습이다. 측정에 사용한 안테나 입력 파라미터는 표 3-1과 같다.

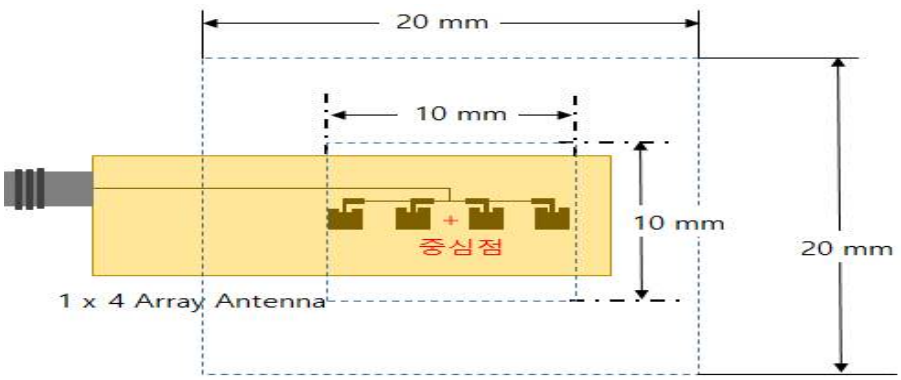


그림 3-26. 설계된 1x4 배열 안테나

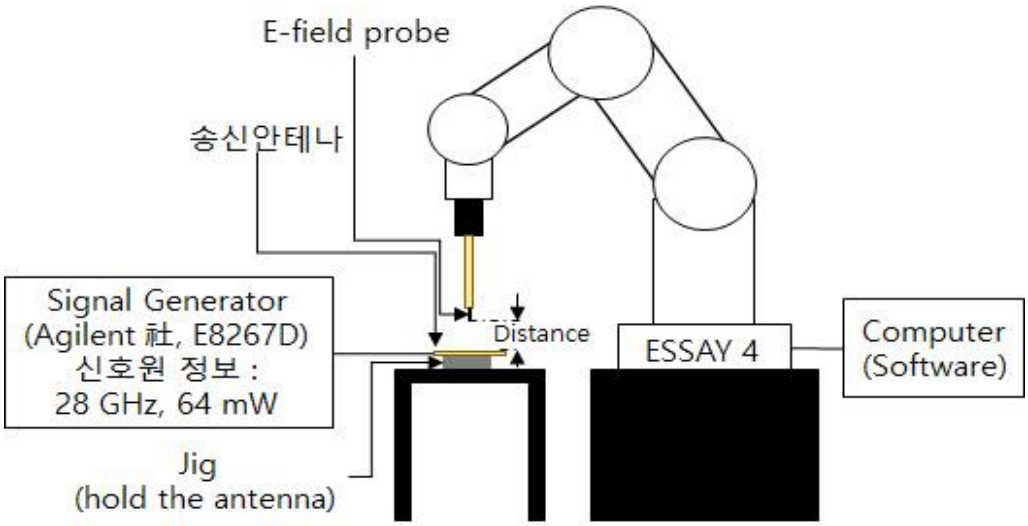


그림 3-27. 28 GHz 전력밀도 측정 시스템 구성도

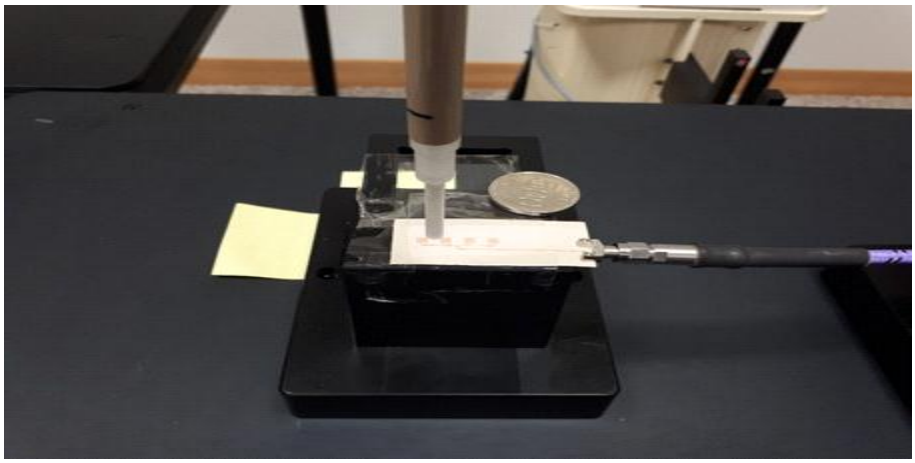


그림 3-28. 1x4 배열 안테나 전력밀도 측정 모습

표 3-1. 안테나 입력 파라미터

주파수	28 GHz
입력전력	64 mW

1x4 배열 안테나에 대한 전력밀도 환산은 그림 3-29과 같이 2가지 경우에 대하여 도출하여 그 크기를 비교하였다. Case1은 임의의 평면에서 그림 3-30와 같이 1 x 1 cm^2의 면적을 1 mm 간격으로 121 포인트의 전기장을 측정하여 평균전력밀도를 계산 후 평균전력밀도를 외삽하여 근거리 전력밀도를 추정하는 것이다. 그리고 Case2는 1 x 1 cm^2의 면적에 대하여 각 거리

에서 전기장을 측정한 후 각 포인트에 대하여 전력밀도를 환산하고 그림 3-31과 같이 측정위치가 같은 포인트에서 외삽을 통해 평균전력밀도를 구하는 방식이다.

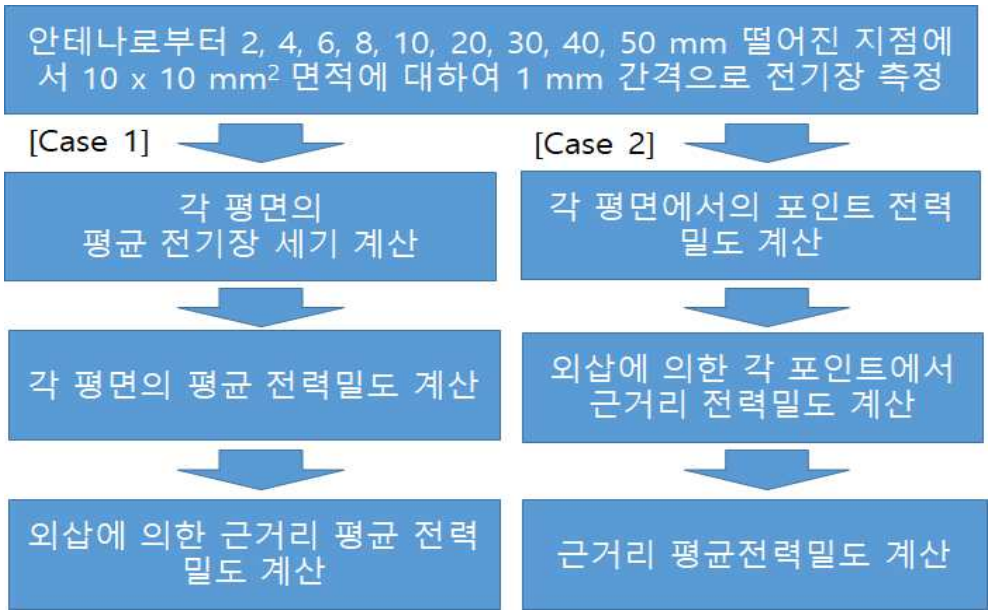


그림 3-29. 근거리 전력밀도 외삽 방법

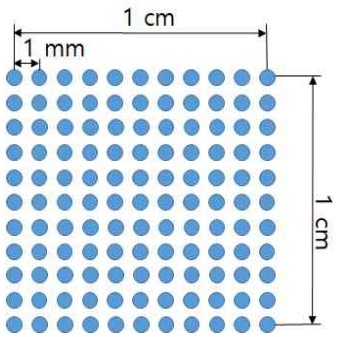


그림 3-30. 1 x 1 cm^2 면적의 측정 포인트

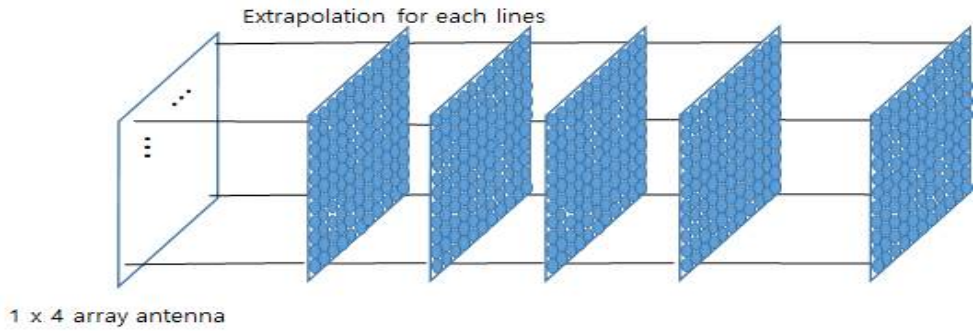
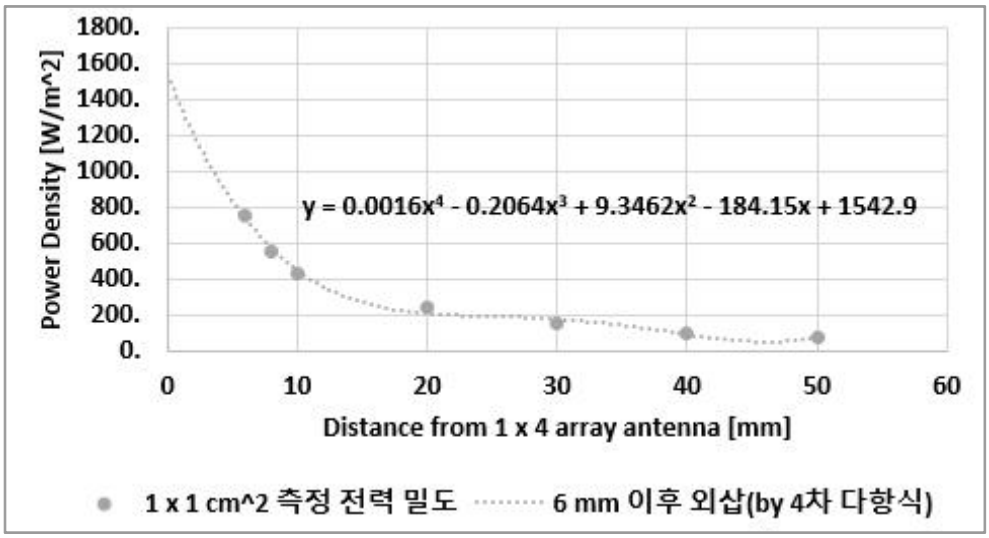
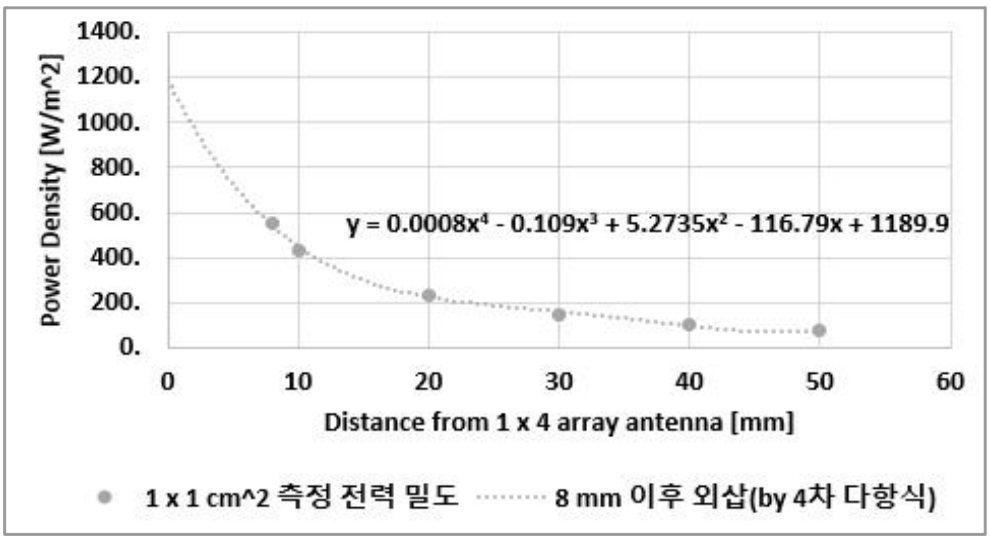


그림 3-31. 각 측정 포인트에 대한 외삽선

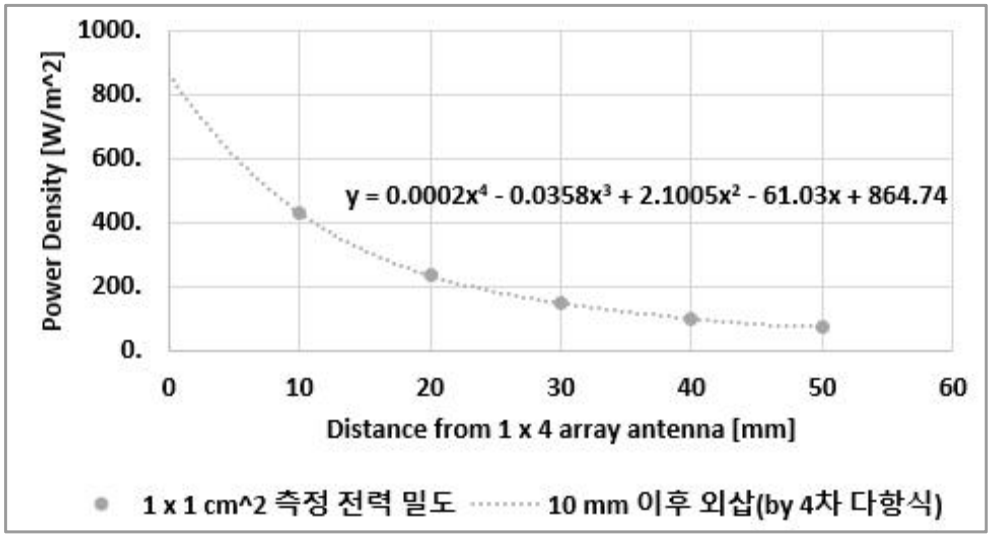
그림 3-32는 Case 1 방법으로 1 x 4 배열 안테나에 대한 근거리 평균 전력밀도를 추정한 것이다. 그림 3-32(a)를 통해 근거리 전력밀도는 약 1,542 W/m^2 으로 계산된 것을 확인할 수 있다.



(a) 6 mm 이후의 측정값과 이를 이용한 외삽 결과



(b) 8 mm 이후의 측정값과 이를 이용한 외삽 결과



(c) 10 mm 이후의 측정값과 이를 이용한 외삽 결과

그림 3-32. Case 1에 의한 근거리 전력밀도 계산

그림 3-33는 Case2에 의한 근거리 전력밀도 계산 결과를 나타낸 것이다. 그림 3-33에서 추정된 근거리 전력밀도는 약 1,590 W/m^{2}로 Case 1의 전력밀도와의 편차가 약 3 %이다. 그림 3-34는 1 x 4 안테나에 대한 전력밀도 수치해석 결과와 측정값 그리고 4차 및 6차 다항식 외삽법을 적용한 결과값을 나타낸 것이다. 20 mm 이후의 수치해석과 측정결과의 편차는 크지 않았으나 근거리장으로 갈수록 측정값과 수치해석값의 편차가 큰 것을 확인하였다.

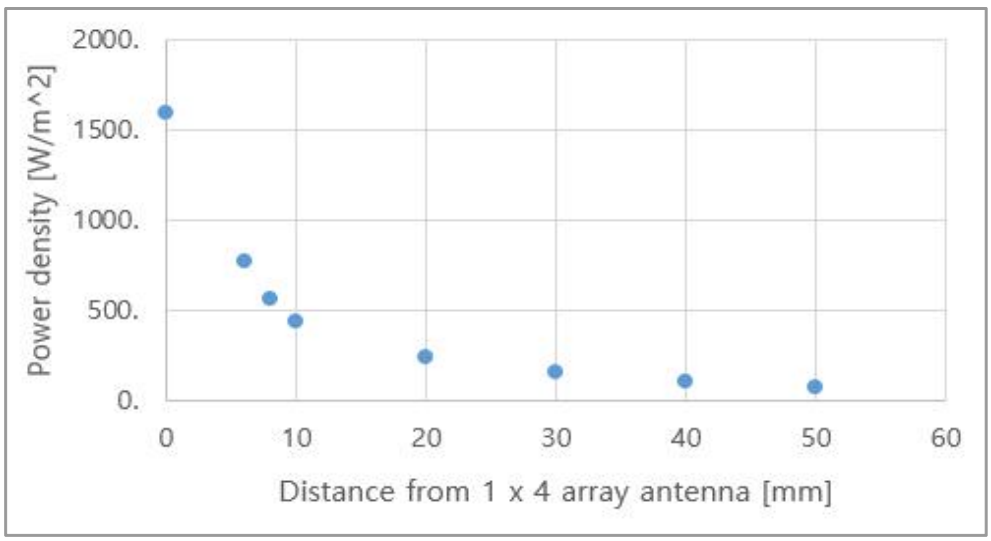


그림 3-33. Case 2에 의한 근거리 전력밀도 계산

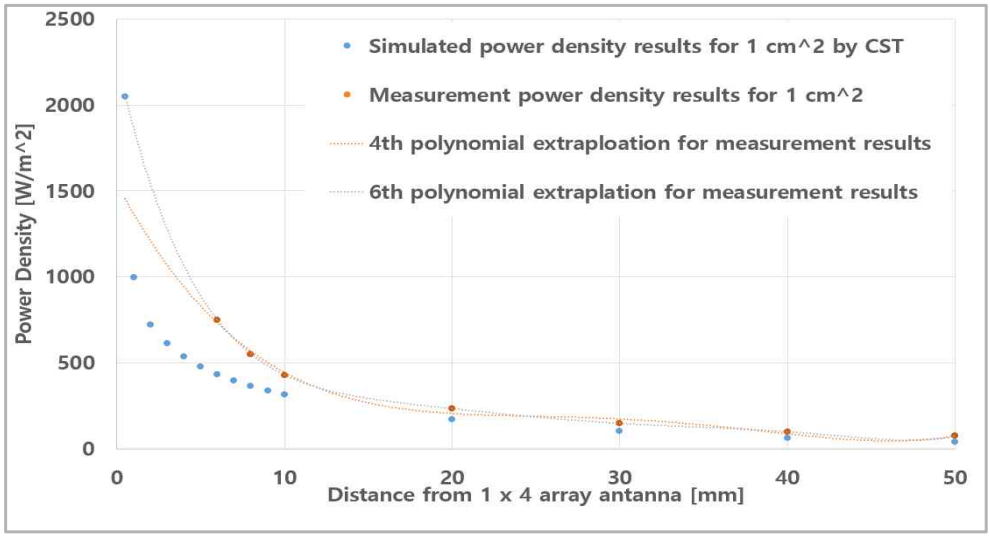
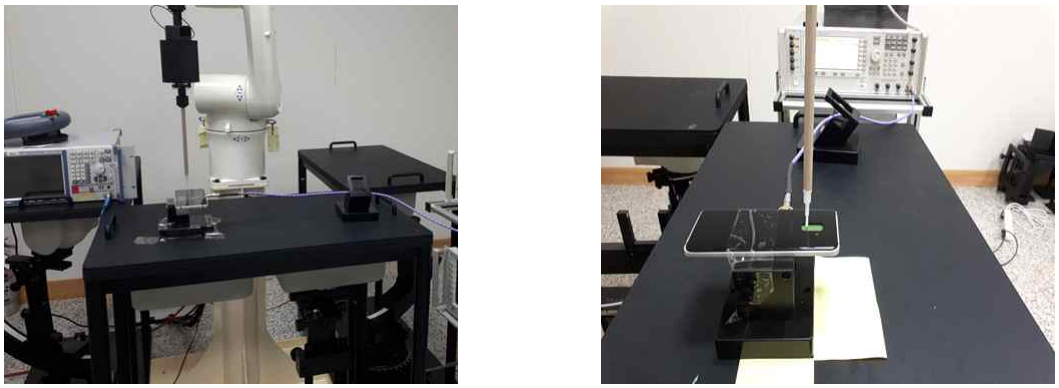


그림 3-34. 수치해석 결과와 측정값 및 측정값에 대한 외삽 비교

5. 목업(Mock-up) 폰에 대한 전력밀도 측정

그림 3-35는 Mock-up 폰의 앞면에 대한 전력밀도 측정 모습이다.



(a) Mock-up 폰 앞면 측정 (b) Mock-up 폰 뒷면 측정

그림 3-35. 목업(Mock-up) 폰에 대한 전력밀도 측정 모습

표 3-2와 표 3-3은 Mock-up 폰에 대한 평균전기장 세기 측정 결과와 전력밀도 값을 나타낸 것이다. 그리고 그림 3-36과 3-37는 Mock-up 폰 앞·뒷면에 대하여 4차 다항식 외삽법을 적용한 결과를 나타낸 것이다.

표 3-2. 목업(Mock-up) 폰 앞면에 대한 전기장 및 전력밀도 측정값

이격거리 [mm]	평균 전기장 세기 [V/m]		전력밀도 [W/m^2]	
	10×10 [mm^2]	20×20 [mm^2]	10×10 [mm^2	20×20 [mm^2]
2	14.604	17.791	0.566	0.840
4	12.123	13.842	0.390	0.508
6	13.073	14.581	0.453	0.564
8	17.253	16.344	0.790	0.709
10	16.307	15.510	0.705	0.638
20	10.274	10.414	0.280	0.288
30	10.604	10.211	0.298	0.277
40	9.692	9.776	0.249	0.253
50	7.323	9.280	0.142	0.228

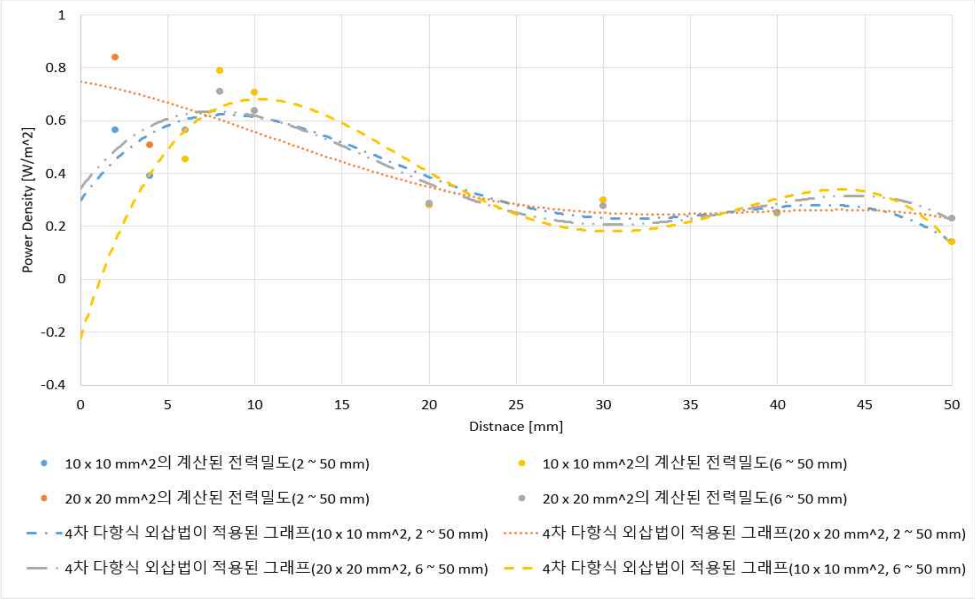


그림 3-36. Mock-up 폰 앞면에 대한 전력밀도 외삽 결과

표 3-3. Mock - up 폰 뒷면에 대한 전기장 및 전력밀도 측정값

이격거리 [mm]	평균 전기장 세기 [V/m]		전력밀도 [W/m2]	
	10×10 [mm^2]	20×20 [mm^2]	10×10 [mm^2	20×20 [mm^2]
2	167.217	132.258	74.168	46.398
4	159.496	116.350	67.477	35.908
6	141.396	108.135	53.031	31.016
8	99.189	74.854	26.097	14.862
10	71.457	52.243	13.544	7.240
20	62.275	46.960	10.287	5.850
30	49.281	42.501	6.442	4.791
40	40.539	37.002	4.359	3.632
50	35.367	33.604	3.318	2.995

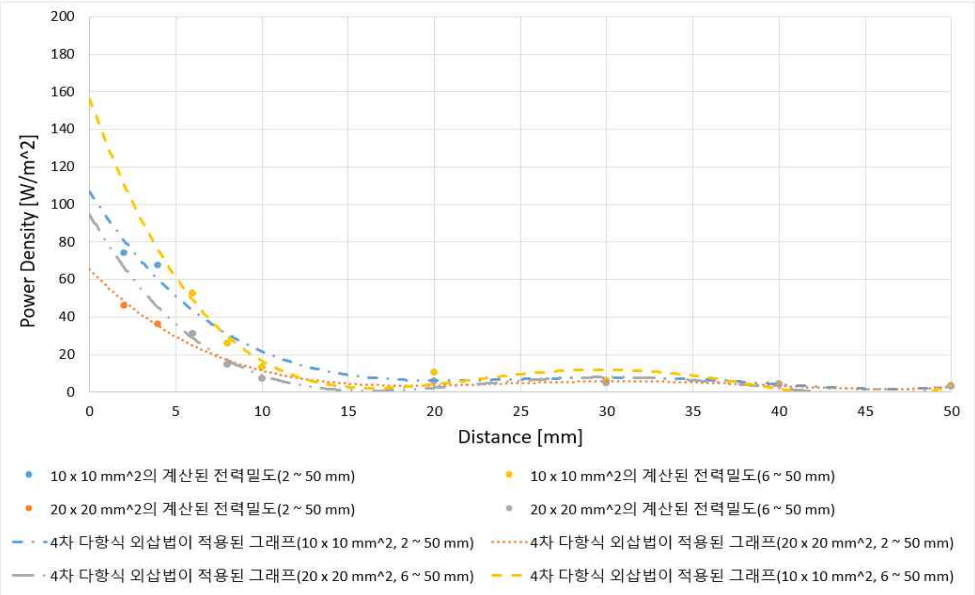


그림 3-37. Mock-up 폰 뒷면에 대한 전력밀도 외삽 결과

제 4 장 결 론

본 연구과제에서는, 5G 이동통신기기에 대한 전자파 인체 노출 환경을 예측하고 분석하는 기초 연구가 수행되었다.

먼저, 28 GHz에서 동작하는 5G 이동통신용 마이크로스트립 단일 패치 및 소형 배열 안테나를 설계하고 제작하였다. 설계·제작된 배열안테나는 1×4, 2×2 배열 안테나이며, 상기 평면 안테나들 및 표준 혼 안테나로부터 방사되는 방향의 거리에 따른 전기장과 전력밀도를 산출하고 측정하였다.

산출 전력밀도를 기반으로 근거리 영역에 대한 전력밀도를 예측할 수 있는 보간 기법들을 제시하고 정확도를 분석하였다. 전력밀도 보간·외삽을 위해 유한제차분 보간기법, Cubic Spline 기법, 쌍곡선 함수 및 쌍곡선 평행이동 함수를 이용하였으며 안테나 별 공간 임피던스 기반 방사 영역 판정에 대해 검토하였다. 근거리 전력밀도 보간·외삽기법에 사용한 상기 기법 가운데 쌍곡선 평행이동 함수를 이용하였을 때 비교적 안정된 결과를 확인하였다.

28 GHz 대역의 3축 및 단축 프로브를 설계 제작하였으며, 제작된 프로브의 등방성 및 민감도 측정을 혼안테나를 이용하여 수행하였으며, 이에 따라 프로브를 교정하였다. 교정된 프로브를 이용하여 28 GHz 대역의 1 x 4 배열 안테나와 Mock-up 폰, 혼 안테나에 대하여 프로브 감지 특성을 측정하였고, 다양한 외삽법을 이용하여 평가표면에서의 전력밀도를 추정하고, 수치해석 결과와 비교하였다. 또한 프로브 팁에 의한 28 GHz 대역의 필드 왜곡 현상을 수치해석 하였으며, 다중주파수에 의한 동시 노출량 산출 방법에 대하여 조사하였다. 본 연구를 통하여 28 GHz 대역에서의 전기장 측정에 의한 전력밀도 측정이 가능한 것을 확인하였다. 나중에 측정값과 수치해석 값 사이에서 발생하는 측정 불확도 개선 연구 및 다중주파수의 동시 노출에 의한 인체 노출량 평가에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5G 이동통신기기의 전자파 인체노출 환경 예측 분석 연구

국립전파연구원
National Radio Research Agency

(58323) 전남 나주시 빛가람로 767
발 행 일 : 2018. 11.
발 행 인 : 전 영 만
발 행 처 : 국립전파연구원
전 화 : 061) 338-4531
인 쇄 : 프리비인쇄소
Tel. 061) 332-1492

ISBN : 979-11-5820-106-7 < 비 매 품 >

주 의

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