

## 제 출 문

본 보고서를 「1GHz~18GHz 대역의 전자파 차폐물질  
표준측정방법에 관한 연구」 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2009. 11. 20.

연구책임자 : 박병권 ( 대림대학교 )

연 구 원 : 박성욱 ( 충북테크노파크 )

신국선 ( 충북테크노파크 )

이상민 ( 충북테크노파크 )

고한웅 ( 충북테크노파크 )

# 요 약 문

1. 과 제 명 : 1GHz~18GHz 대역의 전자파 차폐물질 표준측정방법 연구

2. 연 구 기 간 : 2009. 4. 22 ~ 2009. 11. 20

3. 연구책임자 : 박병권

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. 선진국의 차폐 물질 측정 방법 동향 조사	○ 논문 검색 및 관련이론 파악	박병권													
	○ 규격 검색 및 내용 파악	고한웅													
	○ 세미나나 학회 참석을 통한 동향파악	신국선													
나. 1 GHz ~ 18 GHz 전자파 차폐 성능 측정 방법 연구	○ 물질에 대한 전자파 차폐성능 측정을 위한 기본 원리파악	박병권													
	○ Coaxial line을 이용한 측정법	이상민													
	○ Waveguide를 이용한 측정법	박성욱													
	○ GTEM을 이용한 측정법	신국선													
	○ 파라볼릭 및 혼안테나를 이용한 측정방법	박성욱													
	○ 측정치구 제작 가능성 및 성능 검토	박성욱													
다. 1 GHz 이상 전자파 차폐 성능 측정 시스템 구축 방안 연구	○ 측정치구의 제작가능성 검토	고한웅													
	○ 보유 장비의 활용을 통한 시험 검토	고한웅													
	○ 측정방법 파악 후 절차서 마련	고한웅 신국선													
라. 최종보고서작성		고한웅 신국선													
분기별 수행진도(%)				10 %		30 %		50 %		10 %					

#### 나. 세부 과제별 추진사항

- 1) 연구수행 계획 세분화 완료
- 2) 선진국의 차폐물질 측정방법 동향 조사 완료
- 3) 1GHz-18GHz 대역의 전자파 차폐물질 표준 측정방법 현황 및 기술동향 분석 완료
- 4) 1GHz-18GHz 전자파 차폐성능 측정방법 연구
  - 물질에 대한 전자파 차폐성능 측정을 위한 기본 원리 파악 완료.
  - Coaxial line을 이용한 측정법 검토 완료
  - Waveguide를 이용한 측정법 검토 완료
  - GTEM cell을 이용한 측정법 검토 완료
  - 혼안테나를 이용한 측정방법 검토 완료
- 5) 측정치구 제작 가능성 및 성능 검토 완료
- 6) 보유 장비의 활용을 통한 시험 검토 완료
- 7) 최종보고서작성 완료

#### 5. 연구 결과

- 1) 선진국의 차폐물질 측정방법 동향 조사 및 분석
- 2) 1GHz-18GHz 대역의 전자파 차폐물질 표준 측정방법 현황 및 기술동향 파악 및 분석
- 3) 1GHz-18GHz 대역의 전자파 차폐측정법의 원리 파악 및 응용 연구
- 4) 여러 시험 방법에 대한 장단점 파악 응용가능성 검토
- 5) 1GHz~18GHz대역의 차폐성능 측정치구의 상용제품 검토 및 제시
- 6) 기존 GTEM Cell이 있을 경우 업그레이드 방안 제시
- 7) 1GHz~18GHz대역의 프로토 타입 차폐율측정치구(동축선 타입) 제작 후 성능 측정

## 6. 기대효과

궁극적으로는 1GHz-18GHz 대역의 전자파 차폐효과측정법의 원리 파악 및 응용관련 연구를 진행함으로써 물질특성 값 측정분야와 관련 산업분야에 진흥을 촉진할 수 있다. 구체적으로 현재 세계적인 물질의 차폐효과 측정기술 추세를 검토함으로써 국내실정에 맞추어 적용 가능한 방법을 정할 수 있으며 원리를 파악하여 상황에 맞는 측정치구 제작 및 기술 적용을 할 수 있다.

## 7. 기자재 사용 내역

시설·장비명	규격	수량	용도	보유현황	확보방안	비고
10 m 챔버 (Turn table, Antenna master 포함)	10 m, 18 GHz		EMI 측정	충북테크노파크	무상	
Horn Antenna	1 GHz ~ 18 GHz		EMI 측정	충북테크노파크	무상	
M/W Signal Generator	18 GHz		EMI 측정	충북테크노파크	무상	
전계강도 측정기	26.5 GHz		EMI 측정	충북테크노파크	무상	
네트워크 분석기 (유전율 측정 kit 포함)	40 GHz		유전율 측정	충북테크노파크	무상	
시뮬레이션 Tool	SI wave, HFSS		모델링 & 시뮬레이션	충북테크노파크	무상	

## 8. 기타사항

## 최종보고서 초록

국문 초록		
<p>차폐효과 측정기술은 측정의 재현성과 측정환경의 명확한 규정이 어렵기 때문에 아직 세계적으로 명확한 방법과 정확도를 규정하는 규격이 나와 있지 않은 상태이며 관련 응용기술을 바탕으로 상황에 맞게 치구들이 제작되고 있는 실정이다.</p> <p>본 연구 보고서는 1GHz~18GHz대역에서의 전자파 차폐물질의 표준측정방법에 대한 세계적 기술 동향 및 관련 규격을 조사하여 명시하였다. 또한 차폐효과 측정에 대한 기본 원리 및 치구 제작 기술을 고찰하면서 실제 제작되어 판매되고 있는 치구들을 조사하여 제시하였으며 제작가능성을 검토하여 시뮬레이션 후 동축선 형태의 프로타입 치구를 제작 측정하여 보았다.</p>		
영문 초록		
<p>There is no standard that state a definite method for shielding effectiveness all over the world, Because The technique relative to Shielding effectiveness is difficult to guarantee Reproducibility and to prescribe definite measurement environment.</p> <p>In this report, The standard and technique for Shielding effectiveness in the range of 1GHz~18GHz are stated. In addition to while considering the principal and technique of shielding effectiveness measurement, some products for 1GHz~18GHz is presented. After simulating, prototype Circular Coaxial Transmission_line holder for 1GHz~18GHz is fabricated and measured.</p>		
색 인 어	한글	전자파 차폐효과, 전자파 차폐율, 평면형물질
	영문	Electromagnetic shielding effectiveness, planar materials

# SUMMARY

본 보고서에서는 물질의 차폐효과(SE)를 측정하는 기본 원리 및 측정 방법, 관련 치구등에 대해 정리 하였다. 차폐효과측정은 측정하고자 하는 전원의 원천에 따라 far-field SE와 near-field SE로 구분되고 측정방법 또한 다르게 해야한다.

far-field SE측정의 경우 Continuous-conductor Circular Coaxial Transmission\_line holder를 이용한 측정법, Flanged Circular Coaxial Transmission\_line holder를 이용한 측정법, Time\_domain 측정법, 복소 유전율로부터 차폐효과 측정법, 사각도파관을 이용한 측정법, Nested Reverberating Chamber를 이용한 측정법등을 소개하였다.

near-field SE측정은 DUAL TEM CELL(DTC)을 이용한 측정법, Reverberating Chamber안에 개구면을 가지는 TEM cell을 이용한 측정법을 소개하였다.

또한 응용가능한 1-18GHz대역에서의 차폐효과 측정방법을 소개하면서 관련 제품을 개발하여 판매하고 있는 업체를 조사하여 명시하였다. 축소된 Flanged Circular Coaxial Transmission\_line holder는 치구 하나로 500MHz-18GHz까지 측정가능한 제품이 개발 되어 판매되고 있다. 또한 1-10GHz까지 2개의 치구를 사용하는 광대역 더블리지 사각도파관의 경우도 GHz대역의 차폐효과 측정법으로 유력하다고 판단된다.

차폐효과 측정관련 기술에 대해 고찰을 하면서 특히나 1-18GHz대역에서 아직까지 국제적으로 표준화 된 규격이 없고 측정 할 때 마다 재현성이 쉽게 확보되지 않음을 알 수 있었다. 정확한 차폐효과 측정을 위해서는 먼저 측정자가 측정하고자 하는 상황을 명확히 판단한 후 적당한 방법을 선택하고 관련 치구사용에 익숙해져야 된다.

GHz대역에서 적용가능 한 방법 중 기존에 GTEM cell을 보유하고 있을 경우 업그레이드하는 방법과 더블리지 도파관이나 동축선 타입의 치구의 시뮬레이션 및 제작가능성을 검토해 보았다. 또한 상용화 되어 쓰이고 있는 7mm커넥터를 이용하여 20MHz-33GHz범위에서 측정할 수 있는 방법을 제안해 보았다.

# 목 차

표 목차 .....	11
그림목차 .....	12
제 1 장 서 론 .....	15
제 2 장 선진국의 차폐물질 측정방법 동향 조사 .....	17
제 1 절 선진국 차폐물질 측정방법 동향 조사 .....	17
제 2 절 전자파의 특성 .....	18
제 3 절 전자파 차폐방법 .....	20
1. 전자파 감쇠 메커니즘 .....	20
2. 전기장 차폐기법 .....	21
3. 자기장 차폐기법 .....	21
제 4 절 전자파 차폐 물질 .....	22
제 5 절 차폐효과(Shielding Effectiveness(SE))의 정의 .....	23
제 6 절 차폐효과 측정기술 일반사항 .....	24
제 3 장 여러 가지 차폐효과 측정법 .....	26
제 1 절 far-field의 차폐효과 측정법 .....	26
1. Circular Coaxial line을 이용한 측정법 .....	26
가. Continuous-conductor Circular Coaxial Transmission_line holder를 이용한 측정법 .....	26
나. Flanged Circular Coaxial Transmission_line holder를 이용한 측정법 .....	29



2. Time_domain 측정법 .....	36
3. 복소 유전율로부터 차폐효과 측정법 .....	37
4. 사각도파관을 이용한 측정법 .....	37
5. Nested Reverberating Chamber를 이용한 측정법 .....	38
제 2 절 Near-field의 차폐효과 측정법 .....	39
1. Near-field 차폐효과 일반사항 .....	39
2. DUAL TEM CELL(DTC)을 이용한 측정법 .....	39
3. Reverberating Chamber안에 개구면을 가지는 TEM cell을 이용한 측정법 .....	41
제 3 절 Reverberation chamber 와 GTEM cell에서 측정된 SE값의 비교 .....	42
1. Reverberation chamber 와 GTEM cell에서의 SE측정 .....	42
2. Z축에서 MSC와 GTEM cell 사이에서의 SE 결과 비교 .....	49
3. Y축에서 MSC와 GTEM cell 사이에서의 SE 결과 비교 .....	51
제 4 장 1-18GHz 전자파 차폐효과 측정방법 연구 .....	52
제 1 절 GTEM cell을 이용한 측정법 .....	53
제 2 절 광대역 더블리지 사각도파관을 이용한 측정법 .....	53
1. 더블리지 도파관 이론 .....	53
2. 더블리지 도파관을 이용한 차폐율 측정치구 .....	54
제 3 절 축소된 Flanged Circular Coaxial Transmission_line holder를 이용한 측정법 .....	61

제 5 장 차폐효과 측정 시스템 구축 방안 .....	62
제 1 절 보유장비 활용을 통한 시험 검토 .....	62
1. GTEM cell 업그레이드를 통한 측정 .....	62
제 2 절 측정 치구 제작가능성 검토 .....	65
1. 광대역 더블리지 사각도파관의 제작가능성 검토 .....	65
2. 1-18GHz 대역의 Flanged Circular Coaxial Transmission_line holder 제작가능성 검토 .....	65
3. 상용 7mm커넥터를 이용한 차폐효과측정방법 제안 .....	79
제 6 장 결 론 .....	83
참고문헌 .....	84

## 표 목 차

표 1. 탄소나노섬유나 탄소나노튜브의 특성 .....	22
표 2. Stirrer 조합 표 .....	46

## 그 립 목 차

그림 1. 근역장과 원역장 .....	18
그림 2. 전자파 감쇠 메커니즘 .....	20
그림 3. Continuous-conductor Circular Coaxial line holder .....	27
그림 4. Coaxial holder를 이용한 자동 SE측정시스템 블록 다이어그램 .....	27
그림 5. coaxial holder transmission-line 회로 모델 .....	28
그림 6. Flanged Circular Coaxial Transmission_line holder의 구조 .....	29
그림 7. Flanged Circular Coaxial Transmission_line holder 의 등가회로 .....	30
그림 8. 측정샘플 .....	34
그림 9. time_domain 차폐효과 측정 시스템 .....	36
그림 10. 개구면을 통해 이어져있는 2개의 cell .....	40
그림 11. 한 개의 cell의 횡단면 .....	40
그림 12. EUT로 사용되는 슬롯이 뚫린 차폐체 .....	43
그림 13. 2개의 stirrer를 가지는 reverberation chamber .....	44
그림 14. 800MHz에서 stirrer의 기능으로써 상관계수의 절대 값 결과 .....	45
그림 15. angle 차감 값을 얻기 위해 0.37에서의 교차점 .....	45
그림 16. 3축 모니터링 probe와 E-field meter .....	47
그림 17. GTEM cell에서의 SE측정을 위한 장비 셋팅 .....	48
그림 18. Reverberation chamber 에서의 SE테스트를 위한 장비 셋팅 .....	49

그림 19. Reverberation chamber와 GTEM cell에서 z축에 따른 SE의 측정값 .....	50
그림 20. Reverberation chamber와 GTEM cell에서 y축에 따 른 SE의 측정값 .....	51
그림 21. GTEM cell을 이용한 SE측정 장비 셋업 .....	52
그림 22. 더블리지 도파관의 단면 .....	53
그림 23. 더블리지 사각도파관 차폐효과 측정치구 .....	55
그림 24. 1-3.5GHz 차폐효과 측정치구 치수 .....	55
그림 25. 3.5-10GHz 차폐효과 측정치구 치수 .....	56
그림 26. 1-3.5GHz $S_{11}$ 시뮬레이션 결과 .....	56
그림 27. 1-3.5GHz $S_{11}$ 실측 결과 .....	57
그림 28. 3.5-10GHz $S_{11}$ 시뮬레이션 결과 .....	57
그림 29. 3.5-10GHz $S_{11}$ 실측 결과 .....	58
그림 30. 실제 제작 된 1-3.5GHz 차폐효과 측정치구 .....	58
그림 31. 실제 제작 된 3.5-10GHz차폐효과 측정치구 .....	59
그림 32. 사각도파관을 이용한 SE 측정장비 셋업(a) 및 측정 주파수대역별 측정치구(b) .....	59
그림 33. Flanged Circular Coaxial Transmission_line holder를 이용한 SE 측정장비 셋업(a) 및 장비사양(b) .....	61
그림 34. GTEM cell을 이용한 차폐율 측정치구 .....	62
그림 35. GTEM cell 내부에 장착되는 샘플 고정 치구 .....	63
그림 36. 시뮬레이션툴에서 그려진 축소된 Flanged Circular Coaxial Transmission_line holder .....	67
그림 37. 시뮬레이션툴에서 그려진 축소된 Flanged Circular Coaxial Transmission_line holder의 단면 .....	67
그림 38. 시뮬레이션 결과 $S_{11}$ .....	68
그림 39. 시뮬레이션 결과 $S_{21}$ .....	68
그림 40. 시뮬레이션 결과 TEM모드의 확인 .....	69

그림 41. 시뮬레이션 결과, 스미스차트 .....	70
그림 42. 7mm커넥터의 단면 .....	79
그림 43. 7mm커넥터를 이용한 차폐율측정 장비 셋팅 .....	80
그림 44. 7mm커넥터와 N type to SMA type transition의 조립 .....	81
그림 45. 7mm커넥터의 확대사진 .....	81
그림 46. 샘플 장착 없이 7mm커넥터를 연결 시 반사계수 ..	82

# 제 1 장 서 론

최근에 Complex Information Technology Equipment(ITE)의 사용이 활발해지고 동작주파수가 GHz대역인 장비들이 늘어남에 따라 GHz대역에서의 EMI, EMS 문제가 대두되고 있다. 이러한 문제에 체계적으로 대처하기 위해 관련된 산업체들은 SI/PI integrity의 향상 및 시스템 레벨뿐만 아니라 chip/package/PCB 레벨에서 원하지 않는 EMI를 줄이 위하여 새로운 기술 분야에서 규칙과 가이드라인 및 디자인을 개발하기 위해 노력하고 있다. 효과적인 차폐는 장비 사용자와 제조업자들의 관심거리이다. 차폐는 EMI, conducted EMI, grounding, electrostatic discharge등 많은 전자기적 관심들과 연관된다. 차폐효과는 전자기파의 전달을 줄이기 위해 참조하고자 하는 물질의 특성이다. 차폐재는 전자기파로부터 일부분을 고립시키기 위해 사용되고 바깥쪽 전원으로부터의 간섭을 막기 위해서 사용된다. 또는 내부 전원 때문에 생기는 불필요한 전자파의 누출을 피하기 위해서도 사용된다. 전통적으로 차폐재는 잘 알려진 전자기파특성을 갖는 금속들을 사용하는 것이 일반적이다. 하지만 금속들은 더욱 더 다양하고 예측하기 어려운 물질들로 바뀌어지고 있으며 그 결과 물질의 차폐효과를 측정하는 신뢰할 수 있는 방법들이 필요하게 되었다. 예를 들면 전자부품들 중 전자기파의 영향으로부터 보호 또는 불필요한 전자기파의 방출을 막기 위해 금속 상자가 필요하게 되는데 플라스틱 자체만은 전자기파를 잘 투과시키기 때문에 전자파 투과를 막기 위해 플라스틱에 전도성 스프레이, 몰딩과정 중 금속섬유의 주입, 아연 아크 스프레이, 전기도금과 비접착성 도금, 박막삽입 그리고 다른 금속피복 과정들을 거치게 된다. 이렇게 차폐와 관련되는 비용은 아마 생산비용의 10%를 넘을 것이다. 따라서 차폐방법들 중에서 특히 큰 생산품 제조가 계획되는 곳에서는 그 제품에 가장 적당하게 적용되는 효과적인 방법을 선택하는 것이 중요하다.

또한, IEC/CISPR, ITU, CENELEC와 같은 국제표준화단체들도 GHz대역에서 방사 또는 전도되는 Field를 측정하고 원치 않는 EMI Field를 줄여 궁극적으로 Radio Service와 전기제품을 보호하기위한 규격이나 표준을 제정하려고 노력하고 있다.

본 연구는 이러한 필요에 따라 미국 독일 등 선진국의 차폐성능 측정기

술 및 동향을 조사하는 동시에 1 GHz ~ 18 GHz대역에서 전자파 차폐 성능 측정방법 및 측정치구의 제작 가능성이 있는지 검토하고 적당한 방법 제안 및 절차서를 마련하여 국내 표준 및 기술기준에 반영될 수 있도록 함을 목적으로 한다.



## 제 2 장 선진국의 차폐물질 측정방법 동향 조사

### 제 1 절 선진국 차폐물질 측정방법 동향 조사

선진국의 차폐물질 측정방법 동향 조사 결과 현재 차폐효과 측정방법과 관련하여 상세한 시험방법을 명시한 표준은 ASTM D4935와 KS C 0304가 있었다.

ASTM D4935의 경우 2005년 9월에 전기 전자적 절연물질을 담당하는 ASTM의 분과위원회인 D09에 의해 대안 없이 철회되었다. 이유는 D09에 전문기술자료가 부족하며 이 방법에 대한 의문점이 많다고 판단했기 때문이다.

IEEE논문을 조사한 결과 1GHz-18GHz범위에서의 차폐효율을 측정하는 원리와 방법 및 측정치구에 대한 논문들을 찾을 수 있었으며 차폐효과를 측정하기 위한 여러 가지 방법이 있음을 알 수 있었다. 국제적으로 표준화되지는 않았으나 다양한 형태의 측정방법이 논문을 통해 발표되고 있다. 논문의 연구결과를 고찰하면서 1GHz-18GHz범위에서의 차폐효과 측정방법 및 측정치구 제작 가능성을 검토 할 수 있었다.

## 제 2 절 전자파의 특성

전자파는 공중으로 전파하는 파동 에너지로 전파, 적외선, 가시광선, 자외선, 및 X선을 포함하는 전기장과 자기장으로 이루어진 파동을 말하며, 공간의 한 점에서의 전자파의 임피던스는 전기장과 자기장의 세기의 비로 표현된다.

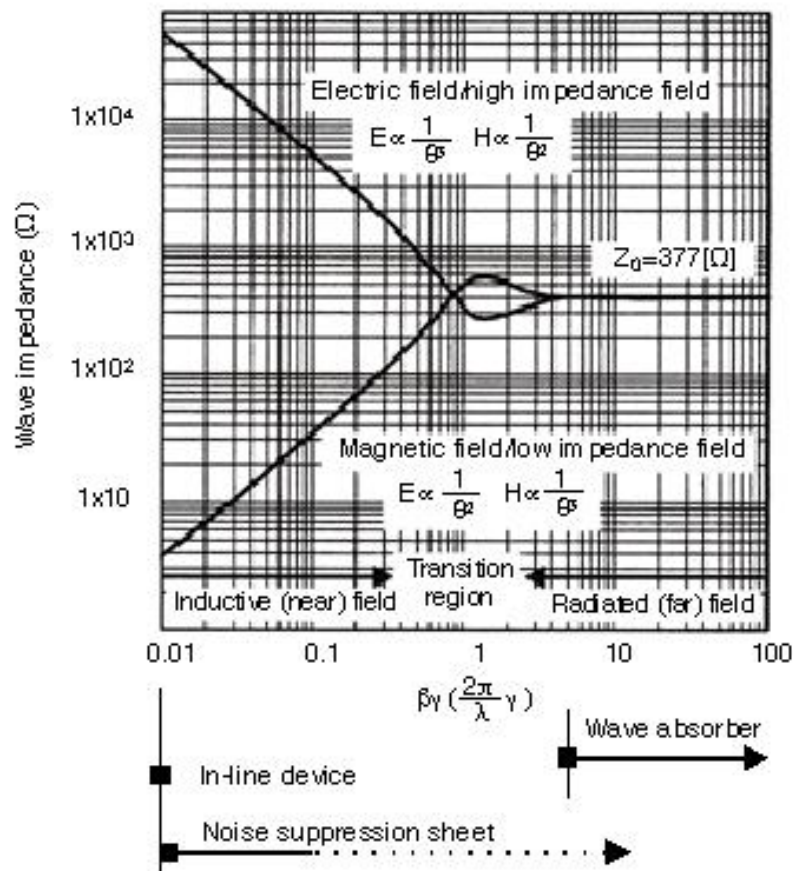


그림 1. 근역장과 원역장

안테나에 고주파 전류를 흘리면 전자파가 발생한다. 전자기파 발생원으로 부터의 거리에 따라 전자기파의 특성이 달라지는데, 안테나로부터의 거리가  $\frac{\lambda}{2\pi}$  보다 가까운 경우를 근역장(near-field), 먼 경우를 원역장(far-field)이라고 하며 전파원으로부터의 거리에 따른 임피던스 관계에 따라 근역장에는 고임피던스인 전기장과 저임피던스인 자기장이 있고 원역장에는 평면파로 되어있다. 또한 그림 1에서 볼 수 있듯이 계의 특성이 고주파 발생원으로부터 거리에 따라 달라진다. 원역장의 경우 전자파 임피던

스(자유공간의 경우  $377\Omega$ )는 전기장과 자기장에서 동일하나, 근역장에서는 전파 발생원의 특성과 전자기장이 관측되는 지점까지의 거리에 따라 변하게 된다. 만약 전파 발생원이 낮은 전압으로 많은 전류 흘리는 루프 안테나이면 전자파 임피던스가 자유공간의 파동임피던스 보다 훨씬 작아져 원역장의 경우보다 자기장의 성격이 더 강해진다. 그러나 전파원이 쌍극 안테나와 같이 높은 전압으로 적은 전류를 흘릴 때는 전자파 임피던스가 자유공간의 파동임피던스보다 훨씬 커지게 되고 원역장의 경우보다 전기장의 성격이 더 강해진다. 이러한 전자파의 임피던스는 전자파의 관측지점의 전파원으로부터 멀어짐에 따라 점차 자유공간의 파동 임피던스의 값으로 접근하게 된다. 공간의 어떤 지점에서의 전자기장의 세기를 경우에 따라 전기장의 세기, 자기장의 세기, 전력 밀도로 나타낼 수 있다. 보통 자기장의 세기는 주로 30MHz이하의 낮은 주파수에서 측정하고 전기장의 세기는 1000MHz이하의 주파수 영역에서 측정하며, 전력 밀도는 500MHz 이상의 초고주파 및 마이크로파 대역에서 주로 측정한다.

### 제 3 절 전자파 차폐방법

#### 1. 전자파 감쇠 메커니즘

전자파 감쇠 메커니즘은 그림 2에서 보는 것과 같이 공기층과 금속간의 임피던스 부정합에 의한 반사손실(reflection loss), 금속 차폐 막을 통과하면서 저항성 손실(ohmic loss)에 의해 열로 발산하는 투과손실(penetration loss), 금속 차폐 막 양쪽의 경계층에서의 금속 층 내부로의 재 반사에 의한 다중 반사 손실(multi-reflection loss 또는 internal reflection loss)등이 있는데 반사손실의 경우 skin depth보다 막의 두께가 매우 얇을 경우 무시 가능하며 투과손실은 다른 말로 흡수손실이라고도 한다. 또한 다중반사 손실의 경우 skin depth보다 막의 두께가 매우 얇을 경우 꼭 고려해줘야 한다

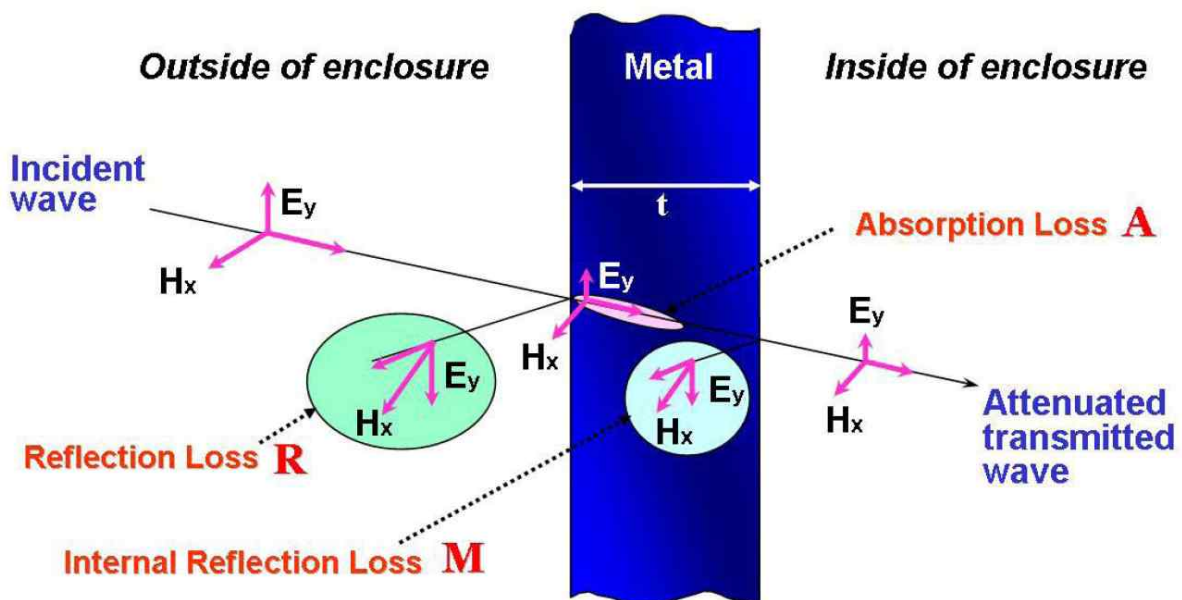


그림 2. 전자파 감쇠 메커니즘

## 2. 전기장 차폐 기법

전기장의 경우는 자기장보다 간단하다. 전도도가 우수한 물질로 보호하고자 하는 물체를 감싸기만 하면 된다. 물질의 두께에 따라서 차폐 효과가 달라지는데, 일반적으로 두꺼울수록 효과가 더 좋다.

흡수를 생각 할 경우 전기장이 전자를 진동시켜 전자의 흐름을 만들게 되는데, 이 때 전류가 발생하게 된다. 보통 전자의 움직임이 열에너지로 발산되어 지속적인 전기장의 흡수가 가능하도록 하는데, 열에너지로 발산이 안 되거나 발산되는 에너지보다 받는 에너지가 큰 경우 시간이 지나면서 차폐 효과가 떨어질 수 있다. 따라서 되도록이면 흡수보다는 반사하는 쪽에 초점이 맞춰지거나 열에너지를 가지고 있는 전자를 밖으로 빼주도록 접지를 해주어야 한다.

## 3. 자기장 차폐 기법

고투자율 재료를 사용해 흡수손실을 증가 시키는 방법이 있다. 고투자율 재료의 비투자율은 다음사항에 의해 영향을 받는다.

- Magnetic flux density in material (saturation level)
- Frequency
- Mechanical shock do not drop, strike with hammer, etc.
- Bending and forming
- Temperature (such as soldering)

일단 고투자율 재료로 차폐 기구물을 만든 다음, 반드시 열처리를 한다.

강한 저주파 자기장을 차폐하기 위해서는 전면에 포화 자속밀도가 높은 재료를 붙이고, 뒷면에 고투자율 재료를 붙인 다층구조 차폐가 요구된다. 자속에 대해 자기저항(reluctance)을 낮춤으로 자기장을 우회 시키는 방법이 있다. 이때 Magnetic Shield (U형 브라켓 등)를 Magnetic Flux와 수직하게 배치하면 더 효과가 있다

## 제 4 절 전자파 차폐 물질

차폐재는 주로 전자기적 성질이 좋은 금속 - 구리, 철, 니켈, 알루미늄, 주석, 아연, 금, 은 등이 각광받고 있었다. 그러나 금속은 무겁고 차폐 재료로 사용할 경우 가공성이 나쁘고 부식을 일으킨다는 문제가 있어 이를 대체할 수 있는 소재로서 전도성 고분자가 제안되고 있다. 그러나 전도성 고분자는 열적 안정성이 취약하고, 전도도가 금속에 비해 낮다는 단점이 있다. 최근 도전성과 차폐율을 높이기 위해 다양한 전도성 복합체가 검토되고 있다. 특히 기계적, 전기적 성질이 우수한 탄소나노섬유나 탄소나노튜브를 복합체의 필러로 이용하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 탄소나노튜브의 경우 탄소나노섬유에 비해 전기적 성질이 아주 우수하기 때문에 산업적으로 많은 관심을 불러일으키고 있다. 표 1에서는 이에 대한 특성을 보이고 있다.

Properties		Graphite Nanofiber	Carbon Nanotube
Density		1.8 ~ 2.2 g/m <sup>3</sup>	> 1.0 g/m <sup>3</sup>
Electronic Property		Semimetal	Metal/Semiconductor
Interlayer Spacing		3.40 Å	3.38 ~ 3.41 Å
Electrical Properties	Resistivity	10 <sup>-3</sup> ~ 0.23 Ω/cm	10 <sup>-4</sup> ~ 10 <sup>-5</sup> Ω/cm
	Max. Current Density	1 ~ 202 A/m <sup>2</sup>	1013 A/m <sup>2</sup>
Structural Properties	Aspect Ratio	> 3,000 ~ 4,000	> 10,000
	BET Surface Area for N <sub>2</sub>	300 ~ 700 m <sup>2</sup> /g	100 ~ 700 m <sup>2</sup> /g
Thermal Conductivity		1000 ~ 2000 W/m·K	1800 ~ 6000 W/m·K
Elastic Properties	Young's Modulus	150 ~ 820 Gpa	~ 1,000 Gpa
	Max. Tensile Strength	1 ~ 3 Gpa	~ 30 Gpa

표 1. 탄소나노섬유나 탄소나노튜브의 특성

## 제 5 절 차폐효과(Shielding Effectiveness(SE))의 정의

같은 입사 전력에서 SE를 측정하고자 하는 시료가 있을 때와 없을 때의 수신되는 전력의 비로 정의하며 보통 아래의 식에 따라 데시벨로 표현된다.

$$SE = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \text{ (decibels, dB)}$$

여기서,  $P_1$  : 측정하고자 하는 시료가 있을 때 수신전력  
 $P_2$  : 측정하고자 하는 시료가 없을 때 수신전력

만약 수신기 정보가 전압의 단위로 표시 된다면 다음과 같다.

$$SE = 20 \log \frac{V_1}{V_2} \text{ (decibels, dB)}$$

여기서,  $V_1$ 과  $V_2$ 는 측정하고자 하는 시료가 있고 없을 때의 각각 전압 레벨이다.

## 제 6 절 차폐효과 측정기술 일반사항

차폐 문제는 여러 가지 전자파환경과 연관되어있다. 그래서 SE측정은 잠재적인 전자파환경을 재현하거나 이론적인 모델에 기초하는 차폐응답을 예측하는 충분한 정보를 얻는데 필요하다. 기본적인 매개 변수들은 주파수, 입사하는 전자파의 필드분포, 측정하고자 하는 시료의 다양성 등이다.

이제까지 대부분의 관심사는 Domestic FCC rules governing emissions from computing devices(Code of Federal Regulations, Title 47, Part 15, Subpart J, adopted Oct. 1979), the German VDE 0871/6.78 standard, MIL-STD-461등과 연계하여 100 kHz에서 1 GHz사이의 주파수 대역폭에서의 SE값이었다. 하지만 Complex Information Technology Equipment(ITE)의 사용이 활발해지고 동작주파수가 수 GHz대역인 장비들이 늘어남에 따라 1GHz이상에서의 SE값 측정에 대한 필요도 점점 높아지고 있다.

우리가 차폐재를 써서 차폐하고자 하는 전자파는 발생 시키는 원천의 종류와 위치에 따라 구분 지을 수 있다. 먼저 외부에서 들어오는 전자파를 차폐하고자 하는 상황에서는 보통 통신 링크, 라디오 송신기, 번개 등 과 같이 먼 전원에서부터 시작되고 측정지점에서 far-field이며 평면파일 것이다. 반면에, 전자파방사를 막기위해 차폐재를 쓸 경우 차폐재 내부 전원에서 발생하는 전자파는 near-field일 가능성이 높다. 이런 near-field의 경우 short dipole과 같은 high-impedance field(electric field dominant)가 생기고, 작은 루프 안테나 같은 low-impedance field (magnetic field dominant)가 생기는 것과 같이 더 깊이 분류될 수도 있다. 또한 simple dipole source에서 near field와 far field사이의 전환지점의 거리는 대략  $\lambda/2\pi$  정도이다. 그렇기 때문에 어느 한 주파수에서는 near-field이지만 이보다 더 높은 주파수에서 far-field가 될 수 있다. 실제로 차폐는 위의 상황을 모두 합쳐놓은 것과 같이 복잡한 문제를 갖는다.

상당히 많은 물질들이 차폐에 사용되기 때문에 SE 시험방법들은 다른 샘플유형들을 고려할 만큼 충분히 유연할 필요가 있다. 물질들은 전기적인 특성뿐만 아니라 두께, 기계적인 특성과 비용에 따라서 변화할 것이다. 어떤 테스트 방법들은 특정한 형체의 일정 내성 내에서의 샘플을 요구한다.



이것은 샘플제작에 있어 기계적인 어려움이나 측정 가능한 강도를 유지하는데 어려움을 초래할 수 있다. 약한 표면 전도성은 금속표면에 좋은 접촉을 요구하는 시험에 있어서 문제점으로 작용한다. 특히 대부분의 합성물과 플라스틱 금속화는 많은 절연 물질을 포함하므로 문제의 소지가 있다.

또한 주파수의 변화, 입사하는 전자파의 field분포, 테스트 물질 뿐 아니라 중요하게 고려되어야 하는 다른 점들은 테스트 시스템의 비용, 데이터를 얻는 데 까지 요구되는 시간, 재현성과 동작 범위 그리고 SE 데이터에 대한 신중한 해석이다. SE측정에서 물질 고유의 차폐 능력뿐 아니라 측정 시스템 자체도 SE 데이터 결과에 영향을 끼친다. 이런 상호작용을 설명하는 것은 발전된 측정 시스템의 상황별 모델설정으로부터 많은 도움을 받을 수 있다.

특정한 SE 측정을 할 때에는 먼저 사용되는 장비, 치수, 적용할 수 있는 주파수 범위, 혼한 테스트 필드의 종류, 필요한 샘플들, 동작범위등의 정보를 가지고 시작한다. 차폐물질의 매개변수인 두께  $d$ , 전도성  $\sigma$ , 유전율  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$  과 투자율  $\mu = \mu_r \mu_0$  들은 중요하다. 여기서  $\epsilon_0$ 와  $\mu_0$ 는 자유공간에서의 값을,  $\epsilon_r$ 과  $\mu_r$ 은 상대적인 값을 말한다. Mylar에 위에 금이나 알루미늄 층을 입힌 샘플들은 잘 정의되어있는 전기적 성질을 가지고 있어서 이론적인 모델들의 정당성을 조사하기 위해서 사용할 수가 있다.

## 제 3 장 여러 가지 차폐효과 측정법

### 제 1 절 far-field의 차폐효과 측정법

#### 1. Circular Coaxial line을 이용한 측정법

가. Continuous-conductor Circular Coaxial Transmission\_line holder를 이용한 측정법

차폐 물질에 관여하는 중요한 문제 중의 하나는 어떻게 입사 평면파를 차폐 할 것인가 이다. 관심의 대상이 평면파를 차폐하는 경우는 전원으로 부터 발생한 전자파가 far-field의 경우를 생각하게 되는 것이다. SE 테스트에서 기본적으로 해야 되는 것은 전원과 수신되는 안테나와 의 고립 이다. 실제로 far-field 테스트를 샘플이 무한한 상태로 할 수 없기 때문에 이를 대체할 방법들이 필요하다.

그 중 한 가지 방법은 전송선로를 사용하는 것이다. 이는 전원과 수신안테나를 간단하면서 확실하게 고립시킨다. 또한 2개의 도체를 가지는 동축선의 경우 주 전파모드가 TEM모드이며 이는 자유공간에서의 평면파에 대한 차폐효과 측정시험에 유용하게 쓰일 수 있다.

따라서 far-field SE를 테스트 하기위한 circular coaxial line holder가 발전하게 되었다.

일반적으로 사용되는 coaxial holder는 continuous-conductor(CC) 버전이다.

그림 3에서 볼 수 있듯이 Continuous-conductor Circular Coaxial line holder는 50Ω 동축선을 테이퍼지게 하여 확장해서 연결한 것이다. 크기는 내부도체와 외부도체가 각각 4.35cm와 9.90cm이다. 사용 주파수대역은 30MHz-1.4GHz정도 이며 동작 범위는 90-100dB정도 이다.

이 방법으로 측정할 때 샘플은 와셔모양의 형태로 가공되고 동축선의 외심과 내심은 연속적으로 연결된다. 이 방법으로 측정할 때 자동화 된 측정시스템의 블록다이어그램 및 회로 모델은 그림 4, 그림 5와 같다.

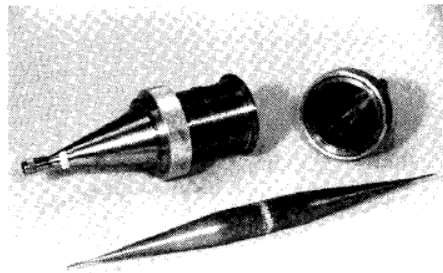


그림 3. Continuous-conductor Circular Coaxial line holder

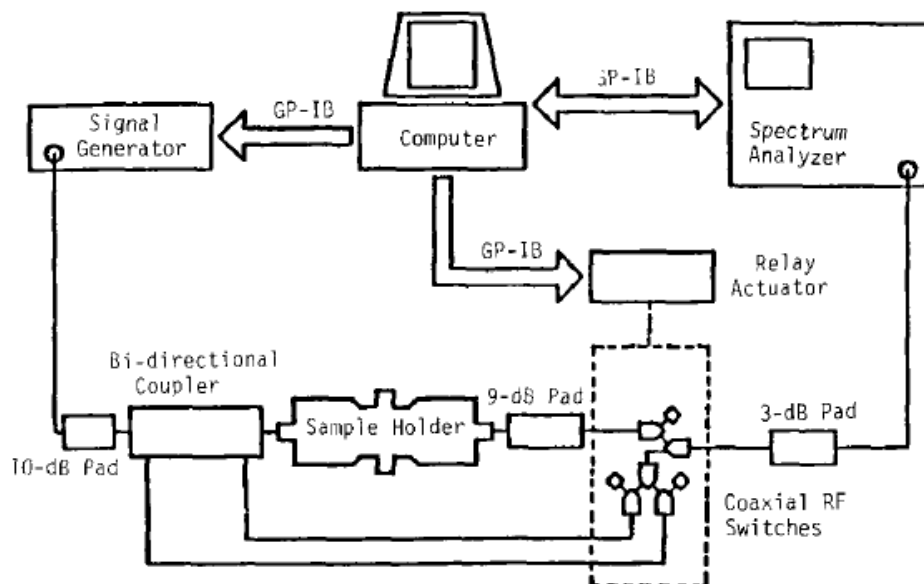


그림 4. Coaxial holder를 이용한 자동 SE측정시스템 블록 다이어그램

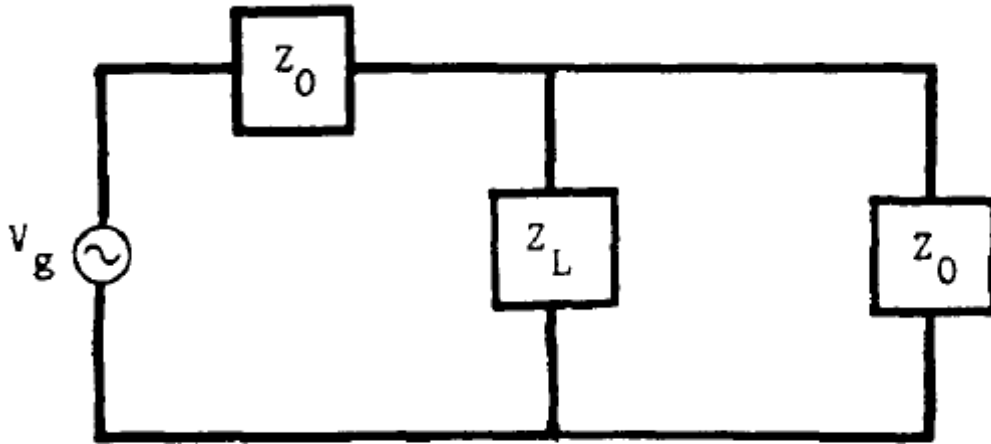


그림 5. coaxial holder transmission-line 회로 모델

coaxial holder transmission-line 회로 모델을 통해 SE값은 다음 식으로 표현 된다.

$$SE = 20 \log \left| 1 + \frac{Z_0}{2(Z_L + Z_C)} \right|$$

여기서,  $Z_C$ 는 샘플과 홀더의 접촉저항인데 이 방법에서는 와셔모양의 샘플을 동축선 내부도체에 고정할 때 확실히 고정시켜줄 방법이 없어서 큰 값을 가지게 된다. 결과적으로 접촉저항은 수식적으로 검토해 볼 때 그 크기가 커질수록 SE값 측정의 정확도에 많은 영향을 끼친다. 실제로 Mylar에 위에 금이나 알루미늄층을 입힌 시료들과 같이 SE가 거의 정확하게 이론적으로 계산되어져 있어 기준샘플로 사용 할 수 있는 재료를 샘플로 측정해 보면 이 접촉 저항 때문에 이론적 계산값과 큰 차이를 보이게 된다. 따라서 샘플을 확실히 고정시킴으로서 접촉저항 값이 측정의 정확도에 끼치는 영향을 최대한 줄이기 위해 Flanged Circular Coaxial Transmission\_line holder를 개발하게 되었다.

나. Flanged Circular Coaxial Transmission\_line holder를 이용한 측정법

Flanged Circular Coaxial Transmission\_line holder는 그림 6과 같은 구조로 되어있으며 이런 구조에서는 샘플을 확실히 고정시킬 수 있으므로 접촉저항 값을 줄일 수 있다. 앞서 설명한 Continuous-conductor Circular Coaxial line holder와 비교해 보면 50Ω 동축선의 확장개념은 같으나 플랜지가 생기면서 샘플을 잡아주는 역할을 하게 된다.

플랜지가 생겨 샘플을 잡아주는 역할을 하지만 내부 도체나 외부도체의 연속성은 사라지게 되고 제작되는 샘플의 형상 또한 달라진다.

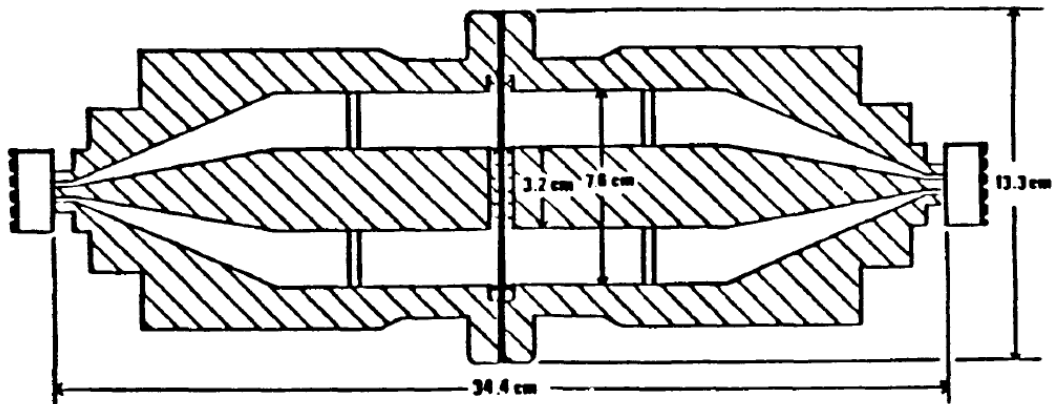


그림 6. Flanged Circular Coaxial Transmission\_line holder의 구조

ASTM D4935에서 자세한 도면과 함께 소개 하고 있는 이 치구는 내부도체 직경은 3.2cm이며 외부도체직경은 7.6cm 플랜지 직경은 13.3cm정도 이다. 동작 주파수 범위는 30MHz-1.8GHz정도 이며 동작 범위는 90-100dB정도 이다. 등가 회로는 그림 7과 같다.

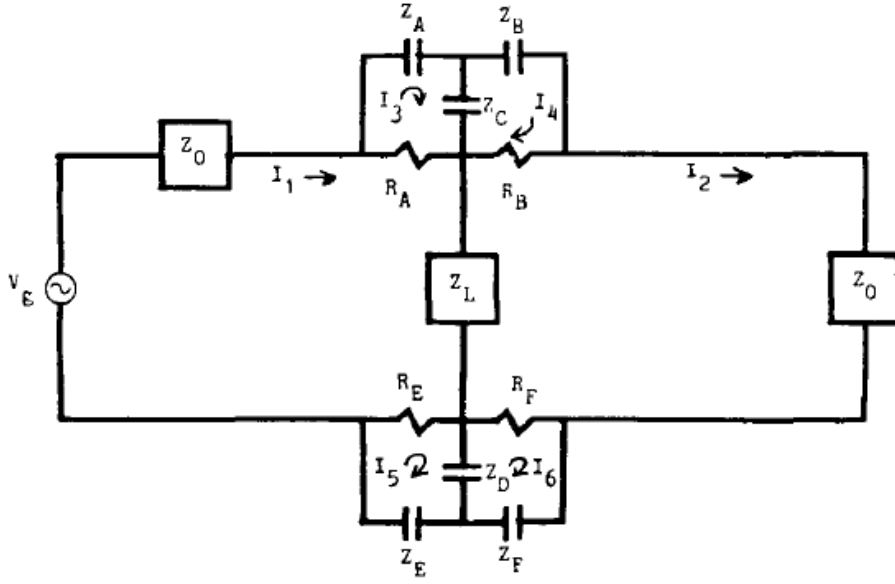


그림 7. Flanged Circular Coaxial Transmission\_line holder의 등가회로

이 등가회로를 해석해 보면 다음과 같다. 먼저, 샘플과 플랜지사이의 접촉저항을  $R_A, R_B, R_E, R_F$ 라 하고 플랜지들 사이의 용량성 커플링을  $Z_A, Z_B, Z_E, Z_F$ 라 하고 플랜지와 샘플 사이 용량성 커플링을  $Z_C, Z_D$ 라 하면 키프히호프의 법칙에 의해 전류  $I_1$ 에서  $I_6$ 까지의 값을 구 할 수 있다.

$$I_1(Z_0 + R_A + Z_L + R_E) - I_2Z_L - I_3R_A - I_5R_E = V_g$$

$$I_2(Z_0 + R_B + Z_L + R_F) - I_1Z_L - I_4R_B - I_6R_F = 0$$

$$I_3(Z_A + Z_C + R_A) - I_1R_A - I_4Z_C = 0$$

$$I_4(Z_B + Z_C + R_B) - I_2R_B - I_3Z_C = 0$$

$$I_5(Z_D + Z_E + R_E) - I_1R_E - I_6Z_D = 0$$

$$I_6(Z_D + Z_F + R_F) - I_2R_F - I_5Z_D = 0$$

이며

$$I_2 = V_g B / (AC - B^2)$$

이다. 여기서,

$$A = Z_0 + Z_L + R_B + R_F - \frac{R_B^2(Z_A + Z_C + Z_A)}{M} - \frac{R_F^2(Z_E + Z_D + Z_E)}{N}$$

$$B = Z_L + \frac{R_A R_B Z_C}{M} + \frac{R_E R_F Z_D}{N}$$

$$C = Z_0 + Z_L + R_A + R_E - \frac{R_A^2(Z_B + Z_C + Z_B)}{M} - \frac{R_E^2(Z_F + Z_D + Z_F)}{N}$$

$$M = (Z_A + Z_C + R_A)(Z_B + Z_C + R_B) - Z_C^2$$

$$N = (Z_E + Z_D + R_E)(Z_F + Z_D + R_F) - Z_D^2$$

이다. 여기서,  $A' = A - B$  ,  $C' = C - B$ 라 두면

$$A' = Z_0 + \frac{R_B[Z_A(Z_B + Z_C) + Z_B(R_A + Z_C)]}{M} + \frac{R_F[Z_E(Z_F + Z_D) + Z_F(R_E + Z_D)]}{N}$$

$$C' = Z_0 + \frac{R_A[Z_B(Z_A + Z_C) + Z_A(R_B + Z_C)]}{M} + \frac{R_E[Z_F(Z_E + Z_D) + Z_E(R_F + Z_D)]}{N}$$

따라서,

$$I_2 = V_g \frac{B}{B(A' + C') + A'C'}$$

이고, 샘플이 장착되었을때 수신되는 파워는

$$P'_R = \frac{Z_0}{2} |V_g|^2 \left| \frac{B}{B(A' + C') + A'C'} \right|^2$$

이다.

만약, 샘플이 없을 시는  $Z_L \rightarrow \infty$  (개방회로)가 되고 동시에  $B \rightarrow \infty$ 가 된다. 따라서 샘플이 없을때의 파워는 아래와 같다.

$$P_R = \frac{Z_0}{2} |V_g|^2 \left| \frac{1}{A' + C'} \right|^2$$

따라서, 차폐효율은

$$SE = 20 \log \left| 1 + \frac{A'C'}{B(A' + C')} \right|$$

와 같이 표현 될 수 있다.

이제 조금 특별한 경우를 고찰해 보자. 먼저, 샘플과 홀더가 완벽하게 접촉되어 있는 이상적인 경우 원하지 않는 임피던스값들( $R_A, Z_A$  등등)은 단락으로 해석 될 것이다. 이 경우  $A' \rightarrow Z_0, B \rightarrow Z_L, C' \rightarrow Z_0$ 가 되고 차폐효율은 아래와 같이 표현 되어 질 수 있다.

$$SE = 20 \log \left| 1 + \frac{Z_0}{2Z_L} \right|$$

하지만 이상적인 완벽한 접촉은 있을 수 없고  $R_A, Z_A$  등 원하지 않는 임



피턴스는 언제나 측정에 영향을 끼친다.

동작 주파수가 올라 갈수록  $Z_A, Z_B, Z_E, Z_F$  등의 값은 감소한다. 만약  $\omega C \gg 1$  이면 이값들은 단락 된 것처럼 동작한다. 따라서 이 항목들을 정리하면

$$A' = C' = Z_0$$

$$B = Z_L + \frac{R_A R_B Z_C}{M'} + \frac{R_E R_F Z_D}{N'}$$

$$M = R_A R_B + Z_C (R_A + R_B)$$

$$N = R_E R_F + Z_D (R_E + R_F)$$

가 되며 표면 전도성이 아주 좋은 샘플의 경우

$R_A, R_B \approx 0$  or  $R_B, R_F \approx 0$ 가 되고 차폐효율은 이상적인 경우와 같은

$$SE = 20 \log \left| 1 + \frac{Z_0}{2Z_L} \right|$$

로 표현 될 수 있다. 이 식을 Continuous-conductor Circular Coaxial Transmission\_line holder를 이용한 측정법에서의 SE와 비교해 보면 접촉 저항  $Z_C$ 가 '0'이 된 것을 알 수 있다.

또한 표면 전도성이 아주 안 좋은 샘플의 경우를 생각해 보면

$$R_A, R_B \gg |Z_C|$$

$$R_E, R_F \gg |Z_D|$$

$$B \approx Z_L + Z_C + Z_D$$

가 되고

$$SE = 20 \log \left| 1 + \frac{Z_0}{2(Z_L + Z_C + Z_D)} \right|$$

로 표현 될 수 있다.

여기서, 플랜지와 샘플사이의 용량성 임피던스  $Z_C$ 와  $Z_D$ 가 작아야만 측정의 정확도가 올라가게 된다.

이 방법에서 샘플은 그림 8과 같이 Reference표본과 Load표본 두 가지가 필요하다. Reference시료에서 내부도체의 직경과 같은 원형샘플은 용량성 커플링을 유지하기 위한 것으로 장착하지 않고 측정하였을 때 측정의 정확도를 떨어뜨린다. 샘플두께는 중요한 치수이다. 정확한 SE 측정 및 재현성을 위해서는 Reference표본과 로드 표본의 두께가 같아야한다. 이 방법에서는 평균 두께 차이가  $25\mu\text{m}$ 보다 작고 두 표본 사이의 두께 변화가 평균의 5%보다 작으면 두 개의 표본이 동일한 두께를 갖고 있다고 간주한다.

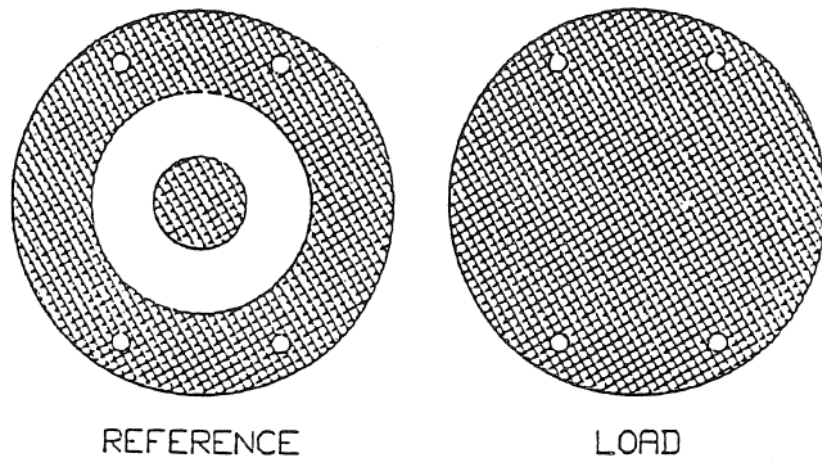


그림 8. 측정샘플

실제로 Mylar에 위에 금이나 알루미늄층을 입힌 시료들과 같이 SE이

거의 정확하게 이론적으로 계산되어져 있는 샘플을 측정해 보면 Continuous-conductor Circular Coaxial Transmission\_line holder를 이용했을 때에 비해 이론값과 잘 일치한다.

시스템의 동적 범위는 금속의 load 표본을 사용할 시 reference 표본을 포함하는 최대 신호 레벨을 최소 신호 레벨과 비교함으로써 확인되어진다. 측정 시스템 감도의 더 낮은 경계는 감도의 기능과 수신기의 대역폭이다. 수신기의 대역폭을 줄이는 것은 탐지할 수 있는 레벨을 낮추지만 측정 시간은 늘린다. 커넥터 또는 케이블에서의 누출은 표본을 통해 가로지를 수 없는 병렬 신호 경로를 제공함으로써 시스템의 동작범위를 줄일 것이다. 스텝 감쇠기가 최소한의 감쇠기 세팅에서의 변화와 일치하는 감지된 신호에서 변화를 야기하거나 스텝 감쇠기 자체가 누설 경로를 야기하지 않는다면 누출은 무시해도 좋고 위에서 측정된 동작범위는 맞는 것이다. 만약 레벨이 일치하지 않는다면 감쇠기는 동작범위를 측정하기 위해 일대일 일치기 될 때까지 증가되어야한다. 동축 커넥터에서의 누출이 커넥터의 질 뿐 아니라 커넥터를 조일 때 사용되는 토크의 양으로도 정해지기 때문에 연결을 꼭 재점검 되어야 한다.

이 방법을 사용 할 때 발생할 수 있는 측정 불확도에 대해 정리하면 아래와 같다.

고려되는 에러의 근원은 작동에러, 표본 에러, 측정시스템 에러이다. 작동 에러는 경험과 연습의 부족이나 부주의에 의해 일어난다. 표본 에러는 준비 또는 고유의 구조와 같은 표본 안에서의 불규칙 때문에 일어난다. 표면이 부드럽고 등방성이며 균일한 표본은 좋은 재현성을 보인다. 만약 reference 표본과 load 표본이 다른 두께라면 바이어스 에러가 발생된다. 두 개의 표본의 두께가 같지만 각 표본에 걸쳐 불규칙한 두께라면 랜덤 에러가 발생된다. 표본의 불균일성 또는 이방성은 크기와 배열과 기하학적인 배열에 의존하는 다양한 변화를 야기한다. 많은 표본의 타입에서의 측정 경험은 표면이 거칠 때를 제외하고는 측정된 데이터의 반복성이 기대된다.

측정 시스템 에러는 임피던스 불일치, 발생기의 불안정, 경로의 부족, 제한된 동적 범위, 제한된 주파수 범위, 수신기 에러에 의해 일어난다. 유경험이라는 점에서 숙련된 운영자는 적당한 주파수 범위, 시스템의 동적 범위 안에서 측정을 할 수 있고 측정 시스템의 동적 범위 안에서 누설 경로

를 피할 수 있고 불일치를 피하기 위해 적당한 감쇠기를 사용할 수 있으며 입력 파워가 계속 유지되게 관찰하고 조절 할 수 있다. 그러면 측정 시스템 에러는 모든 에러의 많은 비중을 차지하지 않을 만큼 줄어들게 될 것이다.

## 2. Time\_domain 측정법

그림 9는 time\_domain 차폐효과 측정 시스템을 보이고 있다. 펄스(time\_domain)를 전원으로 사용하게 되는데 이때 수신측에서는 직접과 간접경로의 신호를 받게 된다. 원하는 직접경로에 펄스가 도착하는 시간과 원하지 않는 간접경로로 펄스가 도착하는 시간 차이를 측정한다. 그런 다음 FFT알고리즘을 이용해 time\_domain 데이터를 frequency\_domain 으로 변환할 수 있다.

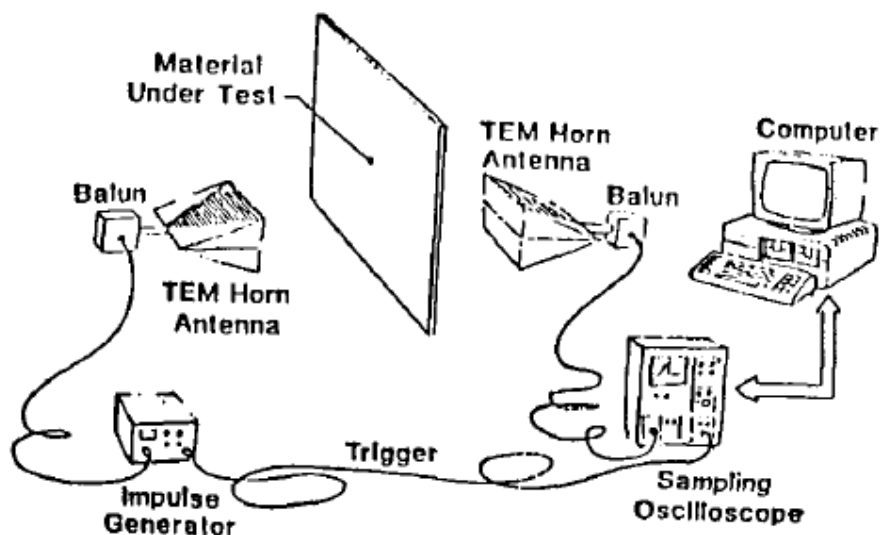


그림 9. time\_domain 차폐효과 측정 시스템

이 방법에서 송신 및 수신 안테나는 TEM혼 안테나를 사용하며 테스트 할 샘플로부터 30cm정도 떨어져 있다. 350-ps의 펄스를 입력신호로 한다. 안테나가 far\_field영역에 샘플이 위치할 경우 샘플에 입사하는 전자파는 평면파가 될 것이다. near\_field 안에 샘플이 위치할 경우 입사는 전자파의

영향에 대해 예측하기 힘들다. 이상적인 측정은 무한의 샘플 sheet를 측정하는 것이며 작은 샘플의 경우 측정이 불가능하다. 더 짧은 펄스의 사용은 더 높은 주파수에서 측정을 가능하게 한다. 사용 주파수 범위는 200MHz-3.5GHz정도이며 동작영역은 50-60dB정도 이다.

### 3. 복소 유전율로부터 차폐효과 측정법

물질의 복소 유전율 값으로부터 차폐효과는 여러 상황별로 계산되어질 수 있다. 하지만 복소 유전율 측정은 Microwave대역에서 여러 가지 난해한 어려운 문제점들이 있다. 브리지 회로는 손실이 큰 물질의 경우 모델링이 어려워진다. 개방 또는 디스크 공진기가 높은 주파수 까지 확장되어 쓰이고 있으나 저 손실 물질에 적용가능하며 우리가 관심 있는 고 손실 전도성 물질에는 적용이 어렵다.

여러 길이의 절단된 transmission\_line 고정 치구가 GHz대역에서 사용되고 있으나 액체나 유동성 물질의 측정에 적당하다. 이런 치구들을 이용해 유전율을 측정할 경우 여러 기생 성분이 같이 측정될 수 있으며 측정결과가 부정확하게 된다.

### 4. 사각도파관을 이용한 측정법

이 방법은 microwave대역에서 SE를 측정할 수 있다. 사각도파관에서 전자파의 주 진행모드는  $TE_{10}$  모드이다. 샘플은 도파관의 가이드에 맞춰 자르기만 하면 된다. 다른 방법들에 비해 샘플 제작이 간단하다. 여러 크기의 도파관이 가공되어 사용되고 있다. 이 방법의 장점은 접촉저항을 전혀 신경쓰지 않아도 된다는 점이다. 이 방법을 사용할 경우 Microwave회로로 해석해야 하기 때문에 샘플로부터 기인한 scattering-parameter를 사용한다. 하지만 이방법의 문제는 high impedance, low impedance, plane wave등에 대한 차폐 테스트 표준이 없다는 것이다.

사각도파관에서의 주 진행모드가 우리가 관심있는 TEM모드가 아니고  $TE_{10}$ 이며  $TE_{10}$ 모드의 경우 2개의 자기장 성분과 1개의 전기장 성분을 가지고 있으며 분리 할수 없고 상호 작용한다. 이러한 성질은 far\_field SE데이터를 원할때는 해석에 있어 난해한 부분 초래한다.

## 5. Nested Reverberating Chamber를 이용한 측정법

Nested Reverberating Chamber는 회전 패들을 가지는 차폐상자이다. 이것은 많은 부분 마이크로 오븐과 같은 원리로 동작한다. 전력은 송신안테나에 의해 챔버 내로 주입된다. 패들이 회전하면서 여기 되는 cavity모드가 변화하기 때문에 주어진 포인트에서 필드 구조는 변화한다. 그러나 많은 패들 위치에서의 평균필드는 평면파와 같은 성질을 보인다.

통계적으로 볼 때 Reverberating Chamber는 자유공간 모의시험을 할 수 있다. 이 방법의 장점은 챔버의 높은 Q cavities로 인한 낮은 입력 전력에 비해 높은 동작영역과 셀 크기에 따라 결정되는 하한 주파수 대역에서의 넓은 대역폭등이다. 단점은 많은 수의 샘플들의 평균값을 계산해야하므로 데이터 처리 속도가 상대적으로 느린 편이다.

## 제 2 절 Near-field의 차폐효과 측정법

### 1. Near-field차폐효과 일반사항

만일 측정하고자하는 물질이 원천 가까운 필드(Near-field)에 놓이게 되면, 그 차폐 특징들은 far-field에 샘플이 놓이는 경우와 아주 다를 수 있다.

near-field에 대한 SE를 측정하기 위한 방법 중 TEM cell의 이용법과 reverberating chamber에 있는 apertured TEM cell을 이용한 측정법을 소개한다. 각각의 경우에서 시스템 주파수 범위를 고려하고, field 분포, 동작 영역, 필요한 측정 시간과 분석적인 배경을 검토한다.

불필요한 내부 원천으로부터의 방사를 막기 위해 차폐재를 사용할 경우 차폐재는 Near-field에 놓일 가능성이 높기 때문에 높은 임피던스(전계 지배적)와 낮은 임피던스(자장 지배적) wave들이 고려될 필요가 있다.

near-field SE는 밀접하게 간격을 두는 안테나들 사이에 샘플을 놓는 것에 의해서 측정될 수 있다. 무한 샘플 sheet가 이상적이겠지만 실현 불가능하므로 유한한 샘플이 사용되면 샘플을 통하지 않고 원하지 않는 경로를 통해 수신되는 신호 성분이 있을 것이고 이것은 차폐 박스안에 송신 안테나를 위치시키므로 없앨 수 있다. 하지만 원하는 필드분포에서 벗어나게 하는데 이는 차폐박스벽면에 전자파흡수물질을 장착함으로써 어느 정도 도움을 받을 수 있다. 하지만 전자파흡수물질은 비싸며 적용이 까다로우며, 주파수 의존특성을 가진다. 이러한 점들 때문에 안테나 및 차폐박스 사용보다는 waveguide에 의거하는 SE 측정을 선호하게 된다.

### 2. DUAL TEM CELL(DTC)을 이용한 측정법

TEM cell은 보통의 50Ω 동축 케이블에 필적하는 50Ω의 확장된 직사각형 동축케이블의 섹션이다. 이것은 횡단면이 직사각형이라는 것만 제외하고는 앞서 논의되는 동축선 홀더들과 매우 유사하다.

그림 10과 같은 공유되어 있는 개구면을 통하여 이어지지는 2개의 cell들을 고려해 보자.

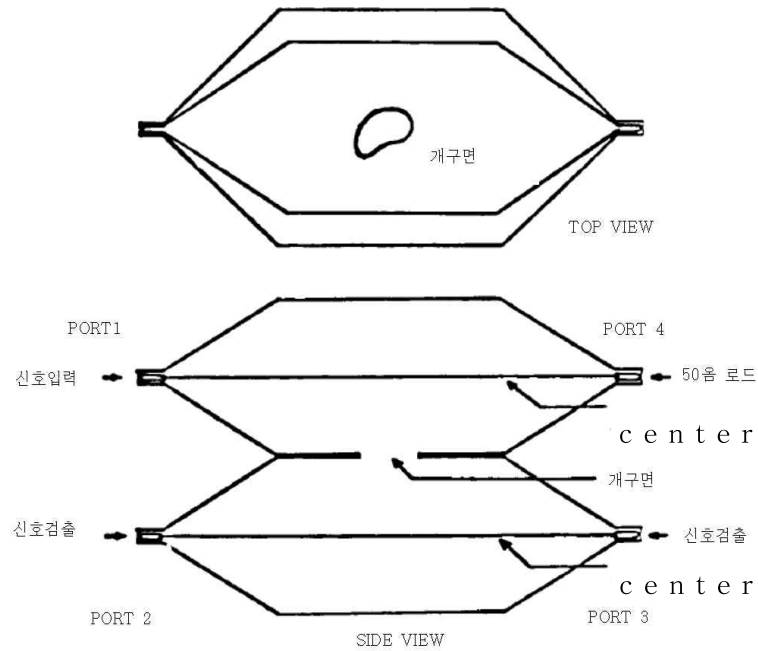


그림 10. 개구면을 통해 이어져있는 2개의 cell

전력은 구동 cell의 Port 1에서 공급되고 개구면을 통해 수신 cell로 전송된다. DTC는 주어진 하나의 입력신호와 2개의 출력신호[Port 2 와 3]를 가진다. 개구면은 비대칭하게 에너지를 2개의 출력포트에 연결한다. 이것은 일반적 전계와 경로를 벗어나는 자계에 대해 각각의 투과를 실험할 수 있게 한다. 다시 말하면 샘플에 대한 near\_field 투과 특성을 알아볼 수 있게 된다.

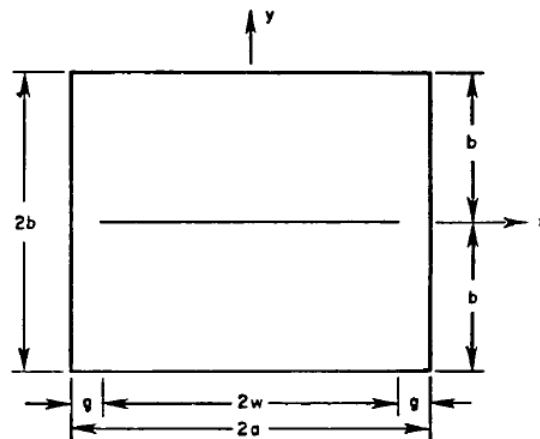


그림 11. 한 개의 cell의 횡단면



그림 11은 한 개의 cell의 횡단면을 나타낸다.  $a = 9 \text{ cm}$ ,  $b = 6 \text{ cm}$ , and  $g = 2.2 \text{ cm}$  이다. 주파수 범위는 1MHz-1GHz정도이며 cell공명에 영향을 받는다. 동작범위는 50-60 dB정도이다. 1MHz에서 1GHz까지의 sweep시간은 대략 30분 정도이다. 측정치구 자체가 전송전로역할을 하기 때문에 요구되는 입력파워 낮으며 차폐된 상태이므로 주변 장치들에 전자기적영향을 받을 염려도 없다. 주된 어려움은 물질을 장착하는데 있어 접촉 임피던스들 최소화되고, 접지루프나 누설을 피하는 것이다. cell과 샘플을 봉하기 위해 개구면 주위에 RFI gasketing을 사용한다.

### 3. Reverberating Chamber안에 개구면을가지는 TEMcell을 이용한 측정법

Near\_Field를 만들어 물질의 차폐효과를 측정하는 다른 한 가지 방법은 Reverberating Chamber안에 개구된 TEM 셀을 두어 개구면에 측정하고자 하는 물질을 장착하는 것이다. 이 방법은 DTC의 이점들은 유지된다. 즉, 시스템은 RF관점에서 해석되며 전계와 자계에 대한 커플링은 별도로 고려될 수 있다. 주요한 차이는 회전하는 패들이 장착되어 여러 가지모드를 만들어낸다는 것이다. 패들 위치가 바뀌는 것에 따라 챔버 안에서 생성되는 필드의 파장임피던스는 평균이 자유공간의 값에 가까워진다. 이 방법에서 중요한 점은 패들로 여러 모드를 생성하는 것이다. 챔버는  $2.74 \times 3.05 \times 4.57 \text{ m}$ 이고, 200MHz-1GHz정도에서 사용된다. 동작영역은 90-100dB 정도이다. 챔버는 high-Q cavity이기 때문에 적당한 입력파워만 사용해도 높은 필드 레벨이 생성 될 수 있다. 이 방법에서 문제는 만일 생성되는 모드들이 너무 적게 되면 챔버가 의미가 있는 결과를 주지 않을 것이라는 점이다. 그리고 데이터 추출에 매우 시간이 걸릴 수 있다는 것이다.

### 제 3 절 Reverberation chamber 와 GTEM cell에서 측정된 SE값의 비교

#### 1. Reverberation chamber와 GTEM cell에서의 SE 측정

이 절에서는 reverberation chamber와 GTEM cell을 이용한 여러개의 슬롯이 뚫린 차폐된 박스를 EUT(Equipment-Under-Test)로 하여 측정된 SE 측정값의 평가 및 비교를 소개한다. GTEM cell 테스트에서 EUT는 특정의 편파와 특정한 필드의 평면파에 의해 노출되어진다. 반면 reverberation chamber 테스트에서는 필드는 랜덤하게 극성을 띄게 되고 모든 방향으로 부터 통계적으로 균등하고 EUT의 회전을 필요로 하지 않는 등방성의 필드의 모든 방향으로 부터 EUT를 노출 시킬 수 있다. 이 실험의 목적은 reverberation chamber에서의 SE 측정의 특성을 이해하는 것과 GTEM cell 측정과의 비교이다.

일반적인 SE 측정은 GTEM cell 또는 특정한 한 방향으로부터의 단일 극성 필드에 EUT를 노출시키는 Anechoic Chamber에서 실행된다. 이러한 상태에서의 측정은 EUT와 커플링에서 최악의 경우를 결정하는 것을 가능하게 한다. 그러나 실제 환경에서 EM 필드는 다른 방향들과 다른 극성으로부터 도달하게 될 것이다. 그러므로 MSC(Mode Stirred Chamber) 측정은 이 같은 환경에 보다 더 근접한다.

이 절에서는 여러개의 슬롯이 뚫린 차폐된 박스를 EUT로 하고 MSC안에서의 직교하는 두 평면파에서의 결합된 필드에 대한 SE시험과 GTEM Cell에서 SE시험을 비교한다.

Reverberation chamber 또는 MSC는 내부에서 통계적인 균일한 필드를 제공하기 위해 경계 조건을 충분히 변경할 전도성의 stirrer를 가진다. Reverberation chamber를 이용하는 기술은 효율적이고 비용 효율이 높은 측정 기술이다. 특히 차폐효과 또는 전자 장치들의 전자파내성 테스트에서 효율적이다. GTEM cell은 보통 실제 Chamber에서 실 측정이 수행되기 전에 작은 EUT의 간이 테스트를 위해 사용되는 경우가 많은데 1GHz까지  $\pm 3\text{dB}$ , 4GHz위에선  $\pm 4\text{dB}$ 의 필드 균일성을 띈다.

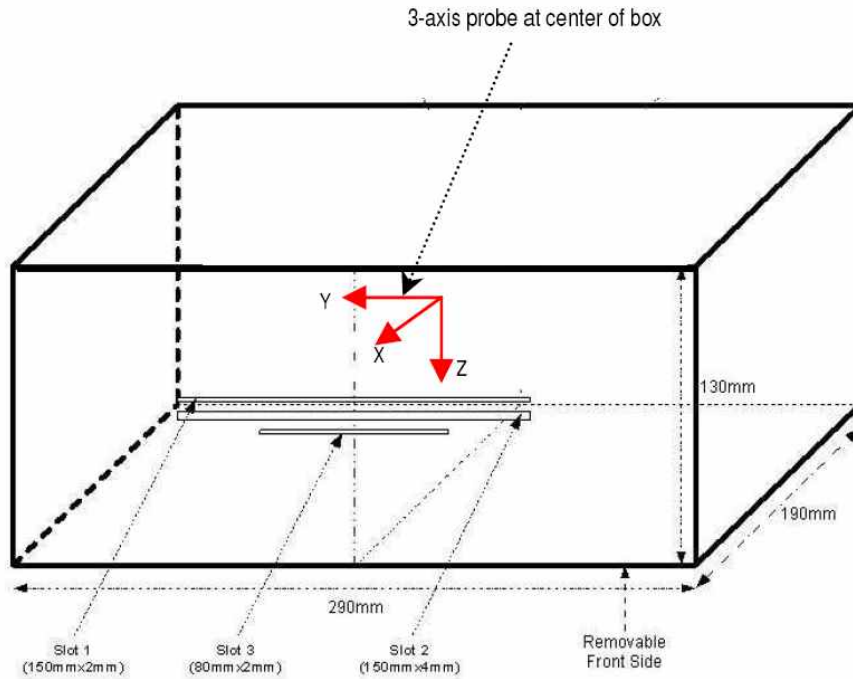


그림 12. EUT로 사용되는 슬롯이 뚫린 차폐체

그림 12는 서로 다른 슬롯 길이의 통로로 쉼드 된 직각의 상자인 EUT를 보여 준다. 알루미늄 실드 된 박스의 내부 치수는 290mm(L)×190mm(W)×130mm(H)이다. 그것은 차폐체의 앞면에 80mm×2mm, 150mm×2mm, 150mm×4mm 사이즈의 세 개의 수평 슬롯을 가지고 있다. 차폐체 안의 공동 공진 주파수를 아래의 공식으로 비교할 수 있다.

$$f_{nml} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n}{L}\right)^2 + \left(\frac{m}{W}\right)^2 + \left(\frac{l}{H}\right)^2}$$

여기서 인덱스 m, n, l은 standing wave pattern에서의 모드 수를 나타낸 것이고, L, W, H는 각각 직각의 차폐체 내부 길이, 넓이, 높이를 나타낸 것이고 c는 자유 공간에서의 빛의 속도를 나타낸다.

그림 2에서 보다시피 coupling 측정은 알루미늄 reverberation chamber에

서 실시되었다.

이 챔버는 113.6cm(L)×77cm(W)×54.5cm(H)의 내부 치수와 8mm의 두께를 가진다. 사용가능한 가장 낮은 주파수에서의 파장보다 큰 치수의 큰 stirrer를 사용하는 대신 chamber는 두개의 다른 축(수직이고 수평인 축)에 설치된 두개의 작은 stirrer를 reverberation chamber의 적절한 작동을 위해 요구되는 모드를 발생시키기 위해 이용했다.

각각의 stirrer의 정방향의 판은 수직과 수평으로 각각 90, 135도의 휨각으로 70.56cm<sup>2</sup>(8.4cm×8.4cm)의 범위를 가진다. TE<sub>110</sub>에서 첫 번째 공진 주파수는 최소 사용가능한 주파수 800MHz와 235MHz에서 발생되었다.

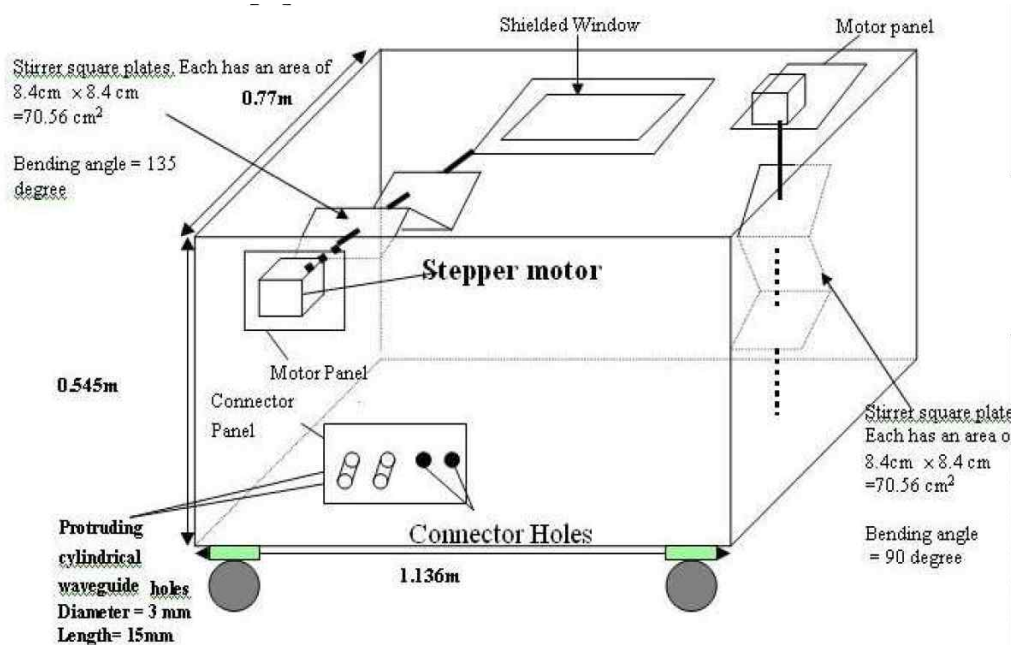


그림 13. 2개의 stirrer를 가지는 reverberation chamber

독립적으로 두개의 stirrer가 회전을 하는데 있어 많은 조합이 있다. 상관계수 분석은 최소의 독립 샘플을 맞추기 위해 요구된 샘플들을 제공하기 위한 최고의 stirrer 과정 조합을 정의하기 위해 실시되었다. 그림 14는 다양한 stirrer 과정 결함을 위해 800MHz에서 stirrer의 기능으로써 상관계수의 절대 값 결과를 보인다. 반면 그림 15는 angle 차감 값을 얻기 위해

0.37에서의 교차점을 보인다. 독립적인 샘플들은 stirrer로 angle offset value를 취함으로써 나오는 전체 샘플의 비로 계산되어진다.

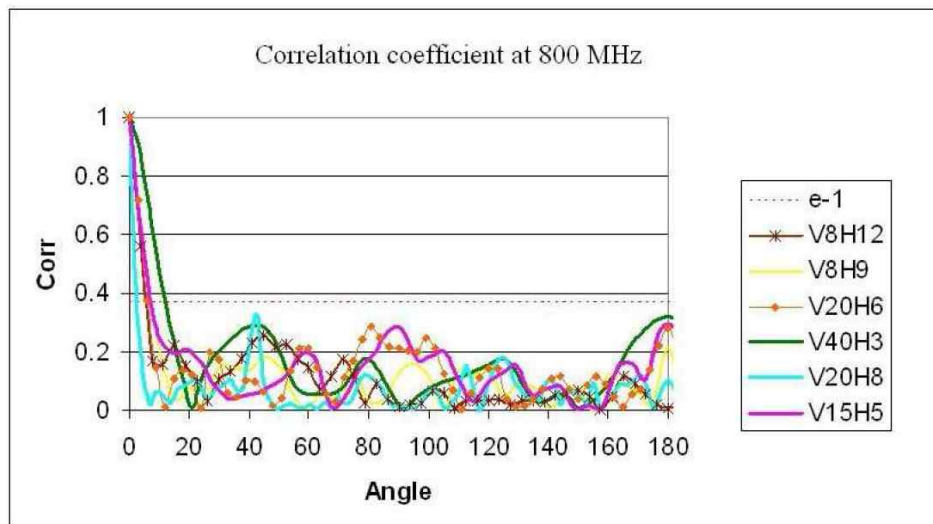


그림 14. 800MHz에서 stirrer의 기능으로써 상관계수의 절대 값 결과

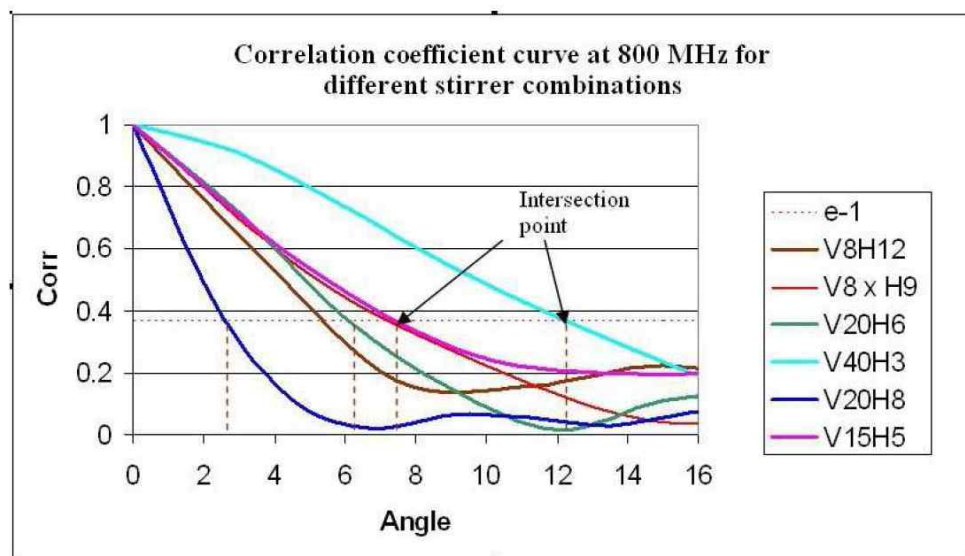


그림 15. angle 차감 값을 얻기 위해 0.37에서의 교차점

Stirrer combination	Intersection point at 0.37 to obtain angle offset (deg)	Number of samples/steps	Independent samples (360 degree/ intersection angle)
V8H12	5	96 steps	65
V8H9	7.3	72steps	49
V20 H6	6	120 steps	60
V40H3	12	120 steps	30
V20H8	2.5	160 steps	144
V15H5	7	75 steps	51

표 2. Stirrer 조합 표

결과는 최고의 51개의 독립적인 샘플과 stirrer 효율을 제공한 75개의 샘플들의 V15H5을 밝혀냈다. 덧붙여 그것의 상관 값은 0.37 범위보다 아래에 있고 최소 추천된 독립 샘플들의 자격을 세웠다. 비록 160 샘플의 V20H8가 표 1에서 보여진 것 과 같이 144의 가장 높은 독립 샘플을 제공해도 모든 결과들 사이에서 테스트 시간이 엄청나게 증가할 것으로 보여지지 않는다. 그러므로 V15H5가 측정을 위해 선택되었다.

차폐체에서의 결합 측정은 GTEM cell과 800MHz에서 2800MHz까지의 reverberation chamber에서 실행되었다. reverberation chamber에서 실시된 SE결과와 GTEM cell에서의 결과를 가장 잘 비교하기위해 그림 16에서 보여진 것과 같이 3축 모니터링 probe가 전계 모니터링 meter를 통하여 각 축의 전계강도를 측정하기위해 차폐체의 중심에 설치되었다. 전계 데이터는 자동적으로 컴퓨터 안에 저장된다.



그림 16. 3축 모니터링 probe와 E-field meter

GTEM cell은 4m (L) x 2.2m (W) x 2.1m (H)의 전면 치수를 가진다. 그림 6에서 보다시피, 차폐체는 균일한 필드 노출 공간 안의 GTEM cell 공급 포트로부터 3미터의 거리에 위치한다. 3축 필드 모니터링 프로브는 수평 슬롯에서 x축은 바로 슬롯의 구멍을 가리키고 z축은 오른쪽 angle의 아래에 위치하는 것처럼 EUT의 중앙에 자리 잡는다. EUT는 수평 slot 구멍이 투사 필드를 향해 있는 것처럼 위치되어 있다. 그것은 빗면의 수평 베이스가 8도의 각으로 약간 기울어져있다. 이것은 수직 축이 측정하는 동안 최대 전계 노출을 제공하기 위해 GTEM cell과 수직 필드와 정렬되도록 해준다. CW 신호는 입력 포트에 입력되기 전에 증폭된다.

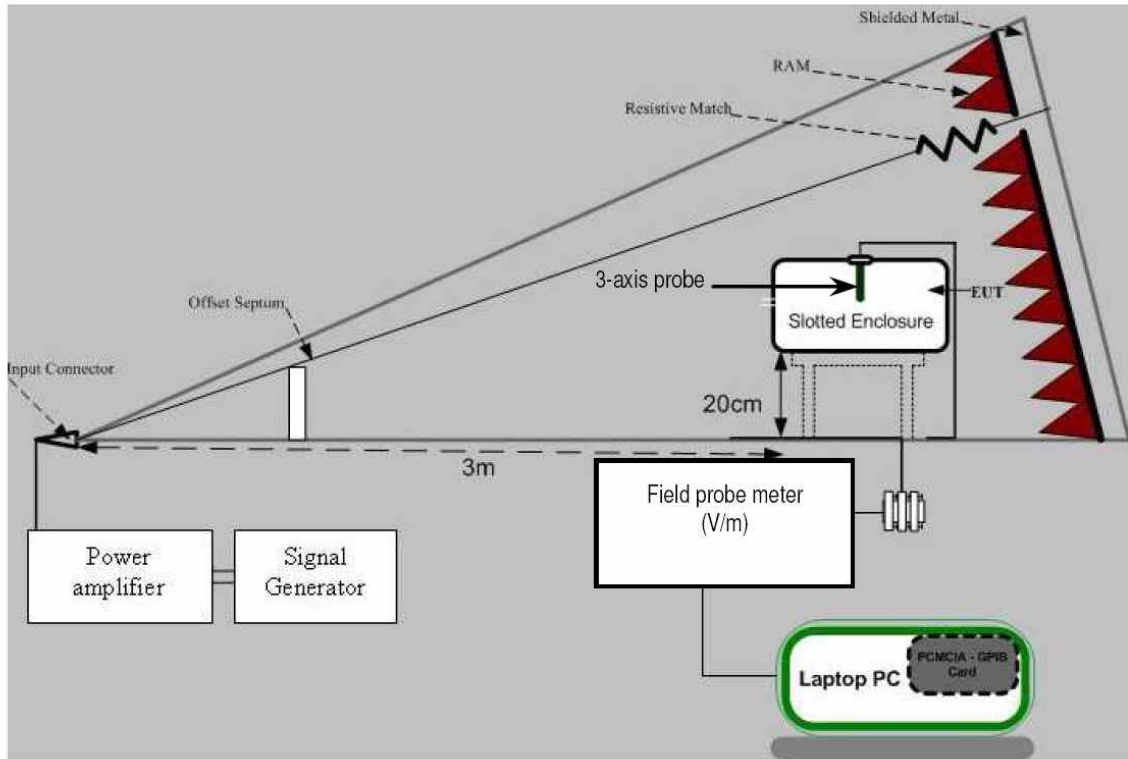


그림 17. GTEM cell에서의 SE측정을 위한 장비 셋팅

reverberation chamber 에서의 SE테스트를 위한 장비셋팅은 그림 18와 같다. 측정 과정은 필드 모니터링 미터가 2개의 stirrer가 회전하는 때 각도별로 전계 강도를 측정함으로 자동으로 이루어진다.

reverberation chamber안에서 얻은 차폐체의 SE측정값은 GTEM cell에서의 측정으로 얻은 각 축의 결과들과 비교되어진다.



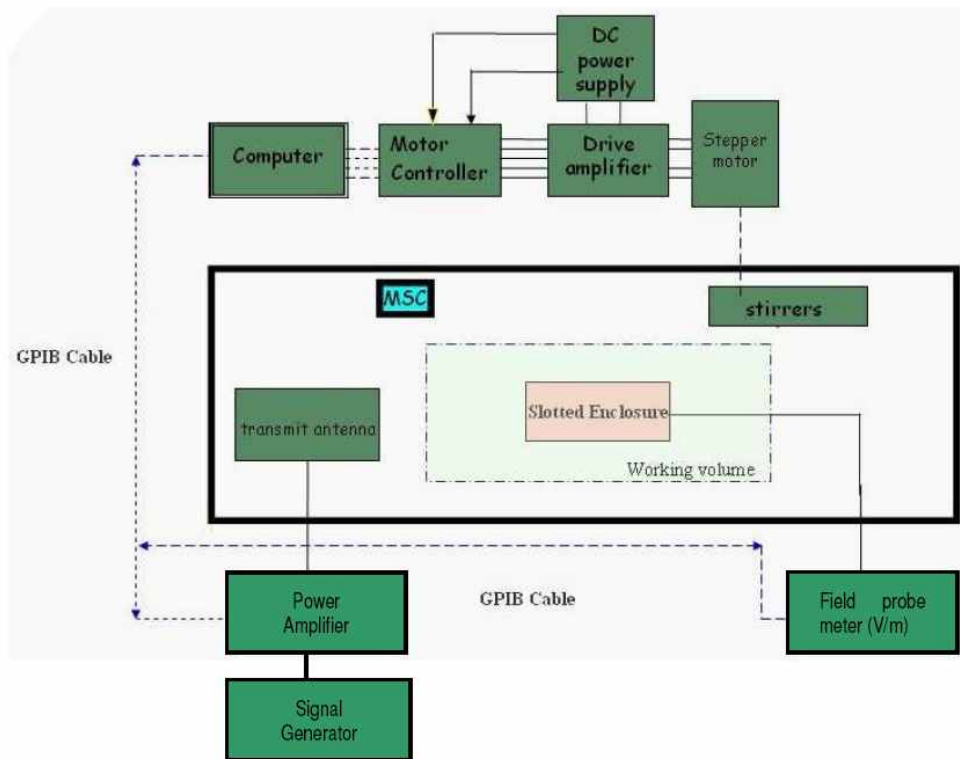


그림 18. reverberation chamber 에서의 SE테스트를 위한 장비 셋팅

## 2. Z축에서 MSC와 GTEM cell 사이에서의 SE 결과 비교

Reverberation chamber에서 얻은 차폐체의 SE 측정값은 z축과 y축에서의 GTEM cell에서의 측정값과 비교되어진다. 그림 19는 reverberation chamber와 GTEM cell에서 z축에 따른 SE의 측정값을 보여준다. GTEM cell 측정값은 slot의 구멍이 입사 전계에 수평한 상태에서 실시되었다. 측정값은 각 측정 방법에 따라 860MHz와 1020MHz에서 두개의 강한

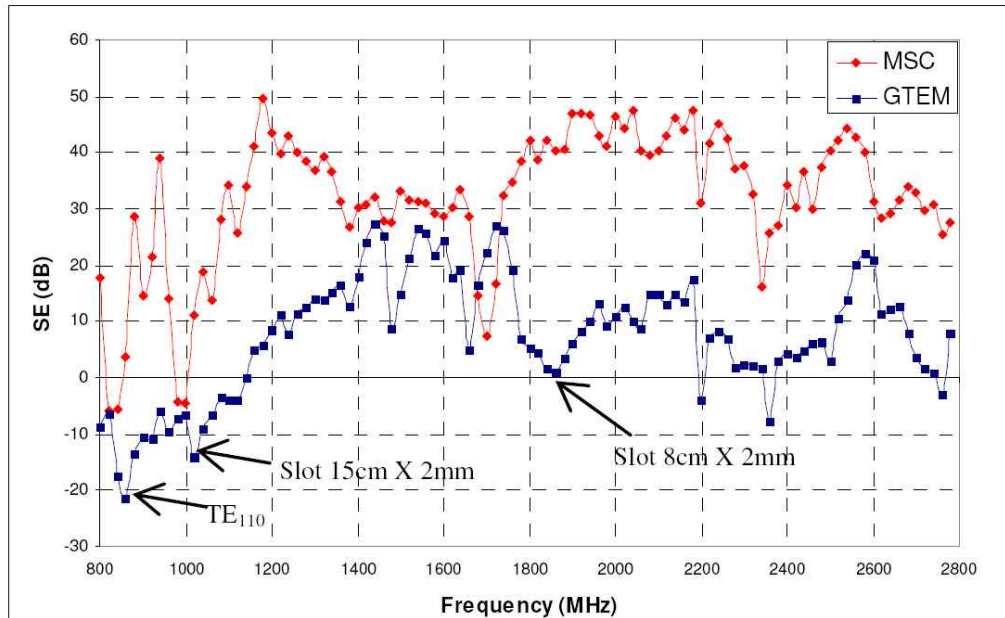


그림 19. Reverberation chamber와 GTEM cell에서 z축에 따른 SE의 측정값

공명을 나타냈다. 이것들은  $TE_{110}$  모드와 15cm 슬롯의 공명에 상응한다. 8cm의 슬롯 공명들은 GTEM cell 측정에서 관찰되지만 MSC에서는 관찰되지 않는다.

두 방법의 SE값의 평균 차이는 GTEM cell에서의 측정이 편파가 맞아 있기 때문에 최대 전계 강도와 결합된 사실을 고려하면 적당한 약 20dB이다. MSC에서는 모든 필드는 정면으로부터 도착한 것들을 제외하고는 차단된다. 이것은 측정된 SE값이 GTEM cell에서 20~30dB 높은 것을 설명한다.

1.4GHz와 1.8GHz 사이에서 차이는 매우 줄게 된다. 이것은 이 주파수대에서 몇몇의 공진 모드의 존재 때문이다.

### 3. Y축에서 MSC와 GTEM cell 사이에서의 SE 결과 비교

y축에서 SE결과를 비교하기 위해 GTEM cell안에 위치한 차폐체를 90도로 회전시킨다.

그림 20은 y축에서 MSC와 GTEM cell 사이에서의 SE측정 결과를 비교 것으로 reverberation chamber y축 SE값이 약 10dB정도로 GTEM cell보다 낮다는 것을 보인다. 이것은 GTEM cell 안의 EUT의 슬롯방향이 z축 방향보다는 약한 전계에 편파가 맞추어진 것이고 MSC 안에서는 큰 변화가 없었음을 보여준다.

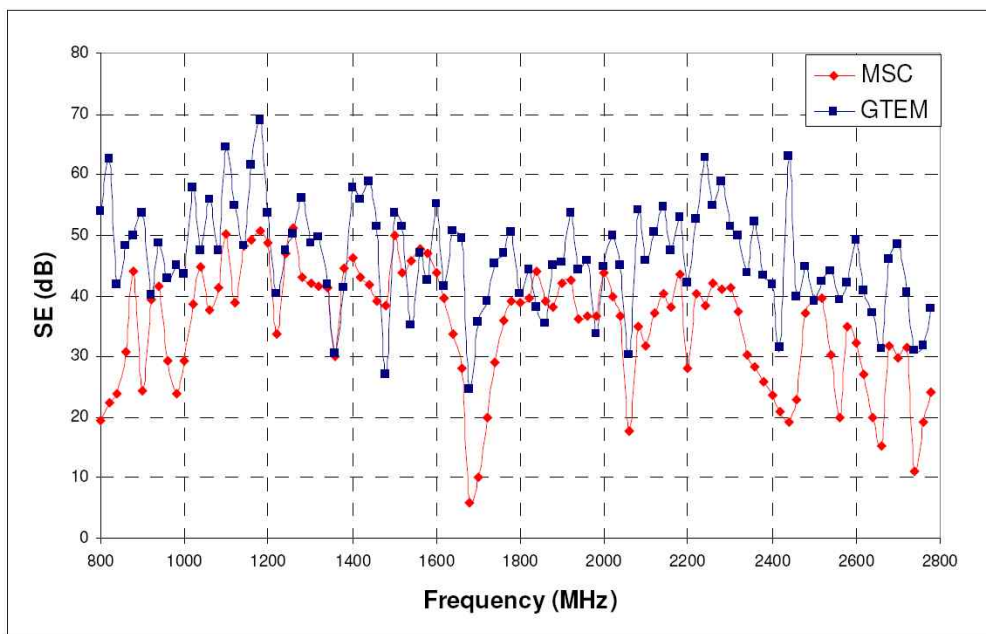


그림 20. Reverberation chamber와 GTEM cell에서 y축에 따른 SE의 측정값

## 제 4 장 1-18GHz 전자파 차폐효과 측정방법 연구

### 제 1 절 GTEM cell을 이용한 측정법

GHz대역에서 GTEM cell을 이용한 측정방법은 그림 21과 같으며 평면파에 대한 SE값을 측정하게 된다.

조사 결과 300MHz-5GHz대역에서 40dB의 동작영역을 가지고 800MHz-4GHz에서 50dB의 동작 영역을 가지는 GTEM cell을 이용한 차폐측정 시스템이 상용화 되어있다. 샘플은 15mm보다 얇은 평면형이어야 하며 크기는 100x100mm이고 장비 설치공간은 2.0m x 2.0m정도이다. 프리 앰프와 회로망 분석기만을 가지고 측정할 수 있는 시스템이다.

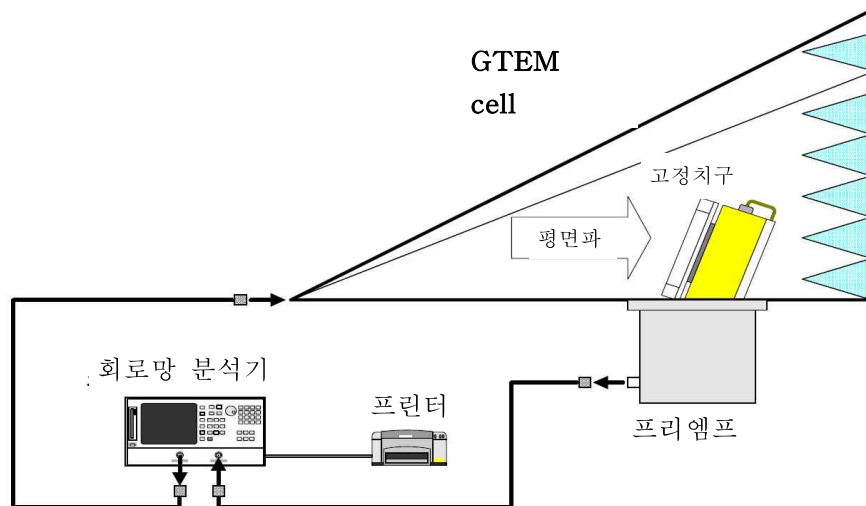


그림 21. GTEM cell을 이용한 SE측정 장비 셋업

## 제 2 절 광대역 더블리지 사각도파관을 이용한 측정법

### 1. 더블리지 도파관 이론

일반적인 표준 직사각형 도파관에 의해 이루어 질 수 있는 지배적인 한 개의  $TE_{10}$  모드 운영을 위한 최대 대역폭은 2:1이다.  $TE_{10}$ 의 컷오프 wavelength는  $\lambda_c = 2a(a > b)$  이다. 광대역 주파수 범위의 편리한 테스트를 위해, 광대역 샘플 홀더가 필요하게 되는데 이것은 더블리지 도파관을 사용함으로써 해결될 수 있다.

그림 22에서 보이는 바와 같이 직사각형의 도파관의 벽의 위와 아래에 직사각형 블록을 설치하게 되면 더블리지 도파관이 구성된다. 일반적으로, 리지는 위상 속도를 낮추고, 특성 임피던스를 줄이는 경향을 보인다. 위상속도의 감소는  $TE_{10}$ 모드의 컷오프 주파수의 감소와 고차 모드의 컷오프 주파수의 증가, 손실의 증가, 다룰 수 있는 전력의 감소를 가져온다. 이 같은 특성들은 리지의 두께 및 위 아래 리지 간 간격에 의해 결정된다.

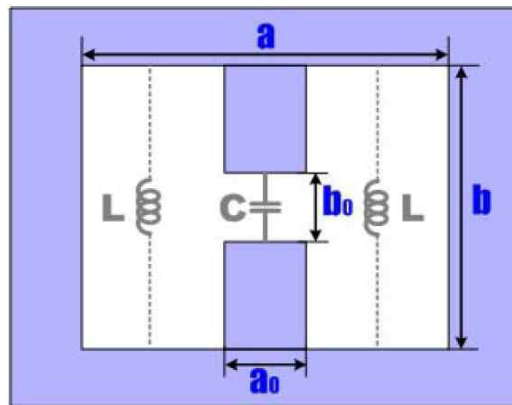


그림 22. 더블리지 도파관의 단면

공진에서 더블리지 도파관은 그림 22에서 처럼 병렬 LC 네트워크로서 모델화된다. 리지 사이의 갭은 캐패시턴스 C로 제시된다. 그리고 더블리지 도파관의 사이드 섹션 각각은 인덕턴스 L로 나타내진다. 도파관 길이를 위한 이런 값은 다음 수식을 사용해서 의해 구할 수 있다.

$$C = \epsilon \left( \frac{a_0 l}{b_0} \right)$$

$$L = \mu \left( \frac{b(a - a_0)}{2l} \right)$$

여기서  $l$ 은 도파관의 길이이다.

전체 인덕턴스가 2개의  $L$ 의 평행한 조합이기 때문에  $TE_{10}$ 모드의 컷오프 주파수는 다음 수식으로 얻을 수 있다.

$$\omega_c = 2\pi f_c = \sqrt{\frac{2}{LC}}$$

$$f_c = \frac{1}{2a \sqrt{\mu\epsilon}} \left[ \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{a}{a_0} \frac{b_0}{b} \frac{1}{1 - a_0/a}} \right]$$

## 2. 더블리지 도파관을 이용한 차폐율 측정치구

IEEE논문 검색 결과 광대역 특성을 가지는 더블리지 도파관을 이용한 측정방법을 검토 할 수 있었다. 논문에서 검토 된 더블리지 도파관은 각각 1-3.5GHz, 3.5-10GHz대역을 가진다.

각 치구는  $S_{11} < -20\text{dB}$ 를 만족하며 구조 및 상세 치수는 그림 23, 24, 25와 같다.  $S_{11}$ 에대한 시뮬레이션 결과 및 실제 측정 결과는 그림 26, 27, 28, 29와 같다. 실제 제작된 사진은 그림 30, 31와 같다.

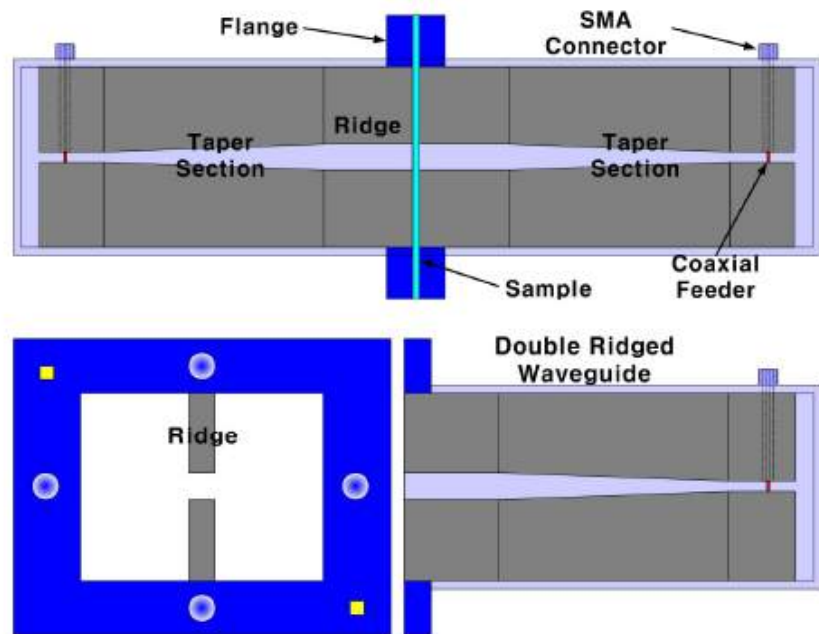


그림 23. 더블리지 도파관 차폐효과 측정치구

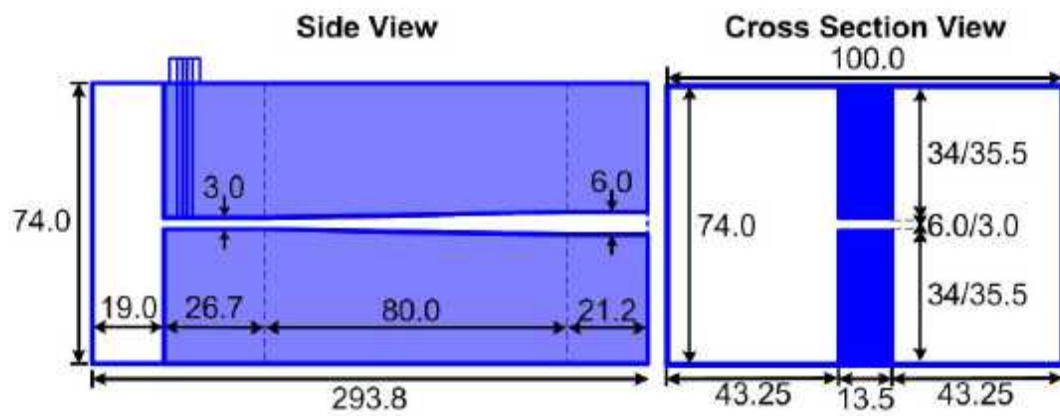


그림 24. 1-3.5GHz 차폐효과측정치구 치수

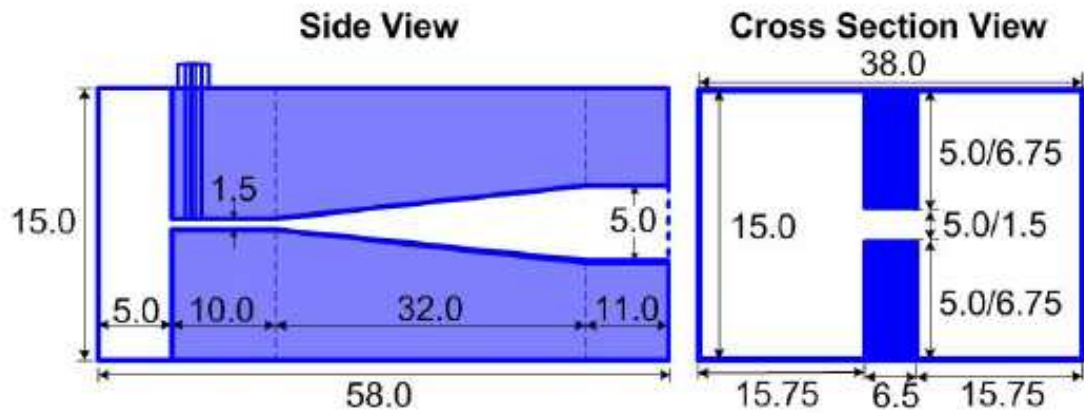


그림 25. 3.5-10GHz차폐효과 측정치구 치수

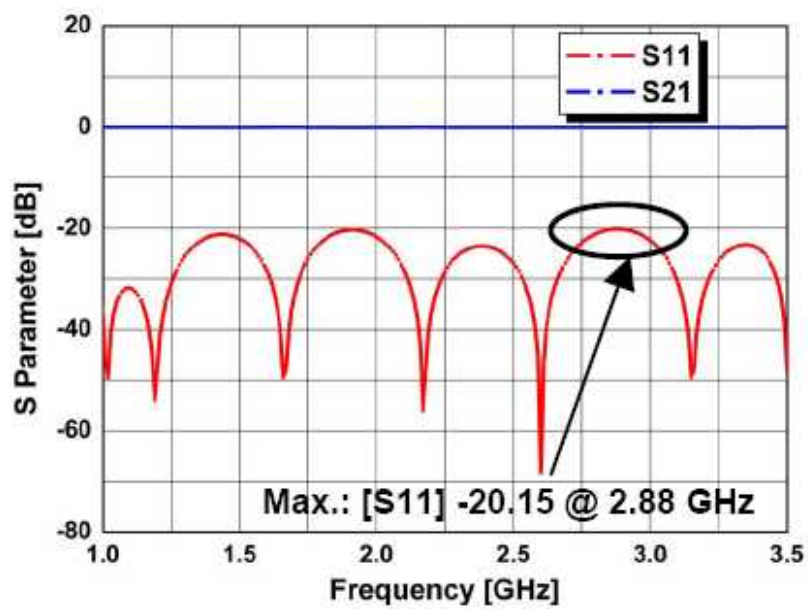


그림 26. 1-3.5GHz  $S_{11}$  시뮬레이션 결과



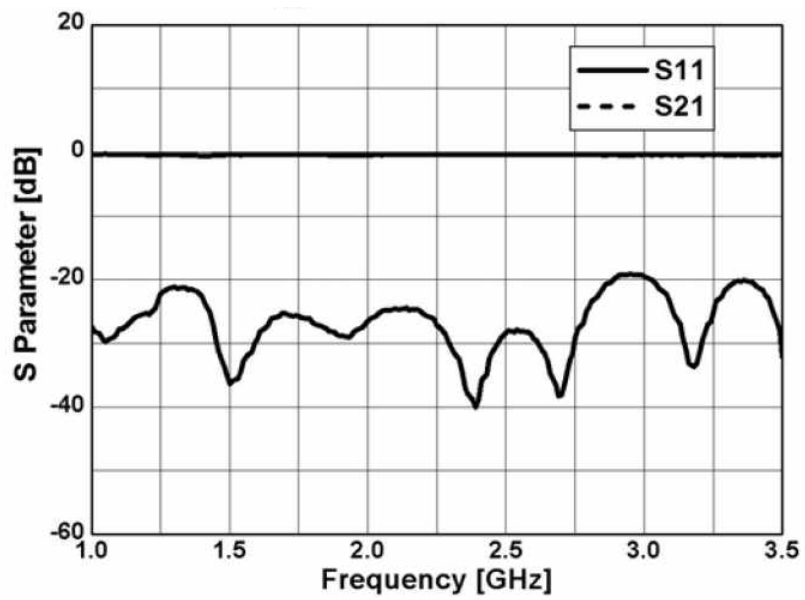


그림 27. 1-3.5GHz  $S_{11}$  실측 결과

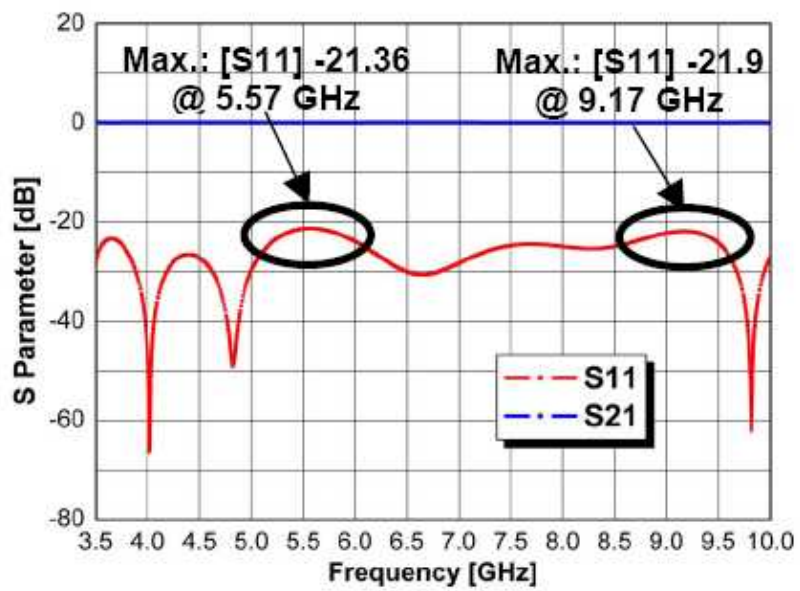


그림 28. 3.5-10GHz  $S_{11}$  시뮬레이션 결과

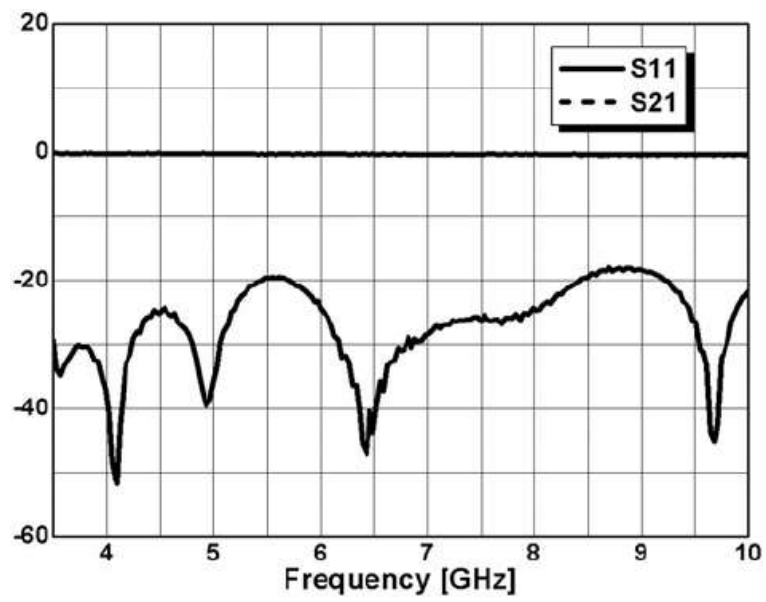


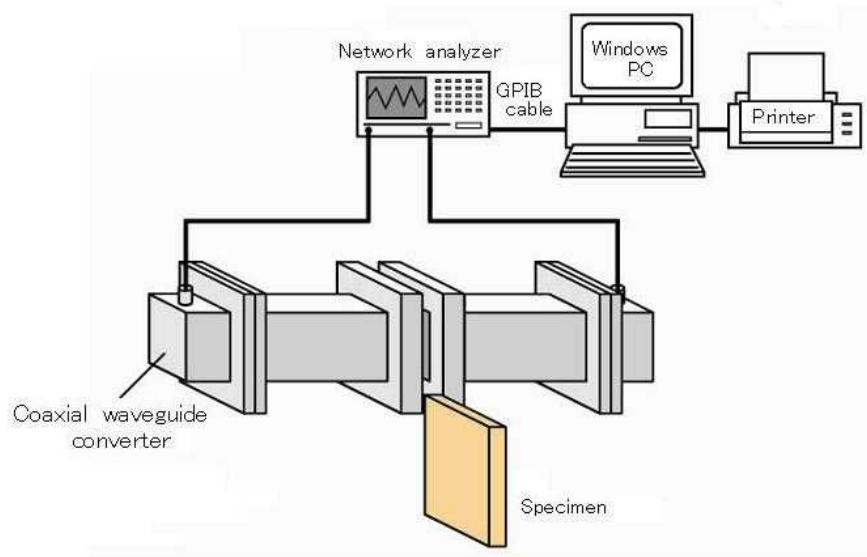
그림 29. 3.5-10GHz  $S_{11}$  실측 결과



그림 30. 실제 제작 된 1-3.5GHz 차폐효과 측정치구



그림 31. 실제 제작 된 3.5-10GHz차폐효과 측정치구



(a) 장비셋업

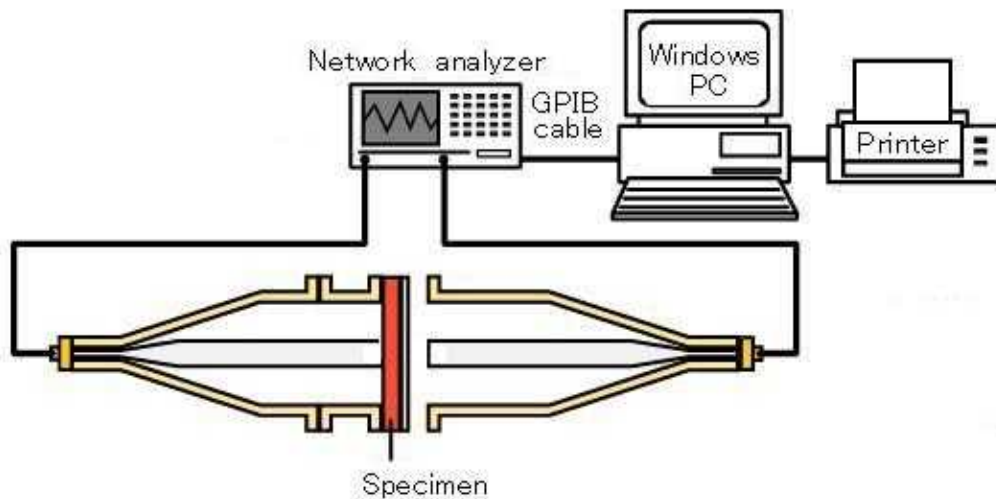
Name	Model No.	Range of frequency (GHz)	Inside diameter size(mm)	Specimen size
Main body	SEWR-770	0.96-1.6	195.6 × 97.8	Width and depth are 100mm larger than inside diameter size
	SEWR-430	1.6-2.60	109.2 × 54.6	
	SEWR-284	2.60-3.95	72.1 × 34.0	
	SEWR-187	3.95-5.85	47.6 × 22.1	
	SEWR-159	4.90-7.05	40.4 × 20.2	
	SEWR-137	5.85-8.2	34.9 × 15.8	
	SEWR-90	8.2-12.4	22.9 × 10.2	
	SEWR-62	12.4-18	15.8 × 7.9	
	SEWR-42	18-26.5	10.7 × 4.3	
	SEWR-28	26.5-40	7.1 × 3.6	
	SEWR-19	40-60	4.8 × 2.3	
	SEWR-12	60-90	3.1 × 1.6	
Measurement software	DMP-12 (1-40GHz)			
	DMP-13 (40-90GHz)			
Scalar network analyzer				
Micro wave / millimeter wave cable 1mx2set				
GPiB cable	GP-01			

(b)주파수대역별 측정치구

그림 32. 사각도파관을 이용한 SE 측정장비 셋업(a) 및 측정 주파수대역별 측정치구(b)

또한 광대역 특성을 가지는 더블리지 도파관이 아닌 일반 사각도파관을 이용한 차폐치구는 제품화 되어 있으며 주파수대역별로 여러 크기로 사용된다. 장비 셋업 및 측정주파수대역별 측정치구는 그림 32와 같다.

### 제 3 절 축소된 Flanged Circular Coaxial Transmission\_line holder를 이용한 측정법



(a) 장비 셋업

Name	Model No.	Frequency
Effect of shield measurement kit	S-152D	For 12~800MHz
	S-39D	For 45M~3GHz
	S-20D	For 100M~6GHz
	S-GPC7	For 500M~18GHz
Measurement software	DMP-11	
Vector network analyzer or Scalar network analyzer		
Windows PC (with printer)		
GPIB cable	GP-01	

(b) 장비 사양

그림 33. Flanged Circular Coaxial Transmission\_line holder를 이용한 SE 측정장비 셋업(a) 및 장비사양(b)

Flanged Circular Coaxial Transmission\_line holder를 1-18GHz 대역에 맞게 축소하여 차폐효과를 측정할 수 있다.

조사 결과 일본회사에서 이를 이용한 차폐치구를 제품화하여 판매하고 있다. 장비 셋업 및 장비사양은 그림 33과 같다.

## 제 5 장 차폐효과 측정시스템 구축방안

### 제 1 절 보유장비 활용을 통한 시험 검토

#### 1. GTEM cell 업그레이드를 통한 측정

기존에 GTEM cell을 보유하고 있다면 그림 21과 같이 셋팅하기 위해 샘플을 고정하기위한 치구와 프리 앰프를 기존의 GTEM cell에 장착하는 방법을 생각 할 수 있다. 기존 GTEM cell을 업그레이드 하기위한 방법 및 해외 및 국내 업체등을 조사하였다. 그림 34와 35는 일본의 GTEM cell을 이용한 차폐율 측정 시스템을 설계 제작하는 업체의 제품을 보이고 있다.



그림 34. GTEM cell을 이용한 차폐율 측정치구

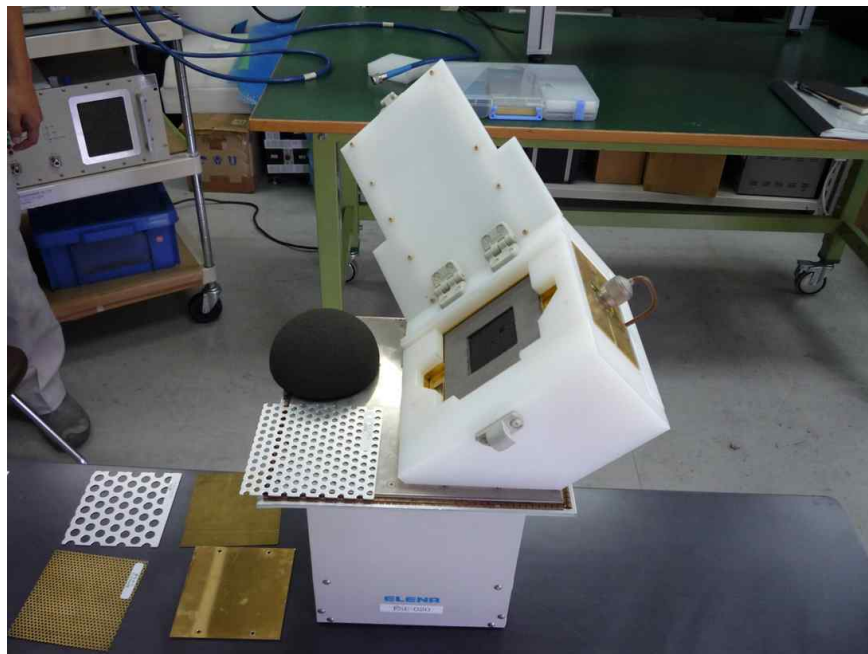
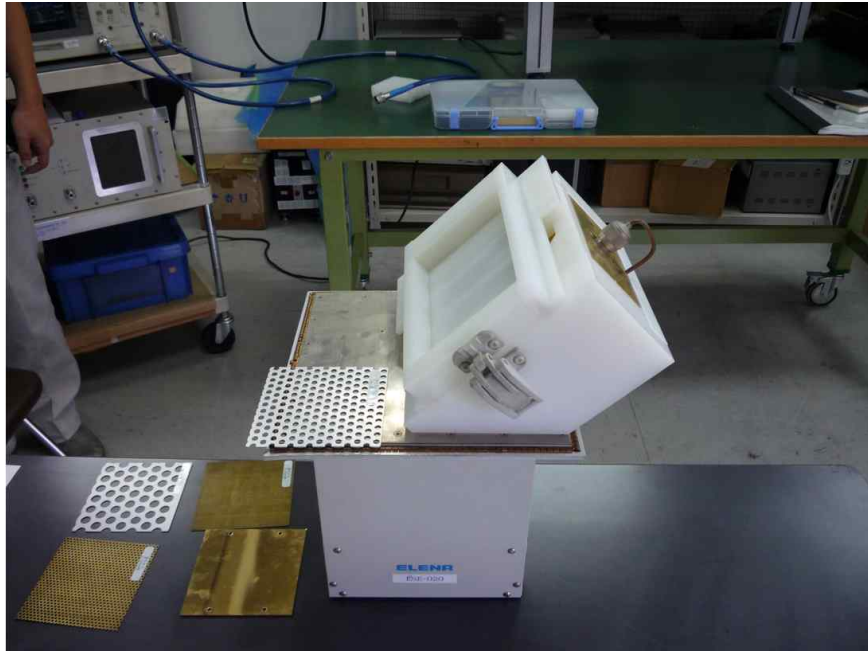


그림 35. GTEM cell 내부에 장착되는 샘플 고정 치구

현재 전파연구소에서는 Schaffner사의 GTEM cell을 보유하고 있으며 이 GTEM cell을 업그레이드 하기 위한 방법을 elena라는 일본 회사를 통해서 알아 보았다. elena라는 일본회사를 간략히 소개하자면 GTEM cell을 자체 제작하면서 차폐측정 기술을 보유하여 GHz대역의 차폐측정 시스템

을 개발 판매하고 있다. 이 업체를 직접 방문하여 관련 시스템을 직접 보고 업그레이드 가능성 검토 및 기술 협의 하였으며 기술적인 면을 보았을 때 elena측에서 직접 제작한 GTEM cell이 아닌 Schaffner사의 GTEM cell을 업그레이드 할 경우 아래와 같은 문제점이 있을 수 는 있지만 불가능하지 않으며 아래와 같은 문제점을 검토 후 스펙의 절충점이나 사용하고자하는 요구환경의 범위에 맞을 경우 기존의 GTEM cell을 효율적으로 사용 할 수 있는 장점이 있다.

- elena측에서 제시한 기본적인 구성품
  - a. EGT-250 GTEM CELL : DC ~ 5GHz
  - b. Pre-Amplifier : 300MHz ~ 5GHz, 30dB
  - c. 재료고정 JIG (Probe) : 300MHz ~ 5GHz, 30dB
  - d. 동축 Cable : DC ~ 8GHz
- Schaffner의 GTEM에 Elena 의 Shield측정장치(Probe)를 부착 사용가능 여부:
 

elena측에서 제시한 a. EGT-250, b. Pre-Amplifier, c. 재료고정 JIG의 3점의 경우 elena사의 오리지널 제품으로서 측정 Dynamic Range 300MHz ~ 5GHz, 40dB이상(800MHz ~ 4GHz, 50dB이상의 Spec을 확보하고 있는 Know-How를 갖고 조정을 하여 고객에게 제공하고 있다. 타사의 GTEM cell에 적용할 경우 스펙의 보장을 위해서 업그레이드 과정에서 보유하고 있는 GTEM cell의 성능과 관련한 기술 검토 및 GTEM cell에 프리 앰프 및 고정치구를 고정시키기 위한 물리적인 변형에서의 성능 확보등의 작업이 필요하게 될 것이며 elena측 장비만 썼을 때의 동작영역 및 주요성능에서의 저하를 보일 수 도 있다.



## 제 2 절 측정치구 제작가능성 검토

### 1. 광대역 더블리지 사각도파관의 제작가능성 검토

앞서 설명한 광대역 더블리지 사각도파관의 치수 및 시뮬레이션 결과는 검색된 IEEE논문을 인용한 것으로 기술적인 내용 및 실제제작 후 측정데이터까지 제시하고 있다.

논문 내용을 참고로 할 때 세부적인 치수까지 제시하고 있기 때문에 바로 제작하여 실제 차폐율측정에 쓰일 수 있을 것으로 판단된다.

더블리지 사각도파관을 이용할 경우 1GHz-3.5GHz대역용과 3.5GHz-10GHz대역용 2개의 치수로 1-10GHz에 걸친 광대역측정을 할 수 있으며 샘플가공이 상대적으로 용이하다는 장점이 있다.

실제 가공을 고려한다면 리지부분이나 도파관 가로 세로 길이의 경우 정확한 치수가 제시 되어있고 가공자체도 어렵지 않을 것으로 판단되나 SMA타입 커넥터의 이용 시 리지로의 급전구조 및 커넥터 내심과 외심사이 간격에 따른 임피던스와 주파수 관계가 고려되어 저야 할 것이다.

또한 앞서 설명한 것처럼 더블리지 도파관을 이용한 차폐율측정의 경우 도파관의 주 모드가 TEM모드가 아니므로 far-field환경측정으로 분류하기 힘들며 near-field환경 측정으로 보기에 그 연구가 아직 미흡한 부분이 있기 때문에 이 점을 감안하고 사용해야 할 것이다.

### 2. 1-18GHz 대역의 Flanged Circular Coaxial Transmission\_line holder 제작가능성 검토

1-18GHz대역의 Flanged Circular Coaxial Transmission\_line holder의 경우 앞서 설명한 30MHz-1.5GHz대역의 Flanged Circular Coaxial Transmission\_line holder를 1-18GHz대역에 맞는 치수로 축소하여 같은 방식으로 차폐율측정을 할 수 있다.

이 경우 주파수가 높아지면서 파장이 작아지고 기본적으로 공기를 유전체로하는 동축선로 구조이면서 50Ω을 유지하기 위한 내심과 외심의 간격

및 내심의 직경이 중요 변수가 되며 샘플을 장착하지 않은 상태에서 얼마나 에너지가 잘 통과하는지에 대한 예상이나 시뮬레이션이 필요하다.

따라서 3D 전자장 시뮬레이션 툴을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션에서는 기존에 보유하고 있는 SMA커넥터와 제작될 치구를 연결하기 위해 보유하고 있는 SMA커넥터의 치수를 조사 후 이 커넥터에 연결가능하면서 1-18GHz대역에서 샘플을 장착할 만큼의 내심면적을 확보하기 위한 테이퍼 부분, 샘플 장착을 원활히 하기위한 플랜지부분의 고정구조 그리고 이 대역에서의 에너지 전달율을 고려하였다.

시뮬레이션 결과 동축선의 기본모드인 TEM모드를 확인하고 에너지 전달정도를 나타내는  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ , 스미스차트등을 확인 하였으며 관련 도면을 작성하여 보았다. 시뮬레이션 결과 및 관련 도면은 아래와 같다.

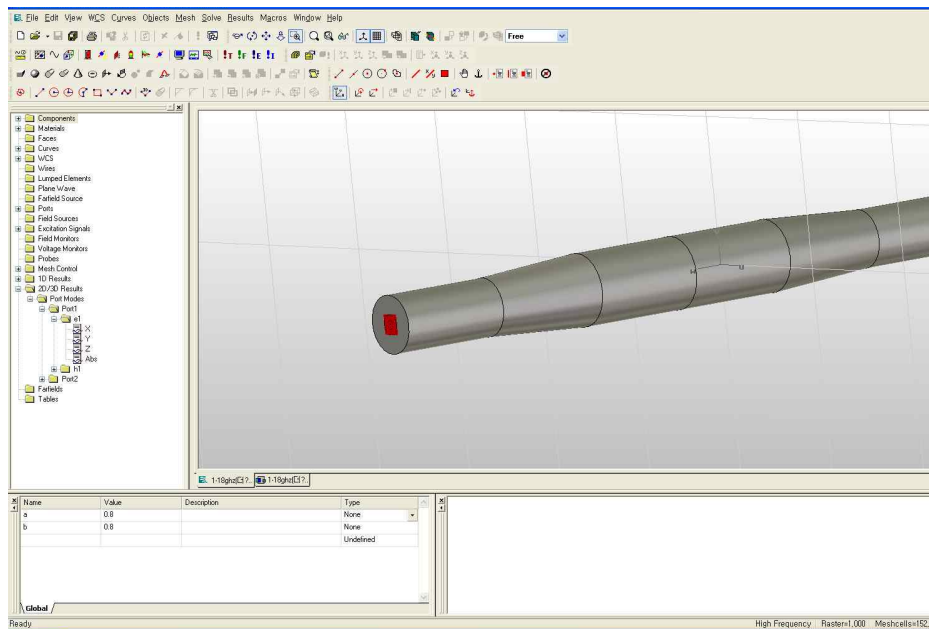


그림 36. 시뮬레이션툴에서 그려진 축소된 Flanged Circular Coaxial Transmission\_line holder

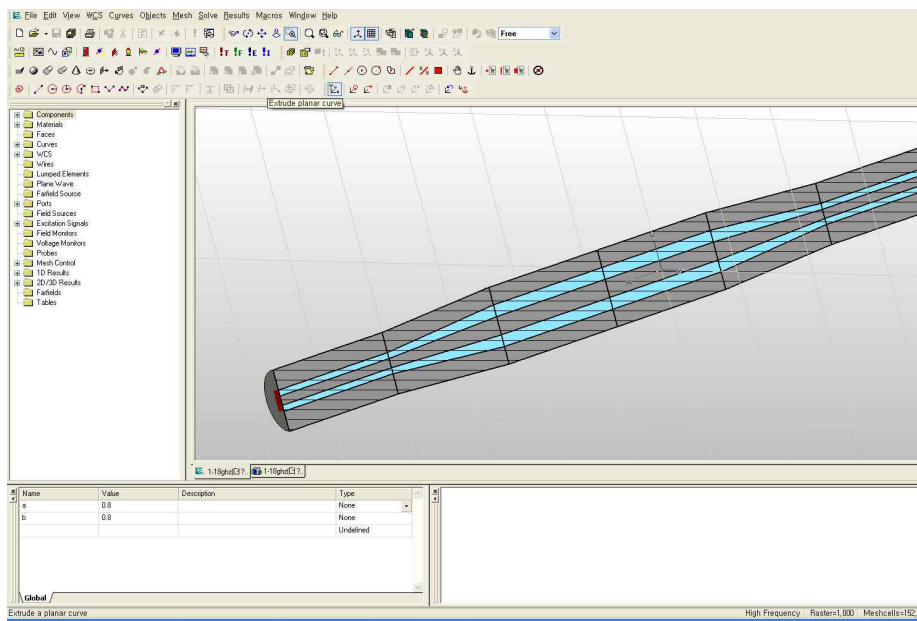


그림 37. 시뮬레이션툴에서 그려진 축소된 Flanged Circular Coaxial Transmission\_line holder의 단면

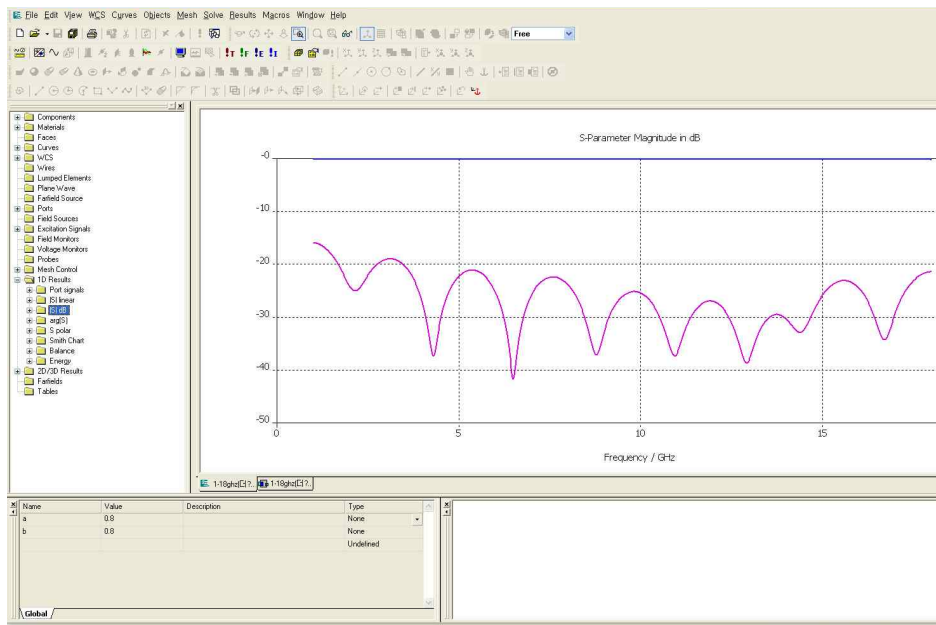


그림 38. 시뮬레이션 결과  $S_{11}$

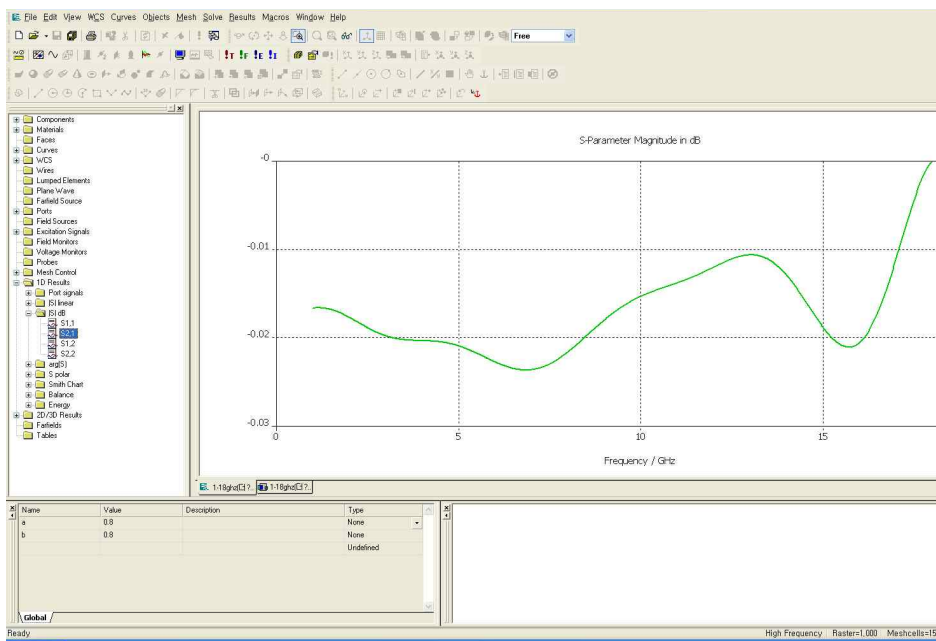


그림 39. 시뮬레이션 결과  $S_{21}$

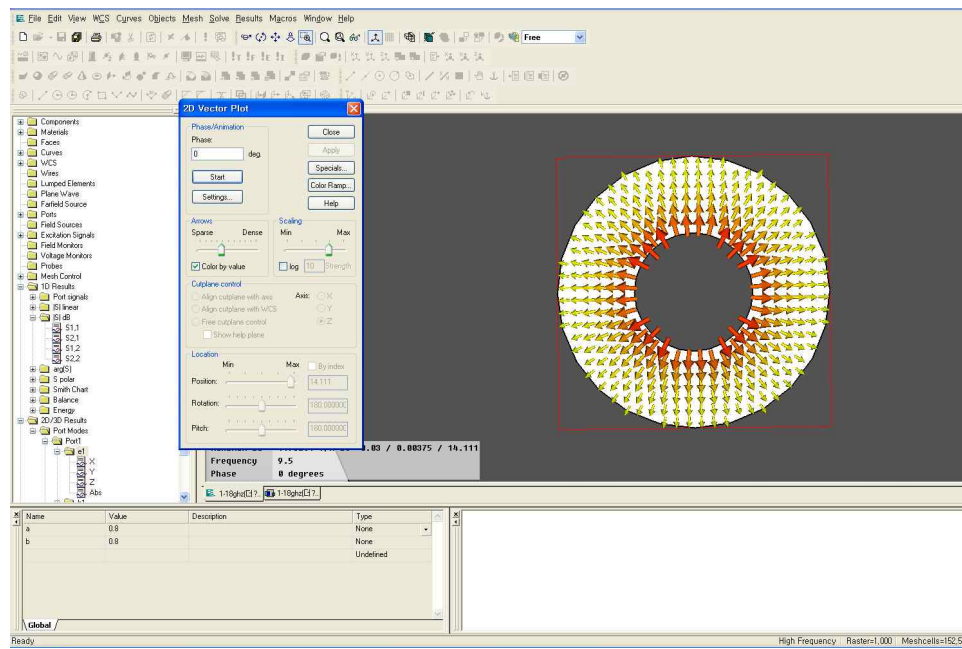
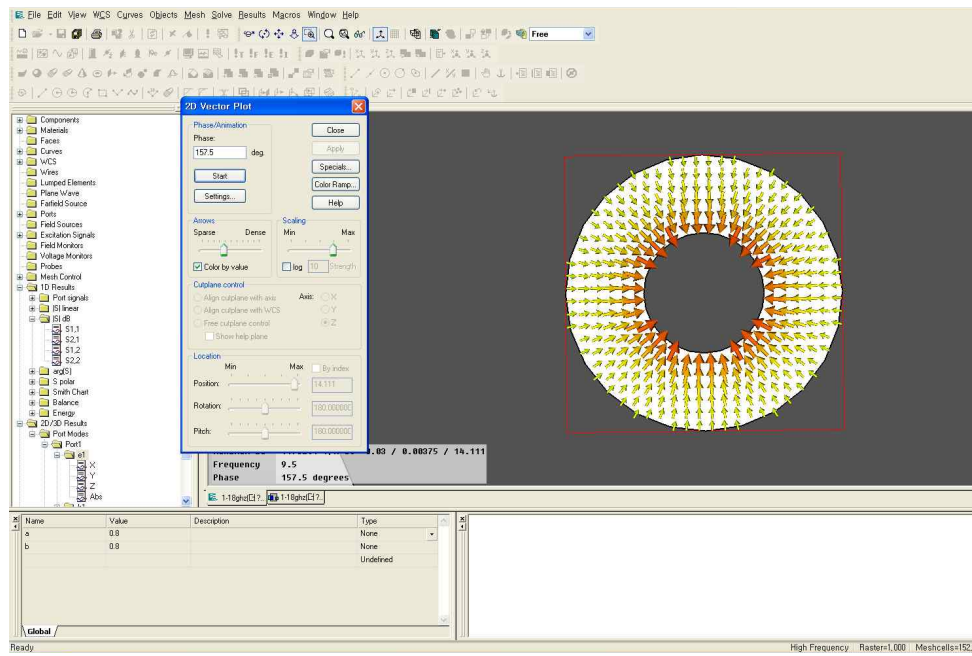


그림 40. 시뮬레이션 결과 TEM모드의 확인

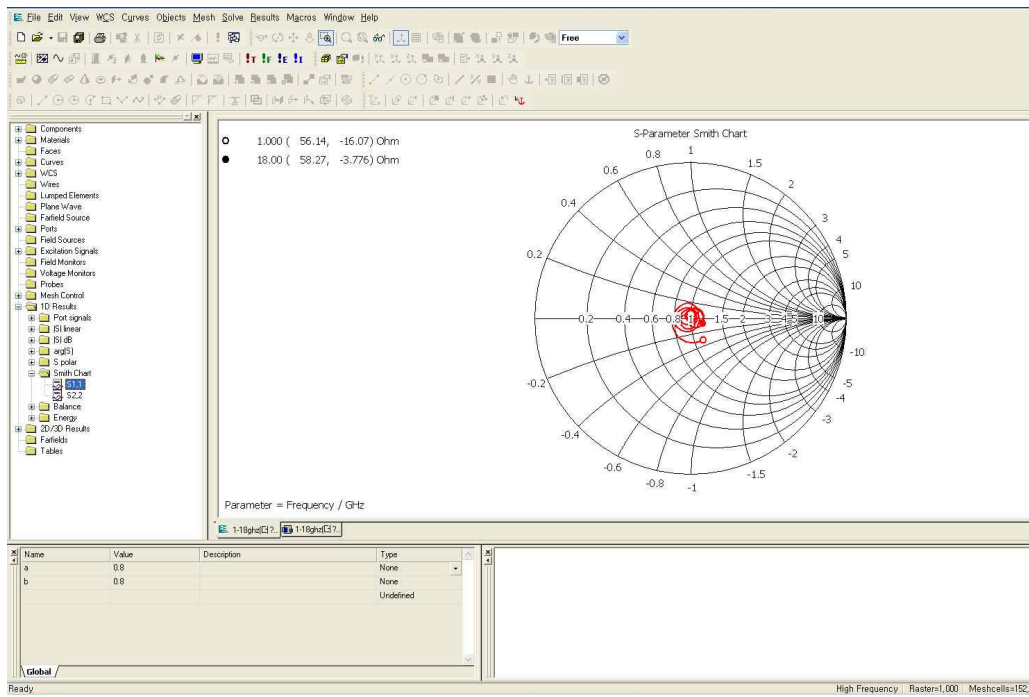


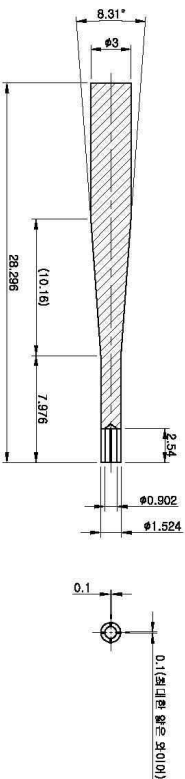
그림 41. 시뮬레이션 결과, 스미스차트

본 도면은 설계도면으로, 무단으로 복제 또는 배포할 수 없습니다.

구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분

구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분

#### 4.



\* 거원모서리 거원 C=0.1

<p>제 1 차</p> <p><math>\psi(\psi) = \psi(\psi)</math></p>		<p>제 2 차</p> <p><math>\psi(\psi) = \psi(\psi)</math></p>	
<p>제 3 차</p> <p><math>\psi(\psi) = \psi(\psi)</math></p>		<p>제 4 차</p> <p><math>\psi(\psi) = \psi(\psi)</math></p>	
<p>제 5 차</p> <p><math>\psi(\psi) = \psi(\psi)</math></p>		<p>제 6 차</p> <p><math>\psi(\psi) = \psi(\psi)</math></p>	
<p>제 7 차</p> <p><math>\psi(\psi) = \psi(\psi)</math></p>		<p>제 8 차</p> <p><math>\psi(\psi) = \psi(\psi)</math></p>	
<p>제 9 차</p> <p><math>\psi(\psi) = \psi(\psi)</math></p>		<p>제 10 차</p> <p><math>\psi(\psi) = \psi(\psi)</math></p>	

중량: 4.0kg (중량: 4.0kg, 2014년 12월 15일 기준) (중량: 4.0kg, 2014년 12월 15일 기준)

구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분

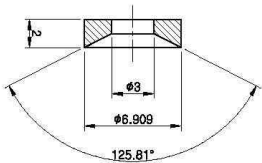
구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분

구분: 4.0kg (중량: 4.0kg, 2014년 12월 15일 기준) (중량: 4.0kg, 2014년 12월 15일 기준)

구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분

구분: 4.0kg (중량: 4.0kg, 2014년 12월 15일 기준) (중량: 4.0kg, 2014년 12월 15일 기준)

5. ∇



-내경, 외경: 6.909, 0.8, 2, 125.81°

\* 가전모서리 가품 C-0.1

구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분
구분	구분	구분	구분	구분

구분: 4.0kg (중량: 4.0kg, 2014년 12월 15일 기준) (중량: 4.0kg, 2014년 12월 15일 기준)



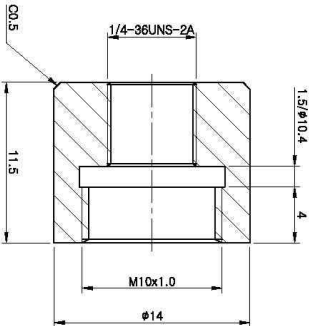
2008-07-09 09:45:00, 2014-07-09 10:00:00, 2014-07-09 10:00:00

項目	内容	単位	数量	単位	数量
材料	材料				
加工	加工				
組立	組立				
検査	検査				

項目	内容	単位	数量	単位	数量
材料	材料				
加工	加工				
組立	組立				
検査	検査				

2008-07-09 09:45:00, 2014-07-09 10:00:00, 2014-07-09 10:00:00

6. 図



項目	内容	単位	数量	単位	数量
材料	材料				
加工	加工				
組立	組立				
検査	検査				

項目	内容	単位	数量	単位	数量
材料	材料				
加工	加工				
組立	組立				
検査	検査				

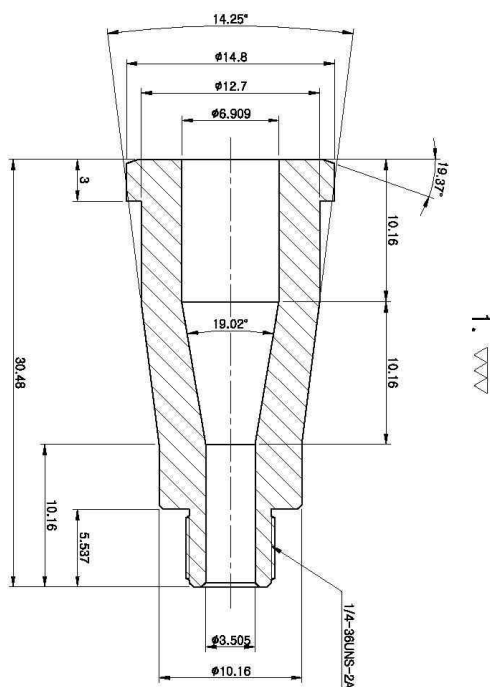
項目	内容	単位	数量	単位	数量
材料	材料				
加工	加工				
組立	組立				
検査	検査				

項目	内容	単位	数量	単位	数量
材料	材料				
加工	加工				
組立	組立				
検査	検査				

2008-01-01 이후에 발행된 제품과 사양은 이 도면과 다를 수 있습니다.

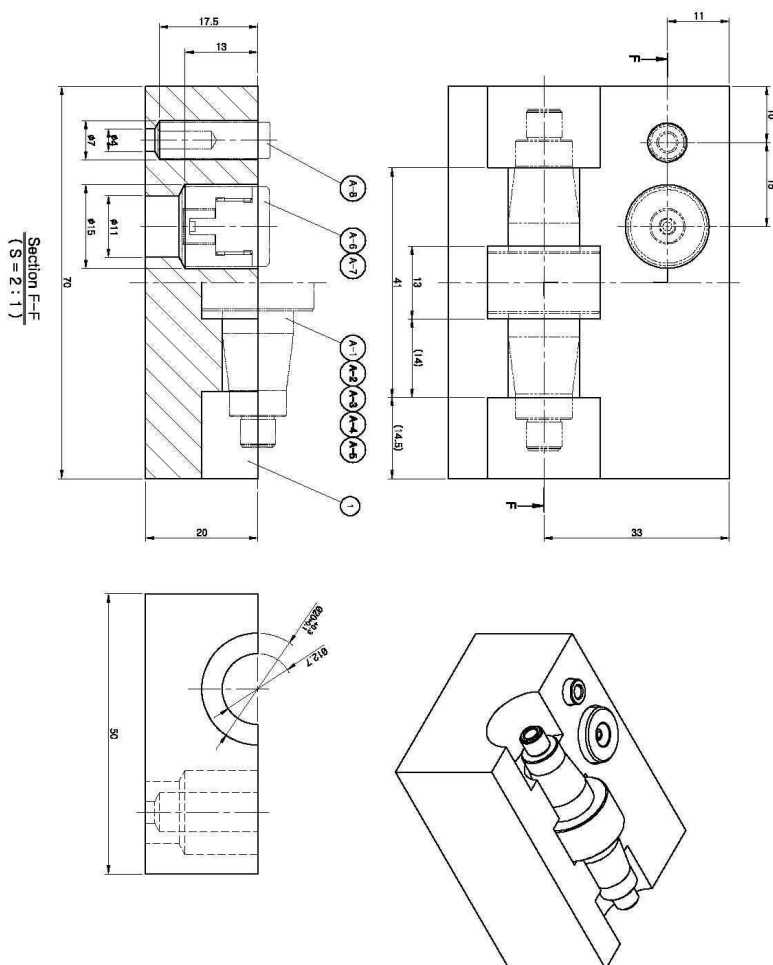
구분	구분명	구분명	구분명	구분명
A	구분명	구분명	구분명	구분명
A	구분명	구분명	구분명	구분명
A	구분명	구분명	구분명	구분명

구분	구분명	구분명	구분명	구분명
1	C-CONDUCTOR F	BRASS	구분명	구분명



\* 도/하와 일치하지 않은 모따기 C-0.3

<p>제품명: C-CONDUCTOR F</p> <p>소재: BRASS</p> <p>구분명: 1</p> <p>구분명: C-0.3</p>		<p>제품명: C-CONDUCTOR F</p> <p>소재: BRASS</p> <p>구분명: 1</p> <p>구분명: C-0.3</p>	
<p>제품명: C-CONDUCTOR F</p> <p>소재: BRASS</p> <p>구분명: 1</p> <p>구분명: C-0.3</p>		<p>제품명: C-CONDUCTOR F</p> <p>소재: BRASS</p> <p>구분명: 1</p> <p>구분명: C-0.3</p>	



姓 名	성명	성명/성씨	성명	성명
1. 3월 1일	성명/성씨	성명	성명	성명
성명/성씨		1		

기타 표시 및 기호	
모든 표시 및 기호	표 2
기호	표 3
표 4	표 5
표 6	표 7
표 8	표 9
표 10	표 11
표 12	표 13
표 14	표 15
표 16	표 17
표 18	표 19
표 20	표 21
표 22	표 23
표 24	표 25
표 26	표 27
표 28	표 29
표 30	표 31
표 32	표 33
표 34	표 35
표 36	표 37
표 38	표 39
표 40	표 41
표 42	표 43
표 44	표 45
표 46	표 47
표 48	표 49
표 50	표 51
표 52	표 53
표 54	표 55
표 56	표 57
표 58	표 59
표 60	표 61
표 62	표 63
표 64	표 65
표 66	표 67
표 68	표 69
표 70	표 71
표 72	표 73
표 74	표 75
표 76	표 77
표 78	표 79
표 80	표 81
표 82	표 83
표 84	표 85
표 86	표 87
표 88	표 89
표 90	표 91
표 92	표 93
표 94	표 95
표 96	표 97
표 98	표 99
표 100	표 101
표 102	표 103
표 104	표 105
표 106	표 107
표 108	표 109
표 110	표 111
표 112	표 113
표 114	표 115
표 116	표 117
표 118	표 119
표 120	표 121
표 122	표 123
표 124	표 125
표 126	표 127
표 128	표 129
표 130	표 131
표 132	표 133
표 134	표 135
표 136	표 137
표 138	표 139
표 140	표 141
표 142	표 143
표 144	표 145
표 146	표 147
표 148	표 149
표 150	표 151
표 152	표 153
표 154	표 155
표 156	표 157
표 158	표 159
표 160	표 161
표 162	표 163
표 164	표 165
표 166	표 167
표 168	표 169
표 170	표 171
표 172	표 173
표 174	표 175
표 176	표 177
표 178	표 179
표 180	표 181
표 182	표 183
표 184	표 185
표 186	표 187
표 188	표 189
표 190	표 191
표 192	표 193
표 194	표 195
표 196	표 197
표 198	표 199
표 200	표 201
표 202	표 203
표 204	표 205
표 206	표 207
표 208	표 209
표 210	표 211
표 212	표 213
표 214	표 215
표 216	표 217
표 218	표 219
표 220	표 221
표 222	표 223
표 224	표 225
표 226	표 227
표 228	표 229
표 230	표 231
표 232	표 233
표 234	표 235
표 236	표 237
표 238	표 239
표 240	표 241
표 242	표 243
표 244	표 245
표 246	표 247
표 248	표 249
표 250	표 251
표 252	표 253
표 254	표 255
표 256	표 257
표 258	표 259
표 260	표 261
표 262	표 263
표 264	표 265
표 266	표 267
표 268	표 269
표 270	표 271
표 272	표 273
표 274	표 275
표 276	표 277
표 278	표 279
표 280	표 281
표 282	표 283
표 284	표 285
표 286	표 2

	- 7 8 -
--	---------

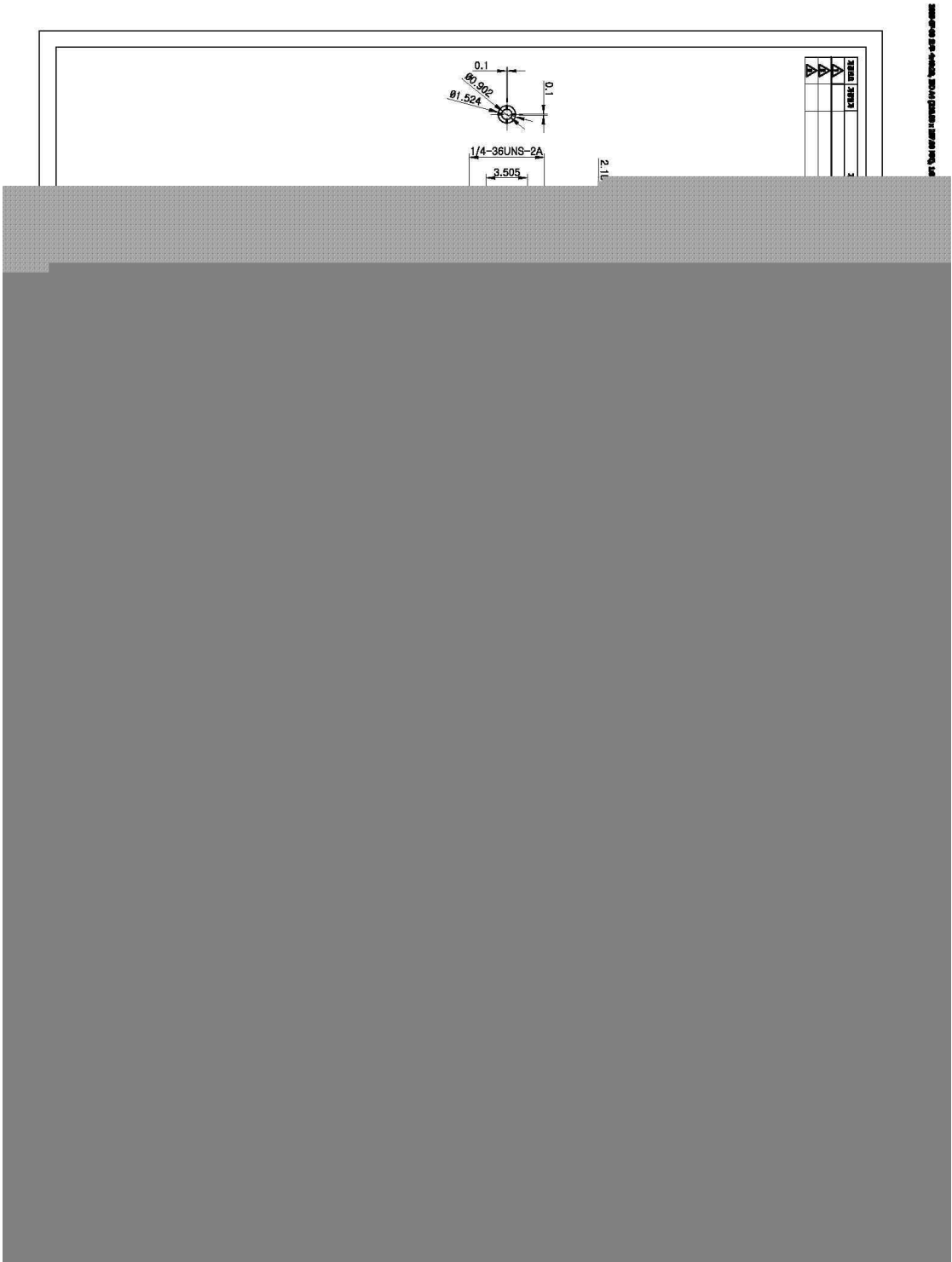


**ULP Co. Ltd**  
<http://www.ulp.co.kr>

ULP Co., Ltd. is a member of the ULP Group of Companies.



有 效 制	確 切	適 切	合 理

CBTP - EMC	
ASTM-VER2	
제 목	자동차 충전기 VER 2.
도 록	UIP-OE-QTO-EFS-00-00
작성일자	2006 / 07 / 09
제 도	2 : 1
	도출일자
	A9




材料	管	通径/通径	英寸/毫米	长度
2	C-CONDUCTOR T	BRASS	1	

$$\nabla(\nabla \cdot \nabla \nabla) = (\nabla \cdot \nabla) \nabla$$

材料品質證明書	CM-2
品質管理事項	CM-3
寸法	 $\varnothing$ 
寸法公差	$\pm 0.05$
面粗度	$Ra 1.0$
材料	鋼

-	-
---	---

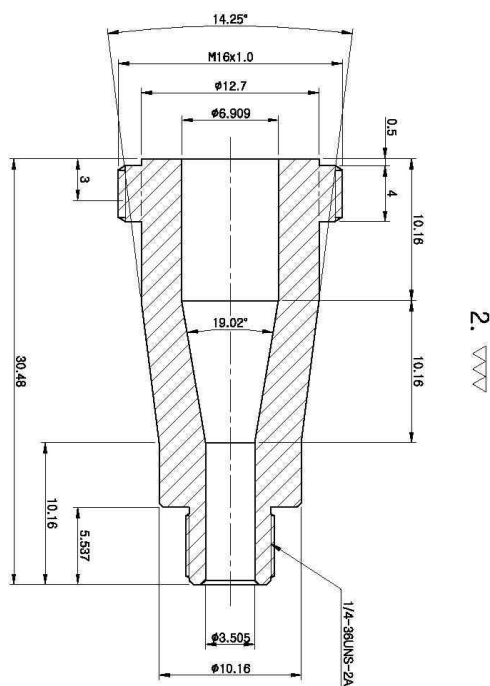
--

 <p><b>UIP Co. Ltd</b>  <a href="http://www.uipltd.com">http://www.uipltd.com</a></p>		
--	--	--

考核制	考核	考核	考核

모델명	CBTP - EMC ASTM-VER2		
제명	차세대 측정기 VER.2.		
도입	U-P-O-E-Q1D-EF8-A0-002		
작성일자	2008 / 07 / 08		
페이지	4 : 1	도입일자	A8

\* 도시하고 지시하지 않은 모뎀기 C=0.3



2. 



### 3. 상용 7mm커넥터를 이용한 차폐효과측정방법 제안

현재 7mm커넥터의 경우 상용화 되어있으며 보유하고 사용하는 업체나 기관이 많을 것이다. 또한 다른 타입의 커넥터들과 마찬가지로 7mm커넥터의 경우도 제조회사나 제조 단가에 따라 그 성능의 우열이 가려진다. 특히 고가의 커넥터의 경우 그 주파수 특성이 좋아 넓은 주파수 대역에서 적은 손실을 보인다.

차폐효과측정 관련한 기술을 고찰하는 과정에서 이 7mm커넥터를 이용하여 커넥터가 가지는 주파수 범위까지 차폐효과 측정을 할 수 있을 것으로 판단되어 그 절차 및 방법을 제안해 본다.

그림 42에서 볼 수 있듯이 7mm커넥터의 단면은 규격 ASTM D4935에서 보이는 치구도면에서 보이는 Flanged Circular Coaxial Transmission\_line holder와 거의 유사하다.



그림 42. 7mm커넥터의 단면

내심 단면이 막혀있지 않고 뚫려 있으며 커넥터끼리 연결하는 구조가 나사가 아닌 금속 외부 스크류 구조로 되어 있다는 것이 다를 뿐이다. 나사로 연결 할 경우 샘플이 장착되었을 때 외부로 노출이 되나 기존 7mm 커넥터 처럼 금속 스크류 구조의 경우 외부로 노출되지 않고 차폐되게 된다. 또한 내심의 경우 Lord샘플이 장착될 때 뚫려있고 없고 차이가 발생

한다. 이런 차이에 대한 이론적 고찰은 앞서 제시한 접촉 임피던스와 관련 있다. 이러한 영향들을 실험이나 좀 더 깊은 이론적 해석을 통해 규명할 경우 기존 상용화 되어있는 7mm를 이용하여 꽤 넓은 대역에서 차폐율 측정을 할 수 있을 것이다. 7mm커넥터의 경우 성능이 좋은 것은 수MHz부터 30GHz까지 손실이 아주 작기 때문에 차폐측정치구로 사용 할 수 있을 만큼의 특성을 가진다.

만약 이론적으로 규명되고 관련 규격도 있는 Flanged Circular Coaxial Transmission\_line holder와 차이점에 따른 차폐율 측정치구로서의 특성이 나 구조가 적당하지 않다면 7mm커넥터를 Flanged Circular Coaxial Transmission\_line holder의 구조와 비슷하게 개조하는 작업은 소요비용이나 작업난이도 측면에서 크거나 높지는 않을 것이다.

그림 43, 44, 45는 7mm커넥터 2개와 N type to SMA type transition 2개를 이용해 차폐율을 측정할 수 있도록 한 셋팅을 보인다.

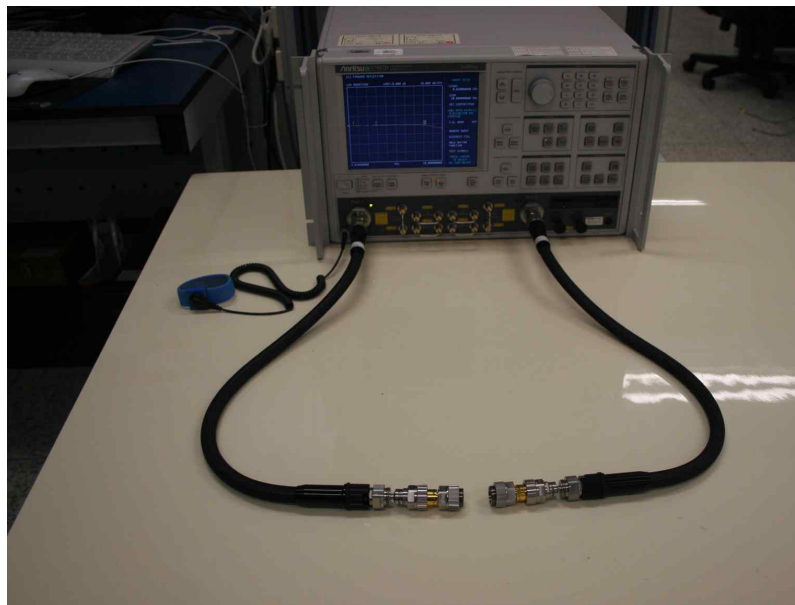


그림 43. 7mm커넥터를 이용한 차폐율측정 장비 셋팅





그림 44. 7mm커넥터와 N type to SMA type transition의 조립



그림 45. 7mm커넥터의 확대사진

그림 46는 아무런 샘플을 장착하지 않고 7mm커넥터를 연결했을때의 반사계수를 보인다. 앞서 말한 것처럼 반사계수값이 S파라메터 dB값으로 표현했을 때 -20dB이하 일 때를 차폐율 측정치구의 설계 값으로 보았을 때 이 방식은 20MHz - 33GHz범위에서 설계 기준 값을 통과한다.

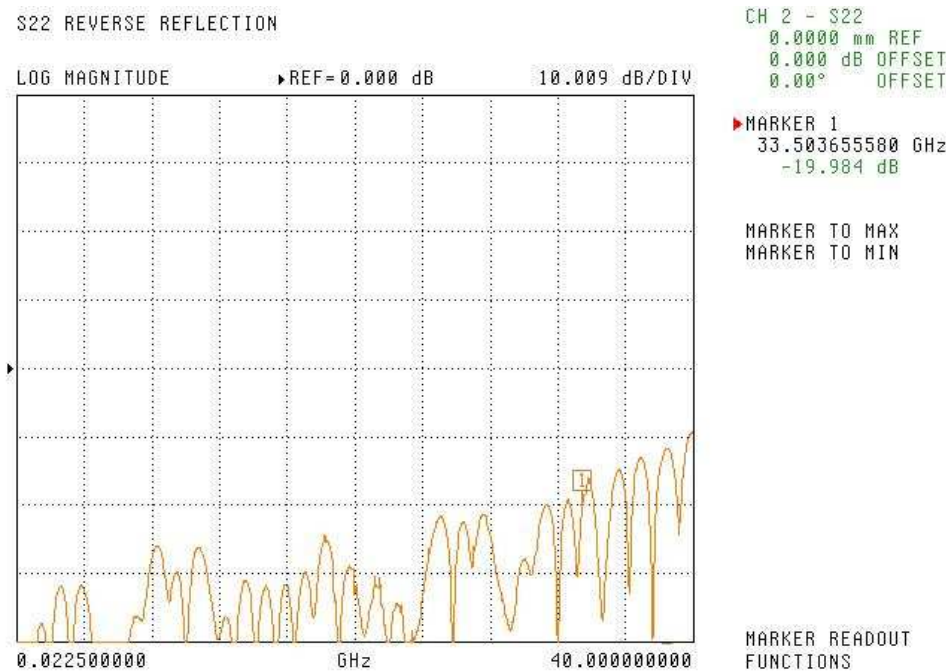


그림 46. 샘플 장착 없이 7mm커넥터를 연결 시 반사계수

## 제 6 장 결 론

본 보고서에서는 물질의 차폐효과(SE)를 측정하는 기본 원리 및 측정 방법, 관련 치구등에 대해 정리 하였다. 차폐효과측정은 측정하고자 하는 전자파의 원천에 따라 far-field SE와 near-field SE로 구분되고 측정방법 또한 다르게 해야한다.

far-field SE측정의 경우 Continuous-conductor Circular Coaxial Transmission\_line holder를 이용한 측정법, Flanged Circular Coaxial Transmission\_line holder를 이용한 측정법, Time\_domain 측정법, 복소 유전율로부터 차폐효과 측정법, 사각도파관을 이용한 측정법, Nested Reverberating Chamber를 이용한 측정법등을 소개하였다.

near-field SE측정은 DUAL TEM CELL(DTC)을 이용한 측정법, Reverberating Chamber안에 개구면을 가지는 TEM cell을 이용한 측정법을 소개하였다.

또한 응용 가능한 1-18GHz대역에서의 차폐효과 측정방법을 소개하면서 관련 제품을 개발하여 판매하고 있는 업체를 조사하여 명시하였다. 축소된 Flanged Circular Coaxial Transmission\_line holder는 치구 하나로 500MHz-18GHz까지 측정 가능한 제품이 개발 되어 판매되고 있다. 또한 1-10GHz까지 2개의 치구를 사용하는 광대역 더블리지 사각도파관의 경우도 GHz대역의 차폐효과 측정법으로 유력하다고 판단된다.

차폐효과 측정관련 기술에 대해 고찰을 하면서 특히나 1-18GHz대역에서 아직까지 국제적으로 표준화 된 규격이 없고 측정 할 때 마다 재현성이 쉽게 확보되지 않음을 알 수 있었다. 정확한 차폐효과 측정을 위해서는 먼저 측정자가 측정하고자 하는 상황을 명확히 판단한 후 적당한 방법을 선택하고 관련 치구사용에 익숙해져야 된다.

4장에서는 GHz대역에서 적용가능 한 방법 중 기존에 GTEM cell을 보유하고 있을 경우 업그레이드하는 방법과 더블리지 도파관이나 동축선 타입의 치구의 시뮬레이션 및 제작가능성을 검토해 보았다. 또한 상용화 되어 쓰이고 있는 7mm커넥터를 이용하여 20MHz-33GHz범위에서 측정할 수 있는 방법을 제안해 보았다.

## 참고 문헌

- [1] ASTM D4935-99, "Standard test method for measuring theelectromagnetic shielding effectiveness of planar material,"1999
- [2] KS C 0304, "평면 재료의 전자파 차폐 효과 측정 방법", 1998
- [3] "Development of Apparatus for Measuring Electromagnetic Shielding Effectiveness at GHz Frequency Band"  
Jong Hwa Kwon; Hyung Do Choi; Jae Ick Choi; Jong Gwan Yook;  
Electromagnetic Compatibility, 2007. EMC 2007. IEEE International Symposium on 9-13 July 2007 Page(s):1 - 4  
Digital Object Identifier 10.1109/ISEMC.2007.180
- [4] P.R. Wilson and M.T. Ma, "Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials: Part I," *IEEE Trans. EMC*, vol. 30, no. 3, pp. 239-250, Aug. 1988
- [5] P.R. Wilson and M.T. Ma, "Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials: Part II," *IEEE Trans. EMC*, vol. 30, no. 3, pp. 251-259, Aug. 1988
- [6] M.S. Sarto, A. Tamburrano, "Innovative Test Method for the Shielding Effectiveness Measurement of Conductive Thin Films in a Wide Frequency Range," *IEEE Trans. EMC*, vol. 48, no. 2, pp. 331-341, May 2006
- [7] A. Manara, "Measurement of Material Shielding Effectiveness

Using a Dual TEM Cell and Vector Network Analyzer,"  
*IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 38,  
No. 3, 1996, pp. 327-333.

[8] P. F. Wilson and M. T. Ma, "Shielding Effectiveness Measurements  
Effectiveness Measurements with a Dual TEM Cell,"  
*IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol 27, No.3,  
1985, pp. 137-142.

[9] Gustav J.Freyer, Mats G. Backstrom, "Comparison off Anechoic  
& reverberation chamber coupling data as a function of  
directivity pattern- Part II." , IEEE 2001 international EMC  
symposium.

[10] Leif Jansson and Mats Backstrom, "Directivity of Equipment and  
Its Effect on Testing in Mode-Stirred and Anechoic Chamber.",  
IEEE 1999 International EMC symposium.

[11] elena(<http://www.elena-e.co.jp/>)

[12] Keycom(<http://www.keycom.co.jp/>)