

고출력 마이크로파의 발전장치 및 전자기 펄스탄 개발동향

최 은 하

(광운대 전자물리학과 교수)

1. 서 론

고출력 마이크로파(High Power Microwave : HPM)는 진동수 영역이 대략 1 GHz에서 100 GHz에 이르는 한결성(coherent)의 전자기파를 지칭하는 용어이며, 이때 발생출력은 수백 MW에서 수십 GW 급에 이르는 특성을 갖는다. 일반적으로 이와같은 고출력의 마이크로파를 발생하기 위해서는 짧은 펄스폭 및 낮은 반복율, 또는 단발성(single-shot)의 전원샘(power source)을 필요로 한다. 일반적으로 이와같은 고출력 마이크로파는 방위목적으로 많은 연구와 개발을 하고 있으며, 여기서 전자기 펄스(Electromagnetic Pulse : EMP) 효과를 이용하는 기술을 발전시켜오고 있다.

전자기펄스(Electromagnetic pulse : EMP) 효과는 고공에서 터지는 핵무기(Nuclear weapons)의 초기시험단계에서 처음으로 관측되었다¹⁾. 전자기파는 라디오 및 TV 신호를 보낼때 사용하는 고주파(Radio frequency: RF)부터 시작해서 마이크로파, 적외선(Infrared : IR), 가시광선, 자외선, x-선 등을 포함한다. 비핵 EMP (Non-nuclear EMP : NNEMP) 펄스 무기는 주로 GW 급의 고출력 마이크로파(High power microwave : HPM)를 발생시키며, 이때 단 펄스(single pulse) 또는 몇 개의 펄스가 있는 짧은 펄스열(short train of pulses)을 사용하며, 이들은 반도체 및 집적회로의 소자를 파괴하거나 기능을 정지시킬 수 있는 능력을 가진다. 100 MW 급 이상의 고출력 전자기 펄스에 노출된 케이블 선을 따라 전자기기 내부에는 수십~수천볼트 상당의 유도기전력이 생기게 된다. 이와 같은 전자기펄스(Electromagnetic pulse : EMP)의 유도기전력을 이용하는 EMP 무기는 전자컴퓨터, 통신, 그리고 각종 정보화 시대의 기기에 들어있는 트랜지스터, 집적회로 또는 다이오드를 파괴시키거나, 또한 이들 전자기기의

순간작동을 멈추고자 하기 위해서 사용된다. 100 MW 이상의 고출력 마이크로파(HPM)를 이용한 EMP 무기는 현재 연합직접공격무기(Joint Direct Attack Munition : JDAM) 기술과 병행하여 개발되고 있는 현실이다. 특히 미국은 이미 걸프전에서 전자기 펄스탄(EMP bomb)을 사용하였다는 보고가 있으며, 최근 이라크전 에서 매우 효과적으로 EMP탄을 사용하였다고 알려지고 있다. 여기서는 고출력 마이크로파 및 전자기 펄스탄(EMP bomb)의 발생기술과 개발에 관한 소개를 간단히 한다. 특히 최근 EMP 발생과 관련된 ~GW급 마이크로파의 발생기술인 가상음극발전기(Vircator)의 발생기술 및 국내에서의 최근 개발동향에 관한 내용을 소개하며, 아울러 다른 발생기술도 함께 논의해 보도록 한다.

2. 고출력 마이크로파 및 EMP Bomb 발생기술 및 개발

일반적으로 고출력 마이크로파(HPM) 및 이를 이용하는 EMP bomb 발생기술은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 우선 Marx 발전기²⁾ 또는 자기유출량 압축 발전기(Magnetic flux compression Generator: MCG 또는 FCG)³⁾를 사용하여 고전압(~500 kV), 저전류(~수십 kA)의 전자빔을 발생시키는 기술이 핵심이며, 다른 하나는 HPM 발생장치인 가상음극발전기(Virtual cathode oscillator : Vircator)의 최적 설계기술이다. 이 두 분야에 관한 연구는 현재 활발히 진행 중이다^{4,6)}.

2.1 Marx 발전기 및 자기유출량 압축발전기 (Flux Compression Generator : FCG)

고용량/소규격의 캐패시터(capacitor) 및 고속충전회로에

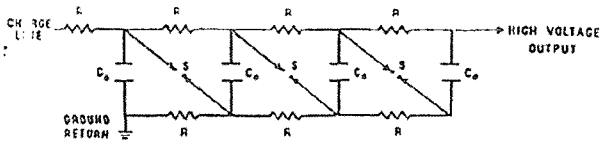


그림 1 4개의 단위 스테이지로 연결된 Marx Generator의 개략도

관한 급격한 기술개발에 힘입어 고출력 마이크로파의 발생을 위한 중소규모의 Marx 발전기에 관한 기술개발을 활발히 하고 있다. Marx Generator는 여러 단(stage)으로 연결된 캐패시터를 병렬로 충전한 상태에서, 스위치를 이용하여 직렬로 순간 방전시켜 고전압을 얻을 수 있는 장치이다. Marx Generator의 기본동작을 설명하기 위해 우선 4개의 단위 스테이지로 연결된 그림 1과 같은 회로를 살펴보기로 하자.

각 단 캐패시터는 전력공급기에 의해 V_0 의 전압으로 충전되어 있다. 사용된 스파크갭 스위치는 일반적으로 SF6 및 질소 기체로 충전되어 있다. 이론적으로 첫단의 스파크갭을 외부에서 트리거 시킴으로써, 그 이후의 스위치는 직렬로 선(election) 상태로 모두 닫힌 상태가 된다. 이로써 병렬 연결된 캐패시터 4개가 직렬로 연결되고, 출력단에서 $4V_0$ 의 전압을 얻을 수 있다. 캐패시터가 여러개 연결 되는 경우, 외부에서 최소 2개 이상의 스파크갭을 트리거 시킴으로써 Marx Generator를 동작시킬 수 있으며, 출력전압이 백만(Vega)볼트를 초과할 경우 표면방전과 관련된 플래쉬오버(flashover)를 방지하기 위해 절연유를 사용한다. 긴 펄스를 이용한 응용분야에서는 Marx Generator를 직접 진공 이극관 Vacuum Diode)에 연결한다. 그러나 펄스의 상승시간(Rise time)이 Marx 발전기의 인덕턴스와 캐패시턴스, 그리고 통상적으로 수십 옴(Ohm)에 이르는 발생장치의 임피던스에 의해 제한을 받기 때문에, 상승시간이 100 ns 이하의 빠른 짧은 펄스를 이용하려면 펄스 형성선(Pulse forming line, PFL)을 사용하여야 한다.

고출력 마이크로파의 EMP bomb을 운반하는 플랫폼(Platform)은 항공기 및 전차로 할 수 있으며, 이를 위하여 고에너지 밀도의 특성을 지니고 또한 상대적으로 무게 및 크기가 작은 자기유출량 압축발전기(FCG)의 개발기술을 또한 활발히 진행하고 있다. 그림 2에 나선형 FCG의 구조(왼쪽) 및 FCG의 폭발상황이 시간별로 나타나 있다^(7,8). 나선형 FCG는 무기로 사용하는데 최적의 모양을 가지고 있으며, 원통형 모양의 구리 기둥(armature) 안에는 C-4 와 같은 고폭발성 화약이 들어가 있고, armature의 바깥쪽에 위치한 테두리에는 자기장을 형성하는 코일이 원통형으로 감겨져 있다. 초기 코일 전류로부터 전류를 발생시켜 armature 원통과 코일이 감겨져 있는 도체벽 사이에 자기장을 형성시킨다. 그리고 armature 화약을 점화시켜 화약을 폭발시키면, armature

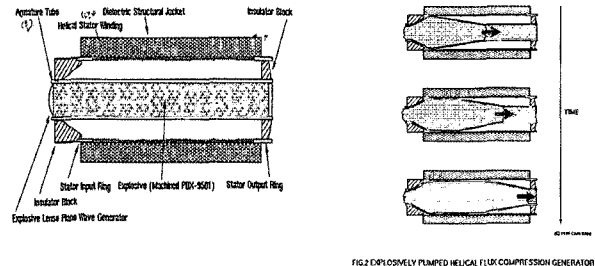


그림 2 나선형 FCG의 구조 및 시간별 폭발상황

표 1 Power conditioning의 개념표

High Current (MA)	→	Low Current (~100 kA)
Low Voltage (10's kV)		High Voltage (~600 kV)
Long Pulse (10's us)		Short Pulse (~1 us)

벽이 파괴되어 코일이 감겨져 있는 도체벽에 전기적으로 접촉하게 되며, 이 접촉점은 시간이 지남에 따라 그림에서 보듯이 오른쪽으로 이동하게 된다. 이때 armature 원통과 코일이 감겨져 있는 도체벽 사이에 존재하는 자기장은 접촉점이 이동함에 따라 압축되며, 코일이 감긴 초기의 도체벽 인덕턴스(L_0)와 코일이 파괴된 잔여 인덕턴스(L)의 비, 즉 L_0/L 에 따라 FCG의 발생전류는 수십 배 증가하게 된다.

FCG의 전기출력은 수십 kV 및 수MA의 특성을 갖는 관계로, EMP bomb에 응용하기 위해서는 이의 출력을 조건화(Power conditioning)시켜주어야만 한다. Power conditioning 과정은 표 1에서 보듯이 FCG 출력을 EMP bomb의 임피던스에 맞추어주며, 이때 수백 kV, 수십 kA의 고출력 펄스 전자빔을 출력시켜 EMP bomb에 사용되는 HPM을 생성하게 된다.

출력 조건화(Power conditioning)는 고전압 변압기 및 스파크 갭과 같은 고출력 스위치를 배합하여 사용하거나 또는 퓨즈와 유사한 폭발 전선(exploding wire)과 같은 개방 스위치 및 스파크 갭을 배합하여 저전압, 고전류의 FCG 1차 전기특성을 고전압, 저전류의 2차 고임피던스 특성으로 바꾸게 된다. 이와 같은 출력 조건화를 거친 FCG의 2차 전기특성은 현재 사용되고 있는 HPM 발생장치의 임피던스와 멧칭이 잘 이루어지게 된다. 현재 진동수 영역이 1 GHz-10 GHz인 HPM을 발생시키는 가상음극발전기(Vircator)를 EMP-Bomb의 주요 부하로 사용하고 있으며, 한편 자기절연선 발전기⁽⁹⁾(Magnetic insulated line oscillator :MILO)도 현재 일부 개발되고 있다.

2.2 고출력 마이크로파 샘 (HPM sources) - 가상음극발전기(Vircator)

HPM 샘(source)들은 마이크로초(micro second) 또는 그

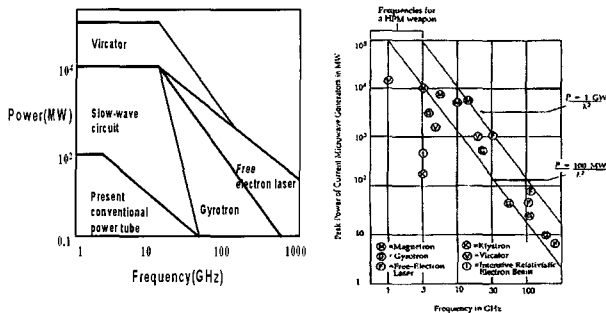


그림 3 Vircator 와 다른 발전관의 비교

보다 낮은 단위의 짧은 시간동안 에너지를 폭발적으로 방출시켜 고출력 마이크로파(HPM)를 만들어내는 순간적인 발생기로서 주로 고전압 펄스에 의해 구동된다. 펄스의 전기적 파워를 마이크로파로 전환하는 효율이 10% 정도라 할지라도, 100 GW의 고출력 마이크로파 파워는 실현가능하다. 물론 단 펄스로 높은 레벨의 파워를 실현하는 부분에 대해서는 많은 기술적 문제를 안고 있으나 현재의 기술력으로는 출력 10 GW 미만, 진동수 1~10 GHz 정도의 출력 마이크로파를 얻을 수 있다. 무기로 쓸 수 있는 마이크로파 샘의 경우, 수백 MW-1 GW 이상의 출력 파워를 낼 수 있는 장비를 필요로 한다. 이를 위한 여러가지 마이크로파 샘은 출력파워 면에서 이러한 척도를 만족시킨다. 그림 3은 여러가지 마이크로파 샘의 출력을 비교한 도표이다. 출력파워 외에도 효율(eficiency), 진동수 폭(bandwidth), 진동수(frequency), 부피(size), 조율성(tunability) 등의 요소들도 고려되어야 한다. 표에서 보듯이 가상음극발전기인 Vircator^{4,6)}는 위에서 열거한 여러가지 요소들을 만족시키는 마이크로파 샘 중의 하나로서 각광 받고 있다. 한편 상대론적 클라이스트론(Relativistic Klystron)¹⁰⁾, 마그네트론(Magnetron)¹¹⁾, 저속파동장치(Slow wave devices)¹¹⁾, 반사3극관(Reflex Triode)¹²⁾ 등과 같은 유용한 여러 가지 종류의 HPM 장치들도 있다.

Vircator는 수백 MW급 이상의 고출력 마이크로파를 비교적 넓은 진동수 영역에 걸쳐 발생시킬 수 있는 장점이 있다. 그림 4에 가상음극발전기(Vircator)의 기본원리를 나타내었다. 전자빔을 진공이극관의 음극에서 발생시키면 전자빔은 양극(그물망)으로 가속운동을 하게 된다. 이때 발생된 전자빔의 전류가 공간 전하 한계전류보다 크게 되면, 양극을 통과한 전자는 진행 도파관에서 더 이상 진행을 하지 못하고, 양극 바로 뒤에서 전자빔이 뭉치게 된다. 이들 전자빔의 뭉치를 가상음극(Virtual cathode) 이라고 한다. 이들 가상음극에 의해서 뒤따라오는 전자들은 다시 양극 쪽으로 반사하고, 또한 가상음극 자체가 진동을 하게 된다. 이들 두 가지 요인의 진동에 의해서 수백 MW급이상의 고출력 마이크로파의 발전이 생기며, 이를 이용한 HPM 발전장치를 가상음극 발전기

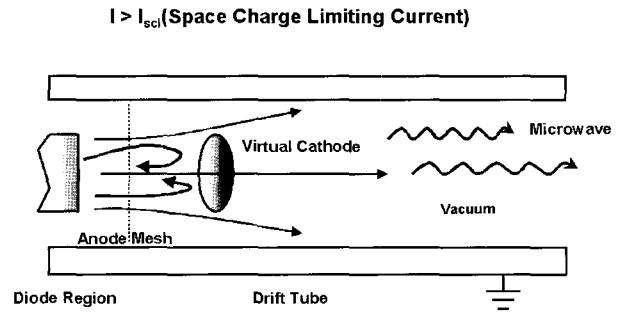


그림 4 Vircator 발전

(Virtual cathode oscillator :Vircator)라고 한다.

Vircator 로부터 방출되는 HPM 진동수는 진공이극관 안의 전류밀도와 양극과 음극사이의 거리에 관계한다. 따라서 Vircator의 출력 및 변환효율을 올리기 위해서는 최적의 양극과 음극사이의 거리 및 진동수를 선택하여야 하며, 이를 위해서 최근에는 공명기(Cavity) 구조를 고려하는 시도가 있다. 축방향 Vircator로부터 발생된 HPM의 모드는 일반적으로 TM 과 TE의 조합으로 이루어져 있으나, 주로 TM01 모드가 주종을 이루고 있으며, 한편 원통형 동축 Vircator는 주로 TE 모드가 주종을 이루고 있다.

Vircator의 물리는 다른 장치에 비해서 복잡다단하나, 발생 장치는 매우 간단한 특성을 갖는다. 또한 구조적으로 견고한 특징을 갖고 있기 때문에 특히 EMP bomb의 응용분야에서 다른 종류의 HPM 발생장치에 비해 현 시점에서 중요한 위치를 차지하고 있다. 그리고 Vircator 는 다른 장치에 비해서 진동수 1-10 GHz 의 영역에서 수백MW - 수십GW급 이상의 고출력 발전 특성을 가지기 때문에 EMP bomb의 응용에 매우 적합하다. Vircator에 의한 최고 출력은 보통 수 GW에 이르며, 이때 발전된 마이크로파의 일부를 되먹임 시키는 반사관을 사용하여 적절한 공명 조건을 맞추어 수십 GW 까지 이를 수 있다¹³⁾. 이때 마이크로파의 최고변환효율은 이론적으로 50%이며, 실험적으로는 최근 10% 정도가 보고되고 있다. 최근 Vircator의 변환효율을 올리려는 기초연구 및 이의 개발연구는 미국 Texas Tech University¹³⁾, 일본 Nagaoka University of Technology¹⁴⁾, 그리고 한국의 광운대학교¹⁵⁾를 중심으로 활발히 진행되고 있다.

2.3 다른 고출력 마이크로파 샘(HPM sources)

자이로트론(Gyrotron)¹⁵⁾은 밀리미터 범위에서 동작되며 협대역 및 매우 높은 출력상태에서 연속발진을 할 수 있는 특성을 지닌다. 이와 같은 특성 때문에 핵융합 플라즈마를 발생시키는 데 제 1후보로 지정되기도 하였다. 자이로트론은 또한 펄스 모드로도 발전가능하다. 자이로트론의 발전 진동수는 전자빔의 자기장 회전 진동수 및 이의 조화로 주어지며, 주

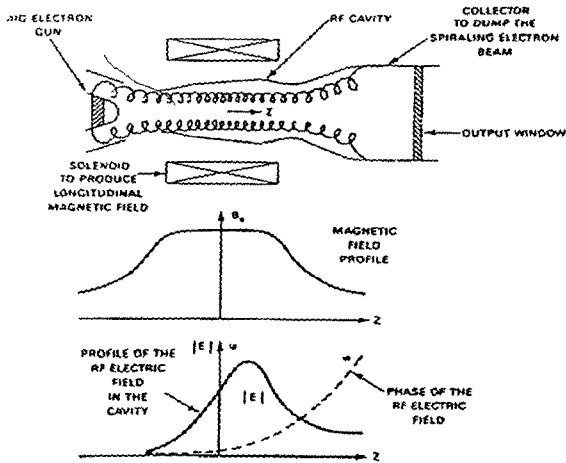
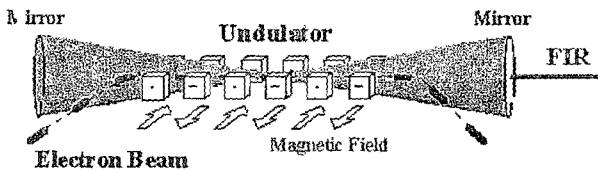


그림 5 Gyrotron 발전관



$$\lambda_s = \frac{1+a_w^2}{2\gamma^2} \lambda_w, \quad a_w = \frac{eB_w}{mc^2k_w} \approx 0.934B_w[\text{Tesla}]\lambda_w[\text{cm}]$$

그림 6 자유전자레이저 (Free Electron Laser) 발전관

진동수는 전자빔의 회전 진동수와 같다. 현재 펄스모드로 동작 하였을 때 최대출력 7 GW보다 큰 출력이 보고 되었으나, 자기장을 채택해야 하기 때문에 소규모의 EMP bomb을 제작하는데 많은 연구를 더 필요한 현실이다. 그림 5에 자이로트론 발전관을 나타내었다.

자유전자레이저⁽¹⁶⁾ (Free electron laser)는 마이크로파 에너지를 밀리미터 파 영역에서 발생 시킬 수 있다. 자유전자레이저의 발전진동수는 전자빔의 에너지 및 언듈레이터(undulator)라고 불리는 자석의 공간주기에 관계되며, 최대출력을 1 GW 이상 낼 수 있다. 자이로트론과 함께 자유전자레이저는 고 에너지 전자빔에 의해서 구동된다. 이와 같은 전자빔을 발생시키는 가속기는 일반적으로 너무 대형이어서 이동성이 떨어지는 단점이 있다. 현재 이의 결점을 보완하는 연구개발이 진행되고 있다.

마그네트론⁽¹⁷⁾은 1970년대 후반, 100 MW 급이 상용화 되었으며, L-Band 에서 동작하며, 1.8 GW의 피크 파워를 갖는 상대론적 마그네트론은 오늘날에서야 상용화되었다. 그림 7에 마그네트론의 개략적인 그림을 나타내었다. 마그네트론은 동축형태의 음극(Coaxial cathode)이 공진기 구조의 양극(multicavity anode)으로 둘러싸여 있는 구조로 되어있다.

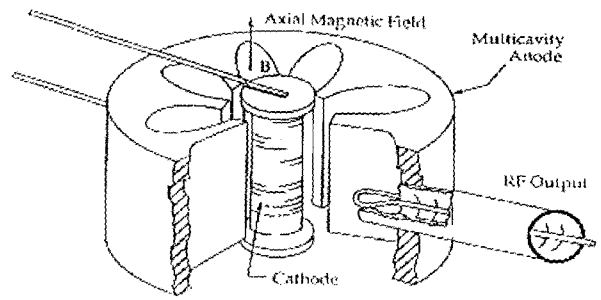


그림 7 마그네트론 (Multicavity magnetron oscillator) 의 개략도

외부로부터 인가된 전압에 의해 음극과 양극 사이에 발생된 전기장과, 외부로부터 인가된 축방향의 직류(DC) 자기장이 수직이 되는 '음극 근방(near the cathode)' 으로부터 전자가 방출된다. 음극에서 반지를 방향으로 튀어나온 전자는 양극쪽으로 흡인됨과 동시에 자기장에 의해서 진행방향으로 직각의 힘을 받아 나선 운동을 하게 된다. 여기서 자기장의 세기를 크게 하면 전자가 휘어지는 힘도 커지며, 양극에 도달하기 전에 몇 번이라도 돌게 된다. 그리고 자기장의 세기가 어느 한계(임계자속밀도)에 도달하게 되면 전자는 거의 양극에 도달하지 못하게 된다. 이때 음극 주위에는 자기력에 의해 구심력이 발생하며, 이로 인해 전자는 회전운동에 의해 원형의 궤도를 이루며 가속하게 된다. 또한 양극의 진동회로에는 유도전류(誘導電流)가 생겨서 진동이 자극되어 지속된다. 상대론적 마그네트론은 고출력을 발생시키기 위해서 메가볼트 급의 고전압과 수십 킬로 가우스 급의 직류자기장을 필요로 하며, 대전 입자가 빛 속도의 삼분의 일 정도로 가속할 때 30% 까지 효율을 낸다는 보고가 있으나 통상 그 효율을 10% 정도로 보는 것이 일반적이다.

3. EMP Bomb 및 반도체 전자장비의 EMP 파괴에너지

1-10 GHz 영역의 낮은 진동수의 고출력 마이크로파 (HPM)를 발생시키는 EMP 탄은 Marx 발전기, 또는 FCG 와 출력조건화 장치가 결합된 형태로 소형으로 구성되어 있으며, 이때 주위 환경과의 좋은 결합을 위하여 필요에 따라 안테나를 사용하기도 한다. 그림 8에 EMP 탄의 간단한 구조를 나타내었다⁽¹⁷⁾. 고출력 마이크로파를 발생시키는 EMP 탄은 넓은 영역의 연결모드를 가지고 있으며, 탄의 크기에 비해서 파장은 작기 때문에 비교적 간단한 구조의 안테나를 사용하여 목표물에 용이하게 집속시킬 수 있다. FCG를 이용한 EMP는 단발성이라는 현실적인 문제를 가지고 있으나, 전차나 항공기 탑재용으로 한창 개발하고 있다. EMP의 HPM 출력이 GW 급 이상이면 공기와의 breakdown을 피하기 위한

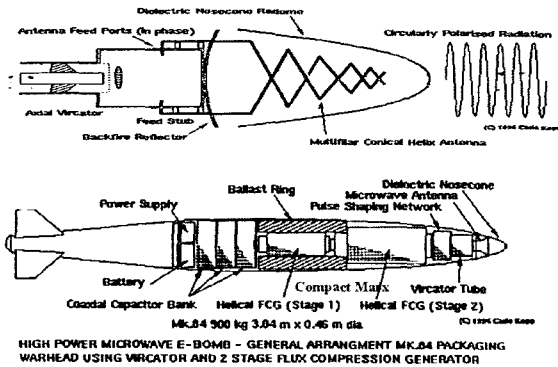


그림 8 EMP Bomb

표 2 반도체 소자의 EMP 파괴 에너지

Electronic Device Burnout Thresholds

Component Class	Energy (J)
GaAs MESFET	$10^{-7} - 10^{-6}$
MMIC	$7 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-6}$
Microwave diodes	$2 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-4}$
VLSI	$2 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-5}$
Bipolar transistors	$10^{-5} - 10^{-4}$
CMOS RAM	$7 \times 10^{-5} - 10^{-4}$
MSI	$10^{-4} - 6 \times 10^{-4}$
SSI	$6 \times 10^{-4} - 10^{-3}$
Operational amplifiers	$2 \times 10^{-3} - 6 \times 10^{-3}$

표 3 반도체 소자의 EMP 파괴 에너지

Upset Levels for Electronic Devices

Type	Power (W)	Energy (J) @ 1 μ s
Operational amplifier	0.0009	$9 \cdot 10^{10}$
TTL device	0.008	$8 \cdot 10^9$
CMOS device	0.001	10^{-9}
Voltage regulators	0.09	$9 \cdot 10^8$
Comparator (output switches)	0.008	$8 \cdot 10^{-9}$
VHSIC (pulsed exposure)	0.1	10^{-7}

안테나의 크기가 커지는 결점이 있으므로, 소형 대응량의 Marx 발전기를 사용한 EMP용 HPM의 출력을 300 MW 급으로 해서, 단펄스가 아닌 5 Hz의 펄스모드를 최소한 3-4번 보낼 수 있는 설계기법을 도입하기도 한다.

EMP에 의한 전자장비 장비의 파괴(burnout) 에너지를 표 2에 나타내었다¹⁸⁾. 장비의 파괴는 일반적으로 접합크기에 비례하며, 소형 소자(GaAs MESFET 및 MMIC)일수록 최소한의 EMP 에너지로도 파괴가능하다. 장비의 파괴하는데 필요한 EMP 출력의 크기는 진동수 1- 10 GHz 및 펄스폭 1 us

의 HPM을 고려 하였을 때, 전형적으로 100 W 근처의 값을 갖는다. MMIC 전자장비의 경우 5-7 uJ의 EMP 에너지에서 파괴됨을 알 수 있으며, 크기가 더욱 작은 GaAs MESFET는 약 0.1 uJ의 EMP 에너지에서 파괴됨을 알 수 있다.

한편 전자장비의 기능정지(upset)를 일으키는 EMP의 출력 및 에너지 크기를 표 3에 나타내었다¹⁸⁾. 차폐되지 않은 컴퓨터 및 마이크로프로세서에 EMP를 조사시키면 클럭 진동수에 상응하는 EMP 진동수 범위에서 더욱 기능정지현상이 유발되며, 구형 컴퓨터의 경우 더 낮은 EMP 진동수에서 기능 정지 및 오동작 현상이 발생된다. 차폐되지 않은 컴퓨터에 진동수 1 GHz, 그리고 $10^7 - 10^8$ mJ/cm² 크기의 EMP 에너지가 침투하게 되면 비트 에러(bit error) 현상이 발생한다. 시스템을 설계할 때 HPM의 EMP에 의한 파괴 및 기능 정지의 위험을 줄일 수 있는 여러 가지 방법을 고안해야 하는 어려움이 있다. 부수적인 시스템 및 케이블은 이를 위하여 차폐시킨다. 케이블을 아무리 차폐해도, 그리고 부수 시스템을 광케이블로 연결시켜도 EMP 의한 케이블의 유도 과전압 및 과전류로부터의 시스템 보호 장비는 반도체 장비의 크기가 소형화 될수록 취약한 결점이 있다.

4. 결 론

고출력 마이크로파(High Power Microwave : HPM)는 진동수 영역이 대략 1 GHz에서 100 GHz에 이르는 한결성(coherent)의 전자기파를 지칭하는 용어이며, 이때 발생출력은 수백 MW에서 수십 GW 급에 이르는 특성을 갖는다. 일반적으로 이와같은 고출력의 마이크로파를 발생하기 위해서는 짧은 펄스폭 및 낮은 반복율, 또는 단발성(single-shot)의 전원샘(power source)을 필요로 한다. 일반적으로 이와같은 고출력 마이크로파는 방위목적으로 많은 연구와 개발을 하고 있으며, 여기서 가상음극발전기(Vircator)를 이용한 전자기 펄스(Electromagnetic Pulse : EMP) 효과를 이용하는 기술을 발전시켜오고 있다. 전자기펄스(Electromagnetic pulse : EMP) 무기는 전자컴퓨터, 통신, 그리고 각종 정보화 시대의 기기를 파괴시키거나 또는 이들 기기의 순간작동을 멈추고자 하기 위해서 사용된다. 1-10 GHz 영역의 수백 MW-수십 GW급의 고출력 마이크로파를 발생시키는 EMP 탄은 Marx 발전기, 또는 FCG 와 출력조건화 장치가 결합된 형태로 소형으로 구성되어 있으며, HPM 발생장치로써 Vircator를 사용하고 있다. 이때 주위환경과의 좋은 결합을 위하여 필요에 따라 안테나를 사용하기도 한다. EMP bomb은 사람에 치명적이지 않고 단지 전자장비 및 계측기에 영향을 주는 무기개념이므로, 기존의 무기체계에 비해서 군사적으로 더 많은 영역에 활용하기 위하여 더 많은 연구개발을 하고 있다. ■

참고 문헌

- [1] S. Glastone, Editor, The Effects of Nuclear Weapons, US AEC, April, 1962, (Revised Edition February, 1964).
- [2] 이문중, 신희명, 유광호, "Intense Relativistic Electron Beam 발생 및 그의 연구", 새물리, vol. 18, p. 175 (1978).
- [3] L. L. Altgilbers, I. Grishnaev, I. R. Smith, Y. Tkach, M. D. J. Brown, B. M. Novac, I. Tkach, Eds. "Magnetocumulative Generators", Springer, 1999, ch. 1, p. 8.
- [4] D. J. Sullivan, "High power microwave generator using relativistic electron beams in waveguide drift tube", US Patent 4345220, H 03B 9/01, August 17, 1982.
- [5] E. H. Choi, M. C. Choi, Y. Jung, M.W.Chong, J. J. Ko, Y. Seo, G. Cho, H. S. Uhm, H. Suk, "High power microwave generation from an axially extracted virtual cathode oscillator", IEEE Transactions on Plasma Science, PS-28, p. 2128 (2000).
- [6] L. E. Thode, "Virtual cathode microwave device research : Experiment and simulation", in High Power Microwave Sources, V. L. Granastein and I. Alexeff, Eds. Boston: Artexh House, 1987, ch. 14, p. 507.
- [7] R. E. Reinovsky, P. S. Levi, J. M. Welby, "An economical, 2 stage flux compression generator system", Digest of Technical Papers, 5th IEEE Pulsed Power Conference, pp. 216, IEEE, New York, 1985.
- [8] Clayborne D. Taylor, D.V. Giri, "High power microwave system and effects", Chapter 1, p 4~6.
- [9] M. D. Haworth, G. Baca, J. Benford, T. Englert, K. Hackett, K. J. Hendricks, D. Henley, M. LaCour, R. W. Lemke, D. Price, D. Ralph, M. Sena, D. Schiffler, and T. A. Spencer, "Significant Pulse Lengthening in a Multi-gigawatt Magnetically Insulated Transmission Line Oscillator", IEEE Trans. Plasma Sci. PS-26, pp. 312 (1998).
- [10] M. J. Friedman, and V. Serlin, "High Power Relativistic Klystron Amplifier Reserach at the Naval Research aboratory", in H. E. Brandt (Ed.), Intense Microwave Pulses I, Proceedings SPIE 1872 (1993) : 2.
- [11] J. Benford, "Relativistic Magnetrons", in "High Power Microwave Sources edited by V. L. Granastein and I. Alexeff, Norwood, MA : Artech House (1987).
- [12] A. Didenko, A. Zherlitsyn, and G. Melnikov, "Research on Microwave Generation Efficiency for Triode with Virtual Cathode (Virtual Tride)", Proceedings 12th International Conference on High Power Particle Beams, Haifa, Israel, pp. 65 (1998).
- [13] W. Jiang, J. Dickens, M. Kristiansen, "Efficiency enhancement of coaxial virtual cathode oscillator", IEEE Trans. Plasma Sci. PS-27, pp. 1543-1544 (1999).
- [14] W. Jiang, H. Kitano, L. Huang, K. Masugata, and K. Yatsui, "Effect of longitudinal magnetic field on microwave efficiency of virtual cathode oscillator", IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 24, pp. 187, 1996.
- [15] W. M. Black, S. H. Gold, A. W. Fliflet, D. A. Kirkpatrick, W. M. Manheimer, R. C. Lee, V. L. Granastein, D. L. Hardesty, A. K. Kinkead, and M. Sucey, "Megavolt, Multikiloamp Ka-band Gyrotron Oscillator Experiment", Phys. Fluids B 2, pp. 193 (1990).
- [16] M. Friedman, and M. Herndon, "Microwave Emission Produced by the Interaction of an Intense Relativistic Electron Beam with a Spatially Modulated Magnetic Field", Phys. Rev. Lett. 28, pp. 210 (1972).
- [17] C. Kopp, "The E-bomb - a weapon of Electrical Mass Destruction", <http://www.cs.monash.edu.au/~carlo/>

〈 저 자 소 개 〉



최은하(崔銀河)

1960년 12월 20일생. 1982년 서울대 물리학과 졸업. 1984년 KAIST 물리학과 졸업(석사). 1987년 동 졸업(이박). 1989년~1990년 미국 NASA/Hampton Univ. 위촉연구원(조교수). 1990년~1992년 한국표준연구원 선임연구원. 1992년~현재 광운대 전자물리학과 교수.