

KTI150310

EMP방호실 건설에 있어 건물의 유효공간 극대화 활용을 위한

## 방호실 차폐성능 측정방법에 관한 연구

### 연구요약;

본 연구는 EMP방호실 건설에 있어 관련 MIL STD 188-125에서 요구하는 차폐도 측정거리 2m 이상에서 측정하는 경우 고가의 건물을 유용하게 사용할 수 없어 경제적 손실이 크게 증가 한다. 따라서 본래 차폐도 측정 목적을 완벽하게 달성하면서 건물과 차폐벽 간의 거리를 최소화 시킬 수 있는 방법에 대한 연구이다. 이의 대안으로 I. 1) SELD방법 + 2) Mode stirred SE측정법 + 3)수신 안테나의 크기(D)를 최소화 시킬 수 있는 MZ Optics field sensor를 이용한 측정법과 II. 누설 동축 케이블을 이용한 SE측정법 등을 복합적으로 이용하여 거리가 확보되지 못한 벽면, 바닥면, 천정을 측정하고, 유효공간을 확보 할 수 있는 door side, POE 등은 MIL STD 188-125에 따라 확인 측정하는 방법을 제안한다.

EMC/EMP advanced technology since 1987

한국기술연구소

emc.re.kr [minkti@naver.com](mailto:minkti@naver.com) 82-(0)31-763-67

## 전파누설 검출방식(SELD) 차폐도 측정방법

(SELDS; Shielding Effectiveness Leak Detection System)

### 1. SELD의 용도 및 Hole을 통한 전자파 누설

SELD 방식은 그 방법 자체가 차폐도 측정방법의 하나로 인정하고 있으며 EMC 차폐 장치의 차폐효과 측정 시 전자파 누설량 측정장치로 사용될 수 있다. SELDS 시험은 주로 방호실 건설 중에 금속 접합부 용접상태 확인과 전파누설 방지에 대한 확신을 갖기 위한 시험방법으로 요긴하다. 사용 주파수는 대략 100kHz을 루프 안테나로 구동 시키고 방호벽 밖에서 루프 안테나로 신호를 검출하여 전파 누설을 탐지한다. SELD 시험은 1956년에 제정된 MIL STD 285에 뿌리를 두고 있는데, 정식 차폐도 측정 모듈의 경우 송신용 루프로 직경 305mm 루프 안테나를 사용하고, 표준 측정거리는 609mm로 되어있으나, 작은 페라이트 자성재료에 코일을 감아 작은 루프형 안테나를 수신 안테나로 사용하면 가까운 거리에서 용접상태, Hole의 유무를 확인 할 수 있다. 차폐벽에 개구부가 있을 때 방호실내부로 재방사 과정을 그림1로 설명.

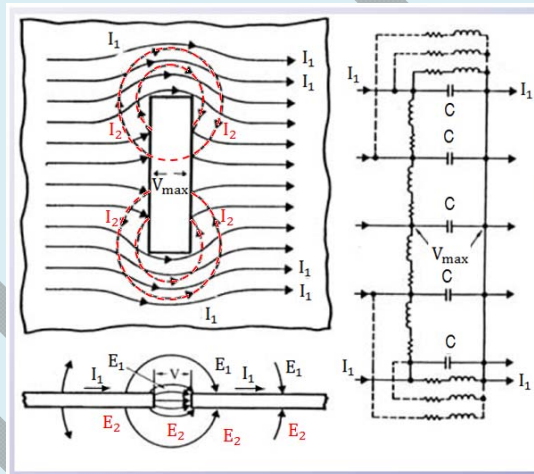


그림1. 방호실 벽면에 Hole이 있는 경우 전파 누설 증가도

- 1) 개구부에 전파가 도래하면 전류  $I_1$ 가 유기.
- 2) 개구부 주변에 흐르는 전류  $I_1$ 은 도체의 표피효과와 인덕턴스 성분 또는 전류가 개구부에 굽어져 흐르게 되어 전류 흐름차 (전류밀도)가 발생되며, 공극(Slot)의 용량성분 C 의해 전압  $V_{max}$ 가 발생. (전류 및 자속의 불연속 영역)
- 3) 개구부 중앙에 발생된 최대 전압  $V_{max}$ 는 금속 합체 내부에 변위 전류  $I_2$ 를 만들어 낸다.
- 4) 전류  $I_2$ 에 의해 전계  $E_2$ 를 만들어 내고,  $E_2$ 에 의해 자계  $H_2$ 가 형성되어 내부에 전계가 재방사되어 전달된다.
- 5)  $E_2$ 는 개구부 중앙에서 최대가 되며,  $H_2$ 는 개구부 끝에서 최대가 된다.

### 1. 송. 수신 안테나간 권장 측정 거리, 원방계란 무엇인가?

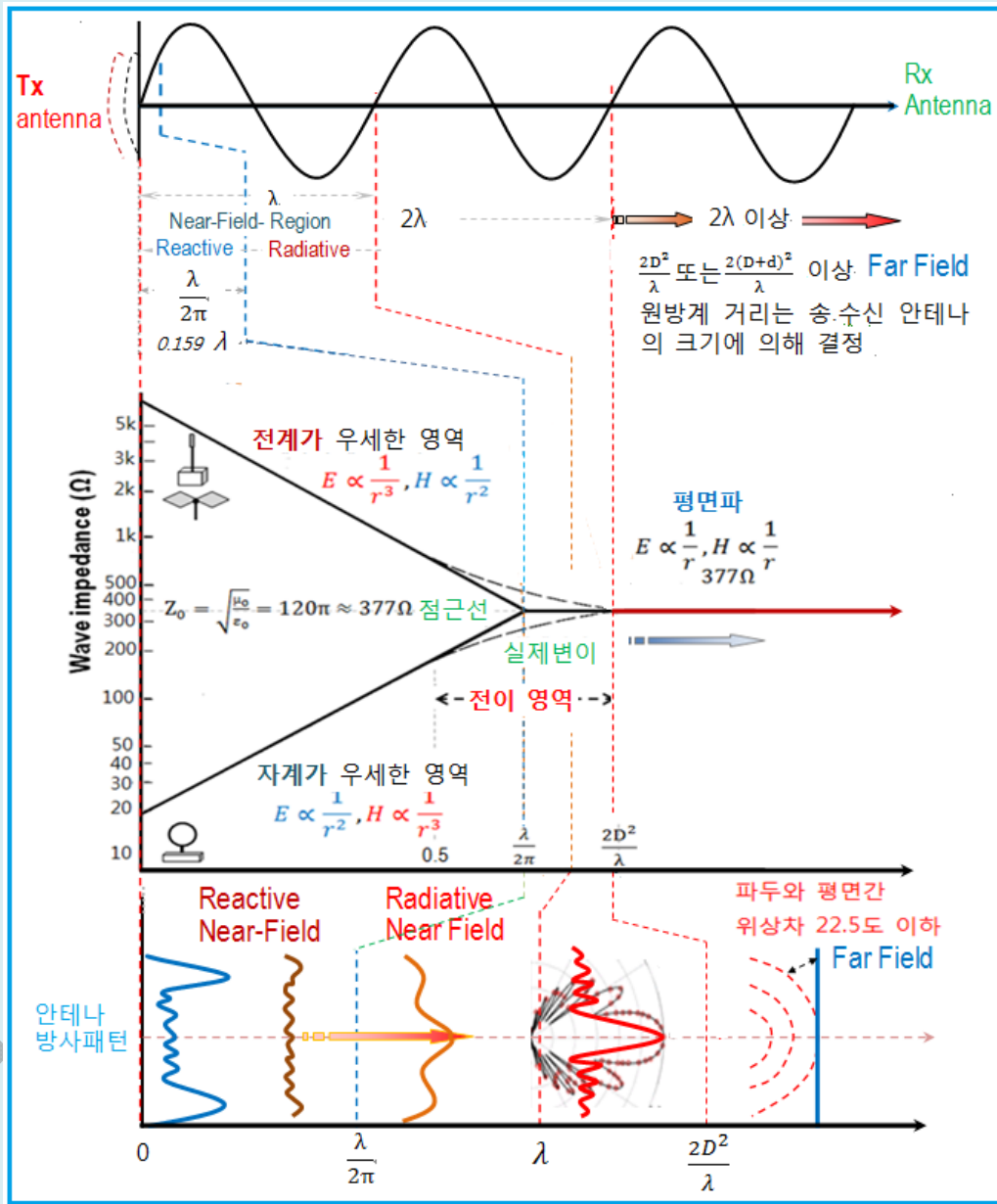


그림2. 근접계와 원방계 정의

그림2에서 송신 안테나로부터  $\frac{\lambda}{2\pi} = 0.159\lambda$  만큼 떨어진 거리 이내는 전파의 방사성분은 없고, 리액턴스장만 존재한다. 이는 이 거리 내에 수신 안테나를 설치하면 송신-수신 안테나간에 유도성, 용량성에 의한 결합만이 존재한다는 의미이다. 근접장에서 루프 안테나와 같이 임피던스가 낮은 경우는 유도성만, 로드, 바이코니컬 등과 같은 높은 임피던스를 갖는 안테나를 송신 안테나로 사용하는 경우 용량성(변위전류)에 의해 송.수신 안테나간 에너지가 결합된다.

$\frac{\lambda}{2\pi}$ 의 거리 이후부터  $\lambda$ 까지는 서서히 방사성 에너지 즉, 전장과 자장이 교번하면서 장이 형성된다. 이후  $2\lambda$  또는  $\frac{2D^2}{\lambda}$ 까지는 근접계에서 원방계로 변하는 전이영역이 존재하고 자유공

간 임피던스  $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \approx 377[\Omega]$  에 가까워 지면서, 방사원에서 방사된 전파의 파두면이 수직면과 22.5도 이하가 되면 우리가 평면파라 부르고 이때부터는 원방계 거리라 한다. 평면파란 전파의 파두면이 준 평면을 이루기 때문에 붙여졌다.

## 2. 근접계 거리( $\frac{2D^2}{\lambda}$ 이내)에 송.수신 안테나를 설치하고 전계를 수신하면 어떤 문제가 발생 될 수 있는가?

근접계내에서 전파를 측정하게 되면 어떤 결점이 있는지 알아보자. 우선 그림2 하단의 안테나 방사 패턴이 불규칙해져 주엽과 부엽의 구분이 어렵다. 전파의 주엽인 파두가 송신 안테나와 가까울수록 안테나 축방향의 에너지 보다 가장자리(부엽)에서 큰 값이 검출 될 수 있어 정량적인 값의 수신이 어려워 질 수 있다. 또한 근접계에서는 이론적인 계산값이 거리( $r^2, r^3$ )에 따라 변화폭이 커져 측정거리에 따른 **측정값이 부정확해** 질 수 있다.

다시 말해 근접계에서는 전계와 자계값이  $r^2, r^3$ 에 따라 크게 변하므로 차폐도 SE를 측정할 때 표준거리에서 측정한 값과 차폐 측정값을 비교하여 차폐도를 결정하는데, 만일 약간의 **거리 오차** 또는 **안테나 축 방향**이 어긋나도 측정값이 크게 달라질 수 있다는 것을 의미한다.

이러한 이유에서 전자파 측정에 있어 원방계 거리에서 측정을 권고 하는 것이다.

## 3. 짧은 거리에서 방호실 차폐도를 측정 할 수 있는 방법의 제안

건물의 유효공간 사용을 극대화 시키기 위해서 짧은 거리에서 빠르게 SE를 측정하는 방법을 원방계 조건을 만족하는 이론 식으로부터 찾아 다음과 같은 3가지 대처법을 제안한다.

### I. SELD + MZ형 광 전계 센서를 이용한 SE 측정법

- 1) 자계측정 범위인 10kHz- 10MHz는 SELD 방법으로 전파누설 시험으로 대처
- 2) 10MHz- 1GHz는 Mode stirred 방법으로 방호실내에서 충분한 원방계 거리에서 전파 여진하고  $\frac{2D^2}{\lambda}$  **에 따라 방호실 밖에서** 수신안테나의 크기를 매우 작고(≈50mm) X,Y,Z 3축에서 전계 측정이 가능하며, 30uV/m 까지 전계수신 범위가 넓은 MZ형 Optical field sensor를 이용하여 전계를 측정하여 방호실 내부 전계와 외부 전계값의 차를 구해 SE측정
- 3) 위 1)-2)로 측정하고 전계 누설이 있을 수 있는 도어, POE면을 중심으로 MIL STD 188-125에 따라 최종 확인 시험하는 방법이다. 다음 표1에 방호실 벽이 용접불량으로 Holes이 존재할 때 전파 입사각에 따라 차폐도 저하에 대한 각각의 경우를 설명하고 있다.

II. 미육군 연구소에서 제안한 누설 동축 케이블로 여진 시키고 방호실 내부에서 SE를 측정.

III. "미육군 연구소 제안방법 + KTI 제안 평행 2선 여진방법" 으로 측정

표1. 방호실 방호벽에 사각형 또는 원형 구멍(Hole or Slot)이 있는 경우 차폐도 변화

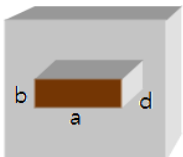
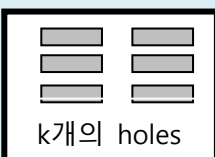
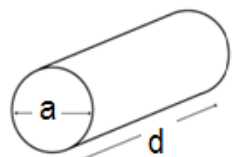
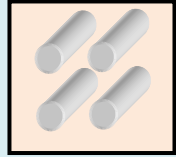
구 분	Hole의 구조	
	직사각형 hole	원형 hole
Slot의 감쇠량 일반 식 (1)	1) 감쇠량 $[dB] = 20 \log_{10} \left\{ \frac{\lambda}{2l} \right\}$ , <b>얇은 박막 구조 차폐 재료</b> 2) 감쇠량 $[dB] = 30 \frac{d}{a} \sqrt{1 - [f/f_c]^2}$ , <u><math>d \gg a</math> 조건, 두께 고려</u> $f$ = 해당 전계 주파수, $f_c$ = 개구부 차단 주파수, 구멍의 장경 $a$ , 길이(차폐재 두께) $d$ , 장경 길이가 반파장의 길이와 같을 때를 차단 주파수라 함(식3 결과 식 참조)	
TE 10모드에서 전파상수 식(2)	$\beta = \sqrt{\left[ \frac{2\pi}{\lambda} \right]^2 - \left[ \frac{\pi}{a} \right]^2}$	$\beta = \sqrt{\left[ \frac{2\pi}{\lambda} \right]^2 - k_c^2} = k_c \sqrt{1 - \left[ \frac{k}{k_c} \right]^2} = \sqrt{1 - \left[ \frac{f}{f_c} \right]^2}$
차단 주파수 식(3)	$f_c = \frac{v}{\lambda_c} = \frac{1}{2a\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{c}{2a}$	여기서, $k_c$ 값은 TE <sub>11</sub> 모드에서 $k_c = \frac{3.682}{a}$ 식(2)의 근을 "0"으로 놓고 차단 주파수를 구하면 $f_c = \frac{1.8412}{\pi a \sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{1.8412c}{\pi a} = \frac{0.586c}{a}$
차단주파수 이하에서 전파 식(4)	$E_{(z)} = E_0 e^{- \beta z}$ 전파가 거리 $d$ 만큼 진행했을 때, $E_z = E_0 E^{- \beta z}$ 로 지수함수적으로 감소된다. 이를 dB 표현하면 $Attenuation \text{ in dB} = 20 \log_{10} e^{- \beta d} = 8.7 \beta d$	
식(1), 식(2) 식(3), 식(4)의 관계를 결합하여 방정식을 풀면	$SE[dB] \approx 27.3 \frac{d}{a} \sqrt{1 - \left\{ \frac{f}{f_c} \right\}^2}$ 길이 mm, 주파수 MHz 일 때; $= 27.3 \frac{d}{a} \sqrt{1 - \left( \frac{af}{150,000} \right)^2}$ 여러 개(k개) 일 때; $SE_{k,dB} = 27.3 \frac{d}{a} \sqrt{1 - \left( \frac{af}{150,000} \right)^2} - 20 \log_{10} \frac{2ka}{\pi} \cos \phi$ 여기서, $\phi$ 는 전파 입사각으로 90도 일 때 "1"이 된다.	식(2),식(3),식(4)의 관계를 결합하여 방정식을 풀면 $SE[dB] \approx 31.95 \frac{d}{a} \sqrt{1 - \left[ \frac{f}{f_c} \right]^2}$ 길이 단위를 mm, 주파수를 $f$ [MHz] 단위로 표현하면; $SE_{cir[dB]} = 31.95 \frac{d}{a} \sqrt{1 - \left( \frac{af}{175,800} \right)^2}$ 여러 개(k)의 원형 hole이 있는 경우 $SE_{k,dB} = 31.95 \frac{d}{a} \sqrt{1 - \left( \frac{af}{175,800} \right)^2} - 20 \log_{10} \frac{2ka}{\pi} \cos \phi$
구 조	 	 

표1에서 방호실 벽에 사각형 또는 둥근 구멍이 (예: 용접식 방호실의 경우 용접불량, 패널 식의 경우 조임 불량 또는 차폐판의 휨)이 존재하게 되면 전자파 누설이 발생된다. 이들 개구부에 의한 차폐도 영향은 Hole의 장경( $a$ ), 철판 두께( $d$ )에 의해 차폐도가 결정된다.

그림3에 방호벽의 전자파 누설 또는 자기차폐 측정 방법인 MIL STD 285에 대해 기술되어 있다. 만일 방호실 벽에 hole이 존재하면 그림1의 설명과 같이 전류(자속)의 불연속이 발생하고 불연속점의 중앙에서 전압차가 발생하여 이 전압이 벽면 반대 쪽에  $I_2$ ,  $E_2$ 를 발생시켜 전자파가 누설되고 수신 안테나는 누설된 전자파의 전류성분  $I_2$  또는  $E_2$ 에 의해 수신 안테나의 양단의 전위차를 수신기가 읽도록 되어 있다.

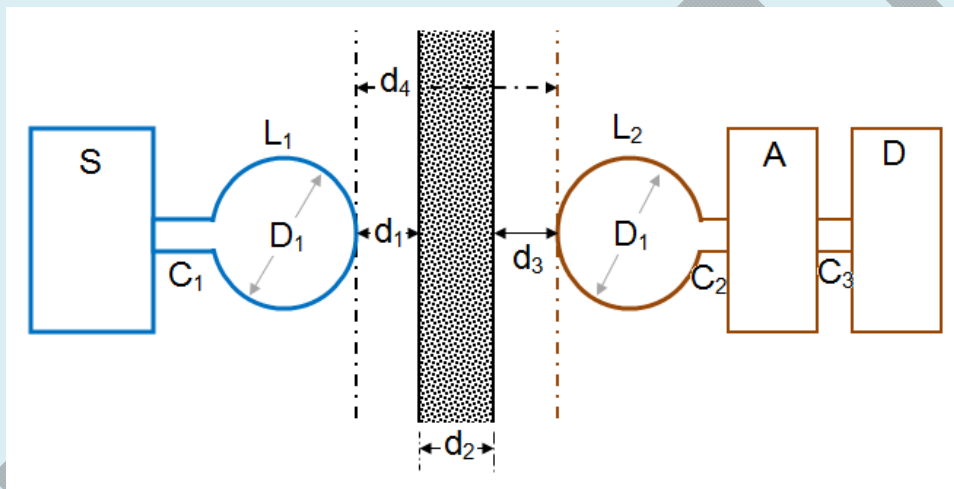


그림3. MIL STD 285의 자체 차폐도 측정장비 Set up

$d_1 = 305$  [mm],  $d_2 =$  차폐벽 두께,  $d_3 = 305$  [mm],  $d_4 = 635$  [mm] ( $d_1 + d_2 + d_3 = d_4$ )

S = 근접계(Near field, 저 임피던스 신호원) 시험주파수에서 적정출력 조절

$D_1 =$  안테나 직경 305mm, 시험 주파수: 150-200kHz 대역 중 하나 선택

$L_1 =$  송신 안테나, 6 AWG 동선 굵기의 1 turn. 차폐벽의 수직구조에서 임의 각도

D = 시험 주파수에서 적절한 감도를 갖는 감이 수의 검출기. 표준레벨 표시기로 사용

$L_2 =$  수신 루프 안테나, 송신 안테나와 같은 각도로 위치시킴

A = 저 임피던스 입력의 dB감쇠기로 시험 주파수에서 교정되어야 함

$C_1, C_2, C_3 =$  차폐 전송선, 가급적 짧게해야 하며 필요한 경우에만 사용

**주의:**  $d_1, d_2$ 의 경우 305mm로 되어 있으나, 이는 **정식 차폐도 측정 모듈로** 측정하는 경우이고, 만일 SELD의 전자파 누설여부를 확인하는 경우 방호실 내 충분한 원방계 거리에서 Mode stirred 방식으로 전파를 여진시키고 방호실 외부에서 루프의 크기를 작게 하고, 루프를 페라이트에  $n$ 번 감아 권선으로 수신하면 예민한 각도에서 전파(자계) 누설을 탐지 할 수 있다.

소형 휴대용 SELD 측정기는 약 140dB 동작범위를 가져야 하며 용접 접합부 상태 점검 또는 전파 누설을 탐지하는 목적으로 사용하는 경우 자속을 집중시켜 충분한 수신감도나 자장의 세기를 만들기 위해 개방형 페라이트 코어에 코일을 다권으로 감아 사용할 수 있다.

수신기 감도 레벨은 10dB씩 줄이거나 높일 수 있는 구조가 이상적이다.

**자계 차폐 모듈에 따른 차폐도 측정방법**으로 송.수신 안테나간 표준값 측정은 610mm 거리에서 측정한 후, 그림3과 같이 차폐벽을 중심으로 송신과 수신 안테나를 맞대응 시켜 설치하고 측정한다. 감쇠기는 측정이 편리하도록 조절하여 측정하고 필요시 표준 측정값과 감쇠기 값을 보정하여 차폐도를 결정한다.

SELDS 시험은 앞서 설명한 바와 같이 방호실의 용접상태, 패널의 조임 상태 등에 의한 부분 전파 누설탐지에 주로 사용되는 방식이다. 특히 방호실 바닥 공사중에 용접부위 마무리 작업하기 전에 전파누설을 탐지하여 개선하는데 요긴하다.

**4. 길이 5cm의 안테나 이하인 MZ sensor를 이용하는 경우 10MHz에서 원방계 거리가 얼마인지 알아보자.**

원방계 이론적 거리는 국제규격, 시험의 종류에 따라 약간씩 다르나 그림2에서 보는 바와 같이 주엽과 부엽(side lobe)을 확실하게 구분할 수 있는 거리( $\frac{10\lambda}{2\pi}$ )가 된다. CISPR 16-2에서는  $\frac{2D^2}{\lambda}$ , 유럽 ETSI 규격에서는  $\frac{2(d_1+d_2)^2}{\lambda}$ , 가장 정밀성을 요구하는 안테나 제조업체에서는  $\frac{6D^2}{\lambda}$ 를 원방계 거리로 사용하고 있다.

표2. 세계 주요 규격 별 이론적 원방계 거리(R) 정의

주.부엽 구분 가능 거리	CISPR 16-2, 1GHz 이상	ETSI, 유럽	안테나 제조업체	MIL STD 461F RE	
				1.24GHz미만	1.24GHz이상
$\frac{10\lambda}{2\pi}$	$\frac{2D^2}{\lambda}$	$\frac{2(D+d)^2}{\lambda}$	$\frac{6D^2}{\lambda}$	$\frac{2D^2}{\lambda}$ R=3 λ 중 큰 값	2.5D < d일때; $\frac{2D^2}{\lambda}$ 2.5D ≥ d일때; $\frac{2(D+d)^2}{\lambda}$

λ=파장, D= 송신 안테나 물리적 큰 변의 길이, d= 수신 안테나 물리적 큰 변의 길이

CISPR 16-2의 원방계 이론거리를 적용한다면  $\frac{2D^2}{\lambda}$ 이므로 만일 수신 안테나 장경의 크기  $D=5\text{cm}$ , 10MHz에서 파장  $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{10 \times 10^6} = 30\text{m} = 3000\text{cm}$  라면 원방계 거리는 10MHz에서  $\frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2 \times 2,500}{30,000} = \frac{5,000}{30,000} \approx 0.17\text{mm}$  이다. 만일 비교적 정확한 측정이 이루어지는 안테나 제조업체에서 사용하는 원방계 거리로 계산하면

$$\frac{6D^2}{\lambda} = \frac{6 \times 2,500}{30,000} = 0.5\text{mm}$$

여기서, 만일 방호실 내부에서 송신 안테나를 방호벽으로부터 충분히 이격 시킬 수 있거나, 뒤에서 설명되는 Mode stirred 방법으로 전파를 여진 시킨다면 결국 수신 안테나의 지향성과 크기만 고려해도 되므로 위에서 계산한 거리가 **유효성**을 갖는다.

유효성이란 결국 방호벽에 거의 붙어서 전계를 수신해도 충분한

원방계를 만족시킬 수 있다는 의미이다. 다만 방호실 벽의 유지보수, SELD 측정거리, 경제성 등을 고려하여 미국내 EMP방호실은 논문<sup>2)3)</sup>에 따르면 건물벽(터널벽)과 방호실 벽면간 이격거리는 **60cm**, 터널내 바닥으로 부터는 **약1.5m**를 띄워 시공하고 있다. 국내 어떤 분이 SE 측정을 위해 이격거리를 2m이상으로 할 것을 주장하는데 이는 크게 잘못된 생각이다.

**그 분의 주장이 맞다면 천정과 바닥도 2m이상 이격 시켜 차폐도를 MIL STD 188-125에 따라 측정해야 될 것 아닌가? 왜 벽면만 2m이상 인가 ?**

특히 용접방식의 경우 SELD 방법으로 비파괴 검사 겸 차폐도 검사를 하고 있으므로 필요 시 측정거리확보가 가능한 도어면 또는 POE 근처에서 MIL STD 188-125에 따라 최종적으로 확인 시험하면 충분하다. MIL STD 188-125규격은 권고사항으로 현행규격 자체도 불명확한 것이 많다. 예를 들어 시험에서 부품이나 장비 손상시 책임한계, 과전압 보호소자의 성능저하를 평가하는 방법, SE측정방법의 대치법, Long pulse 시험이 불가능한 경우 대치법, EMP방호성호실의 성능유지 방법, 과전압 보호소자의 손상 시 긴급 복구방법 등이 보완 되었으면 하는 아쉬움이 있다. EMC 분야 차폐실 시공업체 또는 관련 분야 근무자들은 잘 알고 있는 사실로 EMP방호실 차폐도로 80dB를 요구하고 있으나, 도어를 20-100번만 여달아도 5-10dB가 쉽게 저하된다. EMP최대 전계 50kV/m, 방호대상기기의 방사내성을 10V/m라고 할 때 이론적 요구 차폐도는  $20 \log \frac{50,000}{10} = 74\text{dB}$ 이다. 만일 국내외 전문가에게 MIL STD 188-125에 따라 차폐도 시험을 하기 위해 기설 건물벽으로부터 2m 정도 이격거리를 갖고 방호실을 시공한다고 하면 어리석다 할 것이다. 미국의 터널내 시공된 방호실의 경우 그림7과 같은 이격거리를 갖고 있다.

예를 들어 가로, 세로 10m인 기설 건물내 EMP 방호실을 건설한다고



다음 표3과 같은 조건에서 방호실을 건설한다고 할 때 건물의 활용도를 비교해 보자.

표3. 기설건물내 EMP방호실 건설시 벽면 이격거리에 따른 건물유효공간 활용도 비교

벽면으로부터 2m 이격시공	$6 \times 6 = 36 \text{ m}^2$	36% 유효공간 활용
벽면으로부터 0.6m 이격시공	$8.8 \times 8.8 = 84.64 \text{ m}^2$	77.44% 유효공간 활용
* 기설 건축물 10m x 10m인 공간에 방호실을 건설 할 때		

#### 4.1 전파 잔향(Mode Stirred)식 차폐도 측정법

그림4의 방식은 MIL-STD-461F, SAEJ1113/27, GMW3097GS, HERO Testing, IEC6000-4-21, DEF STAN 5941, **DEF STAN 59-188**, EUROCAE/RTCA DO-160E/F 등 다양한 국제규격에서 차폐도 SE 측정 및 EMI측정법으로 인정하고 있는 방법이다. 이의 정확도는 EMI 측정에 활용될 수 있을 만큼 측정의 재현성이 높다. 이 방법은 회전하는 반사판을 방호실 구석에 놓고 안테나로 전파를 여진시켜 회전 반사판에 인가하여 방호실 벽면에서 전파를 다중 반사시켜 흩뜨리는 방법이다.

비교적 방호실 각부에서 전계가 고르다. 반사판을 수직, 수평만 바꾸어 주고 밖에서 전계를 수신하여 방호실내 위치 별 측정된 전계 값과 비교하여 차폐도를 측정하는 방법이다.

이 방식으로 차폐도를 측정하는 경우 방호실 내부에서 충분히 원방계 거리를 확보할 수 있고, 방호실 내부 각 위치 별 전계 값을 측정된 후 방호실 외부에서 크기가 작은 MZ형 전계 센서로 전파를 측정하면 된다.

## 그림4. EMP 방호실의 Mode Stirred SE 측정법

### Mode stirred 방법이 방호실 SE측정에 필요한 경우;

-건축물 내 방호실 공간을 최대한 활용하고자 하여

건물벽과 방호실 벽면간 측정거리가 충분하지 않은 경우.

-SELDS 측정방법으로 전파 누설장소를 찾아 내고,전체적인 차폐도는 방호실 내부에서 수직, 수평 방향에서

Mode stirred시킨 상태에서 내부 각부의 전계를 확인한 후 외부에서 수신 안테나를 이동하면서 차폐도 측정

### MSC방법을 차폐도 측정방법으로 인정하는 규격;

MIL-STD-461F

SAEJ1113/27

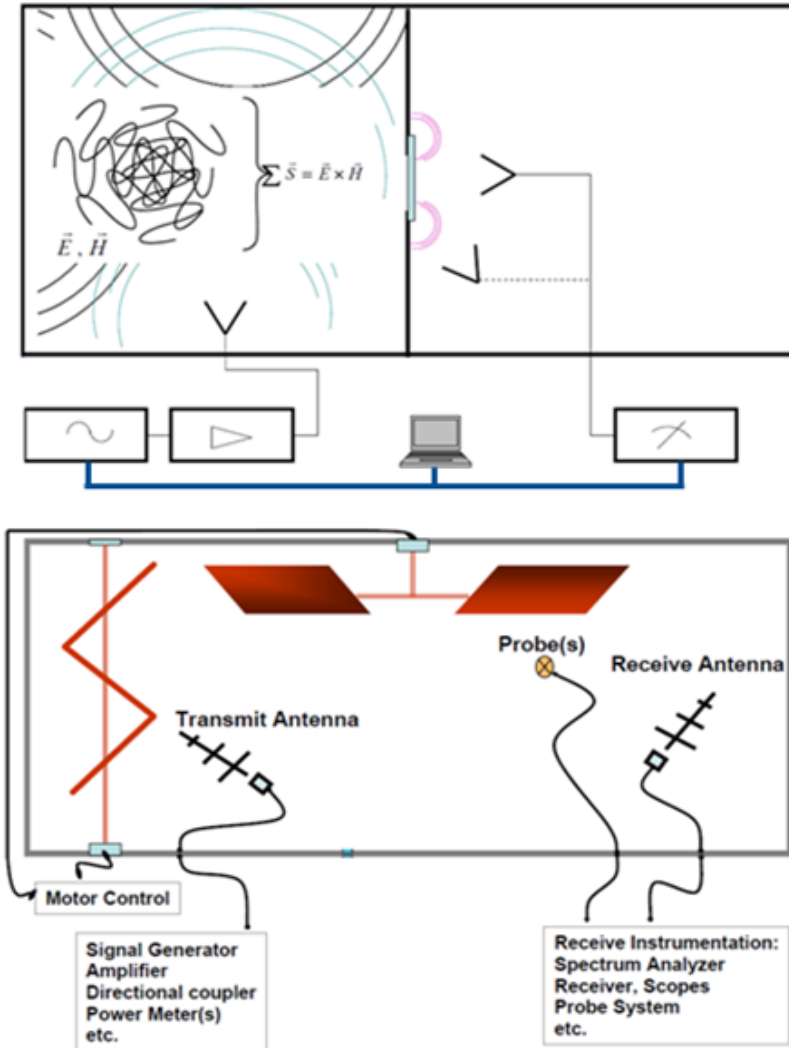
GMW3097GS

HERO Testing

IEC6000-4-21

DEF STAN 5941

EUROCAE/RTCA DO-160E/F



## 그림5. SELDS(Shielded Enclosure Leak Detector System) 시험

시험 목적	금속 차폐실의 전파 누설 탐지																																																										
관련 규격	MIL-STD-285, NSA 65-6, IEEE STD-299, EN 50147-1																																																										
측정 방법																																																											
ETS-LINDGREN Model MF -130D 사양	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Electrical specifications</th> <th>MF-130D</th> <th>LF-antenna</th> <th>HF-antenna</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>This device is in compliance with the following standards</td> <td>EN 50081-1 (1992) EN 50082-1 (1992)</td> <td>EN 50081-1 (1992) EN 50082-1 (1992)</td> <td>EN 50081-1 (1992) EN 50082-1 (1992)</td> </tr> <tr> <td>Frequency ranges</td> <td>N / A</td> <td>10 kHz 156 kHz 1 MHz 10 MHz</td> <td>8 MHz 16 MHz 32 MHz 64 MHz</td> </tr> <tr> <td>Frequency accuracy</td> <td>max. (5 ppm / 10 Hz)</td> <td>N / A</td> <td>N / A</td> </tr> <tr> <td>Dynamic range</td> <td>MIL-STD-285 130 dB NSA 65-6 130 dB IEEE STD-299 130 dB EN 50147-1 130 dB</td> <td>120 dB 130 dB 130 dB 130 dB</td> <td>110 dB 120 dB 120 dB 120 dB</td> </tr> <tr> <td>Attenuation accuracy</td> <td>± 2 dB</td> <td>N / A</td> <td>N / A</td> </tr> <tr> <td>Output power</td> <td>N / A</td> <td>2 W max.</td> <td>2 W max.</td> </tr> <tr> <td>Antenna</td> <td>N / A</td> <td>1 layer PCB antenna</td> <td>1 layer PCB antenna</td> </tr> <tr> <td>Display</td> <td colspan="3">128 x 64 LCD matrix display with background light</td> </tr> <tr> <td>Memory</td> <td colspan="3">63 memory locations for attenuation value for each frequency</td> </tr> <tr> <td>Preset functions</td> <td colspan="3">Attenuation limit in dB</td> </tr> <tr> <td>Calibration</td> <td colspan="3">Auto calibration</td> </tr> <tr> <td>Power supply, both</td> <td colspan="3">6 x 1.2 Volt NiCd battery (D)</td> </tr> <tr> <td>Battery life</td> <td colspan="3">Transmitter 5 to 7 hours Receiver 10 to 12 hours</td> </tr> </tbody> </table>			Electrical specifications	MF-130D	LF-antenna	HF-antenna	This device is in compliance with the following standards	EN 50081-1 (1992) EN 50082-1 (1992)	EN 50081-1 (1992) EN 50082-1 (1992)	EN 50081-1 (1992) EN 50082-1 (1992)	Frequency ranges	N / A	10 kHz 156 kHz 1 MHz 10 MHz	8 MHz 16 MHz 32 MHz 64 MHz	Frequency accuracy	max. (5 ppm / 10 Hz)	N / A	N / A	Dynamic range	MIL-STD-285 130 dB NSA 65-6 130 dB IEEE STD-299 130 dB EN 50147-1 130 dB	120 dB 130 dB 130 dB 130 dB	110 dB 120 dB 120 dB 120 dB	Attenuation accuracy	± 2 dB	N / A	N / A	Output power	N / A	2 W max.	2 W max.	Antenna	N / A	1 layer PCB antenna	1 layer PCB antenna	Display	128 x 64 LCD matrix display with background light			Memory	63 memory locations for attenuation value for each frequency			Preset functions	Attenuation limit in dB			Calibration	Auto calibration			Power supply, both	6 x 1.2 Volt NiCd battery (D)			Battery life	Transmitter 5 to 7 hours Receiver 10 to 12 hours		
Electrical specifications	MF-130D	LF-antenna	HF-antenna																																																								
This device is in compliance with the following standards	EN 50081-1 (1992) EN 50082-1 (1992)	EN 50081-1 (1992) EN 50082-1 (1992)	EN 50081-1 (1992) EN 50082-1 (1992)																																																								
Frequency ranges	N / A	10 kHz 156 kHz 1 MHz 10 MHz	8 MHz 16 MHz 32 MHz 64 MHz																																																								
Frequency accuracy	max. (5 ppm / 10 Hz)	N / A	N / A																																																								
Dynamic range	MIL-STD-285 130 dB NSA 65-6 130 dB IEEE STD-299 130 dB EN 50147-1 130 dB	120 dB 130 dB 130 dB 130 dB	110 dB 120 dB 120 dB 120 dB																																																								
Attenuation accuracy	± 2 dB	N / A	N / A																																																								
Output power	N / A	2 W max.	2 W max.																																																								
Antenna	N / A	1 layer PCB antenna	1 layer PCB antenna																																																								
Display	128 x 64 LCD matrix display with background light																																																										
Memory	63 memory locations for attenuation value for each frequency																																																										
Preset functions	Attenuation limit in dB																																																										
Calibration	Auto calibration																																																										
Power supply, both	6 x 1.2 Volt NiCd battery (D)																																																										
Battery life	Transmitter 5 to 7 hours Receiver 10 to 12 hours																																																										

## 그림6. Mach Zehnder field sensor를 D-dot로 이용한 방호실 차폐도 측정

(수신센서의 크기 손가락 1-2마디 크기, uV/m 전계 수신 가능)

### Resonance Type Isotropic Optical Electric Field Sensor OEFS-RC



#### ■ Outline

This sensor resonates with a specific frequency and the sensitivity improves. For example key less entry signal (315MHz, 433MHz) of a car is measured with this OEFS-RC and it also check the 3D distribution of inside of the car precisely. Working frequency is the one of 150MHz to 950MHz (3dB bandwidth: 10MHz).



#### ■ Specifications

Item	Performance
Sensitivity	30 $\mu$ to 100m V/m
Frequency Response	One specific frequency of 300MHz to 950M
Maximum Input	1V/m
Isotropy	$\pm 0.5$ dB
Sensor Size	$\phi 50$ mm x 190mm
Output Connector (RF output)	N-J
Working Temperature Range	0°C to 40°C

### Optical Electric Field Sensor Probe OEFS-PR



#### ■ Outline

This sensor has a SMA connector. It is good for evaluation of small antenna. An antenna connects this sensor and the electrical signal transforms the optical signal (E/O exchange) at that head.

The signal transmits in optical fiber and it can precisely measure because Common mode noise cannot into the fiber. The probe heads are three types depend on frequency range.

#### ■ Specifications

Item	Performance	Note
Sensor size	10 x 10 x 50mm	
Measurement frequency range	300k to 2GHz	OEFS-Probe-2S
	300k to 5GHz	OEFS-Probe-5S
	300k to 6.5GHz	OEFS-Probe-6S
Insertion Loss	5 $\pm$ 5 dB	OEFS-Probe-2S
	10 $\pm$ 5 dB	OEFS-Probe-5S
	15 $\pm$ 5 dB	OEFS-Probe-6S
Stability/td>	$\pm 0.3$ dB	24°C ,5H

그림5는 시판되는 SELDS시험 장비 사양이다. 관심을 가져야 할 것은 측정범위가 송신과 수신 장비간 120dB이상 되는 것과 각각의 레벨을 10dB씩 증감시킬 수 있는 기능이 요구된다.

그림6은 지름 20mm, 길이 50mm MZ 광전계 센서 측정장비이다. 이 제품을 이용하면 송신 측에서 충분한 원방계 거리를 확보하고 수신안테나의 크기(D)를 50mm이하로, 앞서 계산한 바와 같이 측정거리를 벽면으로부터 2mm 이하에서도 충분히 원방계를 만족시키는 것을 알 수 있다.

## 4.2 누설 동축 케이블과 200Ω 평행 2선 여진 방법을 이용한 방호실 차폐도 측정방법

### 4.2.1 MIL STD 188-125 규격의 문제점

일반적으로 우리나라 사람들은 미국사람이나 유럽사람이 제정한 규격을 비판 없이 맹종하는 습관이 있다. 유럽에서 제정되는 규격은 유럽 여러나라(EU) 전문가에 의해 비교적 잘 다듬어져 있으나 MIL STD 188-125는 좀 다르다. 단지 몇몇 사람이 모여 만든 규격으로 문제점이 있다.

MIL STD 188-125에 따른 시험을 하다 보면 다음과 같은 문제점이 발견된다.

1) 규격에 사용한 용어가 범용으로 사용되는 용어를 사용하지 않아 혼동을 준다.

예 ; Norton equivalent circuit or Norton source = PCI surge generator

Waveguide below cutoff array =Honeycomb

2) SE 차폐도 구역분할로 불필요한 SE 측정시간을 수 백배( 1-2개월) 증가 시킨다.

방호실의 차폐도 측정에 있어 해당규격에서는 구역을 나누어 시험하도록 되어 있다.

문제점 :

① 구역을 나눌 필요가 전혀 없다. 금속판과 금속판간에 이음매에서 비파괴검사의 일종은 SELD(누설차폐 측정법) 시험을 하며, SELD시험은 1954년에 제정된 MIL STD 285를 바탕으로 시험한다. MIL STD 285는 미군의 차폐실 정식 차폐도 시험방법이다.

② 공간차폐도 요구량 80dB는 관리목표일 뿐 실제로는 약 74dB면 EMP방호에 문제가 없다.

-사용기기의 방사내성 레벨이 10V/m일 때 계산 예;

$$\begin{aligned} \text{필요 차폐도[dB]} &= 20 \log \left( \frac{\text{EMP 전계강도}}{\text{전자기기의 일반적 방사전계내성}} \right) = 20 \log \left( \frac{50\text{kV/m}}{10\text{V/m}} \right) \\ &= 20 \log 10^3 + 20 \log 5 = 60 + 13.98 = 73.98[\text{dB}] \end{aligned}$$

③ 요구 차폐도 80dB에서 최소 20dB이상 수신기 마진이 있어 매우 작은 구멍이 있는 경우 송신-Hole-수신 안테나가 축방향으로 완전 대향되지 않더라도 전파 누설을 측정해 낼 수 있다. 송신- Hole-수신 안테나 관계에서 대향각에 따른 차폐도 변화는 표1에서 알 수 있듯이 다음과 같이 cosine 함수이다,

만일 작은 구멍이 4각형으로 여러개 있을 때;

$$SE_{k,dB} = 27.3 \frac{d}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{af}{150,000}\right)^2} - 20 \log_{10} \frac{2ka}{\pi} \cos \phi$$

만일 작은 구멍이 원형으로 여러개 있을 때;

$$SE_{k,dB} = 31.95 \frac{d}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{af}{175,800}\right)^2} - 20 \log_{10} \frac{2ka}{\pi} \cos \phi$$

위 식이 갖는 의미는 방호실 어딘가에 구멍이 있을 때 차폐도 측정값 변화를 살펴보면 2차항 log값의 최대값이 20dB보다 작으면 송신-hole- 수신 안테나가 측방향에서 완전하게 대향되지 않더라도 전자파 누설을 측정해 낼 수 있다는 것을 뜻한다. 여기서 20dB는 차폐도 측정장치의 여유 동작 영역(Dynamic range)이다.

$$20 \log_{10} \frac{2ka}{\pi} < 20$$

④ 문제는 비용, 측정시간 대비 SE측정의 효율성이다.

위와 같은 조건에서 과연 MIL STD 188-125에 따라 차폐도 시험을 블럭으로 나누어 시험해야만 완전하게 EMP 방호를 할 수 있는 것이 아니기 때문에 해당 규격의 SE측정 규정을 준용하되 IEEE 299나 다른 간편한 측정방법으로 EMP방호실 차폐도 측정을 할 수 있어야 한다는 주장이다.

⑤ 미국내에서도 EMP 방호실 차폐도 측정법에 대한 이견이 있으며 이를 개선하고자 미육군 연구소(ARL)에서 다음 연구를 수행하였다.

#### 4.2.2 방호실 차폐도 측정법에 대한 미육군 연구소의 연구논문 분석

Thomas F. Podlesak\* and Canh Ly "Leaky Coaxial Cable as a Transmitting Antenna for HEMP Shielding Effectiveness Testing" U.S Army Research Laboratory Journal of Directed Energy, 3, Spring 2009, 97-106

4.2.2.1 누설 동축 케이블로 여진시키고, 일반 안테나로 수신하여 MIL STD 188-125 SE를 측정하는 연구

조건;

- 1) 각 측정 주파수에서 필요 Dynamic range : 최소 +20dB
- 2) 측정 주파수 대역 구분 : 10kHz- 20MHz, 20MHz- 1GHz
- 3) Resolution bandwidth : 10Hz, Sweep time :42s, 측정 주파수; 총 802
- 4) 교정거리 : 10ft, 미국 EMP방호실의 바닥과 암반간 높이: 150cm, 차폐벽과 터널벽간 60cm  
 측정회수 : 방호실 크기에 따라 달라지겠으나 약 100개소, 수직/수평 그리고 2개 대역에 걸쳐 시험하는 경우 약 400번의 측정이 요구됨.
- 5) 연구목적 : 터널과 방호실간 측정거리가 확보되지 않은 경우 그리고 측정시간을 단축하기 위한 목적

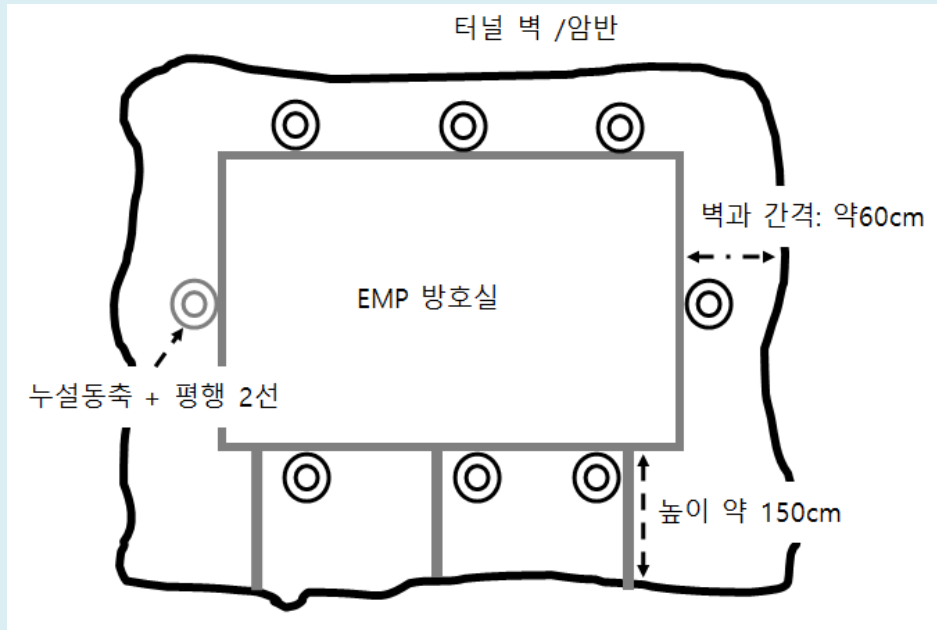


그림7. 터널내 벽면과 방호실간 이격거리 및 누설 동축 케이블 배치

## 6) 장비 구성



그림8. EMP방호실의 차폐도 측정 장비 구성도

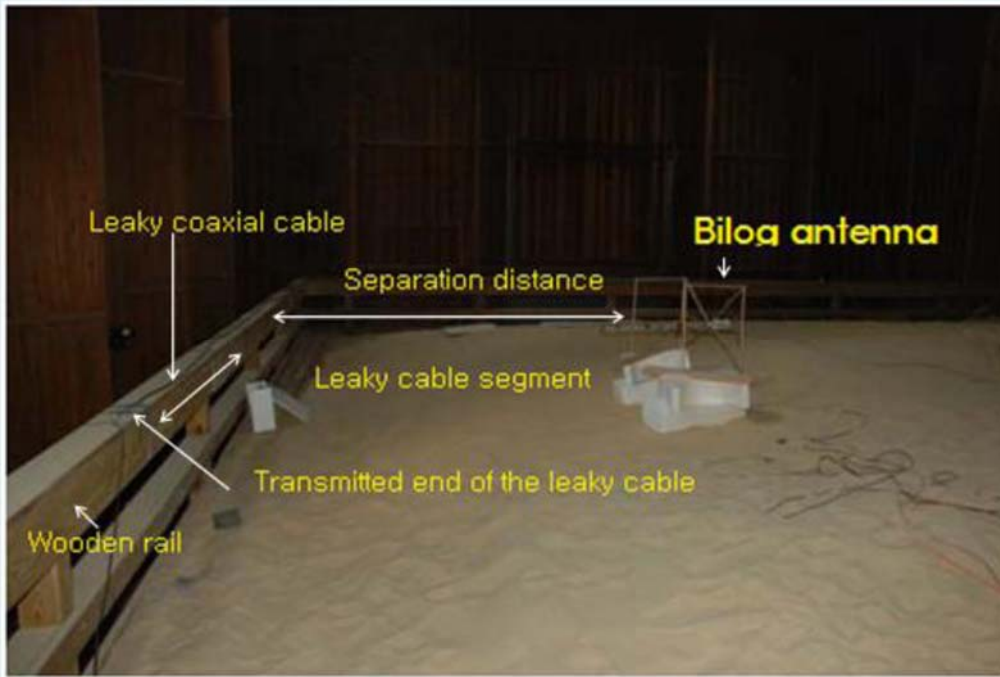


그림9. 누설 동축 케이블을 방사원으로 하는 방호실 차폐도 측정 교정

#### 4.2.2.2 시험절차

비금속체 건물에 그림9와 같이 누설동축 케이블을 설치하고 누설 동축케이블을 통해 신호를 여진시키고 수신안테나는 수직과 수평 조건에서 교정값을 얻는다. 얻어진 교정값은 첨부 ARL 세미나 자료<sup>3)</sup>와 같다.

누설 동축케이블의 길이는 약 30ft이고 누설 동축 송신점으로 부터 4개점 즉 5, 15, 25, 30ft점에서 수신하도록 하고 동축케이블은 50옴으로 종단시킨다. 케이블 길이에 의한 영향은 크지 않았으며 150ft까지 시험 할 수 있을 것으로 판단된다.

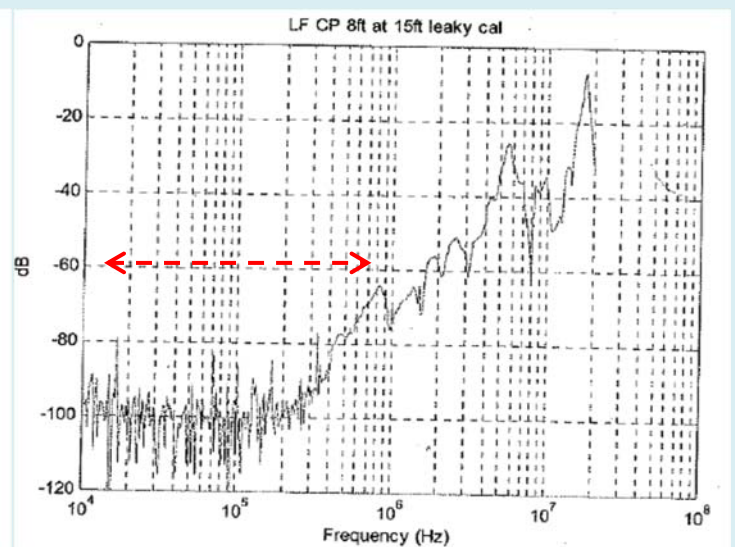
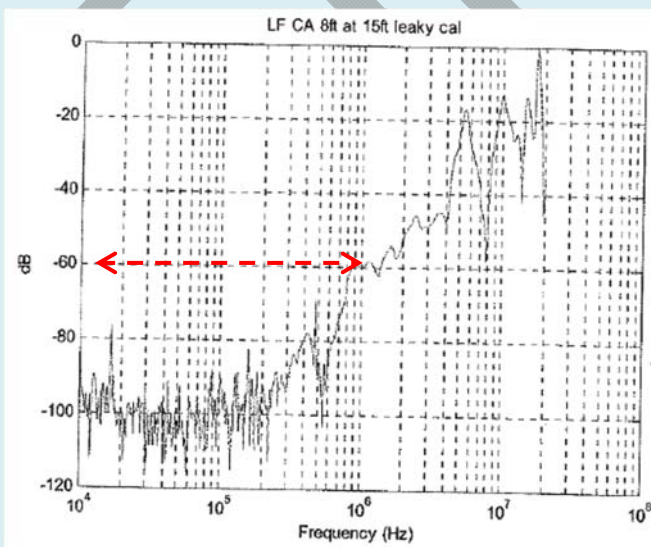


그림 10. 저주파, 급전점15ft, 루프안테나 수직      그림11. 저주파, 급전점 15ft. 루프 안테나 수평



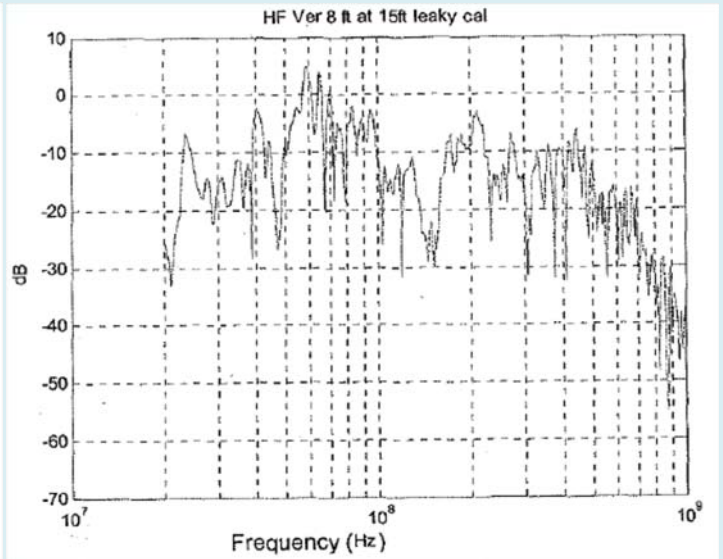
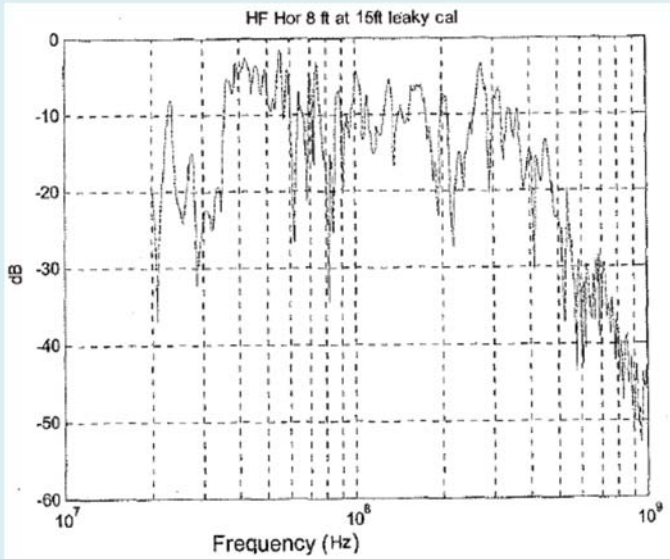


그림12. 고주파, 급전점 15ft, 케이블 평행

그림13. 고주파, 급전점 15ft, 케이블 평행

(고주파에서는 Biconical 안테나 특성표와 유사 특성을 갖는다)

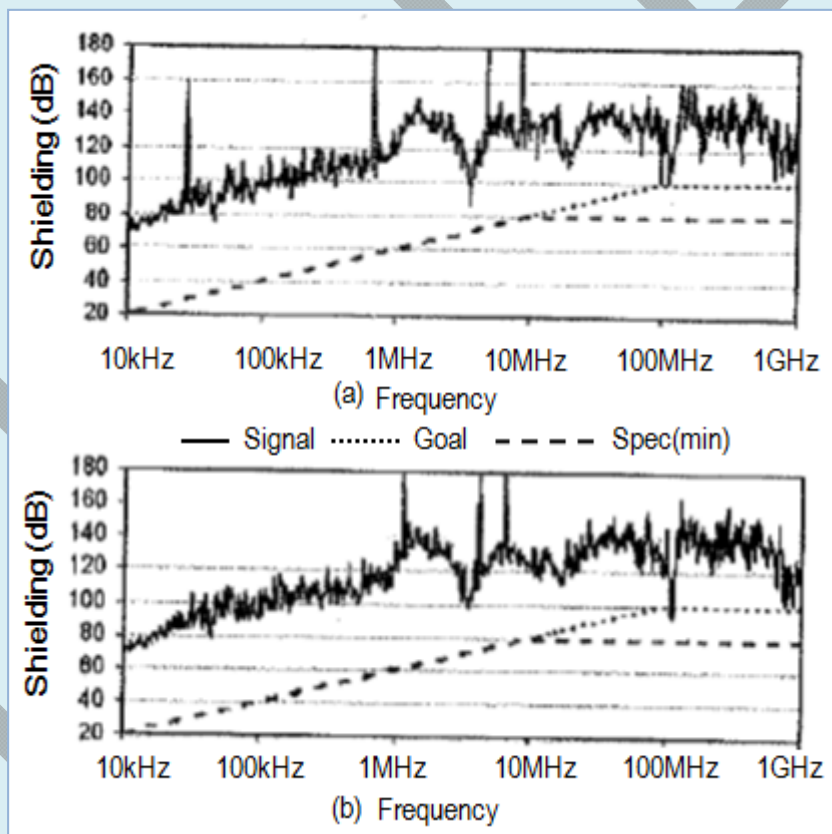


그림14. 누설 동축 급전점으로 부터 15ft점에서 SE측정장비의 기저대역 측정결과

#### 4. 2.2.3 누설 동축 케이블을 이용한 차폐도 측정방법에 대한 검토

미육군 연구소 관련 논문에 따르면 저자는 측정결과 1MHz 이상에서는 만족한(Satisfactory) 특성을 얻을 수 있었으며, 10kHz-1MHz 대역은 누설동축케이블의 방사 효율이 떨어지나 수용

(Acceptable)할 만 하다라고 기술하고 있다.

교정은 해당규격에 정해진 시험 주파수에서 측정하였으며, 케이블 길이에 따른 어떤 영향이 있는지 교정 단계<sup>3)</sup>에서 평가하였다. 케이블 길이에 따라서 거리에 따라 누설동축의 방사 패턴이 변화 할 것으로 예상하였으나, 직관적으로 볼 때 동축 케이블 한쪽면에 개구부가 있으면 다른 쪽은 중심도체가 차폐되어 있어 거의 전방향성 방사 패턴 특성이 관찰되었다.

Schelkunoff<sup>5)</sup>에 따르면 동작 주파수의 파장이 차단 주파수 파장 보다 클 때 전방향성을 갖는 것으로 보고 되고 있다. 사용된 누설동축 케이블의 차단 파장은 차폐 갭 폭의 2배로서 차폐 갭이 약 10mm라면 차단 파장은 20m이다. MIL STD 188-125 차폐도 상한 주파수인 1GHz이므로 최소 파장은 300mm이다. 교정절차와 측정결과로부터 케이블 길이에 따른 전계세기의 변화는 큰 차이가 없었다.

그림14에서 특정 주파수에서 급격하게 떨어지는 주파수 대역이 있는데 이는 수신 신호를 디지털 처리하는 과정에서 발생된 것으로 아무런 의미를 가지지 않는다.

### 4.3 "200Ω 평행2선 + 누설동축 케이블" 여진방법을 이용한 개량된 방호실 차폐도 측정 방법 대한 KTI 제안

#### 4.3.1 목적

ARL 연구논문에서 논문저자는 1MHz이상 대역에 대해서 누설동축 케이블을 이용한 EMP 방호실의 차폐도 측정방법이 " Satisfactory "라는 표현을 사용하여 만족한 할 만하다라는 표현을 사용한 반면, 10kHz-1MHz 대역에 대해서는 " Acceptable"라는 표현을 사용하고 있다.

그림 10, 그림11 그리고 교정논문<sup>3)</sup>을 보면 약 10kHz-1MHz 대역의 측정결과를 보면 수신 신호 레벨이 기저대역에 깔려있어 교정값으로 취급하기에는 유효성이 다소 떨어진다.

따라서 이 문제를 개선하기 위해 KTI는 새롭게 [평행2선 + 누설 동축 케이블]을 이용한 EMP 방호실 측정방법을 제안한다.

#### 4.3.2 누설 동축 케이블과 평행 2선을 이용한 방법의 차이

누설 동축 케이블의 제조사 사양을 보면 거의 모두가 1MHz미만에서는 사용 주파수 대역을 벗어나는 것으로 되어 있으며, 신호 전송 형태가 불평형 선로이다. 반면에 200 Ω계통의 평행 2선 선로는 접지에 대해 평형선로이고 방호실을 감을 수 있는 길이면 10kHz- 1MHz 대역 신호 방사효율이 누설 동축 보다 높을 것으로 판단된다.

#### 4.3.3 평행2선을 이용한 1MHz 미만 측정장비 SET

아래 그림15는 50 Ω to 200 Ω 변환기와 200 Ω 평행2선을 보여주고 있다.



그림15. 평행2선 방식의 10kHz-1MHz 대역 여진장비 Set

#### 4.3.4 측정방법 제안

우선 비금속 공간에 평행2선과 누설동축 케이블을 이용하여 교정값을 얻은 후, 평행2선 케이블과 동축 케이블을 묶어 그림7과 같이 시험 할 방호실을 외부에서 감싼다.

10kHz- 1MHz 대역은 평행2선 케이블로 여진시키고, 1MHz 이상은 누설 동축 케이블을 이용하여 여진 시킨 후, 방호실 안에서 Active loop 안테나와 Bilog안테나로 전계를 수신하여 교정값과 방호실 내부에서 측정한 값에 20 Log를 취해 차폐도를 계산해 낸다.

#### 4.3.5 "200Ω 평행2선 + 누설동축 케이블" 여진방법을 이용한 개량된 방호실 차폐도 측정 방법의 추가 연구

- 평행 2선 여진방법의 교정 시험/ Calibration data
- 케이블 길이 별 수신전계에 미치는 영향 연구
- 누설동축 곁에 포설되었을 때 영향 연구

\* 다만, 현재 200 계통 평행2선 여진방법은 터널내 AM 중계 송신 안테나로 사용하고 있어 500kHz- 1MHz 대역에서 에너지 방사효율은 이미 증명되어있다.

## 5. 결론

지금까지 원방계 조건, 원방계에서 차폐도를 측정해야 되는 이유에 대해 살펴보고 건물의 유효공간을 최대한 활용하기 위해 건물벽과 차폐벽간 최소화 거리를 산출해 냈다.

정리하면 수신 안테나를 5cm 이하 작은 것을 사용하고 방호실 내부에서 송신 안테나를 방호벽으로부터 충분히 이격 시킨 후 Mode stirred 방식으로 전계를 여진 시키고 MZ 광 전계센서로 전계를 수신하여 차폐도를 측정한다면 건물벽과 **방호실 벽간의 거리는 60cm**면 충분하다. 특히 용접방식의 경우 SELD방식으로 전파 누설이 없음을 확인하면, 전자파가 누설되지 않는 것이 확실하므로 위와 같은 방법으로 시험 후 규격에 따라 측정거리가 충분히 확보되는 공간 즉, POE 주변, Honeycomb 그리고 Door 부근에서 MIL STD 188-125에 따라 시험하면 될 것으로 판단된다.

이를 정리하면, 1)방호실 내부에서 Mode stirred방식으로 원방계 조건에서 전파를 여진 시키고 용접부위 또는 금속간 연결부를 중심으로 전파 누설을 측정하고 2) 크기가 작은 MZ형 광 전계센서를 이용하여 방호실 각각 면의 차폐도를 측정한다. 3) 앞서 2가지 방법으로 차폐도가 확인되면 마지막으로 벽면과 POE 등 측정거리가 확보되는 공간에서 MIL STD 188-125에 따라 최종 차폐도를 확인하는 방법으로 SE측정은 충분하다.

이외에 새롭게 제안된 **누설동축 케이블 + 평행2선**을 이용한 차폐도 측정방법 역시 미육군 연구소의 연구결과를 근간으로 좀더 연구하면 좋은 결과를 도출해 낼 수 있을 것으로 확신한다. 결론적으로 앞서 제시한 방법 중 하나로 방호실의 차폐성능을 측정하면, 이론적으로 전혀 이상이 없이 고가 건축물의 유효공간을 최대한 크게 사용 할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

1. 민경찬 " EMP 발생, 전파, 방호실 설계, 시공, 감리 및 시험평가" Workshop 자료"  
한국기술연구소
- 2.Thomas F. Podlesak and Canh Ly " Leaky coaxial cable as a Transmitting antenna for HEMP shielding effectiveness Test" Journal of Directed Energy 3. Spring 2009, 97-106
3. Ly, C; and T. Podlesak, "Calibration Data for the Leaky Coaxial Cable as a Transmitting Antenna for HEMP Shielding Effectiveness Testing," ARL Technical Note ARL-TN-330, August 2008.
4. MIL-HDBK-423, High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Protection for Fixed and Transportable Ground-Based C41Facilities, p. 134, May 1993.
5. Sehelkunoff, SA., Electromagnetic Waves, Van Nostrand, New York, pp. 359-360 (1943).
6. MIL STD 285 "Attenuation measurement for Enclosures, Electromagnetic shielding for electronic test purpose, method " 25. June 1956