

## I. 서 론

전자 기술의 급격한 발전에 따라 현대전뿐만 아니라 미래 전에서도 전자전(EW, electronic warfare)의 중요성이 크게 부각되고 있으며, 이 분야는 선진국에서 기술이전을 기피하는 첨단기술로서 자체 연구 개발이 필수적이다. 전자전에서는 대응 방식에 따라 Soft-Kill과 Hard-Kill로 분류하기도 한다. Soft-Kill 방식은 현재까지의 주된 전자전 대응 방식으로 ESM(Electronic Support Measures)과 ECM(Electronic Counter Measurement)을 이용하는 적의 전자전에 대한 소극적인 대응 방식이다. 이에 비해 Hard-Kill은 강한 전자파의 교란을 이용하여 적의 전자장치 또는 전자시스템의 물리적 파괴를 목적으로 하는 방법이다. 이러한 Hard-Kill의 대표적인 예가 바로 HPM(High power microwave)을 이용한 무기체계라 할 수 있다. 현대 전자전에서 사용되는 레이더, 통신, 제어 등 대부분의 무기체계는 정교하고 예민한 컴퓨터 칩이나 센서 등에 많이 의존하고 있는데 그만큼 HPM을 이용한 공격에 취약하다고 할 수 있다. HPM 기술은 1970년까지는 이론적인 가능성에 그쳤지만, 플라즈마 물리학, 에너지 저장, 그리고 빠른 스위칭 소자의 발전에 따라 주로 미국과 러시아를 중심으로 유럽의 프랑스와 독일, 동양의 중국과 일본 그리고 이스라엘 등 군사 기술 선진국에서 이에 대한 연구가 활성화되었고 실용화 단계를 거쳐 실전에 이미 사용된 상황이다. 그 예로 1995년

에 체첸 반군이 러시아군의 보안 시스템을 무력화시키기 위해 HPM 무기를 사용한 것으로 보고되었다<sup>[1]</sup>. 이는 미래 전자전에서 HPM이 필수적인 방법으로 사용될 것이 분명하며 그만큼 전자전에서 HPM의 중요성을 의미하는 것이라 할 수 있다.

따라서 우리의 상황과 실정에 적합하며 원하는 주파수 대역에 걸쳐 높은 이득과 전력전송 효율을 갖는 HPM 안테나에 대한 연구는 향후 전자전의 Hard-Kill 무기체계를 갖추는데 있어서 필수적일 뿐 아니라 이를 다양한 분야에서 고부가가치의 민간 기술로서 활용할 수 있을 것이다.

## II. HPM 안테나의 특성

### 2-1 HPM 시스템의 개요

HARD-KILL 방식의 무기체계인 DEW(Directed-energy weapon)은 일반적으로 Laser, RF energy weapon, Charged particle beam weapon 등의 세 가지가 연구되고 있다. 이 중 RF 에너지를 이용하는 HPM 무기는 마이크로파를 사용함으로써 다른 방법에 비해 대기 투과 특성이 양호하며, 표적을 맞추는 spot size를 적합하게 조절할 수 있는 장점을 가지고 있다.

HPM 무기란 고출력의 마이크로파 에너지를 이용해 전자장비들을 무력화시키거나 파괴시키는 일체의 무기들로 간주된다.

HPM 시스템은 대역폭에 따라 협대역 HPM 시스템과 광대역 HPM 시스템으로 나뉜다. 협대역 HPM 시스템의 경우 특정 주파수대역을 사용하는 시스템의 파괴를 목적으로 하며, 따라서 표적의 사용 주파수 대역에 따라 다른 시스템을 필요로 한다. 이에 반해 광대역 HPM 시스템은 매우 짧은 지속 시간을 갖는 높은 첨두 전력의 임펄스를 사용하여 넓은 주파수 대역에 걸친 광대역 마이크로파를 방사하게 된다. 따라서 피폭 지역 내에 있는 적의 거의 모든 시스템이 그 영향권에 들게 된다. 이런 광대역 HPM 시스템은 방사하는 마이크로파의 대역 및 전력의 조절이 가능하므로 다양한 시스템을 표적으로 사용할 수 있다. 또한 광대역 HPM 시스템은 광대역 특성을 이용하여 전자파 보호 시스템, 임펄스 통신, GPR (Ground Penetrating Radar) 및 적의 스텔스 물체의 감지 등에도 이용될 수 있다. 최근에는 UWB(Ultra Wide Band) short pulse를 이용한 UWB pulse HPM 무기체계가 근접방어 무기체계 또는 레이더로 활발히 개발되고 있는데 이는 배열구조의 HPM 무기체계로서 효과적일 뿐만 아니라 시스템 구현이 용이하기 때문이다<sup>[1,2]</sup>. 따라서 협대역 HPM 시스템보다는 이점이 많은 광대역 HPM 시스템이 활발히 연구되고 있는 실정이다.

HPM 시스템에서는 특히 신호원에서 안테나로 전파가 방사될 때까지의 전력전송 효율이 중요한데 이는 고출력의 전력전송 시 발생하는 정전파괴현상(breakdown)에 의해 제한된다. 이는 도파관과 안테나 개구면 상에 고출력의 전자장이 인가될 때 도파관과 안테나의 금속 표면에 높은 전압의 전계가 형성되어 전자방출이 발생되기 때문이다. 이런 전자방출에 의해 conducting region이 발생하게 되며, 이 conducting region은 전파를 흡수하거나 반사하여 효율적인 전력전송을 방해하게 된다. 따라서 정전파괴현상을 피하고 전력전송 효율을 높이기 위한 HPM 안테나의 연구가 매우 중요하다.

## 2-2 HPM 안테나 관련기술개요

현재 미국, 러시아, 일본, 중국, 이스라엘 등에서는 독립적으로 HPM 무기 체계기술을 개발하고 있으며, 이를 이용한 미사일 방어 등 근접방어 무기체계로 이용하고 있다<sup>[1],[2]</sup>. 따라서 우리의 실정에 적합하며 실전에 배치 가능한 근접방어 HPM 무기체계를 개발하여 소모성이 아닌 경제적이며 효율적인 방위체계의 구축이 필요할 것으로 판단된다.

이러한 무기체계의 핵심 부품 중 하나가 바로 보다 강한 전력을 목표로 조사하기 위해 높은 이득을 갖는 HPM 안테나이다. 또한 높은 출력은 매우 강한 전계를 수반하므로 안테나 및 안테나 급전구조에서의 정전파괴현상을 심감히 고려해야 한다. 특히 X-band와 같이 높은 주파수를 사용할 경우 도파관 등 급전구조 및 안테나 급전부의 기하학적 크기가 수 cm에 불과하기 때문에 특히 고전계에 의한 정전파괴현상문제를 적절히 해결해야 한다.

## 2-3 HPM 무기체계의 안테나 시스템 사양

일반적으로 미사일이나 군용 무기체계는 Military EMI/EMC 규격을 만족하여 개발되므로, 이에 타격을 가하기 위해서는 HPM이 방사하는 에너지 밀도는  $1\text{mJ}/\text{m}^2$  이상이 되어야 한다<sup>[2]</sup>. 따라서 이러한 사양을 만족하도록 시스템 설계 사양을 결정하여 목표물에 미치는 영향과 HPM 시스템의 사양을 산출하여야 한다.

만약 고출력 HPM용 신호원의 출력을 100MW X-band 사양으로 설정하고, 표준 도파관 WR-90을 사용하여 안테나로 TE<sub>10</sub>모드를 급전시키고 거리 10 km의 목표물에 HPM 빔을 조사시킨다고 가정하면, 이 도파관에서의 최대 전계는

$$E_{WG} = \sqrt{\frac{2P_{peak}Z_{1.0}}{ab}} = 20.74\text{MV}/\text{m} \quad (1)$$

이며, 여기서 도파관의 특성 임피던스는  $Z_{1,0} = \eta_0 [1 - (\frac{\lambda}{2a})^2]^{-1/2}$ ,  $\eta_0 = 376.98\Omega$  이고 WR-90의 치수  $a(=2.0286 \text{ cm})$ ,  $b(=1.016 \text{ cm})$ 를 대입한다. 이러한 도파관 급전 혼 안테나를 이용하여 일반적인 반사판 안테나에 비해 급전부의 위치를 자유롭게 설치 가능하고 spillover 및 부엽에 의한 손실 적은 장점을 가진 읍셋 카세그레인 구조를 사용하면, 반사판의 초점면에서 전자파를 복사시켰을 때, 반사판 면에서의 전계는

$$E_{reflector} = E_{VGC} \times \frac{b}{D} = 52.7 \text{ KV/m} \quad (2)$$

가 된다. 여기서 안테나의 이득은 50 dB 이상의 고이득 안테나로 설계하여 시스템의 부담을 덜어주어야 할 것이다. 이러한 수식을 통해 목표물에서의 fluence를 목표물에 오 동작을 일으킬 수 있는 충분한 에너지 밀도  $1 \text{ mJ/m}^2$ 에 만족하도록 HPM 안테나 시스템의 치수와 이득 등을 산출하여야 한다.

## 2-4 HPM 안테나 설계 시 고려사항

### 2-4-1 전계의 균일 분포와 정전파괴현상

HPM 안테나 설계 시 가장 고려되어야 하는 부분 중 하나가 정전파괴현상이다. 정전파괴현상이란 도파관이나 안테나 aperture 상에 고출력의 전자장이 인가될 때 도파관이나 안테나의 금속 표면에서 높은 전압의 전계가 걸리면서 전자방출이 일어나는 현상이다. 전자방출에 의해 conducting region이 발생하게 되며, 이 conducting region이 전파를 흡수하거나 반사하여 전력전송 효율의 저하를 가져오게 된다.

공기중에서는 이상적으로 field의 크기가 2~3 MV/m일 때 정전파괴에 도달하며, 실제 시스템 설계에서는 field의 크기가 1 MV/m를 초과하지 않도록

한다<sup>[3]</sup>. WR90 도파관의 경우 100 MW의 첨두 전력에 대하여 약 20 MV/m 이상이 걸리게 된다. 혼 안테나의 경우에도 tapered edge에서의 전계가 3 MV/m 이상이 존재하며 특히 edge에서의 전계가 강하게 나타난다. 이 현상은 전계의 세기가 불균일 할수록 더 낮은 전압에서도 정전파괴현상이 일어날 수 있다. 정전파괴현상이 발생하게 되면 단락 고장이 되므로 출력전압이 거의 모두 신호발생기로 되돌아가 시스템이 파괴되는 심각한 손상이 발생하게 된다.

이러한 높은 전계에서 정전파괴현상을 방지하는 방법은 첫째로 유전체의 삽입이나 도파관과 안테나의 구조를 최적화 함으로써 전계의 균일함을 유지하는 방법과 둘째로 안정적이면서도 높은 전압을 견디기 위해서 진공이나 SF<sub>6</sub>, N<sub>2</sub> 가스 등을 사용하는 방법이 있다. 이러한 방전현상을 억제하기 위해서 다양한 절연물질의 사용이 연구되어 왔으며 그 중 순수한 SF<sub>6</sub>가스 또는 혼합물이 절연물질로 우수한 효과가 있어 거의 독점적으로 사용되어져 왔다<sup>[4]</sup>.

SF<sub>6</sub>가스 혼합물에 대해서는 1970년대부터 연구가 이루어져 왔으며 SF<sub>6</sub>보다 유전율이 낮은 N<sub>2</sub> 또는 CO<sub>2</sub>와의 혼합물이 주로 사용되는데 한때 클로로포르카본과의 혼합물에 관심이 모아졌으나 오존층 파괴의 가능성 때문에 중단되었다.

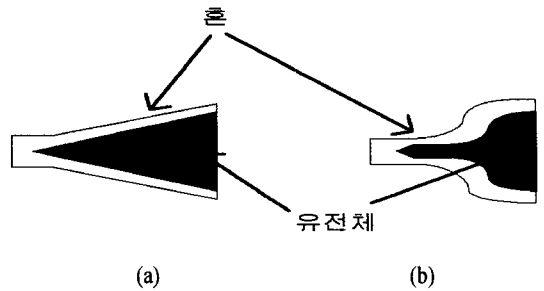
일반적으로 순수한 SF<sub>6</sub>가스보다 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 또는 SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub>의 가스혼합물의 방전억제 효과가 높은 것으로 나타났으며 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>혼합물이 SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub>혼합물보다 성능이 우수한 것으로 확인되었다<sup>[5]</sup>. 정전파괴현상을 방지하는 방법 중 첫 번째 방법의 고려사항은 유전체의 지지문제와 유전체 재질에 따른 특성분석이 이루어져야 한다는 것이다. 그리고 두 번째 방법의 고려사항은 가스들의 사용 주파수 및 전계의 분포에 따라 최소 정전파괴현상 전계가 결정되는데

이러한 진공 및 가스를 사용하기 위해서는 각각 이들을 넣을 수 있는 container가 필요하다. 대표적인 container로서는 polyethylene gas bag 등이 있다. 이러한 container를 구성하는 유전체의 재질 및 형상에 따라 안테나의 방사패턴 및 이득이 변화하므로 이들 유전체의 형상을 최적화 할 필요가 있다. 또한 급전 안테나로부터 부 또는 주 반사판까지의 공기 중에는 고 전계가 걸리는 지역이므로 이들 영역에서의 공기 정전파괴현상에 대한 대책이 필요하다<sup>[6]</sup>. 따라서 경제적이고 안전한, 효율적인 안테나 및 급전구조를 얻기 위해서는 적절한 진공도 및 사용하는 가스의 압력, container의 형상 및 재질을 결정해야 하고 또한 균일한 전계분포를 갖도록 급전구조 및 안테나 형상을 설계하여야 한다.

#### 2-4-2 배열 시 고려문제

우선 100MW 급의 전력을 전달하기 위해서는 급전 혼 안테나의 배열이 필요하며 그에 따른 안테나의 방사특성, 효율 그리고 낮은 교차편파 특성 등이 고려되어야 한다. 하지만 가장 큰 고려사항은 물리적인 크기와 무게문제가 가장 큰 고려사항이라 할 수 있다. 일반적인 혼의 형태는 [그림 1]의 (a)와 같은 Linear tapered dielectric 혼의 형태가 주로 사용되어 왔다. 하지만 전체적인 크기와 그에 따른 부수적인 문제들로 인해 배열 시 많은 제약을 가져왔다. 대표적인 예로 최근에는 [그림 1]의 (b)와 같은 혼의 형태를 변형한 profiled dielectric loaded horn 등을 사용함으로써 전체적인 크기와 무게를 줄이려는 노력이 계속되어 오고 있다<sup>[7]</sup>.

또한 profiled dielectric loaded horn을 사용함으로써 얻을 수 있는 부수적인 이점으로는 좋은 방사특성과 효율 그리고 낮은 교차편파 등이 있다. 무게를 줄이는 또 다른 방법으로는 균일전계를 유지하기 위해 안테나 내부에 삽입되는 유전체의 개발이다.



[그림 1] Dielectric loaded linear horn(a)과 Profiled dielectric loaded horn(b)

현재는 epoxy와 TiO<sub>2</sub> 같은 물질의 합성을 이용한 유전체를 개발하고 있다<sup>[8,9]</sup>.

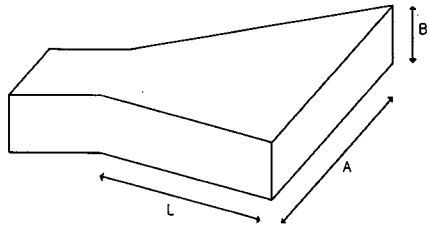
### 2-5 HPM 안테나의 종류

HPM 안테나는 대역폭에 따라 협대역 HPM 안테나와 광대역 HPM 안테나로 나뉜다. 현재는 협대역 HPM 안테나보다는 이점이 많은 광대역 HPM 안테나에 관한 연구가 활발히 진행중이다. 협대역 HPM 안테나로는 대표적으로 혼 안테나가 주로 사용되며 광대역 HPM 안테나로는 TEM 혼, Log-periodic, IRA 등이 주로 사용된다.

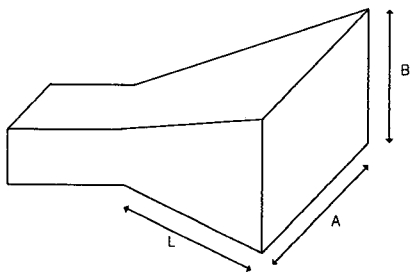
#### 2-5-1 협대역 HPM 안테나

##### 1) 혼 안테나

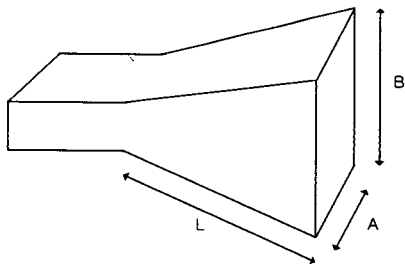
도파관으로부터 연결된 여러 종류의 혼은 [그림 2]와 같으며 높은 전력을 전송하기에 적합하고 내부를 진공으로 만들 경우 정전파괴현상에 대해서 다른 구조의 안테나 보다 효율을 높일 수 있는 장점이 있다. 도파관 이론에서 도파관의 정전파괴현상은 결국 도파관의 전력 운용 용량의 상한을 결정하게 되는데 도파관 내의 진공정도에 따라서 파워의 전송 효율이 달라지게 된다. 따라서 높은 파워의 전송을 위해서는 혼 안테나의 진공을 만들기 위한 부가적



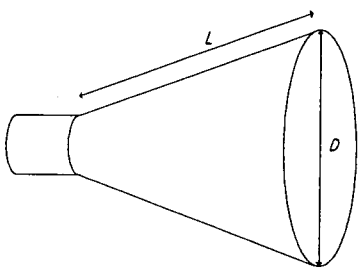
a) Sectoral H-plane 혼



b) 피라미드형 혼

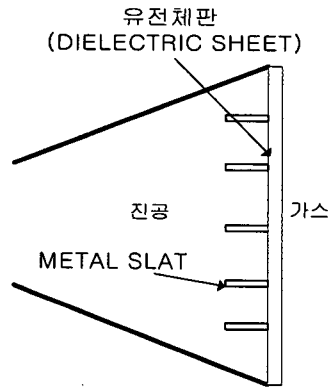


c) Sectoral E-plane 혼

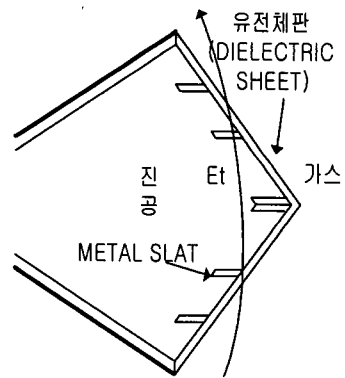


d) 원추형 혼

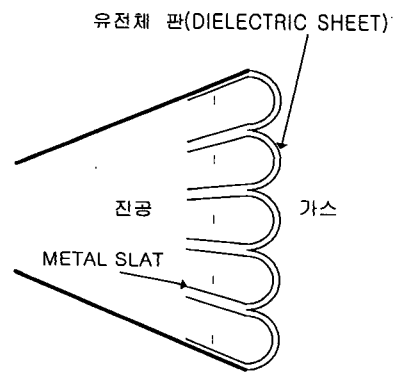
[그림 2] 다양한 형태의 혼 안테나 구조



a) 평평한 유전판



b) 경사진 유전판



c) 굴곡진 유전판

[그림 3] 혼의 개구면 상에서의 가스와 진공의 경계면

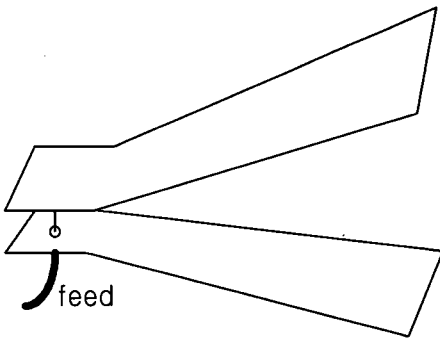
인 구조에 대한 고려가 필요하다.

실제적으로 많이 쓰이는 방법은 [그림 3]과 같이 가스 장벽을 막는 유전체 판을 지지하는 것이다. 혼은 원추형이거나 직사각형의 구조를 가져야 하며, 이 때  $TE_{10}$ 모드가 전파될 때 도파관을 가로지르는 금속판에 전계는 수직에 가깝게 된다. 따라서 파는 방해가 없는 이 금속판에 대해 이상적으로 통과한다.

## 2-5-2 광대역 HPM 안테나

### 1) TEM 혼 안테나

TEM 혼 안테나의 구조는 [그림 4]와 같으며 모든 주파수에 있어 동일한 속도를 가지고 TEM파를 전파한다. 즉 모든 주파수가 혼의 개구면 상에 모이고 광대역 펄스가 전송되는 것이다. 또한 크기와 여기방법에 의해  $TM_{0n}$ ,  $TE_{0n}$  모드와 같은 고차 모드도 전파가능한데 이들은  $\lambda_{cutoff} = 2B/n$  ( $n$ : mode index,  $B$ : 어떠한 지점에서의 단면상의 플레이트 간격)을 가지고, 여기서  $B$ 값으로 고차모드의 제어가 가능한 장점이 있다. 하지만 이러한 안테나는 전송을 위해서 개구면의 크기가 모든 동작 주파수에 대해 0.6 파장보다 작아야 하고 낮은 주파수에 대해서는 혼의 크기가 아주 작아져야 한다는 단점을 가지고 있다<sup>[10]</sup>.



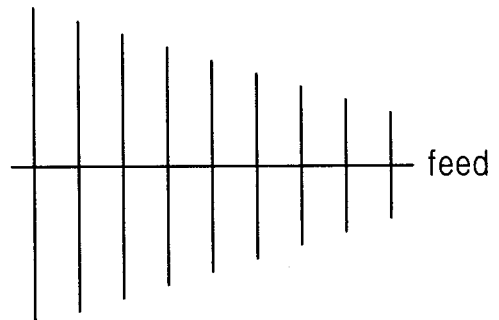
[그림 4] TEM 혼

### 2) Log-periodic 안테나

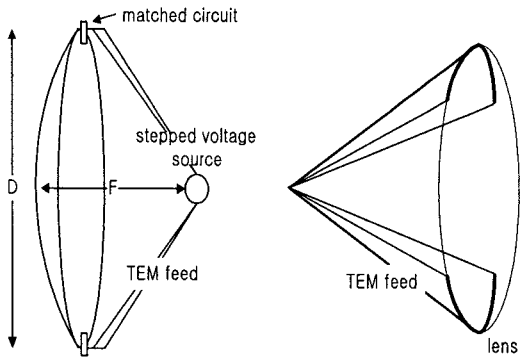
Log-periodic 안테나의 구조는 [그림 5]와 같으며 정현파(continuous wave)에 대해서는 무관하지만 short pulse에 대해서는 주파수에 대한 분산특성을 나타낸다. 안테나의 분산특성을 이용하여 입력 펄스에 대한 정합이 잘 되었다면 원하는 압축된 출력펄스를 만들 수 있는데 빔폭이 크고 결과적으로 낮은 이득을 가지고 있으며, 원하는 대역폭에 대해 일정한 이득을 이루기가 힘든 단점이 있다<sup>[11]</sup>. 또한 고출력 전송을 위해서는 이에 적합한 Balun 설계가 필요하다.

### 3) Impulse Radiating 안테나(IRA)

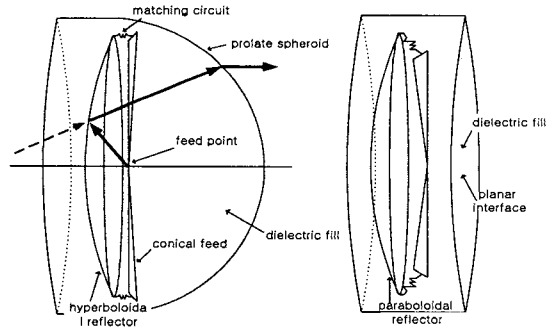
[그림 6]과 같이 IRA는 TEM 급전부와 개구면 필드를 모으기 위한 렌즈나 반사판으로 구성된 형태이다. 이 형태는 short pulse에서 주파수에 대한 분산특성을 개선하기 위해 제안된 구조로서 빠른 순시 펄스(Fast Transient Pulses)를 방사하는데 아주 효과적이고, 같은 크기의 개구면 안테나(개구면 안테나)와 비교했을 시, TEM 혼에서 보이는 것과 같은 높은 주파수 대역에서의 전계 강도 감쇠에서 확실한 장점을 보여 준다. 그러나 작은 크기의 IRA의 경우 낮은 주파수에서 TEM 혼보다 좀더 큰 전계 강도 감쇠를 나타낸다. IRA는 [그림 7]과 같이 변형



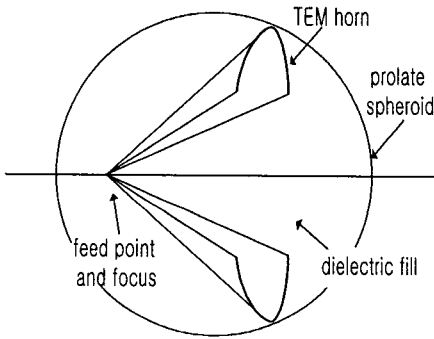
[그림 5] Log-periodic 안테나



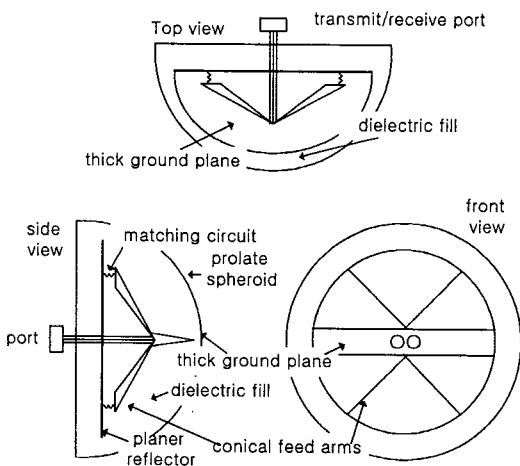
[그림 6] 반사판형과 렌즈형 IRA



[그림 9] Hyperboloidal reflector와 Prolate spheroidal lens(좌), Paraboloidal reflector와 Planar lens(우)를 가진 ReLIRA



[그림 7] Solid dielectric lens IRA



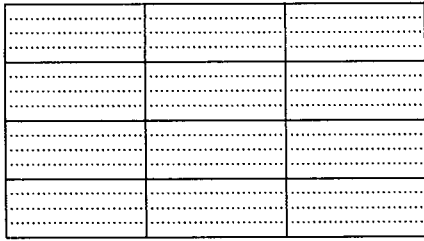
[그림 8] Flat plate reflector와 prolate spheroidal lens를 가진 SPIRA

된 형태의 렌즈로도 제작되었고, [그림 8, 9]와 같이 렌즈와 반사판이 유전체에 동시에 장착된 형태도 가능하다<sup>[6]</sup>.

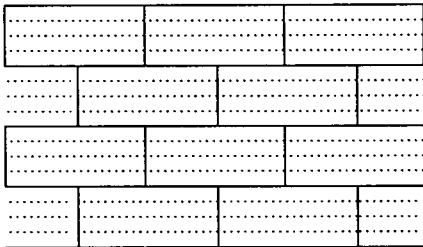
### Ⅲ. HPM 배열 안테나

HPM용 안테나는 하나의 급전부를 사용하거나 단일 안테나 시스템만으로는 충분한 에너지를 목표물에 조사하지 못할 수 있고, 움직이는 목표물을 기계적으로 추적하기에 한계가 있으므로 결국 배열 안테나 구조를 적용해야 한다. 배열 안테나의 경우 두 가지를 생각할 수 있는데 급전부의 배열과 반사판을 포함한 안테나 unit의 배열이다<sup>[12,13]</sup>.

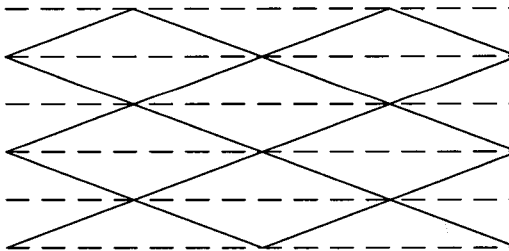
반사판은 크기의 문제가 수반되므로 이것의 배열은 많은 공간과 비용을 수반한다. 반면에 급전부만을 배열하고 하나의 반사판을 쓸 경우 출력 전력은 증가시킬 수 있으나 빔의 electronic scanning의 경우 반사판의 사용 가능한 실효면적의 감소를 야기하게 되고 결국은 같은 반사판의 크기에 비하여 안테나의 이득이 감소하는 단점이 있다. 브로드사이드를 중심으로 빔폭을 60° scan 가능한 각도를 고려할 때, 안테나의 이득은 약 6 dB 감소하게 된다. 이는 급전 안테나를 4개 사용하여 안테나의 출력을 4배



a) In-line 직사각형 혼



b) 엇갈린 직사각형 혼

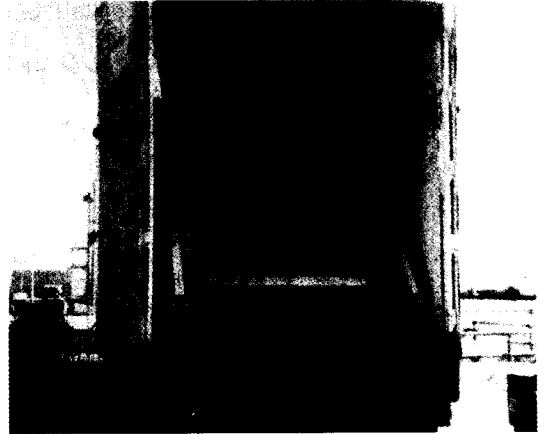


c) 마름모형의 혼

[그림 10] Aperture grating을 갖는 혼 배열

로 한 것에 대한 보상이 된다. 따라서 반사판의 크기와 목표물의 에너지 fluence를 모두 고려하고, 무기체계의 다른 기계적인 측면을 고려하여 사용 안테나 시스템을 결정하여야 할 것이다.

[그림 10]은 혼 안테나의 다양한 배열 형태를 보여준다. M개의 혼 안테나를 이용해서 M개 도파관으로부터의 전송을 생각할 수 있다. 이런 정렬에는 여러 가지 방법이 있는데 [그림 10]의 a)와 b)의 경우는 각 혼들을 가로지르는  $TE_{10}$  모드가 균일하지



[그림 11] TEM 혼 배열 안테나 시스템(by Power Spectra Inc.)

않으며  $E_z$  성분은 옆면에서 0이 된다. 이는 전계 분포가 배열의 표면을 통해 일정하게 유지되지 않아 바람직하지 않음을 의미한다.

여기에 대안적인 형태가 c)의 경우인데, 다이아몬드형의 대칭성으로 인해 적어도 하나의 도체판은 각각의 중심을 통과하고  $E_z$  성분은 다이아몬드의 경계에서 수직이 된다. 직사각형 도파관에서는 각 옆면에서 전계가 0이 되지만, 다이아몬드에서는 모서리에서 0이 된다. 이것은 혼에서 혼으로 부드러운 전송이 가능하게 한다. 일반적으로 혼 배열 최적화를 위한 형태는 다양하기 때문에 여러 가지 모양을 위한 고려가 요구되어진다.

[그림 11]은 실제 TEM 혼 배열 안테나의 구현의 예를 보여준다. 각 배열 소자들은 각각의 레이저 다이오드에 의해 제어되며 각 소자들을 스위칭 함으로써 약  $\pm 30^\circ$  정도의 조향이 가능하다.

#### IV. HPM 시스템의 국외 기술동향

HPM 관련 분야 기술은 크게 신호원(Magnetron, Klystron, Vircator, Gyrotron, Free-Electron Laser 등)



과 안테나 분야로 나눌 수 있으며, 이러한 신호원의 공통점은 전자의 운동에너지를 초고주파 빔의 전자 파로 증폭 변환시킨다는 것이다. 이들 신호원은 크게 고출력의 협대역 신호원과 광대역 신호원 등 두 가지 분야로 발전하고 있으며, HPM 무기체계에 적용하여 이동이 가능하도록 소형, 경량화되는 추세이다.

HPM용 안테나의 설계 사양은 어떠한 신호원을 사용할 것인가에 의해 결정되며, 협대역 신호원용 안테나는 [그림 2]와 같은 도파관 급전 혼 안테나를

사용하고, 광대역 신호원용 안테나는 [그림 4, 6~9]과 같이 광대역 TEM 혼 안테나나 IRA가 사용된다.

현재의 HPM 시스템은 기술적 관점에서 1 GHz 소스에서 100 ns의 펄스 폭으로  $270 \mu\text{J}/\text{m}^2$ 의 에너지를 30 km거리까지 전송이 가능하다. 이것은 인체에는 영향이 적지만, 방어막이 없는 전자기기에는 상당한 피해를 줄 수 있는 수준이다<sup>[2]</sup>. 최근의 HPM 시스템의 현황을 보면 <표 1>과 같다<sup>[11]</sup>.

예로서 미국 내에서의 HPM 연구는 Air Force

<표 1> High Power Microwave System 개발 및 연구현황

소스	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 하나의 소스의 경우, 15GW의 첨두 전력 출력, 1kJ 미만의 Largest Single 펄스 Energy</li> <li>· Phase-Locking Multiple 소스의 경우 개념적으로 1TW, 0.1MJ이 가능</li> <li>· 10GW까지 펄스의 전력 향상</li> <li>· 10 <math>\mu\text{s}</math>까지 펄스 폭을 향상</li> <li>· 100kJ까지 펄스의 에너지 향상 (Pulse Shorting 해결)</li> <li>· Tuning 가능한 소스의 개발 (Gyro Devices, Plasma filled source)</li> <li>· Self-Optimizing 소스</li> <li>· 펄스 방사 능력 향상 (안테나, 윈도우, 모드 변환기)</li> <li>· 소스를 좀더 작고 가볍고 장착이 쉽게, 그리고 Permanent magnets 가능하게 제조</li> <li>· 낮은 전압 동작 (Plasma filled source)</li> </ul>
Antenna	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 혼 배열 급전 방식의 반사형 안테나나 급전 혼과 움셋 부 반사체를 이용한 카세그레인 구조가 주목 받음</li> <li>· 높은 전력에서의 정전파괴현상</li> <li>· 소스의 Phase-locked 배열에 의한 초고전력에 적합한 다중 급전 도파관과 다중 안테나 설계</li> <li>· 큰 방향성을 가지고 목표물을 가능한 한 빨리 추적할 수 있는 능력</li> </ul>
Propagation	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 표적의 위치에 따른 주변 환경에서의 영향 연구</li> </ul>
Interaction with Systems	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 사용되는 소스와 주파수의 종류, 표적 시스템의 Shielding 여부와 종류에 따른 표적의 반응 결과에 관한 연구</li> </ul>

<표 2> 미 공군 4개 연구소의 연구 현황

Phillips Lab.	전체 프로그램 조정, UWB(Ultra-Wideband), Narrowband Sources, Cathodes, Breakdown, and Antenna
Rome Lab.	Solid State Array of InP Switches
Wright Lab.	Plasma Sources and Diagnostics
Armstrong Lab.	UWB effects on cellular structure

< 丑 3 > HPM MURI(Multidisciplinary University Research Initiative)

HPM MURI CENTRAL CONSORTIUM	
Texas Tech University	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ns and sub-ns breakdown of insulating media</li> <li>• Alternate Geometry Vircators</li> <li>• Plasma-filled BWO Theory</li> <li>• Extended Interaction Klystron</li> <li>• RF Vacuum and Window Breakdown</li> </ul>
University of New Mexico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vacuum and Plasma filled BWOS</li> <li>• Smart, adaptive sources</li> <li>• Ferro-Electric Cathodes</li> </ul>
University of Michigan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HPM Gyrotron Pulse Shortening</li> <li>• Relativistic Klystron Oscillator (RKO)</li> </ul>
Physics International (Primex)/ Microwave Sciences	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pulse shortening in HPM tubes</li> </ul>
Other research topics in the Central Consortium	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mode converters, vacuum window breakdown, multipactor, UWB breakdown, radial acceletron, photonic crystal quasi-optical components, pulse shortening laser diagnostics</li> </ul>
HPM MURI WESTERN CONSORTIUM	
University of California at Davis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Multi-beam Klystron</li> <li>• Ultra-short pulse FEM</li> </ul>
Stanford University	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High current density oxide cathodes, MBK</li> <li>• High-gradient RF breakdown</li> </ul>
U.C. at Berkeley	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modeling of HPM sources</li> </ul>
U.C. at Los Angeles	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analysis of HPM sources</li> </ul>
Northrop-Grumman	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compact HPM sources</li> </ul>
Other research topics in the Western Consortium	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Harmonic gyro-TWT amplifiers, Penio-TWT amplifiers, Chirped pulse MMW radar, expert control systems, gated emission sources, plasma filled devices, plasma Cerenkov masers, 25~100 kW CW 94 Ghz gyrotron.</li> </ul>
HPM MURI ESTERN CONSORTIUM	
University of Maryland	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HPM ceramic sintering</li> <li>• Plasma-filled BWO</li> <li>• HPM sources modeling</li> <li>• Phase-locked gyrotrons</li> <li>• Historical ties to research at ARL and NRL</li> </ul>
Cornell University	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ganged high power TWTAS</li> <li>• Ferro-electric cathodes</li> </ul>
CPI	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HPM ceramic sintering</li> </ul>
Other research topics in the Eastern Consortium	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Higher harmonic gyrotrons, oscillators and amplifiers, theory and modeling, materials for tubes</li> </ul>

Research Lab., Army Research Lab., Naval Research Lab., 그리고 여러 대학교와 관련 기업의 CONSORTIUM을 통해 이루어지고 있다. 이러한 연구의 중추적인 역할을 하는 곳이 4개의 Air Force Research Lab.인데, 그 중에서도 Phillips Lab.이 주관을 하고 있다. <표 2>는 미 공군 4개 연구소의 연구 현황이고, <표 3>은 대학과 기업의 CONSORTIUM에서의 연구현황이다<sup>[15]</sup>.

현재 이 외에도 여러 나라들에서 HPM 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 러시아에서는 slow-wave, fast-wave device와 같은 대부분의 device 연구와 s-band 대역에서 repetitive operation의 relativistic magnetron 구동에 사용되는 linear induction accelerator 개발을 진행중이며<sup>[14]</sup>, 유럽의 여러 나라들은 HPM 시스템 연구외에 mine detection 같은 응용분야와 simulator 개발에 주력하고 있다<sup>[18]</sup>. 이외에 중국과 일본을 포함한 아시아에서는 corrugated slow-wave 구조의 분석과 같은 HPM device의 구조 분석과 high power UWB 펄스 소스 등의 소스분야에 활발한 연구가 진행 중에 있다<sup>[18]</sup>.

지금까지의 HPM 연구는 주로 단발성의 순간 최대출력 연구에 중점을 두어왔으나 점차 주파수 및 파형 특성과 총 에너지 효율을 향상시켜 보다 공격 효율을 높일 수 있는 HPM 시스템쪽으로 연구가 이루어지고 있는 추세이다. 이는 양적 측면보다는 질적 측면에 역점을 둔 것으로 판단된다. 이와 같은 추세를 반영하고 있는 대표적인 것들에는 다음과 같은 기술의 변화들을 들 수 있을 것이다.

첫째로 안테나의 빔폭을 변화시킬 필요가 있는 상황에 적합한 안테나의 개발이 이루어지고 있다. 결과적으로 새로운 IRA의 구조가 연구되고 있는데 그것은 파라볼릭 반사판의 focal point에 대하여 혼의 위치를 기계적으로 변화시킴으로써 최종적으로 반사판로부터 방사되는 빔 폭을 조절하는 기술이 지속적으로 발전되고 있다<sup>[8]</sup>. 이는 목표물의 위치를

정확히 알고 있을 때에는 집중된 에너지가 효과적이므로 좁은 빔을 방사하고 반면에 동시에 많은 목표물을 파괴시킬 시에는 보다 넓은 빔 또는 전 방향성 방사가 더욱 효과적이기 때문이다.

둘째로 epoxy와 TiO<sub>2</sub> 같은 물질의 합성을 이용한 유전체를 개발함으로써 lensing material이 쓰이는 안테나 시스템에서의 무게를 줄임으로써 안테나 배열 시 전체 시스템의 중량을 경감시키는 등 많은 장점을 가져올 수 있다<sup>[8]</sup>.

셋째로 배열 안테나를 제작하기 위해서 초광대역 특성을 보이면서도 안테나 구조가 가지는 저주파 차단특성을 향상시킬 수 있는 방법과 새로운 안테나의 개발을 들 수 있다. 이는 short pulse에 대한 펄스 분산현상을 해결할 수 있고 특히 넓은 주파수 대역에 걸쳐 높은 이득을 가지는 안테나에 반드시 필요한 기술이다.

넷째로 협대역과 광대역 안테나 모두 좋은 방사 효율을 보이면서도 정전파괴에 견딜 수 있는 안테나의 설계를 들 수 있다.

따라서 이러한 방향으로의 발전은 HPM 무기체계를 진보시킬 수 있을 것이며, 실전에 보다 응용 가능한 형태로의 발전을 가져올 것으로 기대된다.

## V. 결 론

본 고에서는 HPM 안테나에 관한 관련기술 개요 및 동향과 무기체계로서의 안테나 기술에 대해 살펴보고 있다. 세계 각국의 전자전 무기체계 성능이 고도화되면서 좀더 효율적인 공격목적에 부합하기 위해 더욱 높은 고 전력을 출력시키려는 노력을 계속해 오고 있으나, 국내에서는 아직까지 HPM에 대한 기초연구가 미진한 상태이다. 고 전력의 무기체계를 갖는 안테나 시스템을 위해서는 주파수에 따른 한정된 공간을 갖는 도파관, 혼 안테나에 대한 정전파괴현상 대책, 그리고 실제 사용 가능한 크기 등도

재질과 구조적인 면으로 연구가 계속 이루어져야 한다. 따라서 펄스 발생기의 광대역화와 함께 에너지, rise time, 펄스 폭, 그리고 목표물에 조사되는 방사파형 등에 대한 다양성을 제공할 수 있는 안테나의 개발이 계속 이루어져야 한다.

보다 빠르게 일정수준으로 도약하기 위해서는 외국의 기술을 습득하고, 메카니즘에 대한 기초연구를 수행하며 앞으로의 진행방향을 직시하고 군·산·학·연의 유기적인 연대를 통하여 대처해 나가는 능력이 필요하다.

이러한 무기체계로서의 HPM 연구는 전파교란, 전자파 보호 시스템, 광대역 레이더, 그리고 무선 전력전송과 같은 응용분야에도 큰 발전을 가져올 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- [1] Major General Vladimir M. Loborev, Russian Federation Ministry of Defense Central Institute of Physics and Technology, "HPM Terrorism", AMEREM '96.
- [2] Clayborne D. Taylor and D.V. Giri, *HIGH-POWER MICROWAVE SYSTEMS AND EFFECTS*, Taylor & Francis, 1994.
- [3] A. S. Gilmour, Jr, *MICROWAVE TUBES*, Artech-House, Chap. 15, Breakdown and Protection, pp.437-480, 1986.
- [4] J. D. Yan, "Dielectric Breakdown of a Residual SF<sub>6</sub> Plasma at 3000K under Diatomic Equilibrium", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 4 no. 1, February, 1997.
- [5] Y. Qiu, "Comparison of SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> and SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub> Gas Mixtures as Alternatives to SF<sub>6</sub> Gas", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 6 no. 6, December, 1999.
- [6] Hanson, R. C. Libelo, L. F. ; "Rapid calculation of near-field fluence of HPM antennas", *IEEE Trans. MTT*, vol. 34, pp.206-213, Aug., 1992.
- [7] A D Olver and B Philips "Profiled Dielectric loaded Horns" *Antennas and Propagation*, 1993., Eighth International Conference on, 19-93, Page(s): 788-791, vol. 2.
- [8] Forrest J Agee의 9명 "Ultra-Wideband Tranmitter Research" *IEEE Trans. on plasma science*, vol. 26, no. 3, June, 1998.
- [9] W. S. Bigelow and E. G. Farr, "Minimizing dispersion in a TEM waveguide bend by a layered approximation of a graded dielectric material," *Sensor and Simulation Note 416*, Air Force Research Lab., Kirtland AFB, NM, Jan., 1998.
- [10] J. D. Taylor, *Introduction To Ultra-Wideband Radar Systems*, CRC Press, 1995.
- [11] J. Benford and J. Swegle, *High Power Microwaves*, Artech house, 1992.
- [12] Kenneth W. Brown and Aluizio Prata, Jr, "A Design Procedure for Classical Offset Dual Reflector Antennas with Circular Apertures," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 8, pp.1145-1153, August, 1994.
- [13] Duan, D. W. Rahmat-Samii, Y. "A three-parameter model for circular and elliptical aperture distributions", *Antenna and Propagation*, 1991, AP-S, vol. 1, pp.160-163.
- [14] [http://www.dreo.dnd.ca/pages/factsheet/library\\_e.html](http://www.dreo.dnd.ca/pages/factsheet/library_e.html), "Electronic Warfare : High Power Microwaves(HPM)"
- [15] F. J. Agee, "Basic Reaserch in High Power Microwaves/The US Program," *International*

---

*Workshop on High Power Microwave Generation and Pulse Shortning*, 1997.

- [16] <http://library.plk.af.mil/edinburgh/pdfs/>, Sylvain Gauthier, National Defence Headquarters, "High-Power Microwave Development in Russia".
- [17] L. F. Libelo, "Canonical Examples of Reflector Antennas for High-Power Microwave Appl

ications". *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*.

- [18] 2000 International Conference on High Power & Ultrawideband Short-Pulse Electromagnetics -(EUROEM 2000) May, 30, 2000-Jun. 02, 2000, Edinburgh, UK.

≡ 필자소개 '≡

윤 영 중

1981년 2월: 연세대학교 전자공학과(공학사)

1986년 9월: 연세대학교 전자공학과(공학석사)

1991년 12월: Georgia Institute of Technology, Ph. D.

1992년 3월~1993년 2월: 한국전자통신연구원 위성통신기술 연구단 선임연구원

현재: 연세대학교 전기전자공학과 부교수

[주 관심분야] 안테나, 전파전파, RF소자설계



한 만 군

1996년 2월: 공군사관학교 항공공학과(공학사)

2000년 2월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석사과정

[주 관심분야] GPR, 레이더 시스템



이 병 무

1998년 2월: 순천향대학교 정보통신공학과(공학사)

2000년 2월: 연세대학교 전파공학과(공학석사)

2000년 2월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

[주 관심분야] RF 및 마이크로파 능동소자, 능동 안테나



김 형 락

2000년 2월: 순천향대학교 정보통신공학과(공학사)

2000년 2월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석사과정

[주 관심분야] RF능동소자, 능동 안테나

