

제 출 문

본 보고서를 「소형 EMP 방호시설 성능측정방법 연구」 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2016. 11. 25.

연구책임자 : 김명희 (국립환경대학교)

연 구 원 : 이호원 (국립환경대학교)

연구보조원 : 황민지 (국립환경대학교)

요 약 문

1. 과 제 명 : 소형EMP 방호시설 성능측정방법 연구
2. 연 구 기 간 : 2016. 04. 15. ~ 2016. 11. 25
3. 연구책임자 : 김 명 회
4. 계획 대 진도

가. 월별 추진내용

세부연구내용	연구자	월별 추진일정									비 고
		4	5	6	7	8	9	10	11		
2m 이하 소형 차폐실에 대한 차폐 성능 표준 측정방법 조사·분석	김명회 이호원	—	—								계획 진도
소형 송수신기와 잔향챔버를 이용한 차폐성능 측정 방법 비교·분석	김명회 황민지		—	—	—	—	—	—			계획 진도
소형 EMP 방호시설 성능측정 절차 제안	김명회 이호원								—	—	계획 진도
분기별 수행진도 (%)		30			40			30			

나. 세부 과제별 추진사항

- 1) 2m 이하 소형 차폐실에 대한 차폐성능 표준 측정방법 조사·분석
- 2) 소형 송수신기와 잔향챔버를 이용한 차폐성능 측정방법 비교·분석

5. 연구결과

- 1) 2m 이하 소형 차폐실에 대한 차폐성능 표준 측정방법 분석을 통하여 물리적/전기적 크기 분류에 따른 시험방법 분석
- 2) 전자파 잔향실, 무반사실, 소형 자계루프, 스트립라인 구조물을 이용한 각 시험방법의 특징 및 구성 등을 분석
- 3) 무반사실에서 소형 송/수신 시스템을 이용하여 차폐성능 시험
- 4) 동일한 피시험체에 대하여 전자파 잔향실 기반 차폐효과 성능 측정 실험 수행
- 5) 소형 EMP 방호시설 성능측정을 위한 전자파 잔향실 기반 시험 방법 절차서 제안

6. 기대효과

- 1) 소형 차폐시설의 EMP 방호성능 평가를 위한 시험방법 마련을 통한 고출력 전자파 안전성 평가 활성화

7. 기자재 사용 내역

시설·장비명	규격	수량	용도	보유현황	확보방안	비고
HFSS	Copy	1	수치해석	보유	-	
무반사실	시설	1	측정	미보유	ETRI대여	
전자파잔향실	시설	1	측정	미보유	ETRI대여	
전자파잔향실	시설	1	측정	미보유	RRA대여	
VNA	EA	1	측정	보유	-	

8. 기타사항

해당사항 없음

최종보고서 초록

국문 초록		
<p>본 보고서는 소형 EMP 방호시설 성능측정 방법에 대하여 기술한 보고서이다. 2m이하 소형차폐물에 대한 차폐성능 측정방법을 소개한 기존 표준문서의 내용을 분석하고 이를 기반으로 소형 EMP방호시설에 대한 성능측정방법을 제시한다. 이때, 사용한 방법은 전자과잔향실을 기반으로 한 주파수 교반 방식이다. 본 보고서에서는 국립전파연구원이 보유하고 있는 전자과 잔향실을 이용하여 소형 차폐구조물의 차폐성능을 측정한 결과를 기술하고 있다. 또한 이를 바탕으로 하여 전자과잔향실 기반 소형 EMP 방호시설에 대한 성능측정방법에 대한 시험 절차를 기술한다.</p>		
영문 초록		
<p>This report describes a test method of shielding effectiveness for small enclosures protecting electronic devices from electromagnetic pulse (EMP). We study on the IEEE Std 299.1-2013 to analyze the test method for measuring the shielding effectiveness (SE) of enclosures having all dimensions between 0.1 m and 2.0 m. Employing the analysis result, the measurements for SE of small enclosures are obtained in the reverberation chamber of the RRA. We present a procedure for the SE test of small enclosures based on the measured results.</p>		
색 인 어	한글	소형 EMP 방호시설, 전자과 잔향실, 차폐성능
	영문	small enclosure, reverberation chamber, RC, shielding effectiveness, SE

SUMMARY

본 보고서는 소형 EMP 방호시설 성능측정 방법에 대하여 기술한 보고서이다. 최근 들어서, 소형 차폐시설 (차폐 랙 등)을 이용한 EMP 방호의 필요성이 높아지고 있다. 하지만 소형 EMP 방호시설의 성능측정방법은 잘 정립되어 있지 않다. 본 보고서에서는 2m이하 소형차폐물에 대한 차폐성능 측정방법을 소개한 기존 표준문서 (IEEE Std. 299.1 - 2013)의 내용을 분석하고 이를 기반으로 소형 EMP방호시설에 대한 성능측정 방법을 제시한다.

특히, 앞서 언급한 표준 문서에서 제시하는 전자파 잔향실 기반 시험 방법에 초점을 맞추어서 국립전파연구원이 보유하고 있는 전자파 잔향실을 이용하여 시험을 진행하였다. 전자파 잔향실을 이용한 시험 방법은 기존 무반사실을 이용하는 등의 다른 방법에 비해서 상대적으로 새로운 시험 방법으로써 시험방법 정립을 위해서 실제 측정을 수행할 필요가 있다. 소형 차폐구조물의 공진현상으로 인한 측정 난제를 효율적으로 극복하기 위하여 주파수 교반 방식을 적용하였다.

서로 다른 두 가지 형태의 소형 차폐구조물에 대한 차폐효과 측정 시험을 수행하였다. 벡터회로망분석기로부터 측정된 결과에 주파수 교반 방식을 적용하였으며, 이로부터 소형차폐구조물에 대한 차폐효과 측정결과를 얻을 수 있었다. 이를 바탕으로 국립전파연구원이 보유한 전자파 잔향실을 기반으로 한 소형EMP방호시설 성능측정방법을 위한 시험 절차를 제시하였다.

목 차

1장. 서 론	11
1절. 연구 필요성	11
2절. 연구 목적	11
3절. 보고서 구성	12
2장. 소형 차폐실에 대한 차폐성능 표준 측정방법 조사· 분석	13
1절. 시험 영역 분류 방법 분석	13
2절. 전자파잔향실 기반 성능 측정 방법	21
3절. 무반사실 기반 성능 측정 방법	25
4절. 스트립라인 구조 기반 성능 측정 방법	29
5절. 소형자계루프 기반 성능 측정 방법	31
3장. 소형 송수신기와 잔향챔버를 이용한 차폐성능 측정 방법 비교·분석	35
1절. 전자파잔향실(0.5GHz이하)기반 차폐성능측정 ...	35
2절. 전자파잔향실(80MHz이하)기반 차폐성능측정 ...	41
4장. 시험절차서	57
1절. 시험 절차 요약	57
2절. 시험 절차 상세	58
5장. 결 론	70
참 고 문 헌	71

그 립 목 차

그림 2-1. 소형 합체 최저모드 주파수 (테이블 형)	14
그림 2-2. 소형 합체 최저모드 주파수 (그래프 형)	14
그림 2-3. 전기적·물리적 크기에 따른 시험 영역 분류	15
그림 2-4. 바일 식을 이용한 소형 합체 시험 영역 추가 분류	16
그림 2-5. 최저 모드와 고차 모드의 필드 균일도 비교 ·	17
.....	17
그림 2-6. 모드 수 예측을 위한 Weyl 식, Liu 식, 수치해 석 비교	18
그림 2-7. 고차모드 도출 비교	18
그림 2-8. 소형합체 차폐성능 시험 방법 분류	19
그림 2-9. 전자파 잔향실 기반 시험 방법 1	20
그림 2-10. 전자파 잔향실 기반 시험 방법 2	21
그림 2-11. 차폐효과 도출 식	23
그림 2-12 차폐 효과 차폐값 측정 구성	24
그림 2-13. 차폐효과 기준값 측정 구성 측면도	25
그림 2-14. 차폐 효과 기준값 측정 구성 평면도	25
그림 2-15. 혼안테나 시험 구성 - 차폐값 측정	26
그림 2-16. 혼안테나 시험 구성 - 기준값 측정	27
그림 2-17. 합체 내 안테나 배치 주의사항	27
그림 2-18. 전기적/물리적 소형인 소형합체의 차폐성능 측 정 방법	29
그림 2-19. 소형자계루프 기반 차폐효과 측정	30
그림 2-20. 양문 측정 방법	31

그림 2-21. 단일 문 측정 방법	33
그림 2-22. 패널 이음부 측정 방법 1	33
그림 2-23. 패널 이음부 측정 방법 2	33
그림 3-1. 소형함체 차폐효과 무반사실 측정 구성	34
그림 3-2. 소형함체 뒷면 미소 모노폴 연결부	35
그림 3-3. 소형 함체 내부 미소 모노폴	35
그림 3-4. 차폐효과 기준값 측정	36
그림 3-5. 기준값 측정을 위한 미소 모노폴 안테나	36
그림 3-6. 소형함체 차폐효과 전자파 잔향실 구성	37
그림 3-7. 전자파 잔향실 시험 구성 내부	37
그림 3-8. 미소 모노폴 프로브	38
그림 3-9. 무반사실과 전자파잔향실 시험 결과 비교 ...	39
그림 3-10. 국립전파연구원 보유 전자파 잔향실 이용 차폐성능 시험구성 1	41
그림 3-11 국립전파연구원 보유 전자파 잔향실 이용 차폐성능 시험구성 2	41
그림 3-12. RRA와 ETRI 시험실에서 도출된 차폐성능 비교	42
그림 3-13. 높이 변화 ($h=100\text{mm}$) 영향 분석을 위한 시험구성 1	43
그림 3-14. 높이 영향 분석을 위한 시험 구성 2	44
그림 3-15. 피시험체 높이 변화에 따른 차폐성능 비교	44
그림 3-16. 차폐성능 (1 GHz ~ 18 GHz) 시험 구성	45
그림 3-17. 18 GHz까지 확장된 기준값 측정결과	46
그림 3-18. 18 GHz까지 확장된 차폐값 측정결과	46
그림 3-19. 18 GHz까지 확장된 차폐성능 도출결과	47

그림 3-20. 반무반사실에서 기준값 측정	49
그림 3-21. 반무사실에서 차폐값 측정	49
그림 3-22. 기준값 측정결과	49
그림 3-23. 차폐값 측정결과	49
그림 3-24. 반무사실 측정결과로부터 도출된 차폐성능 ·	49
그림 3-25. 기준값 측정을 위한 시험 구성	50
그림 3-26. 차폐값 측정을 위한 시험 구성	51
그림 3-27. 피시험체 시험 정보	51
그림 3-28. 피시험체 차폐성능 측정을 위한 시험 구성 사 진	52
그림 3-29. 피시험체 내부 모노폴 안테나 설치 사진 ···	52
그림 3-30. 0.6GHz~1GHz 차폐성능 도출결과	53
그림 3-31. 1GHz~4GHz 차폐성능 도출결과	54
그림 3-32 4GHz~18GHz 차폐성능 도출결과	54
그림 4-1. 2 포트 VNA 기반 교정 단계 수행을 위한 시험 구성	61
그림 4-2. 2 포트 VNA 기반 교정 단계 수행을 위한 시험 구성	62
그림 4-3. 기준값 측정을 위한 시험 구성	64

1장. 서 론

1절. 연구 필요성

최근 들어서, 소형 차폐시설 (차폐 랙 등)을 이용한 Electromagnetic Pulse (이하 EMP) 방호의 필요성이 높아지고 있다. 기존 건물 규모의 EMP 방호 방식은 건물 설계 당시 방호 계획을 수립하고 적용하지 못할 경우 시공의 어려움 및 비용증가 문제가 발생한다. 그리고 주요 보호 시설이 중앙 집중 형태로 배치되지 않고 분산되어 있는 경우가 다수 존재하며 이에 대해서 효율적으로 EMP방호를 하는 방안이 필요하다. EMP 방호가 적용된 차폐실은 창문 제한, 출입문 구조 변경, 제한적인 냉난방 시스템 등으로 인하여 실내 근무 환경이 매우 제한적이다. 따라서 이러한 문제를 효율적으로 해결하기 위하여 차폐 랙과 같은 소형 EMP 방호 시설에 대한 관심이 높아지고 있다.

하지만 소형 차폐시설에 대한 EMP 방호 성능 측정 표준의 부재로 이 시설에 대한 성능 평가가 어려운 실정이다. 현재 EMP 방호 시설의 안정성 평가는 차폐실 위주로 적용되고 있다. 전 세계적으로, 2m 이하 소형 차폐 시설에 대한 일반적인 차폐 성능 표준에 대한 논의 및 연구가 활발하게 진행되고 있다. 따라서 기존 차폐 성능 표준을 EMP 방호 시설 성능 표준에 활용할 수 있도록 조사 및 분석이 필요하며, 이를 바탕으로 소형 EMP 방호시설에 대한 성능 평가 절차 마련이 필요하다.

2절. 연구 목적

본 보고서는 소형 EMP 방호시설 성능측정방법 연구의 중간보고서이다. 본 문서는 소형 EMP 방호시설의 성능측정방법 절차를

제시하기 위하여 소형 함체의 차폐효과 측정 방법을 기술한 기존 표준문서를 분석한다. 분석된 표준문서 기반 성능측정방법 중에서 최근 많은 관심을 받고 있는 전자파 잔향실 기반 성능 측정 방법에 대하여 표준 절차에 따라서 시험을 수행하고 결과를 도출한다.

3절. 보고서 구성

본 보고서는 4장으로 구성된다. 1장에서는 본 문서의 목적과 각 장의 구성에 대하여 기술한다. 2장에서는 기존의 표준문서에 기술되어 있는 소형함체의 차폐 성능 측정 방법에 대하여 분석한 결과를 기술한다. 기존 표준 문서 분석 결과에 따르면, 소형 함체에 대한 성능측정방법은 크게 4가지로 분류된다. 이를 분류하는 기준은 소형함체의 물리적 크기와 전기적 크기이다. 물리적·전기적 크기에 따라서 각각 소형과 대형으로 분류된다. 이를 근거로 4가지 영역(전기적 대형-물리적 대형 영역, 전기적 대형-물리적 소형, 전기적 소형·물리적 대형, 전기적 소형·물리적 소형)으로 구분하며 각 영역에 포함되는 소형 함체에 대하여 서로 다른 성능 측정 방법을 기술한다. 특히, 전기적 대형-물리적 소형 영역에 포함되는 소형함체의 경우 전자파 잔향실을 이용하여 성능측정 시험을 수행한다. 물리적으로 소형이면서 전기적으로 대형인 소형 함체의 경우 함체 내부에 기존의 공진형 안테나를 배치하는데 공간적인 제약이 있다. 따라서 기존과 다른 방식의 성능 측정 방법이 필요하며 그것이 바로 전자파 잔향실을 이용한 이중 함체 시험 방식이다. 보다 자세한 내용은 2장에서 기술하기로 한다. 3장에서는 표준문서의 내용을 기반으로 하여 전자파 잔향실을 이용한 차폐성능 측정방법을 수행한다. 전자파 잔향실을 통해서 얻어진 결과의 분석을 위하여 추가로 무반사실에서 차폐 성능 측정 시험을 수행하며 이를 비교·분석한다. 4장에서는 본 보고서의 결론을 기술한다.

2장. 소형 차폐실에 대한 차폐성능 표준 측정방법 조사·분석

1절. 시험 영역 분류 방법 분석

본 장에서는 소형함체 차폐성능 측정방법에 대하여 기술하고 있는 기존 표준문서에 대해서 조사·분석한 내용을 기술한다. 본 보고서에서 조사한 표준 문서는 아래와 같다 [1],[2].

- IEEE-STD.-299.1-2013 (IEEE Standard method for measuring the shielding effectiveness of enclosures and boxes having all dimensions between 0.1m and 2m)
- IEC 61587-3 (Mechanical structures for electronic equipment Part 3 - Electronic shielding performance tests for cabinets, racks, and subracks)

기존 표준문서에서는 소형함체의 물리적 크기와 전기적 크기를 기준으로 시험영역을 구분하고 있다. 각 영역은 전기적 대형-물리적 대형 영역, 전기적 대형-물리적 소형 영역, 전기적 소형·물리적 대형 영역, 전기적 소형·물리적 소형 영역의 네 가지 영역이다. 여기서 각 영역을 영문으로 표기하면 (Electrically Large - Physically Large), (Electrically Large - Physically Small), (Electrically Small - Physically Large), (Electrically Small - Physically Small)와 같다. 이를 줄여서 약어로 LL, LS, SL, SS 표기하기로 한다. 네 가지 시험 영역을 구분하는 기준중 하나는 물리적인 크기로서, 소형 함체의 최대 길이가 0.1 m 이상에서 0.75 m 이하에 위치하면 물리적 소형으로 분류하고, 0.75 m 초과에서 2 m 이하에 위치하면 물리적 대형으로 분류한다.

전기적 크기에 대한 분류는 소형 합체에서 발생하는 공진의 최저 모드를 이용한다. 소형 합체 차폐성능 측정 시험에 대한 시험 주파수가 합체에서 발생하는 공진의 최저 모드 주파수 보다 충분히 큰 경우 전기적으로 대형인 합체로 분류하고, 합체에서 발생하는 공진의 최저 모드 주파수 보다 충분히 작은 경우에는 전기적 소형으로 분류한다. 직육면체 형태의 소형 합체에 대해서 아래에 주어지는 식을 이용하여 합체 공진 최저모드 주파수를 근사적으로 구할 수 있다.

$$f_r = f_{110} = 150 \sqrt{\left(\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2\right)} [MHz] \quad (2-1)$$

이 식에서 a와 b는 합체의 최소 길이를 제외한 나머지 길이를 뜻한다. 그리고 첨자 110은 직육면체 형태의 합체에서 발생하는 최저모드의 모드수를 뜻한다. 여기서 1은 해당 축 방향으로 배치된 반파장의 필드 변화를 의미한다. 육면이 모두 전도체로 둘러싸여 있는 합체의 경우 모드 수는 최소한 두 개 이상이 0이 되어서는 안 된다 [3].

그림 2-1과 그림 2-2에는 소형합체의 최저모드 공진 주파수에 대하여 도시되어 있다. 위 식을 이용하여 a, b의 길이를 0.1 m에서 2m까지 변화시켜 가며 각각에 대한 최저 모드 주파수를 테이블 형태와 그래프 형태로 각각 구한 것이다. 그림을 참고하여 소형 합체의 최저모드 주파수가 어느 정도 위치하는지 근사적으로 가늠할 수 있으며, 이를 바탕으로 해당 시험 주파수에서 피시험체인 소형합체가 전기적으로 소형인지 대형인지를 구분할 수 있다.

f_r (MHz)		b (m)					
		0.1	0.5	0.75	1	1.5	2
a (m)	0.1	2121	1530	1513	1507	1503	1502
	0.5	1530	424	361	335	316	309
	0.75	1513	361	283	250	224	214
	1	1507	335	250	212	180	168
	1.5	1503	316	224	180	141	125
	2	1502	309	214	168	125	106

그림 2-1. 소형 합체 최저모드 주파수 (테이블 형)

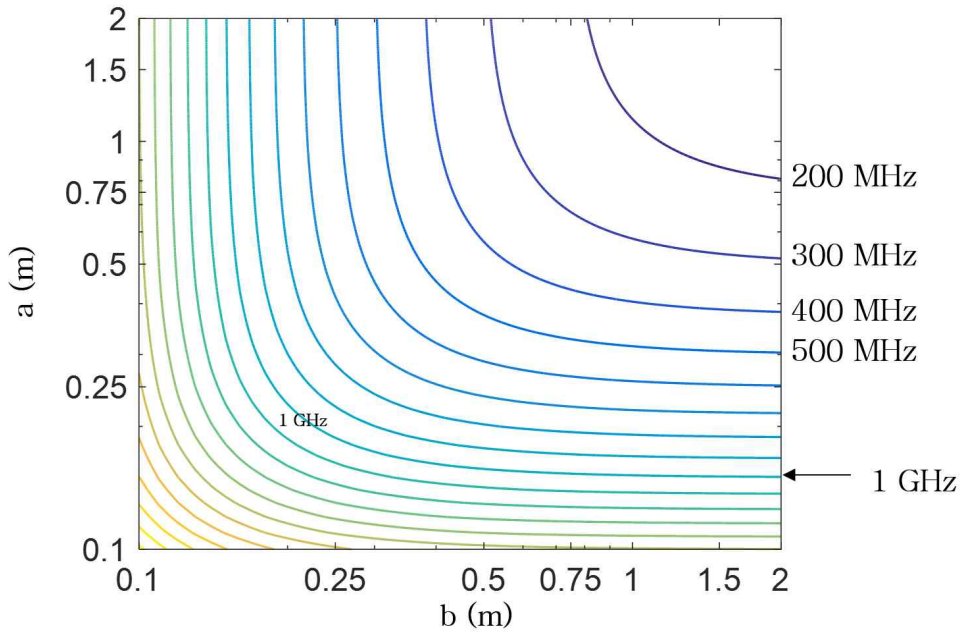


그림 2-2. 소형 합체 최저모드 주파수 (그래프 형)

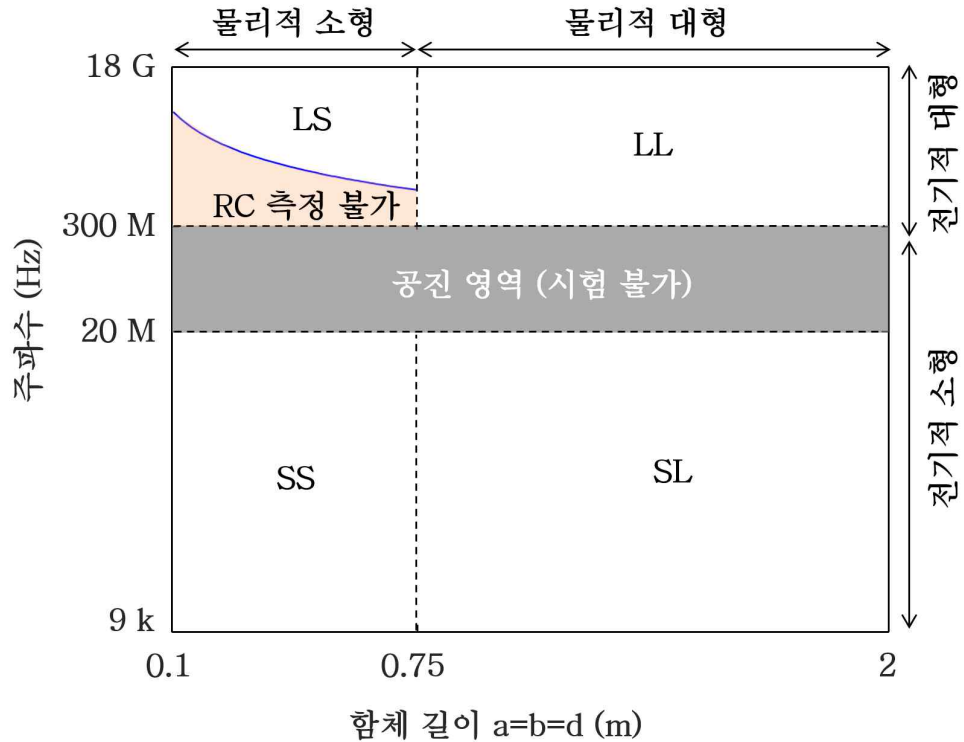
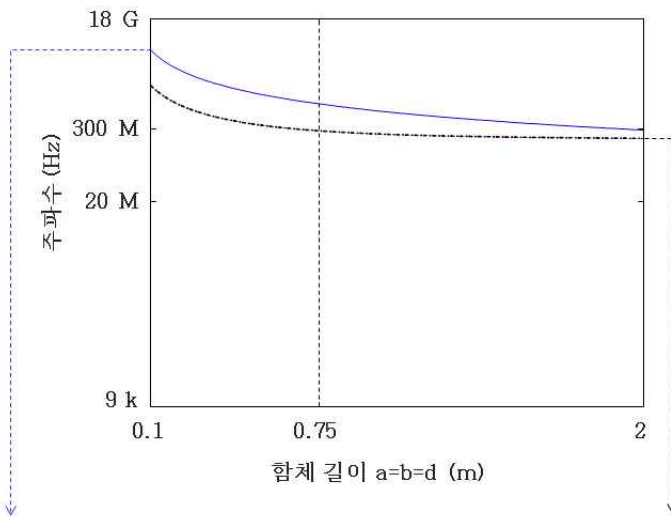


그림 2-3. 전기적·물리적 크기에 따른 시험 영역 분류

물리적 크기를 구분하는 기준치인 0.75m와 전기적 크기를 구분하는 기준치인 f_{110} 값을 이용하여, 그림 2-3에서 보는 것처럼 시험 영역을 네 가지로 구분할 수 있다. 이때, 시험 주파수 값이 f_{110} 근처에 있는 경우 공진영역으로 정의하며, 이 경우에는 측정값이 피 시험체에 의한 의존도가 커서 일반적으로 정의가 어려우며 따라서 이 영역에 대해서는 표준적인 시험 절차를 제시하지 못한다 [1].

본 절에서 한 가지 추가로 언급할 내용은 LS영역의 구분에 대한 것이다. 기존의 표준문서에서는 물리적으로 소형이면서 전기적으로 대형인 LS 영역에 속하는 소형 합체의 경우에는 전자파 잔향실을 이용도록 제시하고 있다. 전자파 잔향실을 이용한 시험 방법에서는 한 가지 가정이 필요한데 그것은 소형 합체 내에 입사된 전자파가 합체 내에서 교반이 잘 되었다는 가정이다. 여기서 교반

이 잘 되었다는 의미는 입사된 전자파를 측정할 때, 합체 내 위치에 따른 측정 값이 변화가 없다는 뜻이다. 일반적으로 합체 내에서 공진이 발생하면 특정한 필드 분포를 가지게 되며, 필드 값이 최대가 되는 지점과 최소가 되는 지점이 생겨난다. 이렇게 위치에 따른 필드 불균일도는 차폐효과 측정결과의 신뢰성과 직접적인 연관이 있다. 따라서 이를 해결하기 위하여 기존 표준문서에서는 주파수 교반 방식을 채용하는데, 주파수 교반이란 특정 주파수 대역 안에 여러 개의 공진 모드가 존재하도록 해서 필드 균일도를 향상시키는 방법이며, 이러한 조건을 만족하는 경우 합체 내 필드 교반이 잘 되었다고 한다. 이렇게 교반이 잘 된 합체 내에서는 위치에 따른 필드 차이가 최소화 된다. 주파수 교반 방식에서 필드 균일도를 향상시키기 위해서는 고차 모드의 사용이 필수적이다.



Weyl's formula

$$\bullet f_{\min} = c \cdot \left(\frac{90}{4\pi V} \right)^{1/3}$$

$$\bullet f_{\min} = 578.3 \cdot a^{-1} [MHz] \quad (\text{단, } a=b=d \text{ 일 때})$$

▪ 전기적 대형 합체의 시험가능 최소주파수 결정

합체 공진 최저모드

$$\bullet f_r = f_{110} = 150 \sqrt{\left(\left(\frac{1}{a} \right)^2 + \left(\frac{1}{b} \right)^2 \right)}$$

▪ 그래프는 a=b인 경우의 f_r

▪ 합체의 전기적 크기를 구분하는 기준

그림 2-4. 바일 식을 이용한 소형 합체 시험 영역 추가 분류

❖ 1번째 (최저)모드 (390 MHz)

❖ 60번째 모드 (1367 MHz)

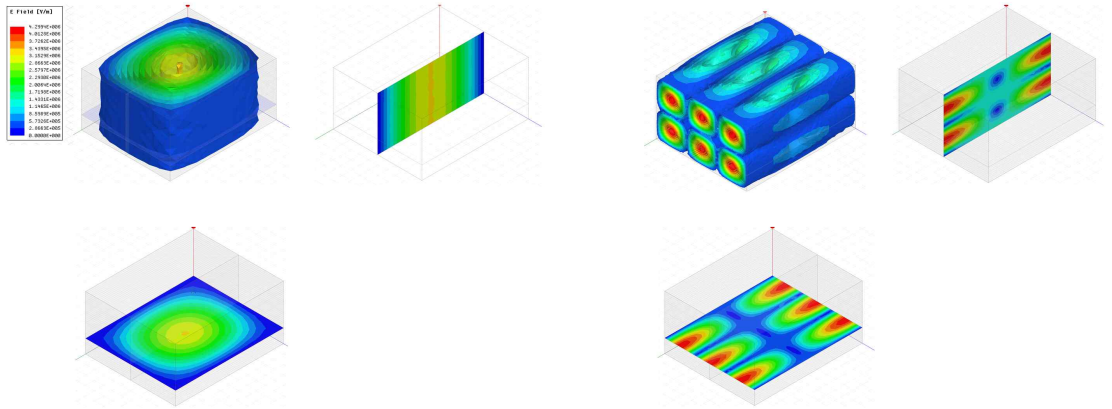


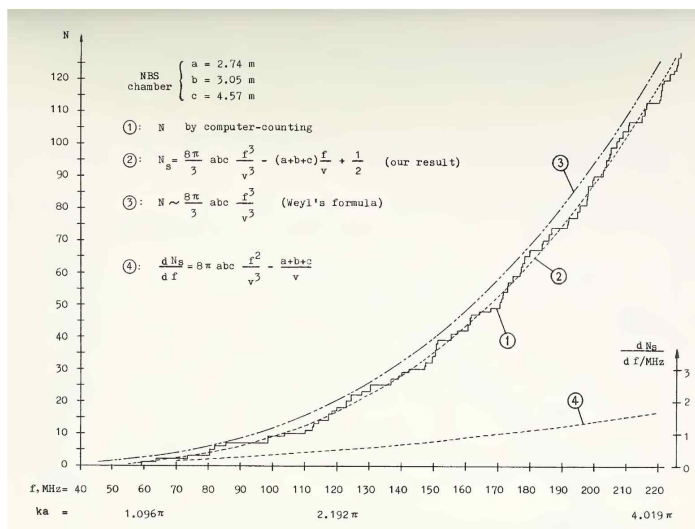
그림 2-5. 최저 모드와 고차 모드의 필드 균일도 비교

표준문서 [1]에서는 60번째 모드 이상의 고차 모드부터 주파수 교반이 시작되어야 한다고 명시하고 있다. 이는 모드 수가 낮은 경우에는 주파수 교반을 적용하여도 필드 균일도가 크게 향상되지 않기 때문이다. 그림 2-5는 직육면체 형태의 소형함체에서 발생하는 최저 모드와 60번째 고차 모드의 필드 분포를 나타낸다. 그림에서 보는 것처럼, 고차 모드의 경우 함체 내에서 동일 한 최대 또는 최소 값을 가지는 지점이 많아지면서 필드 균일도가 향상됨을 알 수 있다. 이런 필드 균일도가 높은 다수의 모드를 중첩하여 값을 구하는 것이 그렇지 않은 모드들을 중첩하여 값을 구하는 것에 비해서 필드 균일도가 높게 된다.

표준문서에서는 고차모드 (60번째 모드)를 구하기 위한 근사식을 제시하고 있다. 이 식은 Weyl에 의해서 고안된 식으로써 함체의 크기를 이용하여 60번째 모드 주파수를 구할 수 있다.

$$f_{60th} = c \cdot \left(\frac{90}{4\pi} \frac{1}{abd} \right)^{1/3} [Hz] \quad (2-2)$$

이 식에서 a, b, d는 소형함체의 각 변의 길이를 뜻하며, c는 빛의 속도를 의미한다. 그림 2-6은 표준문서에서 참조하고 있는 NIST 기술문서에 수록된 내용으로 모드 수 도출하는 각 방법에 대하여 비교하고 있다. 그림 2-7에는 테스트 소형 함체에 대하여 HFSS (수치해석)과 기존 식 결과를 비교하고 있다.



출처 : B. H. Liu, D. C. Chang, and M. T. Ma, "Eigenmodes and the composite quality factor of a reverberating chamber," U.S. Nat. Bur. Stand. Tech. Note 1066, 1983.

그림 2-6. 모드 수 예측을 위한 Weyl 식, Liu 식, 수치해석 비교

테스트 소형 함체 : a=0.6m, b=0.5m, d=0.3m

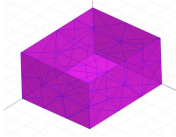
Weyl 공식	Liu 공식	Eigenmode solver
$N_s(f) \approx \frac{8\pi f^3 V}{3c^3}$	$N_s(f) \approx \frac{8\pi f^3 abd}{3c^3} - (a+b+d) \frac{f}{c} + \frac{1}{2}$	
1290.4 MHz	1330.1 MHz	1369.8 MHz
5.8 % 오차	2.9 % 오차	-

그림 2-7. 고차모드 도출 비교

Reverberation Chamber

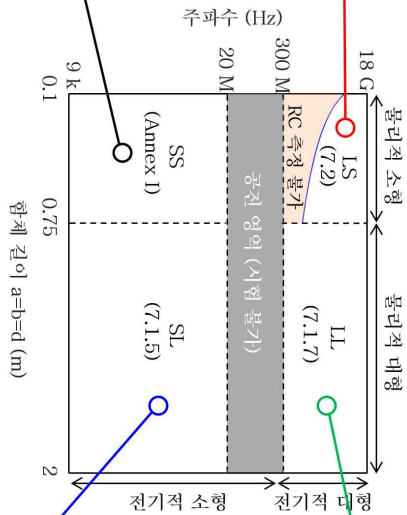
Antenna Port 1

Small Environment

Antenna Port 2

Bulbhead

VNA



The diagram illustrates the experimental setup for measuring the transmission coefficient of a shielded cable. It consists of the following components and connections:

- Frequency Source/Amplifier:** The signal source at the top of the setup.
- 0.3 m Diameter Shielded Loop:** A loop connected to the Frequency Source/Amplifier.
- 0.3 m long Shielded Cable:** The cable being tested, connected between the two loops.
- 0.3 m Diameter Shielded Loop:** A second loop at the output end of the cable.
- Attenuator:** A component connected to the output loop to control the signal level.
- Detector:** The final component that receives the signal.
- Outer Shielding Screens:** Two screens are positioned around the central components to minimize external interference.

- 20 -

위에서 설명한 것처럼, 소형합체를 물리적, 전기적 크기에 따라 분류하고 각 분류된 영역에 대해서 서로 다른 시험 방법을 제시한다. 그림 2-8은 각 분류 영역에 대한 시험 방법을 요약하여 보여준다.

2절. 전자파잔향실 기반 성능 측정 방법

본 절에서는 물리적 소형·전기적 대형 (LS 영역) 영역으로 분류되는 소형합체에 대한 차폐성능 측정방법을 기술한다. LS 영역에 있는 소형합체의 차폐성능은 전자파 잔향실을 이용한다. 물리적으로 소형인 합체의 경우에는 합체 내부에 안테나를 배치하는 어려움이 있다. 그리고 전기적으로 대형이기 때문에 합체 내부에 공진 모드가 발생한다. 따라서 합체 내부에 분포하는 필드 값은 측정 위치에 따라서 달라지는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 표준문서에서는 주파수 교반방식을 이용하는 전자파 잔향실 기반 이중 챔버 시험 방법을 제시한다. 이중 챔버 시험 방식이란 소형 합체 (챔버)를 거대한 챔버 (전자파 잔향실) 안에 배치하여 시험한다는 의미이다. 주파수 교반 방식이란 소형합체 내부 측정 위치에 따른 필드 변화를 해결하기 위하여 일정한 주파수 대역폭 안에 다수의 모드가 존재하도록 설정 한 후 모드 중첩을 통하여 필드 균일도를 달성하는 방법이다.

그림 2-9와 그림 2-10은 전자파 잔향실을 이용한 소형합체의 차폐효과 측정을 위한 시험 구성을 보여준다. 시험 구성 품목은 아래와 같다.

- 전자파 잔향실
- 벡터 회로망 분석기
- 송신 안테나

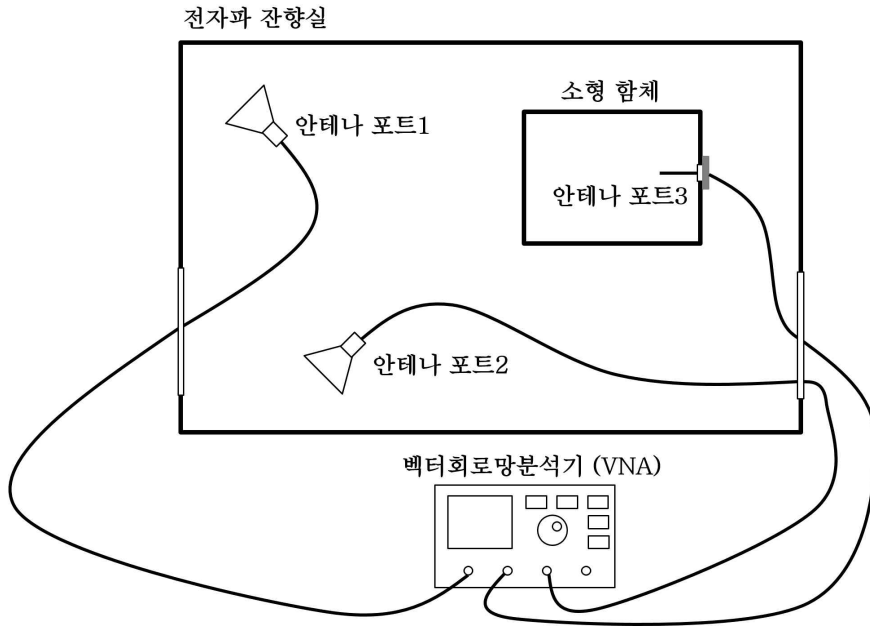


그림 2-9. 전자파 잔향실 기반 시험 방법 1

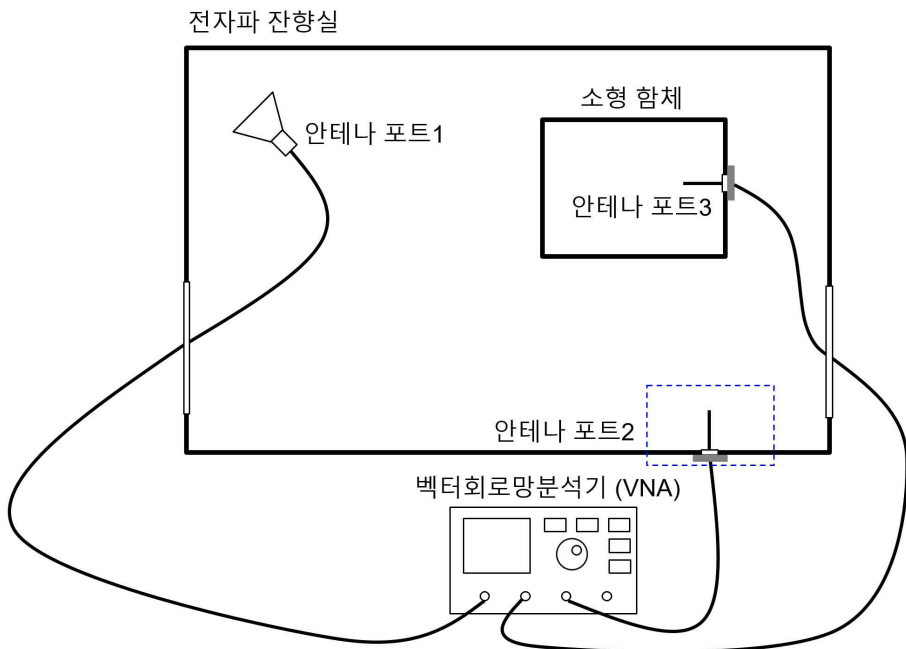


그림 2-10. 전자파 잔향실 기반 시험 방법 2

- 전자파 잔향실 내 수신 안테나 (기준 값 측정)
- 소형 합체 내 미소 모노폴 안테나 (차폐 값 측정)

전자파 잔향실을 이용한 차폐성능 측정에서 기준 값과 차폐 값을 동시에 측정하는 점이 특이하다. 기존 차폐 성능 측정 방법은 소형 합체의 유무에 따라서 측정을 수행하지만 전자파 잔향실을 이용하는 경우에는 기준 값과 차폐 값을 동시에 측정한다. 그 이유는 전자파 잔향실의 경우 주파수 교반으로 인하여 소형 합체 위치에서의 필드 값과 기준 값 측정 안테나 위치에서의 필드 값이 동일하기 때문이다. 전기적으로 대형인 피시험체의 경우 필드 균일도를 확보하기 위하여 60번째 모드 이상의 모드가 발생하는 주파수부터 시험이 가능함을 앞서 기술하였다. 그리고 다수의 고차모드를 중첩해서 필드 균일도를 확보하는 방식으로 합체 내부에 교반이 잘 되었음을 가정할 수 있다. 이런 경우 합체 벽면에 고정된 미소 모노폴로부터 측정되는 필드 값은 합체 내부 어디에서 측정하더라도 동일한 값을 가짐이 알려져 있다. 따라서 소형 합체 내부에 안테나를 배치하기 어려운 점을 벽면에 배치하는 미소 모노폴을 통하여 해결한다 [5].

이렇게 얻어진 결과로부터 차폐효과를 구하는 식이 그림 2-11에 주어져 있다. 4포트 벡터회로망분석기를 사용할 경우, 포트 1은 벡터 회로망 분석기의 포트 1에 연결된 송신 안테나를 의미하고 포트 2는 전자파 잔향실 내부, 소형 합체 외부에 위치하는 안테나와 연결된 포트이다. 포트 3는 소형 합체 내부에 위치한 미소 모노폴에 연결된 포트이다. 이렇게 연결된 경우에는 기준값과 차폐값 측정을 동시에 수행할 수 있다.

하지만 2포트 벡터회로망 분석기를 사용할 경우에는 포트 1은 동일하게 송신안테나에 연결하되 포트 2를 기준값 측정안테나와 미소다이폴 안테나에 번갈아 가면서 연결하여 측정을 수행한다. 기준 값과 차폐값을 순차적으로 측정하게 되며, 전자파잔향실의 경우에는 시험의 재현성이 보장되기 때문에 시험결과에 미치는 영향은 최

소화 된다.

그리고 안테나와 미소 모노폴의 임피던스 부정합에 의한 영향을 보상하기 위하여 반사손실 특성을 보정해 준다. 기준 값 측정 안테나의 반사손실이 보정되지 않은 경우에는 차폐효과가 과대 평가 될 수 있고, 차폐 값 측정을 위한 미소 모노폴의 반사손실을 보정하지 않은 경우에는 차폐효과가 저 평가 될 수 있다. 따라서 각 안테나의 반사손실 보정이 필수적이며, 이는 그림 2-11에 잘 나타나 있다.

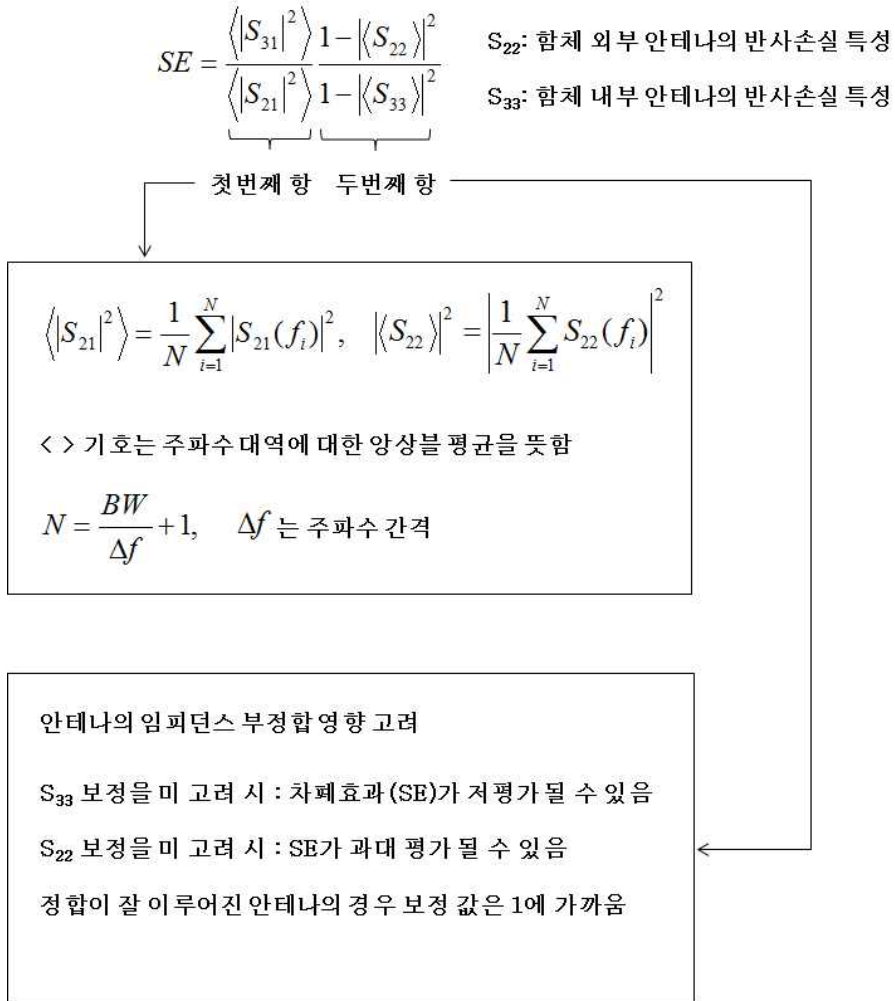


그림 2-11. 차폐효과 도출 식

3절. 무반사실 기반 성능 측정 방법

본 절에서는 전기적으로 대형이고 물리적으로 대형으로 분류(LL 영역)되는 소형함체에 대한 성능측정 방법을 기술한다. LL 영역에 포함되는 소형함체는 야외 시험장 또는 무반사실에서 공진형 다이폴 안테나 등을 이용하여 차폐 성능을 평가한다. 본 시험 방법의 기본은 소형 함체가 있을 때와 없을 때 각각에 대하여 필드 값을 측정하고 이를 통하여 차폐 효과를 도출한다.

그림 2-13과 그림 2-14에는 기준값 측정을 위한 시험구성을 보여준다. 무반사실 내에 송신/수신 다이폴 안테나들을 위치하고 2m 이상 이격시킨다. 수신 다이폴 안테나에는 신호감쇠기 및 필드 세기 측정기기를 연결하고 수신되는 최대값을 측정한다. 이때, 필드 세기 측정기기는 송신 안테나로부터 직접 영향을 받지 않도록 설된 곳에 위치시킨다. 수신 안테나 케이블이 설드 문을 지나는 경우에는 수신안테나 대신 더미 부하를 연결한 후 케이블 커플링 양이 충분히 적음을 확인해야 한다. 송신/수신 안테나는 소형함체의 중앙에 위치시킨다. 그리고 수직 방향으로 $h/4$ 상하로 이동하며 측정한다. 또한 수평, 수직 편파 모두 측정을 수행한다.

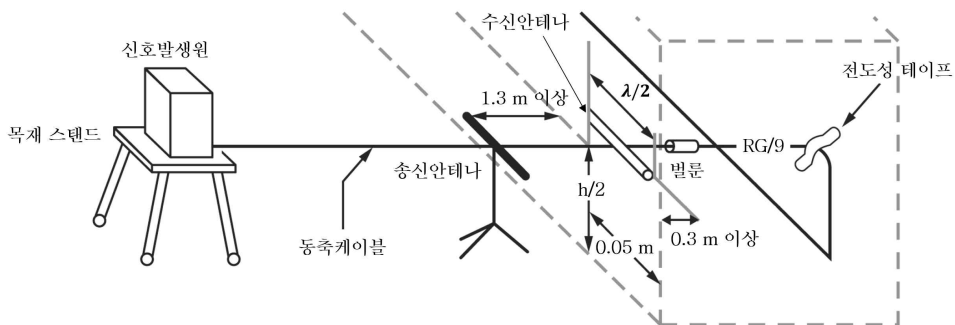


그림 2-12 차폐 효과 차폐값 측정 구성

❖ 차폐효과 기준값 측정 구성 측면도

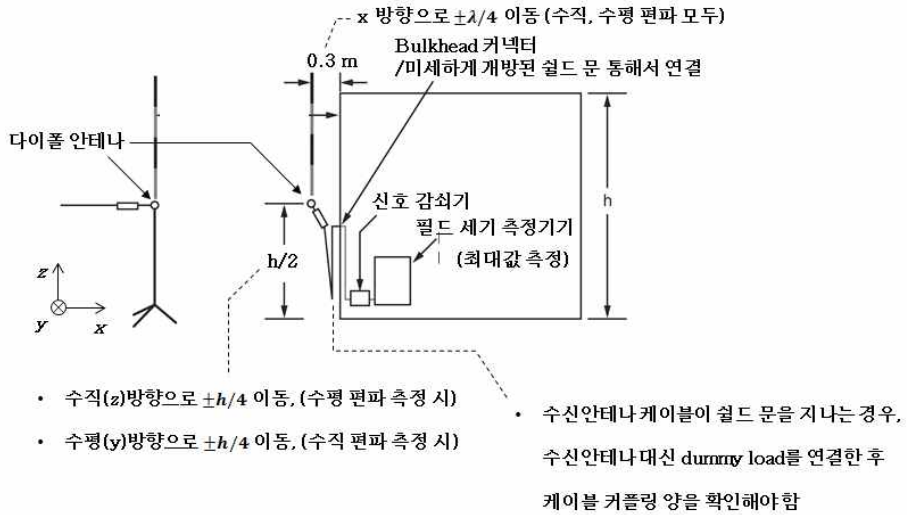


그림 2-13. 차폐효과 기준값 측정 구성 측면도

❖ 차폐효과 기준값 측정 구성 평면도

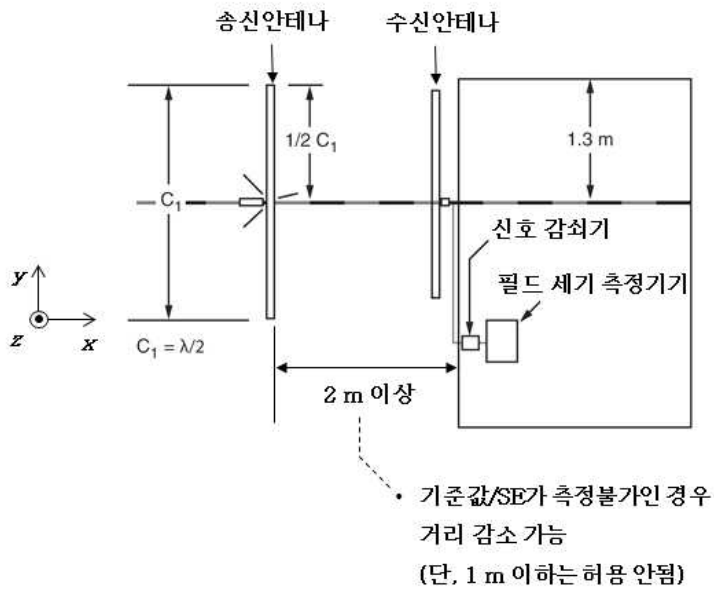


그림 2-14. 차폐 효과 기준값 측정 구성 평면도

시험 주파수가 1GHz 이상인 경우에는 혼 안테나를 사용할 수 있다. 혼 안테나를 이용하는 경우의 구성은 그림 2-15와 그림 2-16에 도시되어 있다. 혼 안테나를 이용하는 경우에도 송/수신 안테나를 통하여 필드를 인가 및 수신한다. 기준 값 측정의 경우에는 (그림 2-16) 송신 안테나와 수신 안테나가 서로 마주보도록 위치시키며 이때, 이격 거리는 2m이다.

수신 혼 안테나에는 방향성 결합기를 이용하여 수신 신호 감쇠를 시킬 수도 있다. 필드 세기 측정기기는 별도의 쉘딩 된 장소에 위치시켜서 송신안테나로부터 방사되는 필드에 영향을 받지 않도록 한다. 차폐값을 측정하는 경우에는 송신 안테나는 소형함체 벽면으로부터 1.7m 이격 시키고, 소형함체 내부에 위치하는 수신 안테나는 0.3m 이격 시킨다.

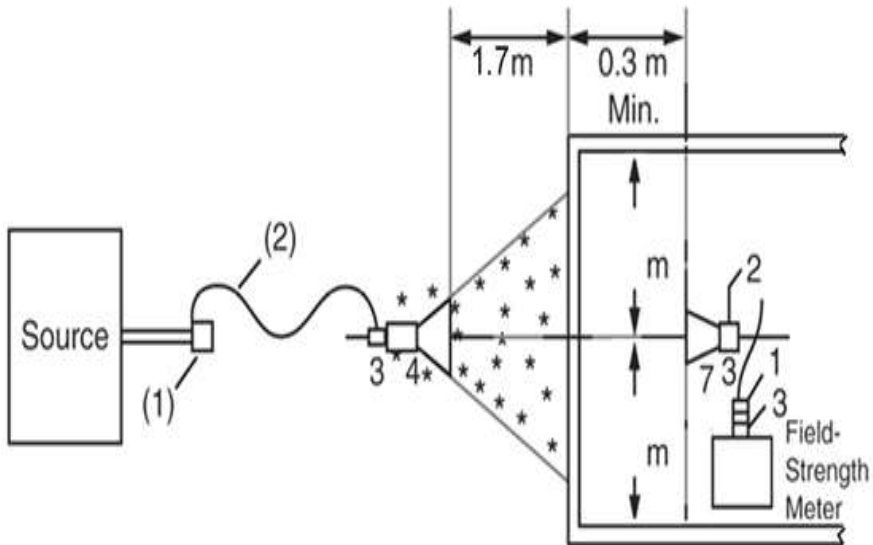


그림 2-15. 혼안테나 시험 구성 - 차폐값 측정

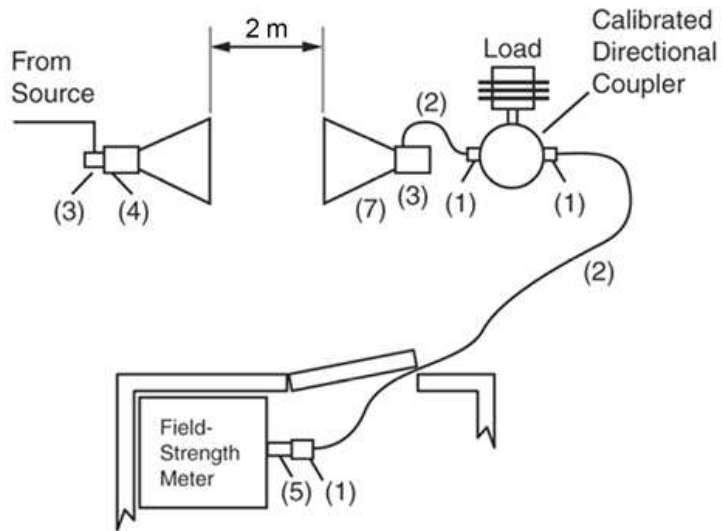


그림 2-16. 혼안테나 시험 구성 - 기준값 측정

소형 차폐 함체

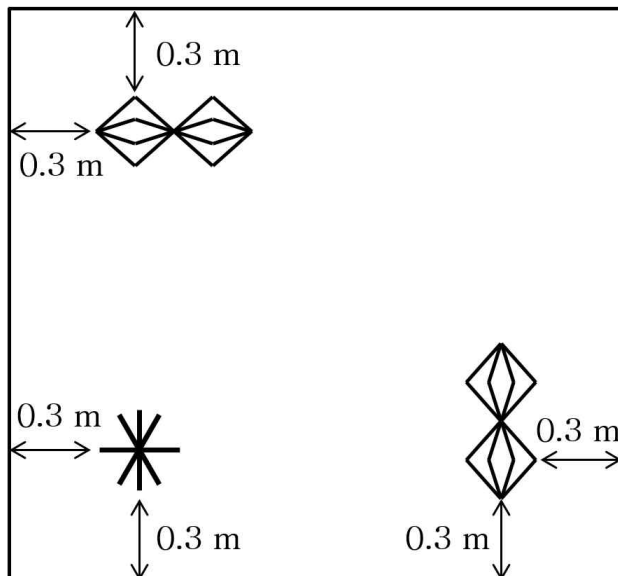


그림 2-17. 함체 내 안테나 배치 주의사항

소형함체 내부에 안테나를 배치시킬 때에는 그림 2-17에서 보는 것처럼, 벽면으로부터 0.3m 이상 이격될 수 있도록 해야 한다.

4절. 스트립라인 구조 기반 성능 측정 방법

본 절에서는 물리적으로 소형이고 전기적으로 소형 (SS 영역)인 소형함체에 대한 차폐 성능을 측정하는 방법에 대해서 기술한다. 물리적으로 소형인 소형 함체는 내부에 안테나 배치가 어렵다. 따라서 앞서의 경우 (LS 영역)에는 미소 모노폴을 이용했고, SS 영역의 경우에는 자기루프센서를 이용한다. 자기 루프 센서는 그림 2-18에 나타내어져 있다. SS 영역으로 분류되는 소형 함체의 차폐 효과를 측정하는 방법은 스트립라인 구조를 기반으로 한다. 여기서 스트립라인이란 소형함체 외부에 균일한 자기장을 형성해 주기 위한 구조물을 의미한다. 그림 2-18에서 보는 것처럼 스트립 라인 형태로 배열된 두 개의 커다란 도체판 내부에 소형 함체를 위치시킨다. 두 개의 도체 판의 한 쪽 끝은 회로망 분석기의 신호와 접지부에 연결되어 있다. 그리고 다른 쪽 끝은 저항을 이용하여 종단된 형태이다. 이때, 충분히 큰 전력에 대해서 저항 부하가 견딜 수 있도록 다수의 저항을 병렬로 연결하는 방식을 이용하며 등가 저항 값은 신호 발생기와 같도록 해준다. 일반적으로 50옴을 사용한다.

시험 구성을 정리해 보면 다음과 같다.

- 스트립 라인 구조물
- 소형함체 내부용 루프 센서
- 소형함체 외부용 루프 센서 (위와 동일)
- 회로망 분석기
- 전력 증폭기

- 전력 분배기
- RC-223 케이블
- 측정 주파수는 octave 당 20개 이상 측정

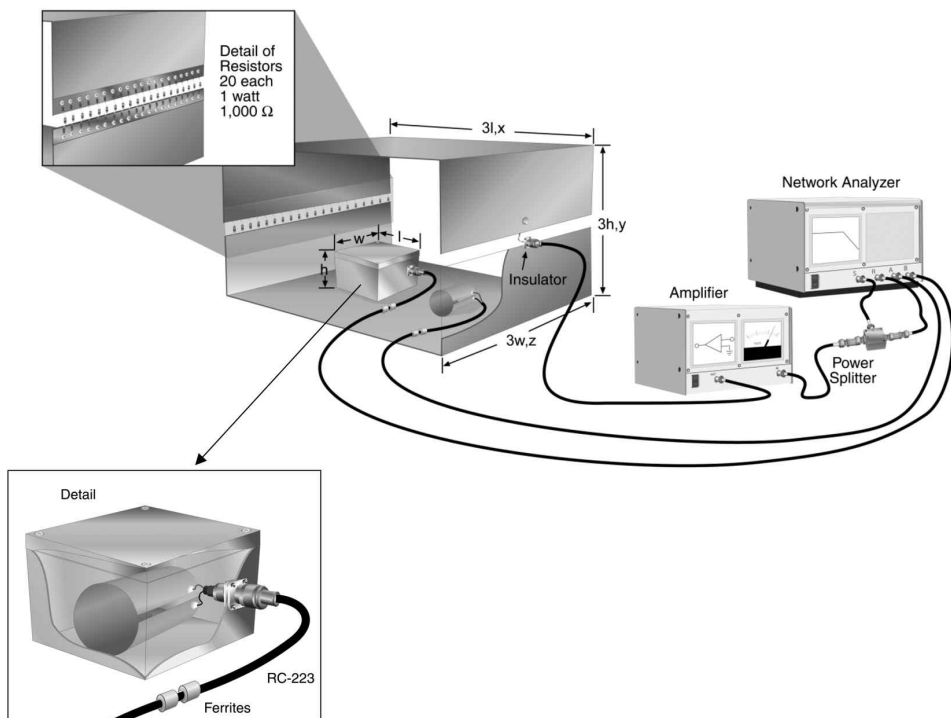


그림 2-18. 전기적/물리적 소형인 소형함체의 차폐성능 측정 방법

5절. 소형자계루프 기반 성능 측정 방법

본 절에서는 전기적으로 소형이고 물리적으로 대형 (SL 영역)인 소형 합체에 대한 차폐 효과 측정 방법에 대해서 기술한다. SL 영역에 포함되는 소형 합체의 차폐 성능은 소형 자계 루프를 이용하여 측정한다.

송신용 소형 자계 루프는 신호발생기에 연결하고 수신용 소형 자계 루프는 감쇠기를 통하여 수신기에 연결한다. 이때 측정하려고 하는 소형합체로부터 각각 0.3m를 이격한다. 그리고 소형 자계 루프는 외부에 영향을 최소화하기 위하여 차폐 케이블을 이용하여 신호 발생기 또는 수신기와 연결한다. 소형 자계 루프는 0.3m 지름의 크기를 갖는다.

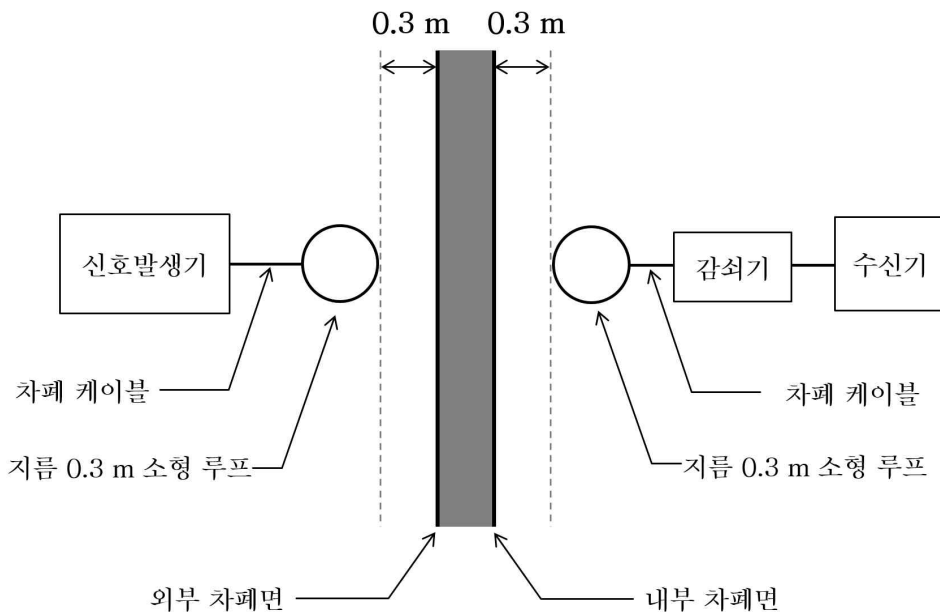


그림 2-19. 소형자계루프 기반 차폐효과 측정

그림 2-21은 단일 문에 대한 차폐 성능 측정 방법을 보여준다. 그림에서 보는 것처럼 문 틈 사이에 소형 자계 루프를 위치하고 차폐 값을 측정한다. 이때, 높이 방향으로는 문의 길이의 $1/3$ 마다 측정을 수행하고 가로 방향으로는 문의 폭의 $1/2$ 마다 측정을 수행한다. 그림 2-20에 있는 양면형 문에 대해서도 이에 준해서 측정을 수행한다. 그림 2-22와 그림 2-23은 패널 이음부에 대한 방법을 보여준다.

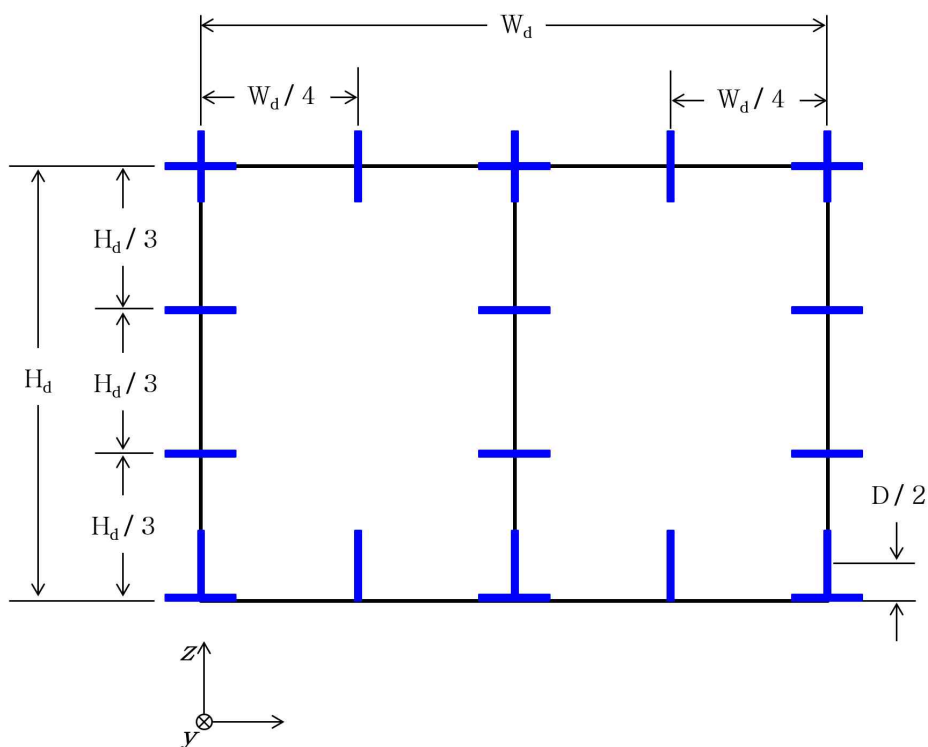


그림 2-20. 양문 측정 방법

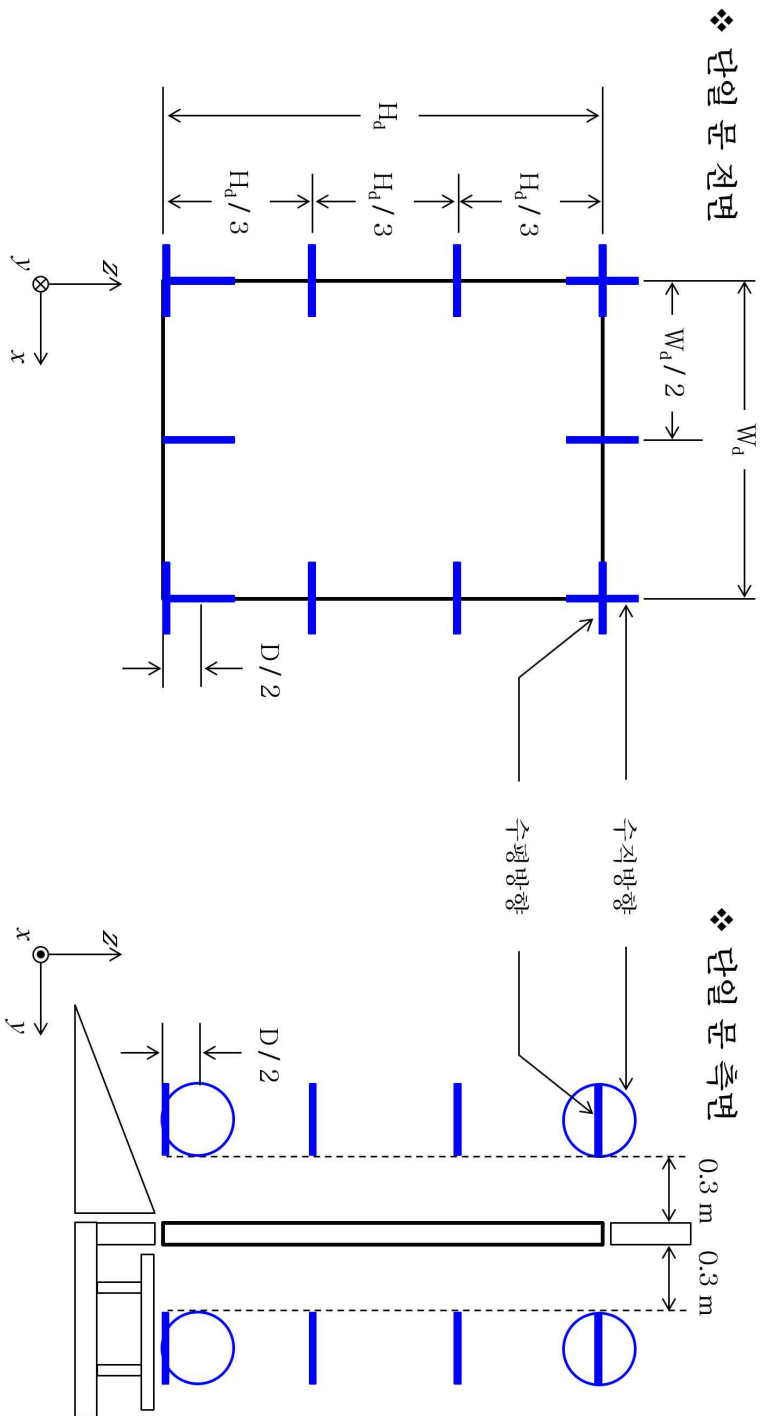


그림 2-21. 단일 문 측정 방법

3장. 소형 송수신기와 잔향챔버를 이용한 차폐성능 측정방법 비교·분석

1절. 전자파 잔향실 (0.5GHz 하한) 기반 차폐성능 측정

본 장에서는 소형 합체에 대해서 무반사실과 전자파 잔향실 (0.5 GHz 하한 주파수, 한국전자통신연구원 보유시설)에서 측정한 결과를 비교 분석한다. 아래 그림은 무반사실과 전자파 잔향실에서 측정한 시험 구성을 보여준다. 무반사실 구성을 살펴보면, 소형합체, 송신 안테나, 소형합체 내 미소 모노폴 안테나, 벡터 회로망 분석기로 구성되어 있다. 아래 사진에서 보는 것처럼 혼 안테나를 3m 이격 시키고 벡터 회로망 분석기를 통하여 송수신 비율을 구하였다. 기준 값 측정은 소형 합체 내에 배치한 미소 모노폴과 동일한 모노폴을 이용하여 측정하였다.

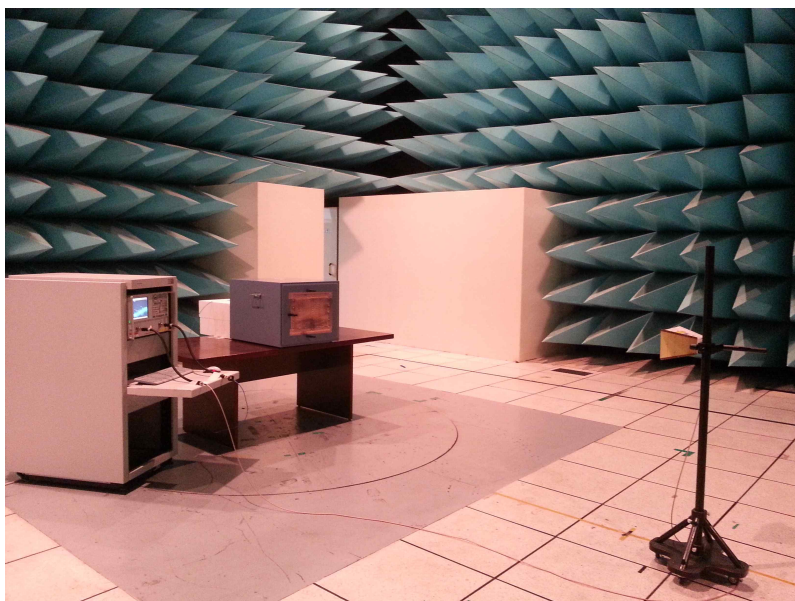


그림 3-1. 소형합체 차폐효과 무반사실 측정 구성



그림 3-2. 소형함체 뒷면 미소 모노폴 연결부



그림 3-3. 소형 함체 내부 미소 모노폴



그림 3-4. 차폐효과 기준값 측정

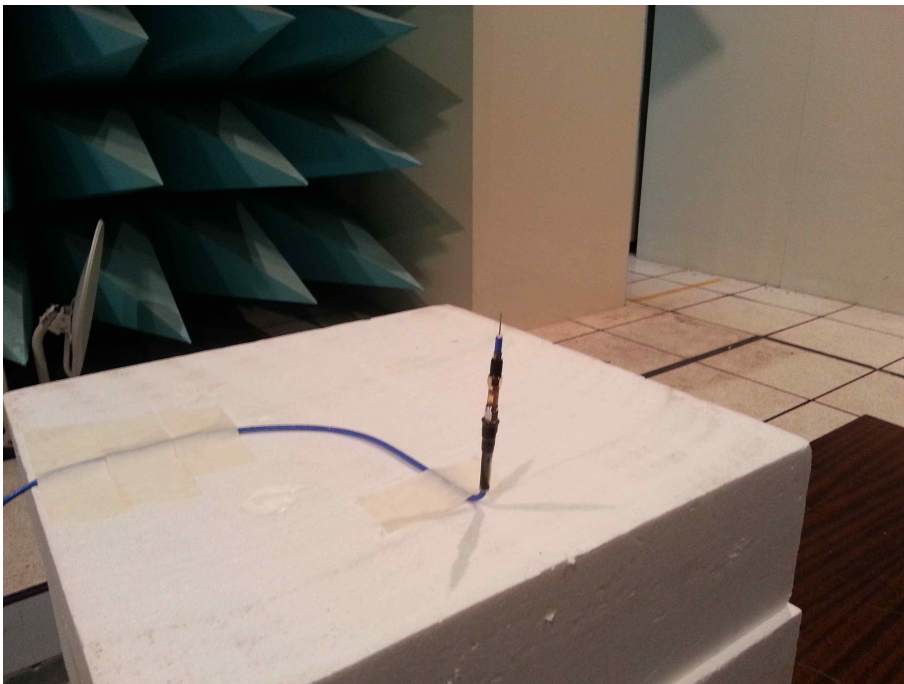


그림 3-5. 기준값 측정을 위한 미소 모노폴 안테나



그림 3-6. 소형합체 차폐효과 전자파 잔향실 구성



그림 3-7. 전자파 잔향실 시험 구성 내부



그림 3-8. 미소 모노폴 프로브

그림 3-2와 3-3에는 소형함체에 설치한 미소 모노폴 안테나 모습을 보여주고 있다. 미소 모노폴은 SMA 케이블을 이용하여 제작하였다. 미소 모노폴 안테나의 신호선 길이는 측정 최대 상한 주파수의 파장에 해당하는 길이보다 충분히 작도록 10 mm 결정하였다 [5]. 그림 3-4와 3-5에는 무반사실 기반 차폐효과 측정 기준값을 위한 시험구성을 보여준다. 전자파 잔향실을 이용한 소형함체 차폐효과 측정 구성은 그림 3-6과 그림 3-7에 도시되어 있다. 앞서 설명한 것과 같이, 전자파 잔향실 내에 송신 안테나와 기준값을 측정하는 수신 안테나 그리고 소형 함체 내 미소 모노폴을 벡터회로망 분석기의 측정 포트에 연결한다. 본 측정에서 사용된 벡터회로망분석기는 2포트 시스템이기 때문에 기준 값과 차폐 값을 동시에 측정하지 못한다. 이런 경우에는 각각 순서대로 측정하도록 표준문서에 기술되어 있다 [1].

송신 안테나와 기준값을 측정하는 수신 안테나는 서로 직접적으로 바라보지 않도록 방향에 주의해서 배치하였다. 표준문서에 기술되었듯이, 가능하면 벽면을 바라볼 수 있도록 하였다. 소형 함체 내에 설치한 벽면 부착형 미소 모노폴 안테나는 그림 3-8에 도시되어 있다. 그림 3-9는 무반사실과 전자파 잔향실에서 측정한 결과를 비교하고 있다. 그림에서 적색 그래프는 무반사실에서 측정된 차폐효

파이고 청색 그래프는 전자파 잔향실에서 측정된 그래프이다. 그림에서 보는 것처럼 무반사실과 전자파잔향실에서 측정한 결과의 상관관계를 파악하기가 어렵다. 두 결과 모두 주파수가 높아질수록 차폐효과 값이 작아지며 이는 주파수가 높을수록 소형합체 내에 침투가 용이함을 나타낸다.

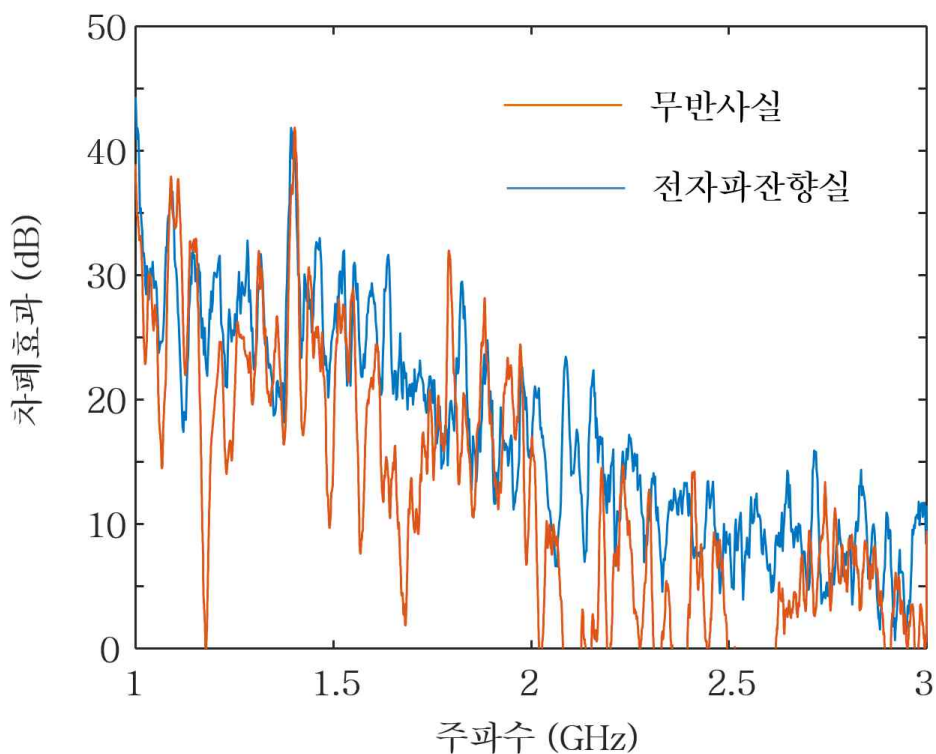


그림 3-9. 무반사실과 전자파잔향실 시험 결과 비교

2절. 전자파잔향실 (80MHz 하한) 기반 차폐성능측정

본 절에서는 국립전파연구원이 보유하고 있는 전자파 잔향실과 무반사실을 이용하여 차폐성능측정을 수행한 결과에 대해서 기술한다. 국립전파연구원의 전자파 잔향실은 크기가 9.3 m x 6.1 m x 4.9 m 이고, 균일장 하한 주파수가 80 MHz이다. 전자파 잔향실 내부에 z축을 기준으로 회전하는 한 개의 교반기가 설치되어 있다. 주파수 교반 방식의 경우에는 시험 가능 영역이 모드 교반 방식으로부터 도출된 시험 영역 (working volume)으로 제한되지는 않지만, 본 연구에서는 주파수 교반 방식의 시험 영역을 모드 교반 방식에서 도출된 시험 영역으로 제한한다. 그 이유는 추후 있을 수도 있는 모드 교반 방식을 이용한 연구와의 확장성을 위해서다.

1. 차폐성능 시험 (1 GHz ~ 3 GHz)

피시험체는 1절 시험에서 사용한 소형합체를 동일하게 사용한다. 전자파 잔향실 (80 MHz 하한)기반 소형합체의 차폐성능 측정 시험 구성은 그림 3-10, 3-11과 같다. 전자파 잔향실 내부에 피시험체인 소형합체와 기준값 수신 안테나, 송신 안테나를 배치하였다. 송신 안테나는 모드 교반 방식 검증을 위해서 사용되었던 위치를 동일하게 적용하였다. 기준값 수신 안테나의 위치는 벽면으로부터 충분히 떨어져 있으며, 안테나 방향이 구석을 향하도록 하였다. 또한 송신 안테나와 기준값 수신 안테나가 서로 직접적으로 마주보지 않도록 하였다. 피시험체는 바닥으로부터 900 mm 이격시켰고 시험 영역의 중앙에 배치하였다. 본 시험에서 적용하는 주파수 교반 방식의 경우에는 벽면에서 $\lambda/4$ 이상 이격시키기만 하면 되지만 보다 안정적인 값을 확보하고 추후 모드 교반방식과의 연구 확장성을 고려하여 시험영역을 기준으로 위치를 정하였다.



그림 3-10. 국립전파연구원 보유 전자파 잔향실 이용 차폐성능 시험구성 1



그림 3-11 국립전파연구원 보유 전자파 잔향실 이용 차폐성능 시험구성 2

차폐성능을 측정하기 위하여 2포트 벡터회로망분석기를 이용하였다. 따라서 기준값 측정과 차폐값 측정을 순차적으로 진행하였으며, 추후 4포트 벡터회로망분석기가 확보된다면 기준값 측정과 차폐값 측정을 동시에 진행할 수 있다. 측정된 기준값과 차폐값을 이용하여 도출된 차폐성능 결과는 그림 3-12와 같다. 아래 그림에서 국립전파연구원의 전자파 잔향실로부터 도출된 차폐성능 값과 한국전자통신연구원 (ETRI)의 전자파 잔향실에서 도출된 결과를 비교하고 있다. 국립전파연구원에서 도출된 결과는 파란색으로 한국전자통신연구원에서 도출된 결과는 붉은색으로 표시되어 있다. 결과 그래프에서 볼 수 있는 것처럼 두 곳에서 측정된 차폐성능 결과가 매우 유사함을 알 수 있다.

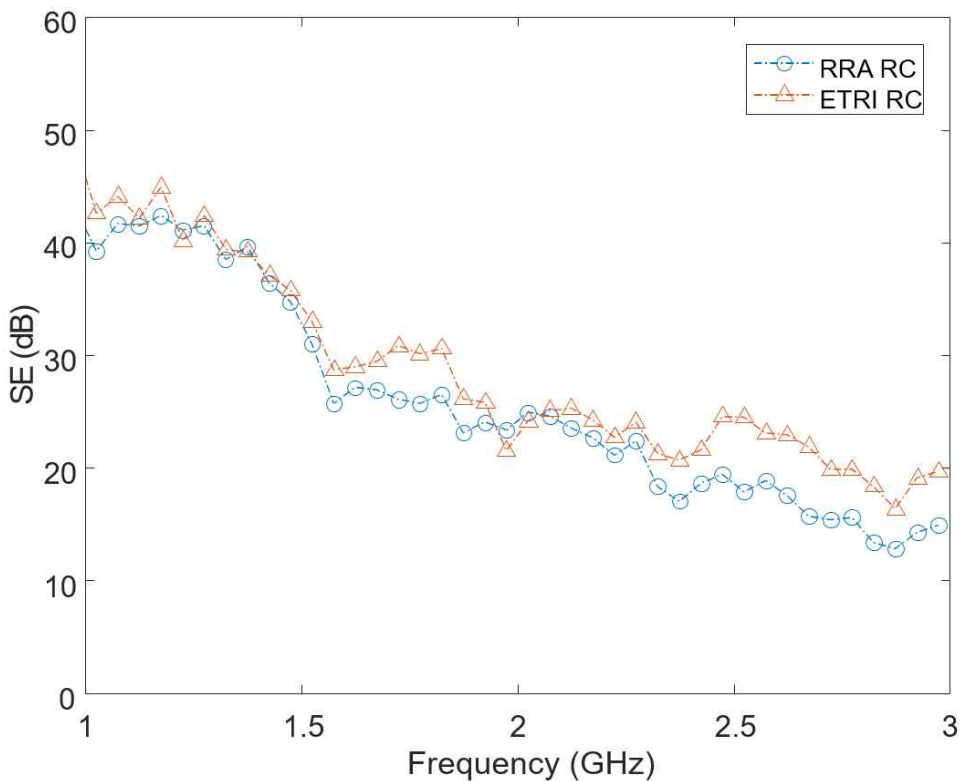


그림 3-12. RRA와 ETRI 시험실에서 도출된 차폐성능 비교

피시험체인 소형함체 중에는 이전 시험과 같이 바닥으로부터 충분히 이격시키기 어려운 경우도 있다. 따라서 바닥으로부터 $\lambda/4$ 거리 정도만 떨어져 있을 경우에 영향을 보기 위하여 소형함체의 높이를 변화하였다. 그림 3-13, 3-14에서 보는 것처럼 바닥으로부터 100 mm 만 이격시킨 후 차폐성능을 도출하였다. 이때, 시험의 일관성을 위하여 소형함체의 방향을 동일하게 유지하였다.

송신 안테나와 기준값 수신 안테나의 위치는 바꾸지 않고 높이 900 mm 일때와 동일하게 유지하였다. 동일한 2포트 벡터회로망분석기를 이용하였으며, 기준값과 차폐값을 순차적으로 측정하였다. 소형함체 벽면에 장착된 모노폴 안테나에 연결된 고주파 케이블도 동일하게 사용하였다. 높이 변화에 의해서 케이블 배치는 다소 변화였으나 전자파 잔향실의 특성으로 인하여 바닥에 밀착된 케이블 배치는 시험에 큰 영향을 주지 않는다.



그림 3-13. 높이 변화 (h=100mm) 영향 분석을 위한 시험 구성 1

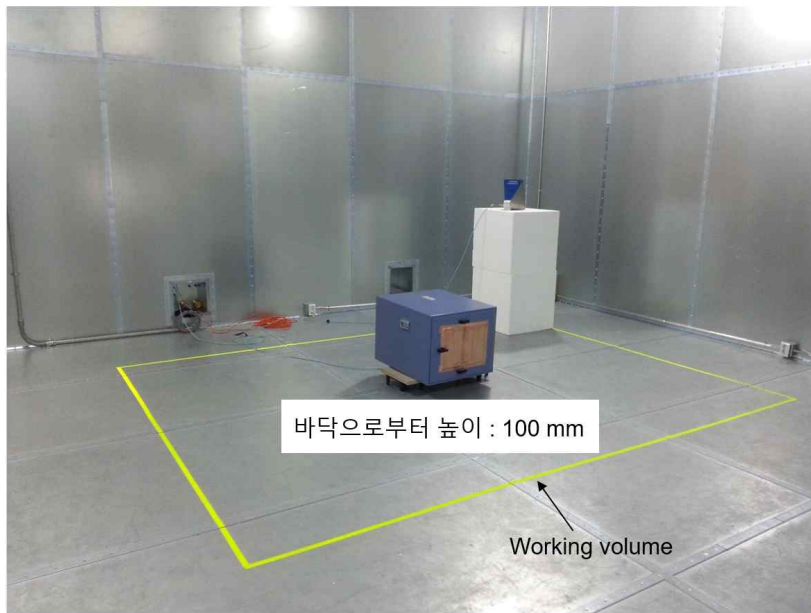


그림 3-14. 높이 영향 분석을 위한 시험 구성 2

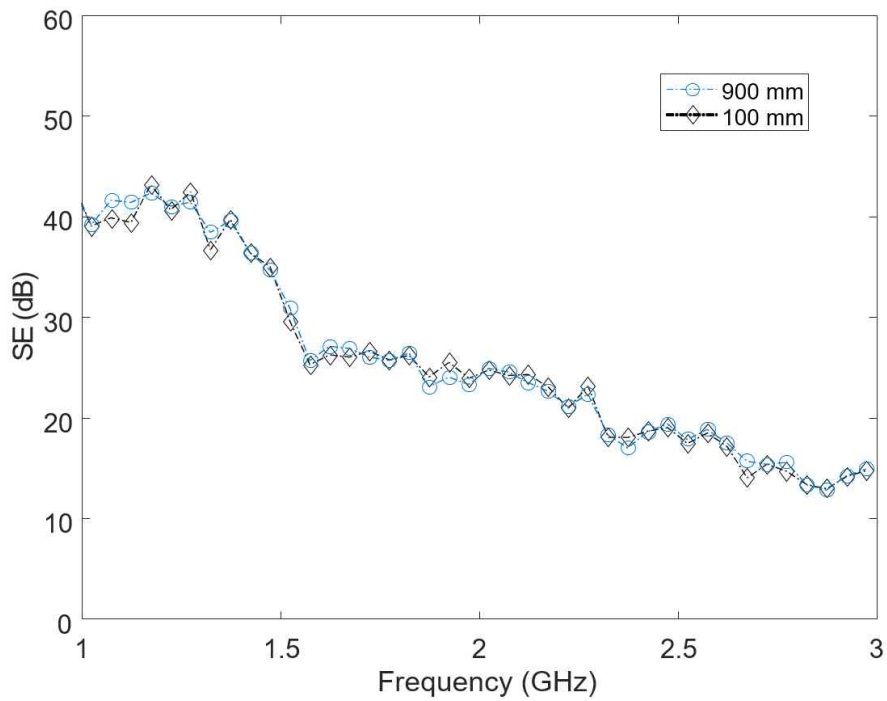


그림 3-15. 피시험체 높이 변화에 따른 차폐성능 비교

2. 차폐성능 시험 (주파수 상한 확장 : 18 GHz 까지)

앞에서는 ETRI 전자파 잔향실로부터 도출된 결과와 상관도를 분석하기 위하여 측정 상한을 3 GHz까지 제한했으나, 지금부터는 전파연구원의 전자파 잔향실을 이용하여 측정 상한을 18 GHz로 확장하였다. 시험 구성에 있어서 피시험체는 이전 시험 구성과 동일하나, 송신안테나와 기준값 수신 안테나는 변경되었다. 피시험체는 동일한 모노폴 안테나를 피시험체 벽면에 장착하였으며, 이전과 동일한 고주파 케이블을 연결하였다. 피시험체의 위치도 시험영역 중앙으로 동일하게 했으며, 높이도 바닥으로부터 900 mm 이격시켰다. 안테나의 경우에는 기존 안테나의 동작대역 제한으로 인하여 동작 대역이 1 GHz ~ 18 GHz 인 혼안테나 (국립전파연구원 보유)로 교체해서 시험을 수행하였다. 안테나의 위치 및 방향은 이전과 동일하게 구성하였다. 그림 3-16은 측정상한이 18 GHz까지 확장된 시험구성을 보여준다.

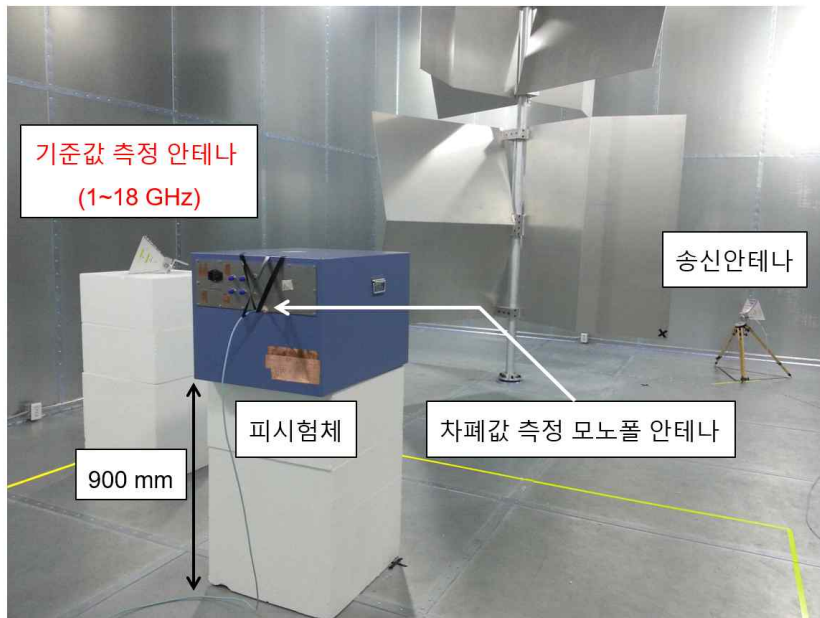


그림 3-16. 차폐성능 (1 GHz ~ 18 GHz) 시험 구성

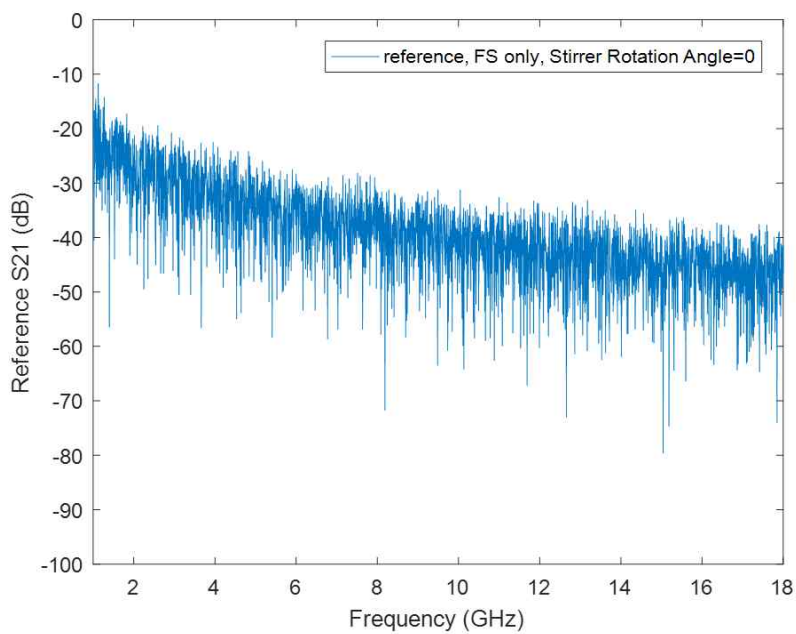


그림 3-17. 18 GHz까지 확장된 기준값 측정결과

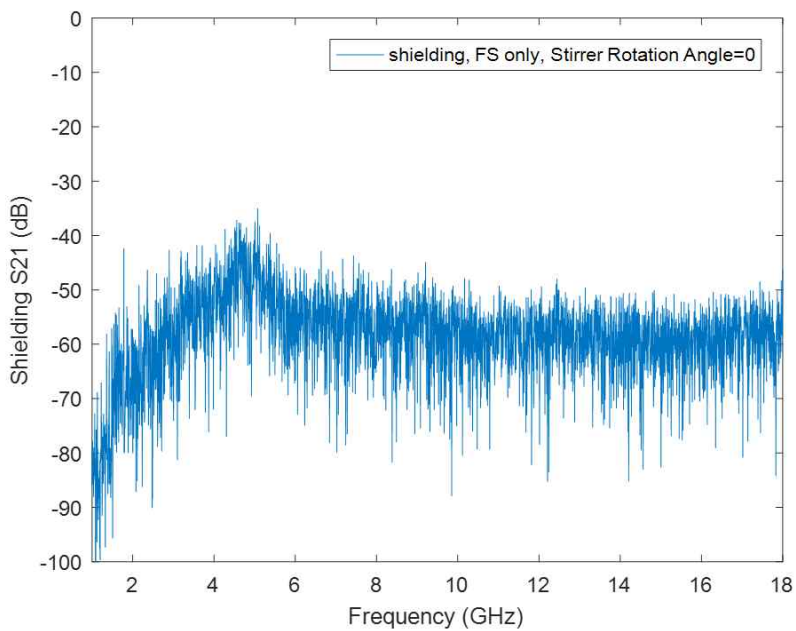


그림 3-18. 18 GHz까지 확장된 차폐값 측정결과

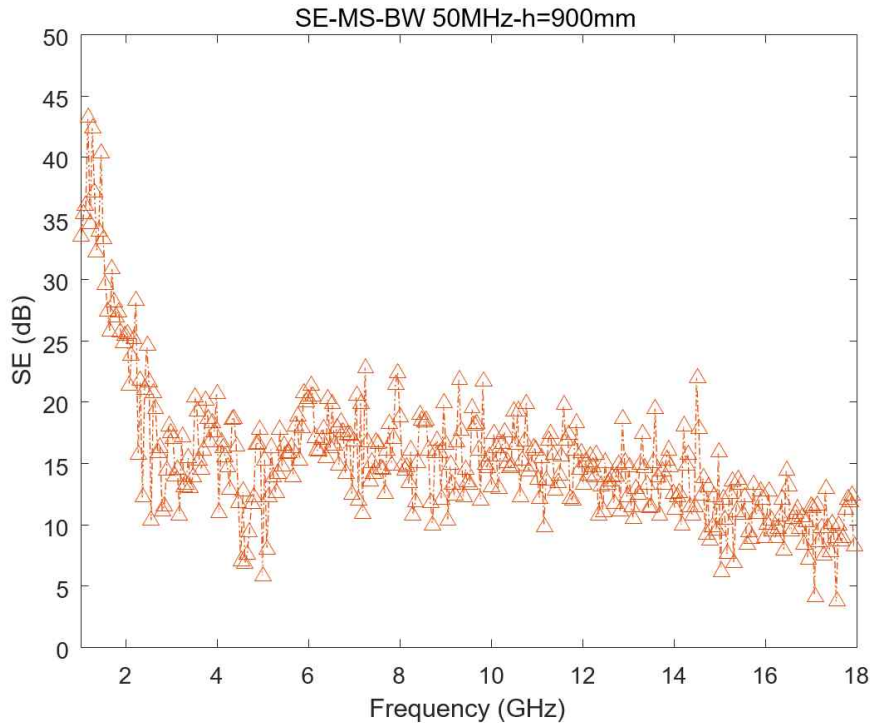


그림 3-19. 18 GHz까지 확장된 차폐성능 도출결과

그림 3-17, 3-18은 18 GHz까지 측정상한이 확장되었을 때, 기준값, 차폐값 측정결과를 보여준다. 이 결과로부터 도출된 차폐성능 결과가 그림 3-19에 주어져 있다. 위 결과는 주파수 교반 대역폭을 50 MHz로 설정하여 구한 결과이다. 주파수가 점점 높아지면서 피시험체의 차폐성능이 변화하는 것을 확인할 수 있다.

소형 EMP 방호시설에 대해서 반무사실에서 측정했을 때 결과를 알아보기 위하여 국립전파연구원이 보유하고 있는 반무사실에서 측정을 수행하였다. 측정방법은 기존 EMP 방호시설의 차폐성능을 측정하기 위하여 수행하는 방법을 적용하였으며, 이 방법은 소형 방호시설을 위한 방법으로 적용가능한지 여부는 확실하지 않다. 하지만 결과를 참고하기 위하여 기존 방법을 준용하여 시험을 수행하였다. 그림 3-20, 3-21에서 보는 것처럼 반무사실에서 소형함체가

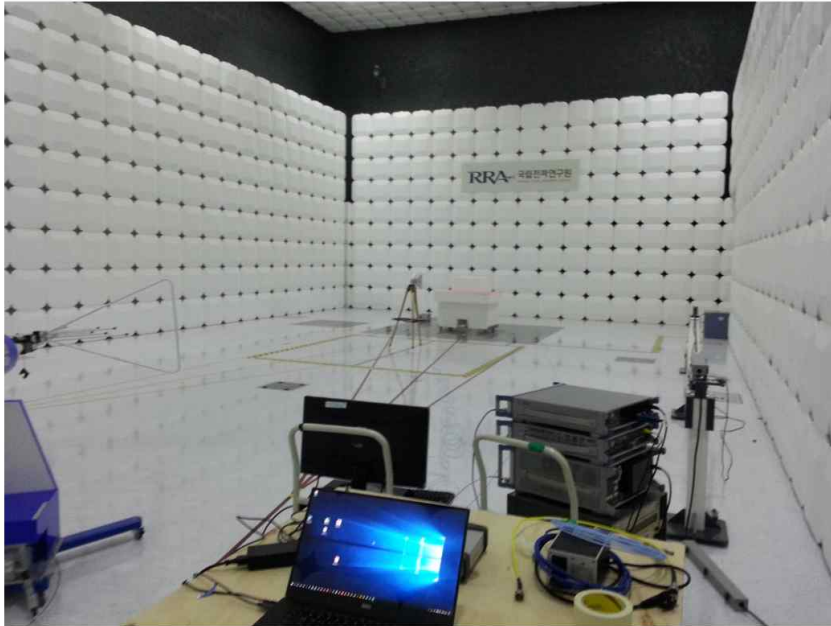


그림 3-20. 반무반사실에서 기준값 측정

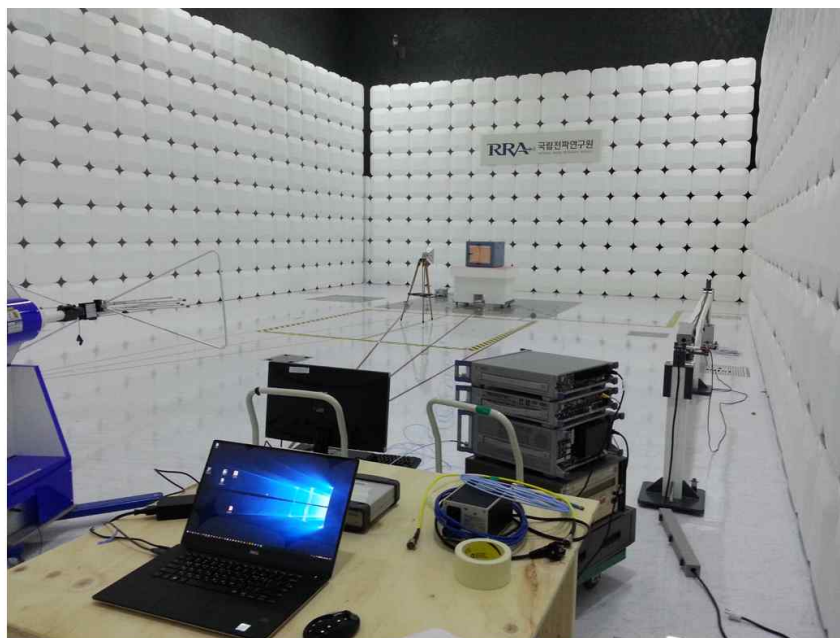


그림 3-21. 반무반사실에서 차폐값 측정

있을 때와 없을 때 결과를 도출하였다. 측정된 기준값 (3-22)과 차폐값 (3-23)을 살펴보면 기대한 결과와 다르게 나오는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 본 시험에 사용된 피시험체에 대해서는 반무반사실을 통한 측정방법은 보완할 필요가 있다고 사료된다.

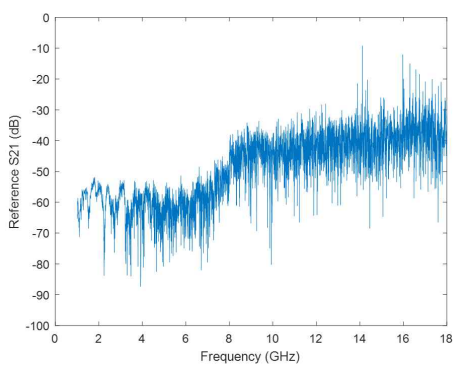


그림 3-22. 기준값 측정결과

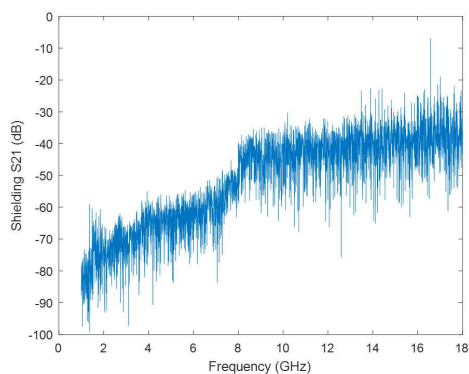


그림 3-23. 차폐값 측정결과

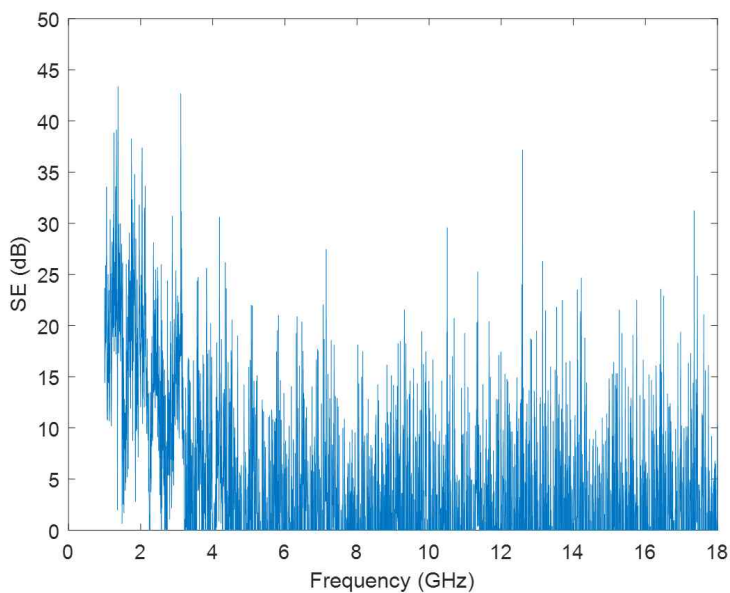


그림 3-24. 반무반사실 측정결과로부터 도출된 차폐성능

3. 차폐성능시험 (피시험체 변경)

차폐성능이 보다 더 우수한 피시험체를 이용하여 차폐성능 시험을 수행하였다. 변경된 피시험체는 전자파 방호용으로 설계된 소형함체로써 이전의 시험에서 사용된 소형함체에 비해서 차폐성능이 우수하다. 이처럼 차폐성능이 우수한 피시험체의 경우 차폐값 측정 시 측정 가능 신호 레벨이 매우 낮기 때문에 이를 높이기 위하여 벡터회로망분석기 출력 포트 (포트 1)에 전력증폭기가 연결되어 신호를 증폭한다. 본 시험에서 사용한 전력증폭기는 이득 40 dB를 가지는 증폭기가 사용되었다. 기준값 측정과 차폐값 측정을 위한 시험구성이 그림 3-25, 3-26에 도시되어 있다. 기존 시험과 차이점은 벡터회로망 분석기의 포트 1에 전력증폭기가 연결되는 것이다. 단일 전력증폭기가 모든 시험 주파수 대역에 대해서 적용할 수 없기 때문에 대역별로 나누어 전력증폭기를 사용하였다. 전력증폭기 1, 2, 3은 각각 0.6 GHz ~ 1 GHz, 1 GHz ~ 4 GHz, 4 GHz ~ 18 GHz 에서 사용 가능하다.

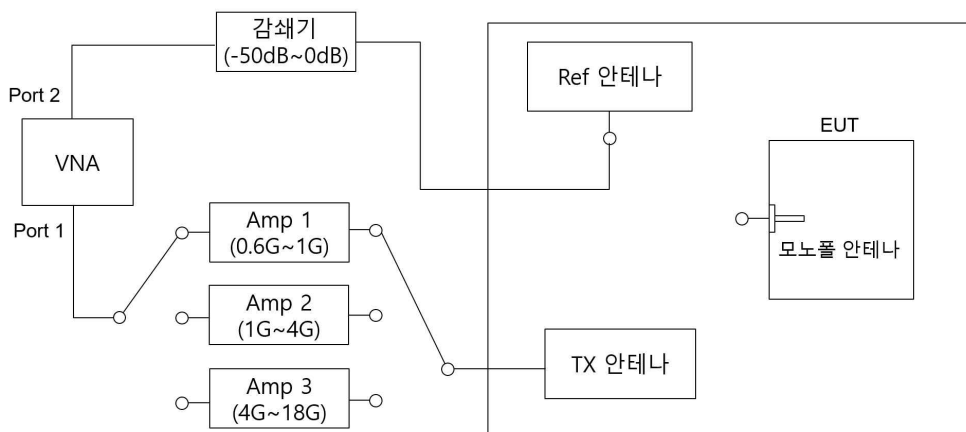


그림 3-25. 기준값 측정을 위한 시험 구성

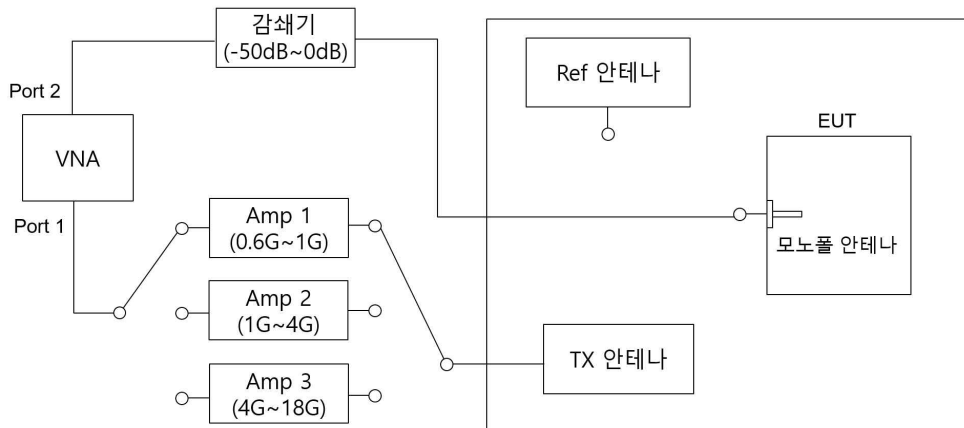


그림 3-26. 차폐값 측정을 위한 시험 구성



❖ 외부 크기 (가로 x 세로 x 높이 (m))

▪ 0.9 x 0.9 x 1.9

❖ 내부 크기 (가로 x 세로 x 높이 (m))

▪ 0.76 x 0.76 x 1.67

❖ Liu 수식을 이용한 60번째 모드 주파수 도출

$$N_s(f) \approx \frac{8\pi^3 abd}{3c^3} - (a+b+d) \frac{f}{c} + \frac{1}{2} = 60$$

여기서, a, b, d는 EUT의 가로, 세로, 높이

$$\Rightarrow f_{60th} = 604 \text{ (MHz)}$$

$$\Rightarrow \text{시험 하한 주파수} = 604 \text{ MHz}$$

$$\Rightarrow \text{모드 밀도} = 0.3 \text{ 개 / MHz}$$

그림 3-27. 피시험체 시험 정보

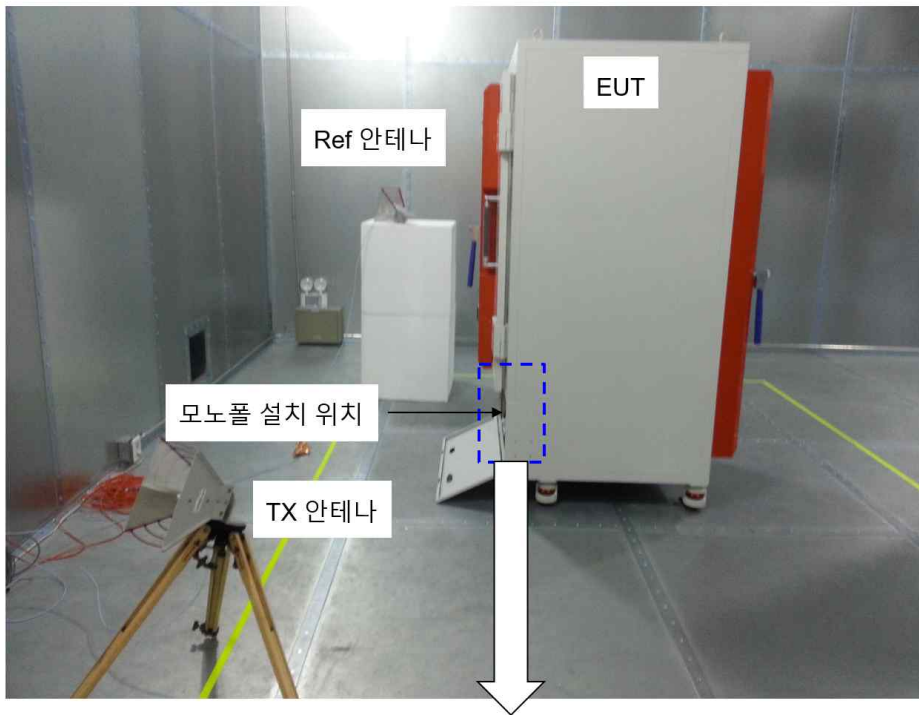


그림 3-28. 피시험체 차폐성능 측정을 위한 시험 구성 사진



그림 3-29. 피시험체 내부 모노폴 안테나 설치 사진

여기서 사용한 피시험체 내부는 0.76 m x 0.76 m x 1.67 m 의 크기를 가진다 (그림 3-27, 3-28 참고). 이 치수를 이용하여 60번째 모드가 발생하는 주파수를 도출해보면 604 MHz가 된다. 따라서 시험 하한 주파수는 이 주파수가 된다. 본 시험에서는 편의상 600 MHz부터 시험을 수행하였다. 그리고 600 MHz에서 모드 밀도는 0.3 개/MHz 이며, 충분한 모드수를 확보하기 위하여 주파수 교반 대역폭은 100 MHz로 하였다.

본 피시험체는 차폐효과가 매우 높은 피시험체로 예상되며, 피시험체 내부에 미소 모노폴 안테나 설치시 다음과 같은 사항을 주의하여 설치하였다 (그림 3-29 참고). 미소 모노폴 안테나가 벽면으로부터 충분히 이격되어 있는지 그리고 주변에 간섭을 일으킬만한 구조물이 있는지 확인하면서 차폐효과 측정결과의 정확도 저하가 최소화 되도록 하였다.

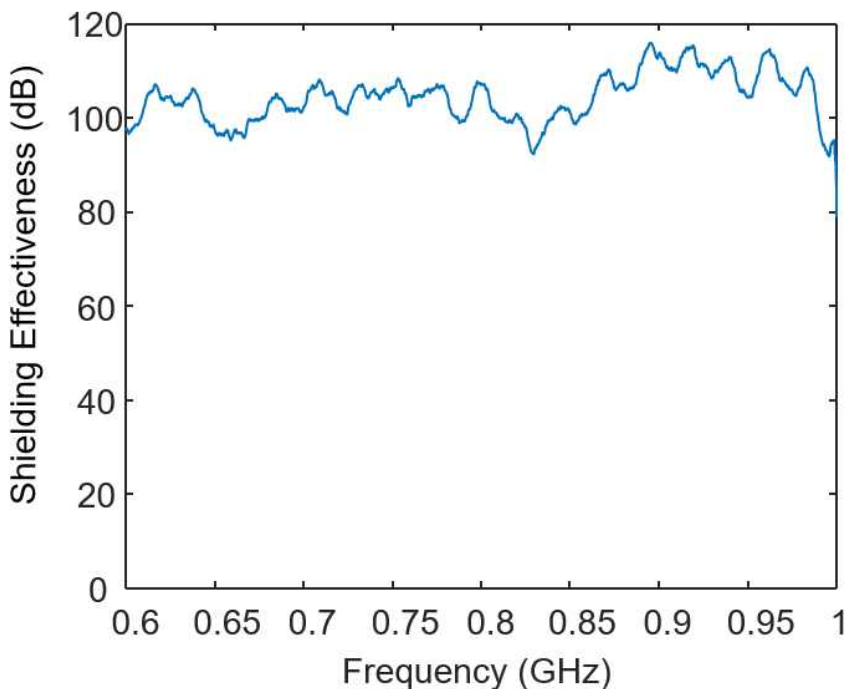


그림 3-30. 0.6GHz~1GHz 차폐성능 도출결과

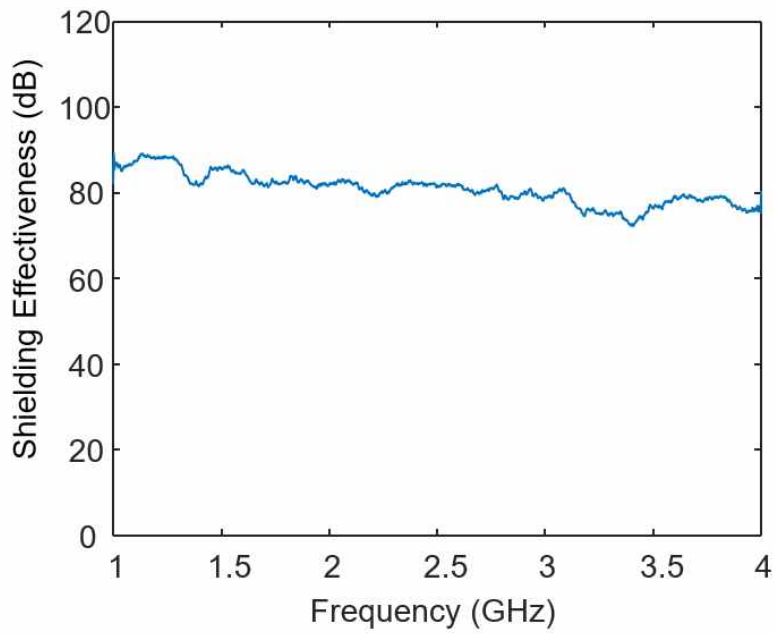


그림 3-31. 1GHz~4GHz 차폐성능 도출결과

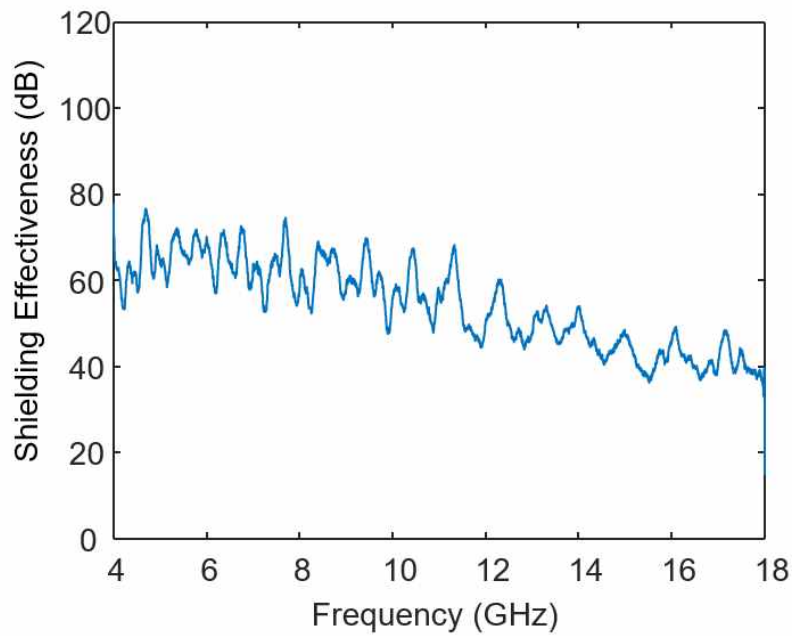


그림 3-32 4GHz~18GHz 차폐성능 도출결과

그림 3-30, 3-31, 3-32는 각 대역별 도출된 차폐성능 결과를 보여준다. 0.6GHz~1GHz 대역에서는 근사적으로 100dB 수준을 기준의 차폐성능을 보여주며 1GHz~4GHz 대역에서는 80dB 이상의 차폐성능을 보여준다. 그리고 4GHz~18GHz의 경우에는 60dB를 시작으로 주파수가 높아질수록 피시험체의 차폐성능이 저하되어 40dB 까지 저하되는 것을 확인할 수 있다. 여기서 1GHz~4GHz 측정결과와 4GHz~18GHz 측정결과의 4GHz에서 연속성을 검토해보면 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이것은 4GHz~18GHz 대역에서 사용된 증폭기의 이득이 충분하지 못해서 차폐값이 과도하게 측정된 것으로 사료된다. 따라서 4GHz~18GHz에서의 송신 신호 감쇠를 충분히 보상할 필요가 있다. 한가지 방법은 현재 사용중인 케이블에 의한 손실을 줄이는 것이다. 본 시험 구성에서 사용된 케이블에 의한 전체 경로 손실은 18GHz에서 30dB 정도이다. 이를 개선하기 위해서는 시험구성을 더 밀도있게 배치하여 고주파 케이블 길이를 최소화하는 것이 필요하며, 케이블 역시 고주파 손실이 적은 제품을 사용하는 것이 필요하다.

4장. 시험 절차서

본 장에서는 소형 EMP 방호시설 성능측정을 위한 시험절차에 대해서 기술한다. 시험절차서 내용은 표준문서 분석 내용과 시험 결과를 바탕으로 작성하였다.

1절. 시험 절차 요약

소형 EMP 방호시설 성능측정을 위한 시험 절차는 아래 표와 같이 시험 전 단계, 시험 수행 단계, 시험 후 단계의 세 단계로 구분된다. 시험 전 단계에서는 시험 수행에 필요한 사항들을 결정한다. 시험 수행에 필요한 사항은 시험 하한 주파수 (f_{60}), 주파수간격 (Δf), 주파수 교반 대역폭 (BWFS) 이다. 시험 수행 단계는 교정 수행, 기준값 측정, 시험값 측정 단계로 이루어진다. 교정수행 단계에서는 벡터회로망분석기에 연결된 케이블 영향을 보정해 준다. 기준값 측정 단계에서는 소형 합체 외부에 위치한 기준 안테나를 이용하여 산란계수 (scattering parameter)를 측정한다. 시험값 측정 단계에서는 소형합체 내부에 위치한 모노폴 안테나를 이용하여 산란계수를 측정한다. 시험 후 단계에서는 앞서 얻어진 측정결과에 주파수 교반 방식 및 안테나 미스매치 보정 방식을 적용하여 차폐성능 값을 얻는다.

시험 순서	상세 내용
1. 시험 전 단계	<ul style="list-style-type: none">- 시험 하한 주파수 (f_{60}) 결정- 주파수간격 (Δf) 결정- 주파수 교반 대역폭 (BW_{FS}) 결정

2. 시험 단계	<ul style="list-style-type: none"> - 교정 수행 - 기준값 측정 - 시험값 측정
3. 시험 후 단계	<ul style="list-style-type: none"> - 주파수 교반 및 안테나 미스매치 보정 적용하여 차폐성능 계산

2절. 시험 절차 상세

2.1 시험 전 단계

2.1.1 시험 하한 주파수 (f60) 결정

- 1) 소형함체 내부의 치수를 측정 : 폭 x 깊이 x 높이 (a x b x d)
- 2) 공진 모드수 (Ns)가 근사적으로 60이 되는 주파수를 아래 수식으로부터 도출

$$N_s(f) = \frac{8\pi f_{60}^3 V}{3c^3} \approx 60 \quad (1)$$

여기서, a, b, d는 함체 내부의 폭, 깊이, 높이임. c는 진공에서의 빛의 속도인 3x10⁸ (m/s)임.

2.1.2 주파수 간격 (Δf) 결정

- 1) 아래 식을 이용하여 모드 간 간격 주파수를 구함

$$\frac{c^3}{8\pi(abd)f_{60}^2} \quad (2)$$

- 2) 측정 장비의 주파수 간격은 하한 주파수에서 계산된 모드 간 간격보다 충분히 작도록 설정

$$\Delta f \ll \frac{c^3}{8\pi(abd)f_{60}^2} \quad (3)$$

2.1.3 주파수 교반 대역폭 (BWFS) 결정

- 1) 모드 밀도 식을 이용하여 충분한 수 (100개 이상)의 모드가 포함되도록 주파수 교반 대역폭 (BWFS)을 결정함

$$BW_{FS} \gg \frac{c^3}{8\pi V f^2} \quad (4)$$

2.1.4 미소 모노폴 안테나 배치 검토

- 1) 미소모노폴 안테나의 설치를 위하여 피시험체 내부형상 검토
- 2) 피시험체 내부 형상은 직육면체이거나 이에 준하는 형상이어야 함. 만약 그렇지 않은 경우에는 시험 결과의 정확도가 저하 될 수 있음
- 3) 미소 모노폴 안테나는 피시험체를 구성하는 면 중에서 바닥과 수직한 면의 중앙에 구멍을 만들어서 설치할 수 있으며,

미소 모노폴 안테나가 이 구멍을 관통하여 배치됨

- 4) 미소 모노폴 안테나의 접지 부분과 피시험체의 벽면을 전도성 물질을 이용하여 연결해야 함 (동테이프, 전도성 에폭시 등 사용 가능). 이때, 미소 모노폴 안테나의 신호부분과 접지부분이 연결되지 않도록 주의해야 하며, 연결 테스트를 통하여 검토해야 함
- 5) 미소 모노폴 안테나를 중앙에 배치하기 어려운 경우에는 벽면으로부터 $\lambda/4$ 이상 떨어지도록 배치. 여기서 λ 는 시험 최소 주파수 (f_{60})의 파장을 의미함
- 6) 미소 모노폴 안테나 근처에 돌출형 구조물이나 개구면 등이 위치하지 않게 주의해야 하며, 최소한 $\lambda/4$ 이상 떨어지도록 배치. 여기서 λ 는 시험 최소 주파수 (f_{60})의 파장을 의미함
- 7) 피시험체 내부 형상이 직육면체가 되도록 불필요한 부분은 제거해야 함.

2.2 시험 단계

안테나 및 전력증폭기 동작 대역의 제한으로 인하여 시험 하한 주파수 (f_{60})에 따라서 시험 대역을 나누어 시험을 수행한다.

2.2.1 교정 단계

시험장비

- 아래 표와 같은 시험장비를 준비함

순 번	장비명	규격	설치 장소
1	벡터 회로망 분석기 (Vector Network Analyzer; VNA)	<ul style="list-style-type: none"> - 측정영역 : 80MHz ~ 18GHz - 동적범위 : 110 dB 이상 - 출력 전력 : 0 dBm 이상 - 내장 포트 : 2 포트 또는 4 포트 - 수량 : 1 EA 	전자과 간향실 외부
2	전력 증폭기 세트	<ul style="list-style-type: none"> - 동작주파수 : 80MHz ~ 18GHz - 이득 : 30 dB 이상 - 출력전력 : 40 dBm - 수량 : 대역별 1 세트 	
3	감쇠기	<ul style="list-style-type: none"> - 감쇠범위 : 0 dB ~ 100 dB - 감쇠 대역 : 80 MHz ~ 18 GHz - 수량 : 1 EA 	
4	고주파 케이블 (간향실 외부용)	<ul style="list-style-type: none"> - 삽입손실 : 18 GHz까지 1m 당 2.0 dB 이하 - 임피던스 : 50옴 - 연결 부위 : 2.92mm, SMA 호환 - 수량 : 4 EA (2포트 VNA 이용 시) - 수량 : 6 EA (4포트 VNA 이용 시) 	
5	대수주기 안테나	<ul style="list-style-type: none"> - 동작 대역 : 300 MHz ~ 1 GHz - 수량 : 1 쌍 	전자과 간향실 내부
6	혼 안테나	<ul style="list-style-type: none"> - 동작 대역 : 1 GHz ~ 18 GHz - 수량 : 1 쌍 	
7	미소 모노폴 안테나	<ul style="list-style-type: none"> - 동작 대역 : 80 MHz ~ 18 GHz - 피시험체 벽면과 모노폴 접지가 연결 가능한 형태 - 입력 : 2.92 mm, SMA 	
8	고주파	<ul style="list-style-type: none"> - 삽입손실 : 18 GHz까지 1m 당 	

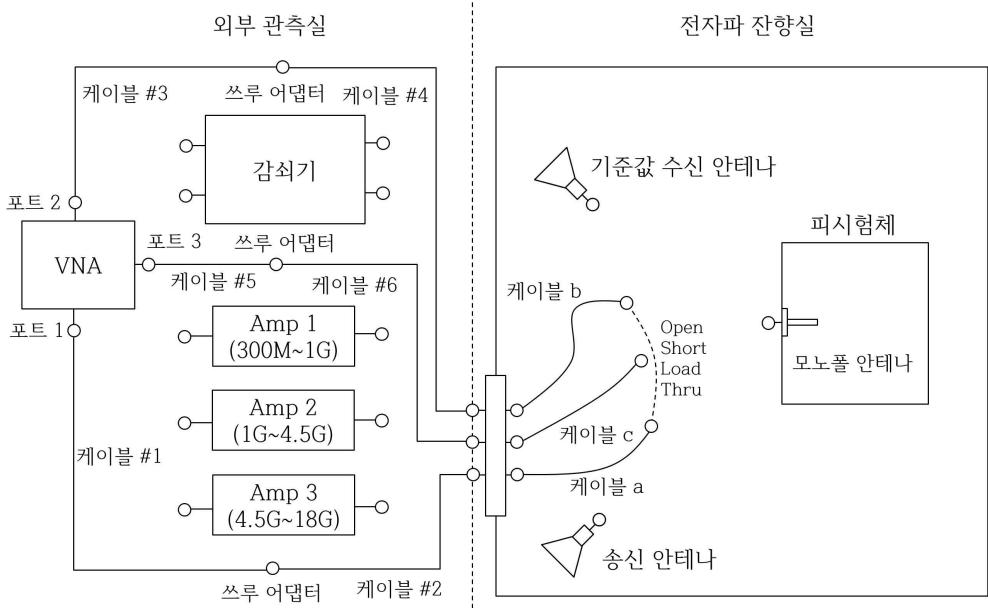


그림 4-2. 2 포트 VNA 기반 교정 단계 수행을 위한 시험 구성

- 외부 관측실에 벡터 회로망 분석기, 감쇠기, 전력 증폭기를 준비함
- 전자파 잔향실 내부에 피시험체, 기준값 측정 안테나, 송신 안테나를 배치함
- 피시험체는 전자파 잔향실에 정의된 시험영역 (working volume) 안에 위치시키며, 안테나와 가능한 멀리 떨어뜨려서 배치함
- 송신 안테나는 전자파 잔향실 내에 벽면으로부터 $\lambda/4$ 이상 떨어뜨려서 배치하며, 안테나 방사 방향이 구석 또는 벽면을 향하도록 배치함. 피시험체와 기준값 수신 안테나를 바라보지 않도록 주의 할 것
- 기준값 수신 안테나의 경우도 전자파 잔향실 내에 벽면으로부터 $\lambda/4$ 이상 떨어뜨려서 배치하며 송신 안테나와 다

른 벽면 또는 구석에 배치할 것. 기준값 수신 안테나의 방향이 송신 안테나를 향하지 않도록 주의할 것

- VNA의 각 포트에 고주파 케이블을 연결
- 고주파 케이블 (1과 2), (3과 4), (5와 6)은 쓰루 어댑터를 이용하여 서로 연결
- 시험 수행 단계에서는 고주파 케이블 (1과 2), (3과 4), (5와 6) 사이에 각각 전력증폭기, 감쇠기, 감쇠기가 연결됨
- 고주파 케이블 2, 4, 6은 전자파 잔향실에 설치되어 있는 bulk head의 커넥터 단자에 연결함
- 전자파 잔향실 내 고주파 케이블 a, b, c의 한 쪽 끝은 전자파잔향실 bulk head의 커넥터 단자에 연결하고 다른 한 쪽 끝은 교정 단계에 따른 open, short, load, thru 단자를 연결함

교정 절차

- 1) 시작 주파수 (fstart)와 종료 주파수(fstop) 설정 (fstart)
- 2) 측정 포인트 지정 :

$$(\text{Number of points}) = \{(f_{\text{stop}} - f_{\text{start}}) / \Delta f\} - 1$$

여기서,

$$\Delta f << \frac{c^3}{8\pi(abd)f_{60}^2}$$

- 3) Average 기능 설정 및 횟수 지정 (예를 들어서, 100 번)
- 4) IF bandwidth 설정 (예를 들어서, 10 kHz)
- 5) Average와 IF bandwidth 설정은 시험 시간을 고려하여 일부 수정 가능)
- 6) Calibration wizard 실행
- 7) Calibration kit 설정

- 8) Full 2 port (또는 4 port) calibration 설정
- 9) SOLT, TRL등에 따라서 VNA에서 가이드 해주는대로 해당 포트에 Term을 연결하고 교정 수행
- 10) 위 단계가 끝나면 교정 완료

2.2.2 기준값 및 차폐값 측정

이 단계에서는 차폐성능 도출을 위한 기준값과 차폐값을 측정한다.

시험 구성

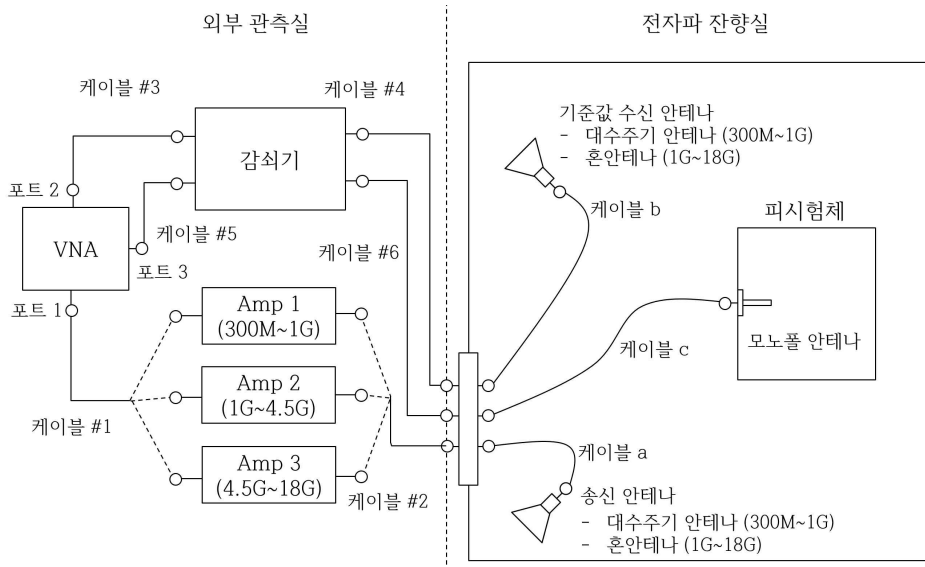


그림 4-3. 기준값 측정을 위한 시험 구성

- 교정 단계에서 사용한 장비 구성을 이용함 (그림 4-3)
- 전자파잔향실 내부에 피시험체, 기준값 측정 안테나, 송신 안테나를 배치를 재확인함
- 이때, VNA의 출력을 홀드한 상태로 전자파 잔향실 내부에 출입해야 하며, 전자파 잔향실 출입전 항상 VNA 출력이 홀드 되어 있는지 반드시 확인할 것
- 피시험체는 전자파 잔향실에 정의된 시험영역 (working volume) 안에 위치시키며, 안테나와 가능한 멀리 떨어뜨려서 배치함
- 송신 안테나는 전자파 잔향실 내에 벽면으로부터 $\lambda/4$ 이상 떨어뜨려서 배치하며, 안테나 방사 방향이 구석 또는 벽면을 향하도록 배치함. 피시험체와 기준값 수신 안테나를 바라보지 않도록 주의 할 것
- 기준값 수신 안테나의 경우도 전자파 잔향실 내에 벽면으로부터 $\lambda/4$ 이상 떨어뜨려서 배치하며 송신 안테나와 다른 벽면 또는 구석에 배치할 것. 기준값 수신 안테나의 방향이 송신 안테나를 향하지 않도록 주의할 것
- VNA의 각 포트에 고주파 케이블을 연결
- 고주파 케이블 1과 2는 시험 대역에 따라서 해당하는 전력증폭기에 연결함
- 고주파 케이블 3과 5는 감쇠기 출력에 연결함
- 고주파 케이블 4와 6의 한 쪽 단자는 감쇠기에 다른 쪽 단자는 전자파 잔향실 bulk head에 있는 커넥터에 연결함
- 포트 1은 신호를 송신하며 (케이블 #1 - 전력증폭기 - 케이블 #2 - 케이블 a)를 거쳐서 송신 안테나에 연결됨
- 포트 2는 기준값을 수신하며 (케이블 #3 - 감쇠기 - 케이블 #4 - 케이블 b)를 거쳐서 기준값 수신 안테나에 연결됨. 이때, 감쇠기 값은 100 dB로 설정
- 포트 3는 차폐값을 수신하며 (케이블 #5 - 감쇠기 - 케

- 이블 #6 - 케이블 c)를 거쳐서 미소 모노폴 안테나에 연결됨. 이때, 감쇠기 값은 100 dB로 설정
- 2 포트 VNA를 사용할 경우 기준값 측정과 차폐값 측정을 순차적으로 수행하며, 각 시험에 맞춰서 케이블 b를 해당 안테나 (기준값 수신 안테나, 미소 모노폴 안테나)에 연결함

시험 절차

- 1) 시험 구성을 확인함
- 2) 전력증폭기의 전원을 인가하고 준비가 될 때까지 대기
- 3) 포트 2, 포트 3에 연결되어 있는 감쇠기의 값을 100 dB로 설정
- 4) VNA 결과창에 S22, S33, S21, S31이 표시되도록 설정
- 5) VNA의 홀드되어 있는 출력을 continuous sweep으로 변경
- 6) S22, S33, S21, S31 결과를 관측
- 7) 감쇠기의 감쇠량을 변화시켜가면서 S21, S31의 값 변화를 관측
- 8) S21, S31 값이 최소 측정 가능한 값 이상으로 되도록 감쇠기 감쇠량을 조정
- 7) 측정이 완료될 때까지 대기 (Average 횟수 도달)
- 8) VNA의 출력을 홀드 (sweep 옵션)
- 9) S22, S33, S21, S31 결과 값을 저장

2.3 시험 후 단계

측정 결과를 이용하여 식 (5)와 같이 차폐성능을 도출한다. 여기서 S31은 차폐값 측정결과를, S21은 기준값 측정결과를 의미한다. 그리고 S22와 S33는 각각 기준값 측정 안테나와 미소 다이폴 안테나의 입력 산란 계수를 의미한다. 입력 산란 계수를 통하여 안테나 미스매치에 의한 영향을 보정해 줄 수 있다.

$$SE = \frac{\langle |S_{31}|^2 \rangle (1 - \langle |S_{22}|^2 \rangle)}{\langle |S_{21}|^2 \rangle (1 - \langle |S_{33}|^2 \rangle)} \quad (5)$$

여기서,

$$\langle |S_{21}|^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_{21}(f_i)|^2, \quad (6)$$

벡터회로망분석기로부터 측정된 기준값 측정결과인 각 주파수에 해당하는 크기 값을 제공하여 앞서 설정한 주파수 대역폭 값만큼 평균을 내는 과정

$$\langle |S_{31}|^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_{31}(f_i)|^2, \quad (7)$$

벡터회로망분석기로부터 측정된 차폐값 측정결과인 각 주파수에 해당하는 크기 값을 제공하여 앞서 설정한 주파수 대역폭 값만큼 평균을 내는 과정

$$\langle |S_{22}|^2 \rangle = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{22}(f_i) \right|^2, \quad (8)$$

기준값 측정 안테나 입력 미스매치로 인한 영향을 보정해주기 위한 항이다. 벡터회로망분석기로부터 측정된 기준값 측정안테나의 입력 산란계수 값에 대하여 각 주파수별로 주어지는 입력 산란계수의 크기와 위상값을 모두 고려하여 주파수 대역폭 값만큼 평균을 구한다. 그리고 그 결과값에 대하여 제공한 값을 구하여 전력을 의미할 수 있도록 변환한다.

$$\left| \langle S_{33} \rangle \right|^2 = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{33}(f_i) \right|^2 \quad (9)$$

차폐값 측정 안테나 입력 미스매치로 인한 영향을 보정해주기 위한 항이다. 벡터회로망분석기로부터 측정된 기준값 측정안테나의 입력 산란계수 값에 대하여 각 주파수별로 주어지는 입력 산란계수의 크기와 위상값을 모두 고려하여 주파수 대역폭 값만큼 평균을 구한다. 그리고 그 결과값에 대하여 제공한 값을 구하여 전력을 의미할 수 있도록 변환한다.

5장. 결 론

본 연구는 소형 EMP 방호시설 성능측정 방법에 대한 것이다. 소형 EMP 방호시설에 대한 성능측정 방법 표준이 없는 관계로, 소형 합체 차폐효과에 대해서 기술하고 있는 기존 표준 문서를 분석하고 이를 활용하여 소형 EMP 방호시설 성능측정 방법을 개발한다. 본 보고서에서는 기존 표준 문서에서 기술하고 있는 소형 합체 차폐효과 방법에 대하여 면밀하게 분석하고 있다. 특히 소형합체의 전기적, 물리적 크기에 따라서 시험방법이 상이해짐을 분석하고 소형합체의 분류 방법 및 각각 영역에서의 시험 방법에 대해서 조사, 분석하였다.

또한 최근 많은 관심을 받고 있는 전자파 잔향실 기반 시험 방법에 대해서 실제 시험을 수행하여 표준문서 내용을 검증하였다. 벡터회로망분석기와 전력증폭기 등을 이용하여 다양한 시험 구성을 하였고 차폐성능이 서로 다른 피시험체를 이용하여 전자파 잔향실 기반 차폐효과 시험 방법에 대하여 분석하였다. 동일한 피시험체를 서로 다른 전자파 잔향실에서 시험한 결과 거의 동일한 차폐성능 값을 도출하였다. 서로 다른 전자파 잔향실에서 이루어진 결과가 매우 유사한 것을 근거로 시험 안정성에 대한 신뢰를 보다 높일 수 있었다.

앞서 기술한 소형합체 차폐성능 시험에 대한 표준 문서 분석 내용과 이를 기반으로 수행한 실제 시험 내용을 이용하여 소형 EMP 방호시설에 대한 성능측정 방법 절차에 대하여 제안하였다. 추후, 이 절차를 기반으로 한 성능측정 방법을 보다 다양한 소형 EMP 방호시설에 적용함으로써 연구의 완성도를 더 높일 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] IEEE-STD.-299.1-2013 (IEEE Standard method for measuring the shielding effectiveness of enclosures and boxes having all dimensions between 0.1m and 2m)
- [2] IEC 61587-3 (Mechanical structures for electronic equipment Part 3 - Electronic shielding performance tests for cabinets, racks, and subracks)
- [3] B. H. Liu, D. C. Chang, and M. T. Ma, "Eigenmodes and the composite quality factor of a reverberating chamber," U.S. Nat. Bur. Stand. Tech. Note 1066, 1983.
- [4] J. Ladbury, G. Koepke, D. Camell, Evaluation of the NASA Langley Research Center Mode-Stirred Chamber Facility, Jan. 1999, Nat. Inst. Standards Technol.
- [5] C. L. Holloway, D. A. Hill, M. Sandroni, J. Ladbury, J. Coder, G. Koepke, A. C. Marvin, Y. He, "Use of reverberation chambers to determine the shielding effectiveness of physically small electrically large enclosures and cavities", IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 50, no. 4, pp. 770-782, Nov. 2008.
- [6] A. Gifuni, G. Ferrara, M. Migliaccio, A. Sorrentino, "Estimate of the shielding effectiveness of an electrically large enclosure made with pierced metallic plate in a

well-stirred reverberation chamber", Progress Electromagn. Res. C, vol. 44, pp. 133-144, 2013.

- [7] Qian Xu, Yi Huang, Xu Zhu, Lei Xing, Zhihao Tian, Chaoyun Song, "Shielding Effectiveness Measurement of an Electrically Large Enclosure Using One Antenna", Electromagnetic Compatibility IEEE Transactions on, vol. 57, pp. 1466-1471, 2015, ISSN 0018-9375.
- [8] M. Anon Cancela, S. Fernandez Romero, A. Lopez Morales, "Research on shielding effectiveness measurement techniques using nested reverberation chambers", Electromagnetic Compatibility - EMC Europe 2009 International Symposium on, pp. 1-4, 2009.
- [9] Domenico Alessandro Lampasi, Maria Sabrina Sarto, "Shielding Effectiveness of a Thick Multilayered Panel in a Reverberating Environment", Electromagnetic Compatibility IEEE Transactions on, vol. 53, pp. 579-588, 2011, ISSN 0018-9375.
- [10] Gregory B. Tait, Carl Hager, Michael B. Slocum, Michael O. Hatfield, "On Measuring Shielding Effectiveness of Sparsely Moded Enclosures in a Reverberation Chamber", Electromagnetic Compatibility IEEE Transactions on, vol. 55, pp. 231-240, 2013, ISSN 0018-9375.

연구결과 활용계획서

연구과제명	소형 EMP 방호시설 성능측정방법 연구					
연구분야						
연구구분						
연구책임자1	소 속	국립한 경대학 교	직위· 직급	조교수	성 명	김명희
연 구 기 간	2016.04.15.~2016.11.25					
주요활용 분 야	소형 EMP 방호시설 성능 인증분야					
국 내 외 공업소유권	구 분	명 칭	출원 일	등록 일	기타	
학술지발표 현 황	구분	학술지명	신청 일	게재 일	기 타	
타 연구로 활용계획						
기타활용 계 획						

소형EMP 방호시설 성능측정방법 연구



국립전파연구원

National Radio Research Agency

520-350 전남 나주시 빛가람로 767

발 행 일 : 2016. 11.

발 행 인 : 유 대 선

발 행 처 : 미래창조과학부 국립전파연구원

전 화 : 061) 338-4414

인 쇄 :

Tel.

ISBN : 979-11-5820-055-8 < 비 매 품 >

주 의

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