

I. 서 론

디지털기술과 반도체기술의 급속한 발전에 따라서 기기의 소형 경량화 및 광대역 특성을 갖게됨에 따라서, 극히 적은 구동에너지로도 동작이 가능하게 되었다. 그러나 이러한 디지털화에 따라서 기기들로부터 외부로 방출하는 노이즈(불요전자파, 전파잡음, 방해파)는 컴퓨터를 비롯하여 각종 응용 기기 들에 오동작을 일으키게 하거나, 심지어 인체에도 나쁜 영향을 미치고 있다. 전자파장해(EMI : Electro Magnetic Interference) 문제는 오늘날 심각한 상태에 다다르고 있어서 선진 각국에서는 자국의 규제법을 이용하여 규제 대상을 세분화하고, 기준에 불합격한 제품의 자국 수입을 불허하는 등의 규제조치를 강화하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 두 가지 측면에서 접근 할 수 있으며 하나는 불필요한 전자파의 방출을 억제 하는 방법이고, 다른 하나는 어느 정도의 전자파 환경 내에서는 장해를 받지않고 정상적으로 동작할 수 있는 방해전자파 배제 능력(EMS : Electro Magnetic Susceptibility)을 강화하는 것이다.

위와 같이 복잡하고 다양하여지는 전자파 환경에 질서를 부여하고 조화를 이루게 하는 전자파 환경 기술은 새로운 혁신 기술 분야로 등장하게 되었다. 이에 따라서 EMI가 단순히 '기기들로부터 나오는 전자파의 방출'이라는 협의의 의미에서 확장하여 자기적합성(EMC : Electro Magnetic Compatibility)이라는 용어가 탄생되었다.

EMI/EMC의 기술적인 문제의 해결을 강구하는 일과 사회적 또는 제도적 규제를 마련하는 일이 중요한 과제가 되며, 여기에는 그 대상을 정확하게 측

정할 수 있는 측정기술이 매우 중요한 비중을 차지한다.

방해전자파 측정에 사용되는 주요 측정 기기에는 수신기, 안테나, LISN(Line Impedance Stabilization Network), 전류프로브, 흡수클램프 등이 있으며 안테나와 LISN은 각각 방사성 잡음과 전도성 잡음 측정에 이용된다. 여기서는 각 주파수대역에서 방해전자파 측정에 사용되는 안테나에 대하여 알아보았다.

II. 주파수별 EMI/EMC 측정용안테나

안테나는 전자기장의 세기를 측정하는 센서로 사용되며, 주요한 측정용 안테나에는 표준안테나로 사용되는 다이폴 안테나(30~1000 MHz)와 표준이득 혼 안테나(1~40 GHz) 그리고 각종의 광대역 안테나가 있다. 이는 표준안테나보다 쉽게 넓은 주파수 대역을 빠르게 측정할 수 있다는 점에서 산업체에서 널리 사용되고 있으나, 8 dB 정도의 측정 오차 범위 내에서 시험하려면 표준안테나를 사용하는 것이 바람직하다. 이러한 광대역 안테나는 30~80 MHz의 주파수 대역에서 접지면과의 결합이 적기 때문에 다이폴 안테나보다 더 정확하다고 주장하는 그룹도 있으나, 반면에 높은 정재파비(VSWR)를 갖기 때문에 부적절하다는 그룹도 있다. 이러한 측정용 안테나는 큰 측정 오차를 유발시킬 수 있으므로 안테나 인자(Antenna Factor)를 정확하게 교정하여 사용하여야 한다.

2-1 주파수 1 MHz 이하

1 MHz 이하의 주파수에서 파장은 300 m 이상이

되므로 안테나의 측정은 자연적으로 near field 측정이 이루어지며, 이러한 주파수 대역에서 사용되는 안테나는 dipole, monopole과 loop 안테나와 같은 단순한 선형 구조이다. dipole은 일반적으로 수신 안테나로 사용되며, monopole과 loop 안테나는 송수신용으로 사용된다. 안테나와 송수신기 사이에 발생하는 손실로 인하여 preamplifier가 필요하며, 이 손실은 주로 안테나와 급전선 사이의 부정합에 의하여 발생된다.

1) E FIELD ANTENNAS

(1) Small Dipole

저주파에서 다이폴은 전계 세기의 상대적인 값을 얻는 수신프로브로 사용되며 이음새 부분이나 개구부에서 누설량을 확인하여 shield room이나 장비 외함의 결함을 검사하는데 사용된다. small dipole은 전류소자와 같이 동작하며 Hertzian dipole으로도 불리운다.

안테나에서 가까운 곳($<0.01 \lambda$)에서 H_θ 성분은 무시될 수 있으며 E_r, E_θ 성분은 다음과 같다.

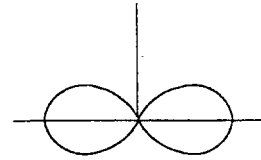
$$E_r = \frac{j60 Idl}{r^3} \cos \theta e^{-j\beta r}$$

$$E_\theta = \frac{j30 Idl}{r^3} \sin \theta e^{-j\beta r}$$

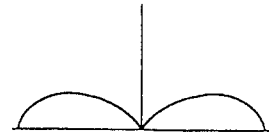
(2) Short Monopole

Monopole은 저주파에서 송수신용으로 사용되며, 사용 도체의 직경을 크게 하면 광대역성을 갖는다. 일반적으로 직경과 길이의 비(l/d)는 $10 \sim 10^4$ 이 보통이며, 선형안테나에서는 이 비를 크게 할수록 대역폭이 커진다. $l/d = 5,000$ 인 선형 monopole의 경우 약 3%의 대역폭을 나타내지만, $l/d = 260$ 의 경우에는 약 30%의 대역폭을 나타낸다.

monopole에서 접지평판의 크기는 안테나의 방사 패턴에 많은 영향을 주게되는데, 무한 평판이나



(a) zero ground plane



(b) infinite ground plane

[그림 1] Monopole의 수직면내 방사패턴

zero ground plane의 경우 $\theta = 90^\circ$ 에서 directivity가 최대로 되지만, 유한한 접지 평면을 갖는 경우에는 $\theta < 90^\circ$ 로 되어 고각도 방사 패턴을 갖는다.

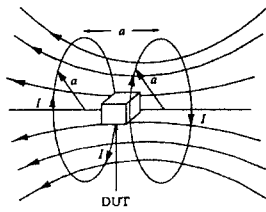
2) H FIELD ANTENNAS

(1) Helmholtz Coils

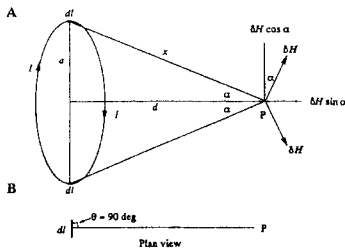
전자파 배제능력측정에 있어서 균일한 자계를 공급하기 위하여 사용된다. 그림과 같이 동일한 직경을 갖는 한 쌍의 코일로 구성되며, 이 두 코일은 각 코일의 반경 a 만큼 서로 떨어져 있다. 한 코일에서 d 만큼 떨어진 곳에서 자계는 축 방향 성분만 갖고 그 크기는 다음과 같다.

$$H_r = \frac{Ia^2}{2(a^2 + a^2)^{3/2}}$$

만일 각각 N 회 씩 감겨 있는 한쌍의 코일이 a 만큼 떨어져 있는 경우에 두 코일 사이의 중앙($d=a/2$)에서 자계 H_r 는 다음과 같이 된다.



(a) Helmholtz coil



(b) coil에 의한 자계 계산

[그림 2] Helmholtz coil에 의한 자계

$$H_z = \frac{8NI}{5a\sqrt{5}}$$

자계는 전류 I와 코일의 권선 수 N에 비례하며, 도체의 직경이 취급하는 전류의 크기를 제한하는데 최대 20 A가 보통이다. 자계의 크기는 코일의 반경에 반비례하며, 도선의 직경을 작게하면 DUT (Device Under Test)의 크기가 제한되어지므로 보통 사용하는 Helmholtz Coils의 직경은 0.5~3 m 정도이다.

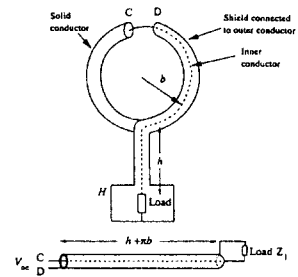
(2) Small Magnetic Loop

single-turn loop는 자계를 수신하는데 사용하며, multi-turn loop는 송수신용으로 사용한다. loop는 magnetic dipole이라고도 부르며, small loop안테나는 small dipole 안테나와 유사한 전자계를 갖으나 전계 E와 자계 H가 서로 바뀌어져 나타난다. 안테나에서 가까운 곳(<0.01 λ)에서 E_θ 성분은 무시될 수 있으며 H_r, H_θ 성분은 다음과 같다.

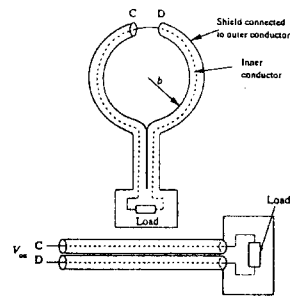
$$H_r = \frac{IdA}{2\pi r^3} \cos \theta e^{-j\beta r}$$

$$H_\theta = \frac{IdA}{4\pi r^3} \sin \theta e^{-j\beta r}$$

single-turn shielded loop는 전계를 제거하고 자계만을 측정하며, 이러한 loop 안테나에는 평형, 불평형의 두 가지 형태가 있다.

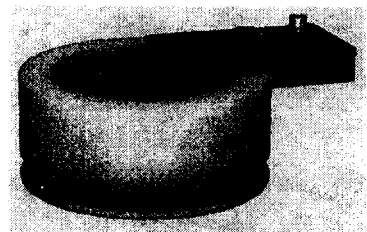


(a) unbalanced single-turn loop



(b) balanced single-turn loop

[그림 3] shielded single-turn loop.



[그림 3-1] Magnetic sensing loop.
(20 turn coil, 30 Hz~50 KHz)

2-2 주파수 1 MHz 이상 1 GHz 이하

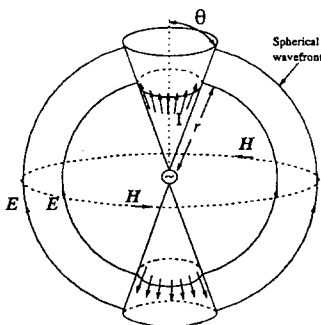
monopole, dipole 및 loop type의 선형안테나와 개구면을 갖는 안테나가 모두 사용된다. dipole type의 안테나의 변형인 folded dipole, triangular dipole 및 biconical 안테나와 dipole array 형태로서 yagi 안테나와 log-periodic 안테나가 있다. monopole type의 안테나로는 discone 안테나가 있고 loop type의 안테나로서는 helical 안테나가 사용된다. 또한 triangular(bowtie) 안테나와 log periodic 안테나의 조합으로 이루어진 bilog 안테나가 있다. 그 밖에 광대역 안테나인 biconical, log spiral 및 log periodic 안테나는 frequency-independent 안테나의 변형으로 볼 수 있다. 이 중에서 주로 많이 사용되는 안테나를 살펴본다.

1) Dipole Type

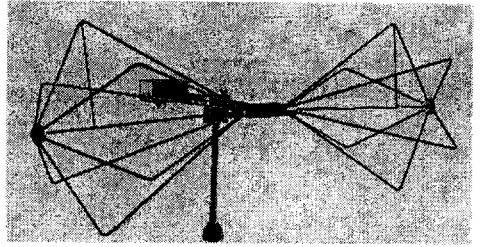
(1) Biconical

길이가 무한히 긴 Biconical 안테나는 구면파를 발생시키며, 두 원추 사이의 급전 단자 양단에는 전압 V 가 발생되고 전류 I 는 원추의 표면을 따라서 흐른다.

이 안테나의 방사 패턴은 다이폴과 유사하며 이



[그림 4] Biconical antenna.



[그림 5] Biconical antenna(20~350 MHz).

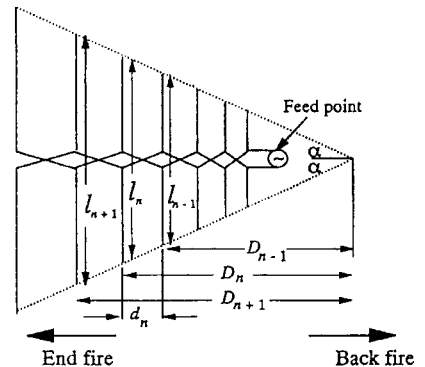
득은 보통 $0 \text{ dB}_i \sim 4 \text{ dB}_i$ 이며 원추도체의 각 θ 가 $30^\circ \sim 60^\circ$ 일 때 광대역 임피던스 특성을 나타낸다. 특성임피던스는 다음 식으로 주어진다.

$$Z = 120 \log_e [\cot(\theta/2)]$$

θ 가 60° 이고 원의 직경이 가장 낮은 주파수에서 한 파장 길이일 경우에 특성임피던스가 50Ω 정도를 나타낸다. 실제로 상용화된 안테나의 형태는 [그림 5]와 같다.

(2) Log Periodic

이 안테나는 Biconical과 더불어 널리 사용되어져 왔던 광대역 안테나이다. 다이폴소자를 배열하여 안테나의 입력임피던스가 사용 주파수 대역 내



[그림 6] Log-periodic dipole array 구조

에서 거의 일정하게 유지된다.

점차로 다이폴 안테나의 길이와 간격은 줄어가도록 구성되어 있으며 n번째 소자의 길이를 l_n , 원점에서 거리를 D_n 으로 놓으면

$$\tan \alpha = \frac{l_n}{2D_n}$$

spacing factor $s_f (< 1)$ 는

$$s_f = \frac{l_n}{l_{n-1}} = \frac{D_n}{D_{n-1}} = \text{일정}$$

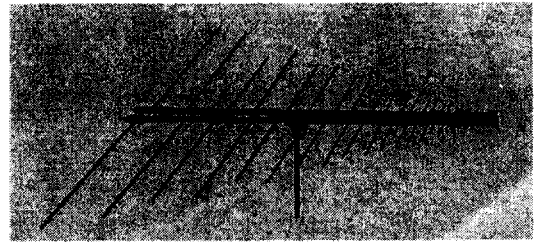
spacing factor S_p 는 소자마다 다르며

$$S_p = \frac{d_n}{2l_n}$$

l_n 은 $\lambda/2$ 이므로 공진주파수에서 $S_p = \frac{d_n}{\lambda}$ 이 된다. 따라서,

$$S_p = \frac{(1-s_f)}{4} \cot \alpha$$

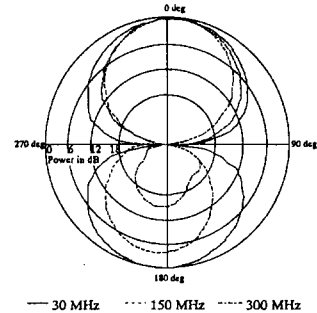
이 안테나의 특성은 $f, rf, r^2f, \dots, r^n f$ 에서도 동일하며, 이 주파수들을 로그함수 크기로 plot하면 주파수는 등 간격으로 된다. 만일 주파수들을 근접시키면 넓은 주파수 대역에 걸쳐서 입력임피던스는 거의 일정하다. 이때 입력임피던스의 변동주기가 주파수의 로그값에 비례하므로 Log Periodic안테나로 부른다. S_p 가 0.06~0.2일 때 s_f 는 0.76~0.98 정도의 값을 갖으며 S_p 값이 감소하면 VSWR값이 증가한다. 이득은 8 dB_i~12 dB_i가 일반적이며 2α 는 2도~40도 정도이다. 안테나의 임피던스는 도선의 길이 대 직경의 비(l/d_0)를 조정하여 급전선에 정합하며, 75 Ω선로에 정합시킬 경우 이 비는 10.501~10.554정도가 된다.



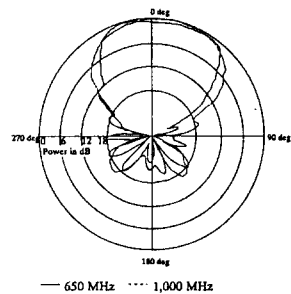
[그림 7] Log-periodic. (80 MHz~2 GHz)

(3) Bilog

triangular(bowtie)앞에 Log Periodic Dipole Array 안테나를 조합하여 초 광대역성을 갖는 안테나이다. 이 안테나는 30 MHz에서 1 GHz까지 사용될 수 있으며, 상용화된 안테나 중에는 2 GHz

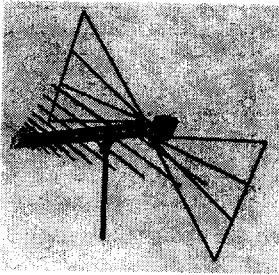


(a)



(b)

[그림 8] Bilog 안테나의 수평면내 방사특성



[그림 9] Biconicallog 안테나
(26 MHz~2 GHz)

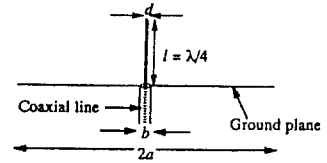
까지 사용하는 것도 있다. 30 MHz에서 파장은 10 m이므로 Log Periodic Dipole만을 사용할 경우 가장 긴 소자의 길이는 5 m가 되어야하나, Bilog 안테나를 사용하면 1.4 m정도로 가능하다.

안테나의 correction factor는 300 MHz 이상에서는 Log Periodic과 비슷하며 100~300 MHz에서는 Biconica보다 우수하다. 안테나의 수평면 내 방사패턴은 다이폴의 경우와 유사하며, 주파수가 증가할수록 지향성을 갖는다.

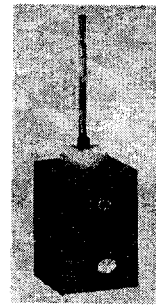
2) Monopole Type

(1) Resonant Monopole

MHz 주파수대에서는 $\lambda/4$ 길이의 Resonant Monopole이 주로 사용되며 공진시 안테나의 임피던스는 36.8 Ω 이다. 임피던스는 동축케이블의 외부 및 내부도체의 직경의 크기(b/a)에 따라서 약간 변하며 선로의 임피던스가 37 Ω 일 때 b/a 값은 1.868이다. 실험적 자료에 근거하면 Resonant Monopole의 공진 길이는 0.236 λ 이며, $1/d$ 는 0.00318 λ 이다. Monopole에서는 접지평면의 직경이 적어질수록 주빔의 방향이 접지평면에서 상향된다. 실제 상용안테나 중에는 2 kHz~300 MHz 범위 걸쳐서 사용되는 passive 또는 active broadband type의 Monopole이 있다.



[그림 10] 동축케이블로 급전되는 monopole.

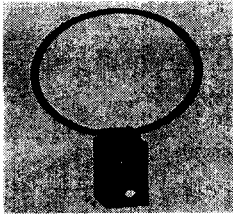


[그림 11] Passive broadband monopole.
(1 kHz~30 MHz)

2) Loop Type

(1) Large Loop

원주의 길이가 0.1 λ 이상인 경우 small loop의 경우와 같이 전류분포가 일정하게 되지 못한다. 전류분포를 일정하다고 가정하고 계산한 방사저항값은 실제와 많은 차이를 보이게된다. 예를 들어 길이가 0.1 λ 인 경우에는 실제 값에 86 % 정도이지만, 0.3 λ 의 경우에는 26 %로 나타난다. loop안테나는 보통 평행 2선식 선로로 급전되며 loop의 원주의 길이가 λ 의 정수배일 경우에 안테나는 직렬 공진되어 방사저항이 최소값을 갖으며, $\lambda/2$ 의 홀수배(0.5 λ , 1.5 λ , 2.5 λ , ...)인 경우에는 병렬공진되어 방사저항이 최대값을 갖는다. 이와 같은 공진점에서 방사저항의 실제값은 loop를 구성하는 도선의 크기에 따라서 결정되는 변수 T_p 값에 의해서 정해진다.



[그림 12] Switchable four-band loop.
(1 kHz~30 MHz)

$$T_p = 2 \log_e \left(\frac{2\pi b}{a} \right)$$

여기서 b 는 loop의 반경이며, a 는 loop를 구성하는 도선의 반경이다.

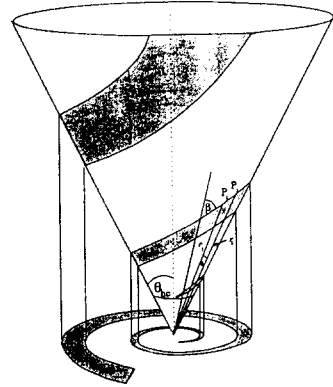
single-turn loop는 높은 이득을 갖도록 최적화하며, 이 경우 loop의 원주 길이는 약 $1\lambda \sim 1.7\lambda$ 이다. 상용화 loop 안테나는 보통 하나의 loop안테나로 약 4개 정도의 대역에서 사용할 수 있도록 제작된다. [그림 12]는 1 kHz에서 30 MHz까지 사용할 수 있는 loop 안테나이다.

2-3 주파수 1 GHz 이상

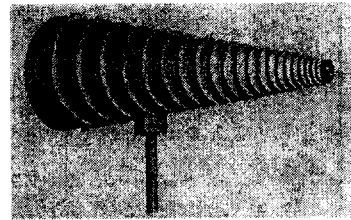
1 GHz 이상의 주파수에서 안테나의 공진 길이는 매우 짧아서 선형안테나는 실제적이 못된다. Conical Log Spiral, Planar Log Spiral과 같은 광대역 안테나와 Double-Ridged Horn 안테나와 같은 개구면 안테나가 주로 사용된다.

1) Conical Log Spiral

이 안테나는 equiangular spiral 안테나를 원추 표면에 투사시킨 형태의 안테나로서, helical 안테나를 입체적으로 tapered시킨 형태를 갖고 있으며 원추각이 매우 작다($\theta_{hc} \leq 10^\circ$). 1 GHz 이하의 주파수대역에서도 사용 가능하며, 보통 빔폭이 60도, 이득은 5 dB~8 dB 정도를 나타낸다. 방사패턴은



[그림 13] Conical log spiral.

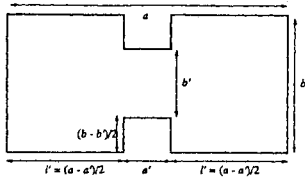


[그림 14] Conical log spiral. (200 MHz~1 GHz)

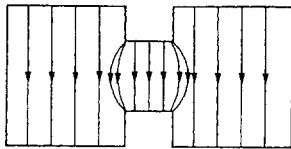
spiral의 arm의 갯수가 증가할수록 넓은 빔폭을 나타낸다. Planar Log Spiral과 마찬가지로 slot 안테나 형태로도 제작될 수 있으며, 입력임피던스는 $80\Omega \sim 320\Omega$ 정도이다.

2) Double-Ridged Waveguide

가로가 a , 세로가 b 인 직사각형 도파관의 TE_{10} 모드에 대한 차단파장 $\lambda_c = 2a$ 이므로, Double-Ridged Waveguide를 사용하면 $\lambda_c > 5a$ 로 낮아진다. 차단주파수는 도파관의 치수에 대한 ridge의 폭과 높이에 따라서 변화한다. pyramid waveguide horn에서 H평면에서 전개는 edge에서 영이므로 sidelobe는 약 23 dB이며, E평면서는 진폭이 거의 일정하므로 sidelobe는 약 13 dB가 된다. 그림과 같이 ridge를 만들고 양 ridge 사이의 높이 $b' = 0.5$



(a) ridge dimension

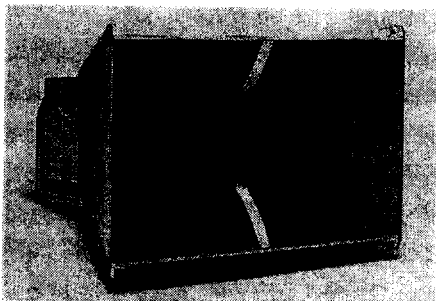


(b) TE_{10} mode의 전계

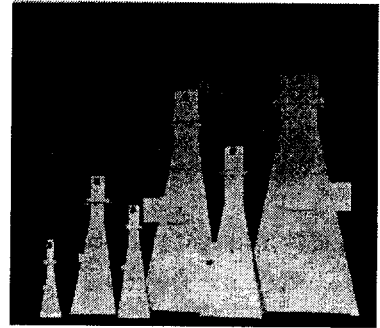
[그림 15] Double-ridged waveguide.

b 로 하면 진폭의 분포가 변화하여 거의 binomial 분포와 같은 1:2:1로 되어 sidelobe level이 30 dB로 된다. 상용화 제품 중에는 200 MHz~2 GHz, 1 GHz~18 GHz의 주파수대에 사용할 수 있는 안테나가 있으며, 이득은 약 2.5 dB_i~42 dB_i이다. H평면과 E평면 빔폭은 각각 40도, 60도이고, 취급 전력이 400 W~800 W로 높으므로 immunity와 susceptibility 측정에 매우 유용하다.

3) Standard Gain Horn



[그림 16] Double-ridged waveguide.
(1 GHz~18 GHz)



[그림 17] Standard gain horn.
(750 MHz~40 GHz)

Standard Gain Horn은 750 MHz~40 GHz까지 넓은 주파수 범위에 걸쳐서 사용되며, 동작 주파수대역에서 antenna factor가 일정하므로 1 GHz이상에서 emission 측정에 사용된다. 이득이 높고(약 17 dB; 정도) VSWR이 낮으며, 취급 전력이 높아서 immunity 측정에서 방사소자로 사용하기도 한다.

III. 결 론

EMI/EMC 측정용 안테나는 일반적으로 대역폭이 넓어야 한다. emission 측정을 위하여 빔 패턴이 무지향성을 갖는 안테나가 요구되며, immunity와 susceptibility 측정을 위해서는 광대역 특성과 취급 전력이 높은 안테나가 필요하다. 이러한 측정에 사용되는 안테나들 중에서 현재 많이 사용하고 있는 안테나를 주파수별로 살펴보았다. 그러나 상용화되어 있는 안테나들을 파악하여 보면, 본문에서 구분한 주파수별 사용안테나의 종류가 엄격하게 구분되는 것은 아니다. 실제로는 광대역의 주파수 범위에서 사용할 수 있는 안테나를 상용 제품으로 제작하여 제조회사에서 제공하고 있다. 국제무선장해특별위원회(CISPR)에서는 공식적으로

tuned dipole을 요구하고 있으나 대부분의 표준은 광대역안테나의 사용을 허락하고 있으므로, 측정에 있어서 동일한 결과를 얻을 수 있는 안테나를 선정하고 기준에 부합하게 측정환경을 구축하여 사용하여야 한다.

참 고 문 헌

[1] Thereza Macnamara, *Handbook of Ante-*

nnas for EMC, Artech House, Boston, 1995.

[2] J. D. Kraus, *Antennas*, McGraw-Hill, New York, pp. 654-655, 1988.

[3] Technical Report "What to look for in an EMC Antenna", *Schaffner-Chase co.*, 1998.

[4] Product Catalog, *EMC Test System co.*, 1997.

*** 필자소개 ***

1949년 10월 24일생

1972년 2월 : 연세대학교 전기공학과 (공학사)

1974년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1990년 8월 : 연세대학교 전자공학과 (공학박사)

1991년 2월~현재 : 경계대학교 전자공학과 교수

