

요 약

전파 방해장치(jammer)의 핵심 부품이라 할 수 있는 광대역 고출력 증폭기는 초소형화, 초고주파화 및 초고출력화하는 다양성을 각각 다른 형태의 증폭장치에서 실현하고 있다. 이 논문에서는 먼저 진공 고출력 증폭기를 반도체 증폭기와 비교하며 각각의 영향권에 대해 비교하였다. 본문에서는 첫째로 초소형화되어가는 광대역 TWT와 MMIC와 같은 반도체소자와 연합하여 효율이 높은 초소형 고출력(>100W CW) 증폭기의 혁신을 일으키는 MPM(Microwave Power Module)을 소개하였고 둘째로는 고출력(>kW)으로 초고주파화(밀리미터파) 되어가는 Gyro-TWT를 소개하였다. 셋째로 원리적으로는 현재 무기체계의 전면적인 수정을 불가피하게 할지 모르는 초고출력화(>GW) 되어가는 HPM(High Power Microwaves)이 소개되었다. 마지막으로 한국에서의 고출력 증폭기에 관련된 연구개발 상황과 TWT 국산화에 대한 현황이 소개되었다.

I. 서 론

현대의 무기운용체계에서 전자기술은 점점 더 중요한 역할을 하고 있다. 전자적으로 제어되는 유도 무기체계의 효율성은 살상율(kill probability)로 말할 수 있는데 방어체계를 갖추지 못한 목표물은 살아남을 희망이 없으니 살상율은 거의 100%이다. 결과적으로 현대에는 거의 모든 무기체계에서 전자유도장치를 갖추게 되었다. 그러므로 이렇게 발전된

무기체계를 방어하기 위해 전자유도장치의 효율을 떨어뜨리기 위한 전자대응체계(counter electronic systems)를 개발하게 되었다. 이러한 countermeasure 기술은 지난 걸프전에서 보여준 것과 같이 적군의 거의 모든 전자유도무기체계를 무력화시켰다. 이리하여 또다시 전자유도 무기체계의 효율성을 회복하기 위해 counter countermeasure 기술개발이 필요하게 되었다. 그러므로 높은 수준의 전자대응체계에 대한 기술개발은 국가 방위체계의 핵심이라고 할 수 있겠다.

방어되어야 될 주요무기체계는 search system, missile system 그리고 artillery system이다. 이러한 무기체계가 운용되기 위해 각각의 무기체계에서 전자센서가 사용된다. 그러나 걸프전에서 보여준 것과 같이 이러한 센서를 jamming함으로써 무기체계는 무력화되었다. 여기서 jamming을 위해 TWT와 같은 고출력 증폭기가 사용되고 있다. 대공방위체계의 위력은 장거리 search 레이더의 성능에 달려 있는데 jamming을 위한 전자장치는 레이더 센서와 신호처리부분을 방해하도록 설계된다. 미사일 체계는 중거리 search 레이더, 많은 tracking 레이더와 미사일 발사대로 구성된다. Search 레이더는 목표물을 확인하고 tracking 레이더에 알리면 tracking 레이더는 지정된 목표물을 탐지하여 데이터를 컴퓨터에 보내고 무기를 겨냥할 interceptor point를 계산하여 무기체계를 향해 조준한다. Jamming 체계의 대상은 search 레이더, tracking 레이더, radio-frequency seeker, electro-optic search systems, infrared seeker 등이다.

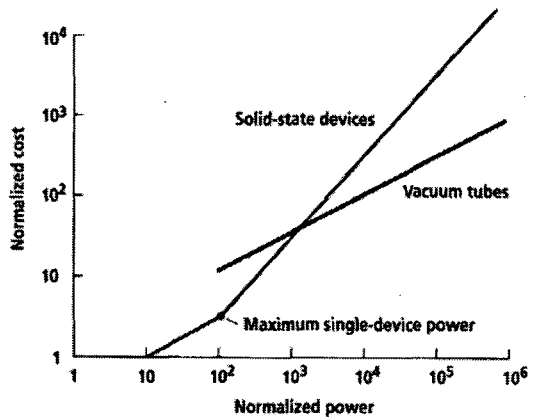
오늘날 레이더, ECM 및 각종 통신을 위한 고출

력 증폭기로 반도체 소자, gridded 튜브(triodes, tetrodes 등), linear beam 튜브(TWT, klystron) 및 crossed field 튜브(magnetron, CFA) 등이 사용되고 있다. 반도체 소자는 낮은 주파수(C 밴드까지)와 낮은 출력(10~40W)의 응용에 주로 사용된다. RF 트랜지스터는 phased array 안테나나 ground-based 레이더(VHF-S 밴드) 등에 사용되기 위해 낮은 출력으로 인해 많은 RF 트랜지스터를 묶어 고출력을 만든다. Triodes와 tetrodes는 약 400~850 MHz까지의 고출력 방송용 증폭기로 쓰인다. 주파수가 약 3 GHz보다 높은 경우와 특히 고출력을 요하는 경우에 klystron, TWT, magnetron, CFA 등이 주로 쓰이는데 이러한 고출력 증폭기들은 많은 레이더 시스템에 쓰이고 있다. 이중 TWT만은 ECM 시스템에도 사용되고 있다.

II. 진공 고출력 증폭기와 반도체 증폭기

반도체로 D, E, F 밴드에서 고출력 증폭기들이 개발되기 시작하면서 중간 정도의 고출력 증폭기로 손색이 없을 정도로 잘 개발되었다. 또한 이러한 반도체 증폭기들을 다수 합하여 고출력을 얻을 수 있었다. 결국 낮은 출력과 낮은 주파수에서는 진공 고출력 증폭기가 더 이상의 장점을 잃어버렸다. 낮은 전압과 높은 전류를 이용할 수 있는 장점으로 인해서 비교적 낮은 효율에도 불구하고 낮은 출력에서는 반도체 소자들이 널리 이용되었다.

그러나 [그림 1]에서 낮은 출력에서 비용적 측면에서 훨씬 우월하던 반도체 소자들이 고출력을 얻는 방법으로 다수의 소자들을 연결하여 사용한 결과 비용이 급격히 증가하게 됨을 볼 수 있다. 킬로와트 이상의 출력부터는 진공 고출력 증폭기가 비용을 매우 절감할 수 있는 특징을 보여 주었다. 또한 고출력에서의 열문제는 고주파 반도체 소자의 고출력 응용을 제한하고 있다.

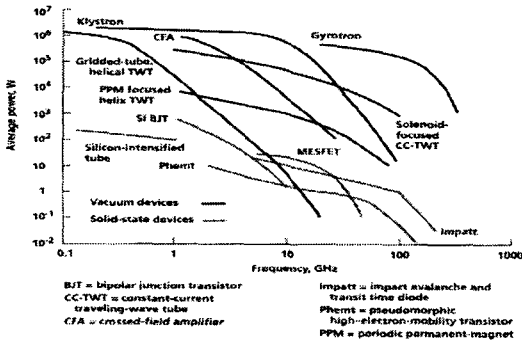


[그림 1] 출력과 경제적 측면의 비교
(반도체소자와 진공 고출력 증폭기)

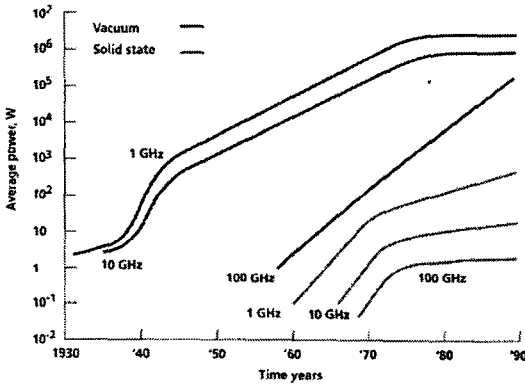
현대의 무기체계는 점점 더 고출력을 요구하고 있으며 이러한 요구를 만족할 수 있는 장치로 여전히 진공 고출력 증폭기가 요구되고 있다. 낮은 출력에서는 반도체가 유용하지만, 고출력에서는 진공 고출력 증폭기가 필수적이다.

지난 수십 년 동안, 고출력 증폭기로 magnetron, klystron, CFA, TWT 등이 개발되었다.

[그림 2]는 반도체소자와 진공 고출력 증폭기들을 주파수에 따른 출력으로 비교한 것인데 대략 10 GHz에서 10W 부근이 반도체소자의 한계이다. 이 이상의 주파수와 출력에서는 TWT 등의 진공 증폭기가 사용되고 있다. 특히 최근들어 밀리미터파대역에서 고출력을 요구하는 응용분야가 증가하면서 gyrotron과 같은 진공 증폭기가 개발되었다. 이 장치는 수백 GHz 대역에서 KW 또는 MW까지의 출력까지도 가능하다. 이 외에도 고주파(센티미터파영역)에서 MW의 출력이 가능한 klystron이 있으며 CFA 및 각종 TWT 등의 진공 고출력 증폭기들이 고주파와 고출력을 만족시킨다. [그림 3]에서 1940년대부터 활발하게 개발되어온 진공 고출력 증폭기들은 1~100 GHz의 모든 주파수영역에서 현재까지 계속 출력이



[그림 2] 주파수에 따른 출력
(반도체소자와 진공 고출력 증폭기)



[그림 3] 개발연대에 따른 출력의 관계
(반도체소자와 진공 고출력 증폭기)

증가하고 있는 반면 반도체 소자들은 고주파화에 따라 출력을 상당히 낮출 수 밖에 없었다는 것을 알 수 있다.

Ⅲ. 초소형화/ 초고주파화/ 초고출력화 고출력 증폭기 연구개발 동향

3-1 초소형화 추세에 따른 TWT(Traveling Wave Tube)

전자파 증폭기인 TWT는 1944년 영국에서 처음 개발된 이래로 다양한 주파수 대역(1~100 GHz)에

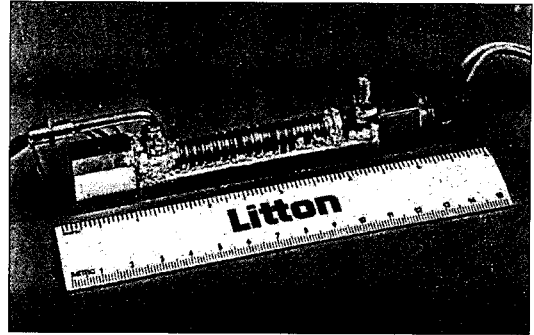
서 고출력(1W~kW)을 방출함으로써 각종 전파 관련 응용 분야에서 널리 쓰이고 있다. 군수용으로는 각종 다양한 전자전 무기체계나 레이더에도 TWT가 쓰이고 있으며 민수용으로는 위성통신 분야에 광범위하게 사용되고 있다. TWT는 좀더 다양한 복합기술을 요하는데 현재에는 미국, 러시아, 프랑스, 영국, 중국, 일본 등의 소수 기술 선진국에서만 TWT를 생산 판매하고 있다. TWT는 상용 위성통신 뿐만 아니라 무기체계에도 응용이 되므로 TWT를 수출하는 나라들은 이 기술의 해외 반출에 매우 민감하다.

TWT는 1944년 영국의 Kompfner에 의해 처음 실험적으로 성공했고 Pierce에 의해 이론적으로 설명되었다. TWT를 개발하기 위한 기술은 크게 네 가지로 분류할 수 있다. 첫째는 전자 발생 장치(전자총) 및 전자빔 전파 기술이고 둘째는 전자빔의 에너지를 전파로 전환할 수 있는 전파발생회로 제작기술이고 셋째는 전자빔을 원하는 대로 유도하며 전파할 수 있게 하는 자석 또는 전자석 기술이며 넷째로는 에너지를 잃은 전자빔을 모아 남아있는 에너지로 다시 회복할 수 있게 하는 전자빔 콜렉터(depressed collector)로 분류할 수 있다. 이외에도 전파를 추출해 내야 하는 커플링(coupling) 구조나 필요에 따라 전파를 줄일 때 사용하는 세라믹 등이 있고 TWT에 전원을 공급하는 전력 공급 장치(power supply)의 기술 또한 필수적이다.

TWT는 각종 무기체계의 고출력 전자파 발전기들 중에 가장 널리 쓰인다. 주된 응용으로는 레이더 TWT, ECM TWT, 미사일 TWT, 위성통신용 TWT 및 각종 다양한 분야에 쓰인다. 이렇게 서로 다른 분야에 필요한 TWT의 사양은 최대출력(펄스 및 CW), 주파수대역(bandwidth), 냉각방법, 사용수명, 효율, 위상과 이득의 주파수에 따른 변이, 크기, 무게, 신뢰도 및 가격 등에 차이를 보인다. 그러나 대부분의 TWT 개발에서는 다음 세 가지에 초점을 맞추어 발전해 가고 있는데 첫째는 물론 성능(효율,

이득과 소음정도 등)이고 둘째로는 크기이며 마지막으로 무게이다. 점점 더 복잡해지는 시스템에 통합이 되어가고 지상뿐 아니라 항공 및 우주에서의 응용분야가 늘어나면서 더욱더 작고 가벼운 전자파 발생장치에 대한 수요가 늘고 있다. 보다 나은 성능을 위해서 그 성능을 미리 예측하면 경비와 시간을 절약할 수 있다. 뿐만 아니라 적정화된 TWT를 제작하기 위해서 컴퓨터를 이용한 전자파 발생장치 모델링 기법이 어느 때보다 활발히 이루어지고 있다. 지난 50여 년간 세계 선진국가들은 TWT의 효율, 이득(gain), 주파수 범위, 소음정도, 선형정도(linearity), 수명 및 크기, 무게를 적정화하여 각종 전자전 관계 등의 현장에서 쓰고 있다. 이러한 성능 개선 외에도 위에서 설명한 바와 같이 작고 가벼운 TWT를 제작하기 위해 여러 나라에서 연구 개발 중에 있다. 아래의 [그림 5]는 6~18 GHz 주파수대의 소형 TWT의 한 예이다.

또한 소형의 TWT를 개발하기 위한 노력으로 새로운 전자 발생 장치의 연구도 활발히 진행되고 있는데 그 중에서도 미세 구조인 FEA(Field Emitter Array)를 이용하여 캐소드를 만들어서 미리 변조된 좋은 질의 전자빔을 만드는 연구가 소수 선진국(미국, 일본)에 의해 진행되고 있다. 전자빔의 질이 향상될 뿐만 아니라 TWT의 길이가 짧아지므로 전자빔을 전파하는 자석이 필요 없어서 크기와 무게가



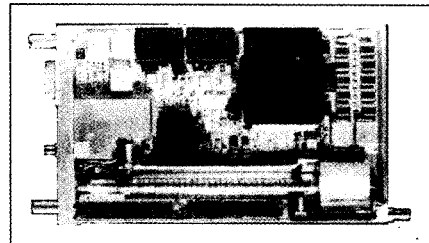
[그림 5] Litton's 100W 소형 TWT

작아지고 성능 역시 향상된다는 것이다. 그러나 아직 신뢰할 만한 FEA가 만들어지지 않는 상황여서 그 개발에 많은 연구비를 투자하며 일본의 NEC와 미국의 Northrop사에서는 이미 기초 실험을 끝내었다. FEA는 이외에도 주로 평판디스플레이(FED)의 전자빔을 방출하는 전자 발생 장치로 쓰이고 있다. 또한 이 소형 TWT는 MPM(Microwave Power Module)이라는 작게 만든 모듈식의 전자파 증폭 장치에 이용되기 위해 개발중이다. 이러한 연구를 통해 성능, 크기, 무게를 적정화하려고 한다. [그림 6]에서는 MPM의 크기가 6"×4"×0.32"이며 6~18 GHz에서 100 W CW를 방출한다.

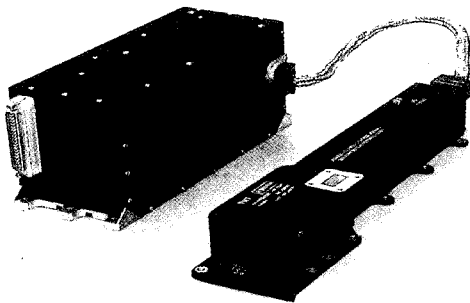
TWT는 앞서 기술한 바와 같이 다양한 분야에서

Microwave Power Module System

6 - 18 GHz
100 W
6"×4"×0.32"



[그림 6] Northrop-Grumann의 MPM; SSPA와 TWT가 같이 쓰였다.



[그림 4] Ku-Band TWT by Hughes(위성통신용)

쓰이고 있다. 레이더 TWT, ECM TWT, 미사일 TWT 및 위성통신용 TWT 등이 주요 분야들이다. 최근에 정보와 통신의 중요성이 강조되며 세계각국에서는 특히 위성통신용 고출력 전자파 증폭기의 개발에 큰 관심을 보이고 있다. 위성통신용 TWT는 특히 긴 수명과 신뢰도가 중요하고 높은 효율 그러나 크지 않은 출력(~200W), 또한 그다지 넓지 않은 주파수대역(1~5%)으로 특징 지을 수 있다. 민수용으로 위성통신의 중요성은 굳이 강조할 필요가 없지만 군수용으로도 위성은 더욱 광범하게 쓰일 전망이다. 이렇듯 다양하게 사용되는 TWT는 국내에서 필시 자체 개발해야 할 핵심부품이다.

1974년 1월 7월부터 2000년 6월 23일까지 미국에 등록된 TWT 관련 특허는 모두 950건이 넘는다. Thomson, CPI, USA, Hughes, NEC, Litton 등의 회사들이 각종 부품에 대해서 이러한 특허 등록을 활발하게 하고 있는 주된 회사들이다(site : <http://www.uspto.gov/>). [그림 8]에서는 연도별 특허갯수를

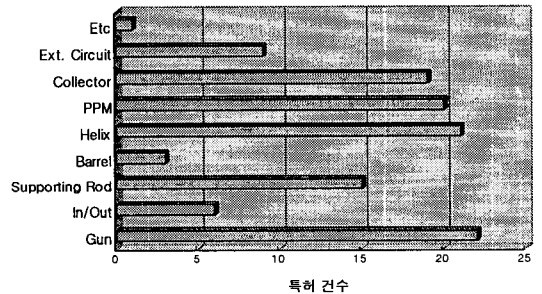
<표 1> Products from EEV Inc.

버전	주파수 (GHz)	출력(W)	상태	이득 (dB)
N10091	8~18	350~500	CW (Bimodal)	40
N10094	6~18	200 (최소 100)	CW (Bimodal)	40
N10085	6~18	200 (최소 100)	CW	40
N10053	6~18	200 (최소 100)	CW	50
N10043	18~40	20	CW	43
N10063	2.7~7.5	200 (최소 120)	CW	45
N10033	8~18	160	CW	30

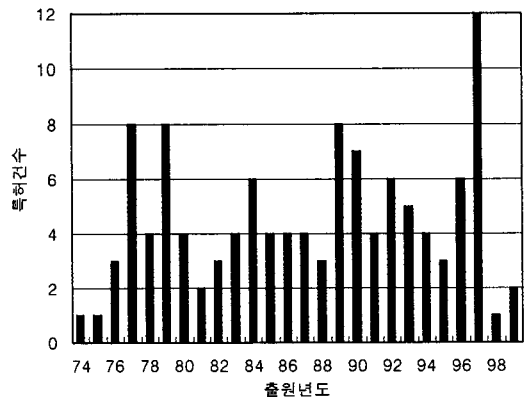
<표 2> CPI Inc.

버전	주파수 (GHz)	출력 (W)	상태	이득 (dB)
VTA-6193C5	18~40	120	CW	50
VTA-6193C5X	18~40	126	CW	50
VTA-6193A4	26.5~40	40	CW	40
VTK-6193D4	18~26.5	40	CW	36
VTA-6193S1	18~40	40	CW	26
VTA-6193C2	18~40	80	CW	

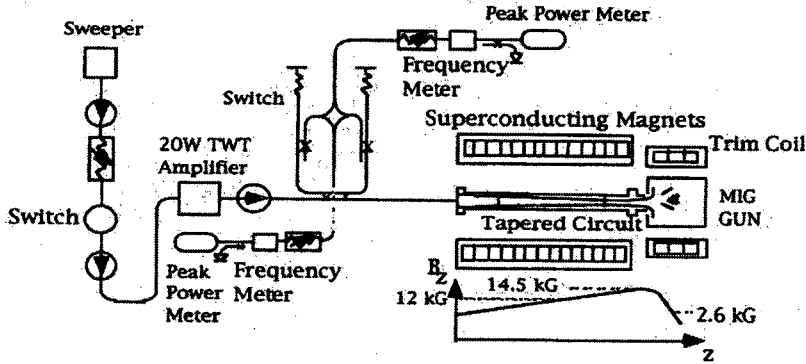
보여 주고 있는데 꾸준히 특허를 등록하고 있는 것을 볼 수 있다.



[그림 7] TWT의 각 부품별 특허



[그림 8] 연도별 특허 등록수

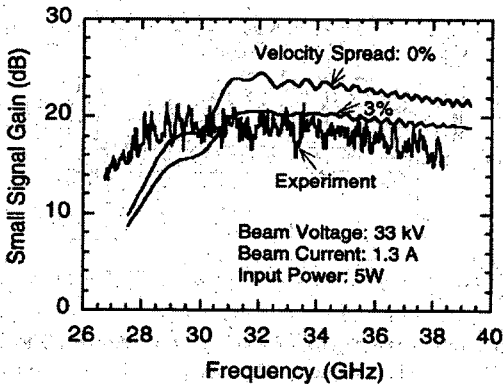


[그림 9] 단순구조의 Gyro-TWT의 실험 도해

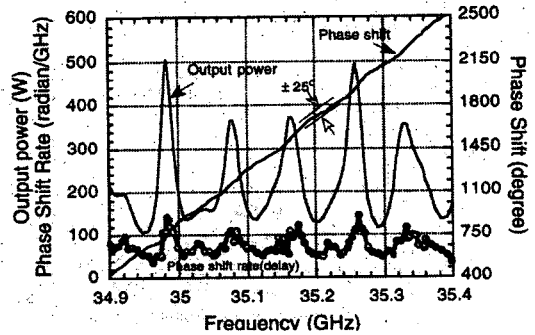
3-2 초고주파화 추세의 Gyro-TWT

또 다른 개발 추세로는 점점 더 높은 주파수에서 높은 출력을 요하는 TWT를 개발하고 있다. 파장이 센티미터에서 밀리미터파로 높아지면 공기중의 흡수등 더 높은 출력을 요하므로 고주파에서 고출력을 방출할 수 있는 고출력 증폭기가 필요하다. 이미 미국에서는 Gyrotron이라는 고출력 전자파 발진기를 이용해 높은 주파수에서 높은 출력을 발생하며 넓은 주파수대 (>20%)를 갖는 전자파 증폭기를 개발했다.

단순구조 Gyro-TWT의 경우에는 이득의 제한과

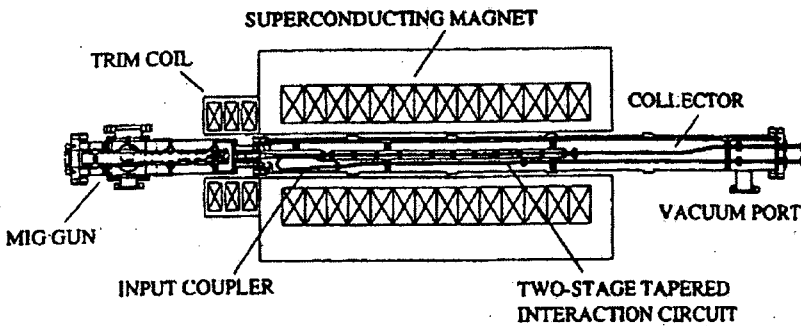


[그림 10] 이득과 주파수대역

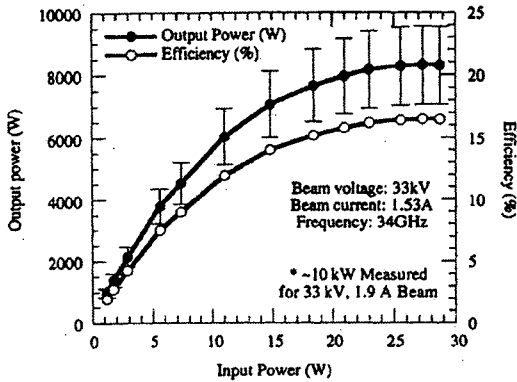


[그림 11] 출력과 위상변이 특성

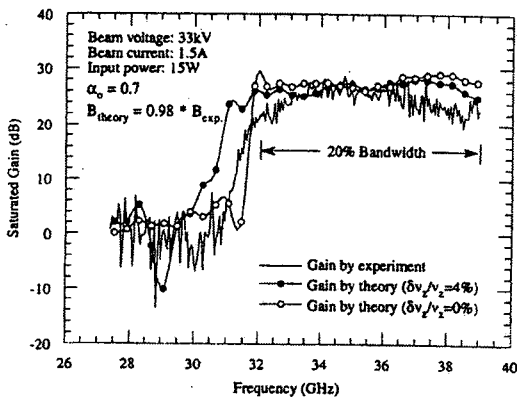
출력과 위상의 변이가 주파수에 따라 심하므로 두 단계 구조의 Gyro-TWT가 미국의 해군연구소에서 곧이어 개발되었다. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 예측값과 실험값이 잘 일치하는 결과를 얻었다. 아래 그림들은 두단계 Gyro-TWT의 실험 도해와 그 결과를 보여준다. 주파수 대역은 줄었지만 예상대로 출력력의 변이가 줄어들었고 이득이 높아졌다. 이러한 고출력의 밀리미터파는 전자전에서 사용될 수 있는 증폭기로 좀더 작은 크기로 개발이 될 전망이다. 아래 그림에서 초전도 코일은 지상배치용이면 가능하지만 아닌 경우에는 자기장의 크기를 줄이며 작동할 수 있는 방법이 가능하다.



[그림 12] 두단계 Gyro-TWT의 실험 개요



[그림 13] 입력과 출력, drive 곡선



[그림 14] 이득과 주파수대역

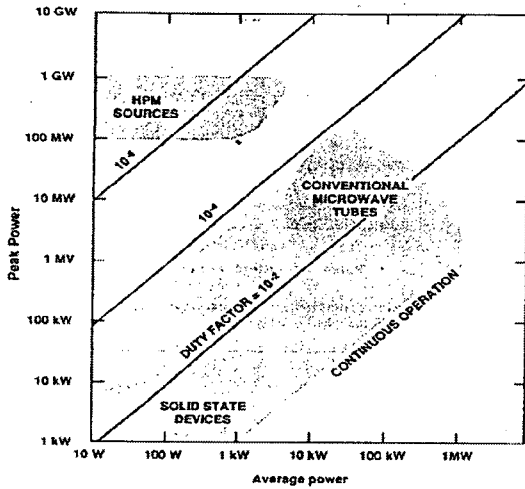
3-3 초고출력화 추세에의 HPM(High Power Micro-waves)

종래의 무기와 같이 어떤 폭발물과 같은 물질로 목표물을 파괴하기보다 에너지를 집중시킴으로써 목표물의 기능을 마비시키는 것을 에너지 무기라고 한다. 이러한 무기는 지난 20여 년간 집중적으로 연구되었다. 에너지 무기는 파괴되고 소모되는 폭탄 대신에 이러한 에너지를 만들어 낼 수 있는 전원 공급장치에 의해 유지되며 거의 빛의 속도로 공격함으로써 점점 빨라지는 미사일 등을 방어할 수도 있다. 에너지 무기에는 HPM 외에도 레이저나 전하를 띤 입자빔이 있는데 안테나를 사용하는 HPM이 공격범위나 공격 정밀성에 민감하지 않은 장점이 있다.

HPM은 두 가지의 기능을 할 수 있는데 첫째로는 목표물을 물리적으로 파괴시키는(hard-kill) 기능이 며 둘째로는 적군의 주요부품을 마비시키는 기능이 며 이 경우는 물리적으로는 파괴시키지 않는다. 대부분의 HPM의 기능은 후자를 선택하고 있다. 소위 전자폭탄이라고도 불리는 HPM의 기능은 대부분의 국가가 반도체에 기초한 군비와 기술에 크게 의존하는 상황에서 군사적, 경제적, 정치적인 시스템을 급격히 무력화할 수 있는 수단을 제공한다. 이러

한 전자무기에 대응할 수 있는 대처방안이 없다면 대부분의 현대 시스템에서 반도체 장비는 가장 취약한 부분이 된다.

그림에서 보는 바와 같이 전자파 발전기의 출력은 꾸준히 높아져서 이러한 엄청난 출력은 SDI 등 전쟁 시나리오에 등장하며 여러 형태의 HPM device들이 개발되었다. 전쟁무기로서 전자무기의 잠재력이 확인된 것은 공중 핵실험에서였다. 대기권 상공에서 폭발한 핵폭탄은 순간적으로 넓은 지역에 강력한 전자기장을 형성시켰다. 전자펄스라고 불리는 이 효과는 핵무기로부터 나오는 방사선에 의한 이온화 효과로부터 발생한다. 핵무기에 의한 전자펄스는 0.5 μsec 을 갖는 짧은 펄스로서 매우 빠른 rise time에 의해 풍부한 고주파를 발생시켜 아주 효과적으로 차폐물이 없는 전선 안으로 파고들어 고전압의 펄스를 전달한다. 충분히 높은 고전압 펄스는 반도체를 파손시키며 그 강도가 더 크게 되면 도체물질에도 열적손상을 주게 된다. 현재는 GW 이상의 출력을 내는 gyrotron, FEL, magnetron, klystron, BWO, TWT, Vircator 등 많은 device들이 개발되고

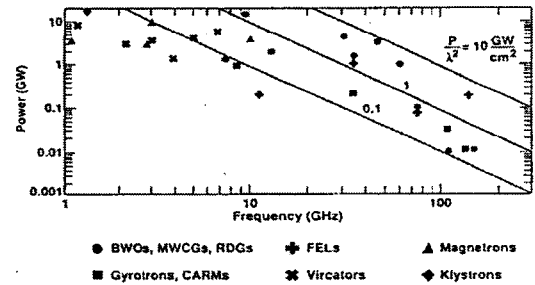


[그림 15] 반도체 전자파 발전기, 진공식 전자파 발전기, HPM의 출력비교

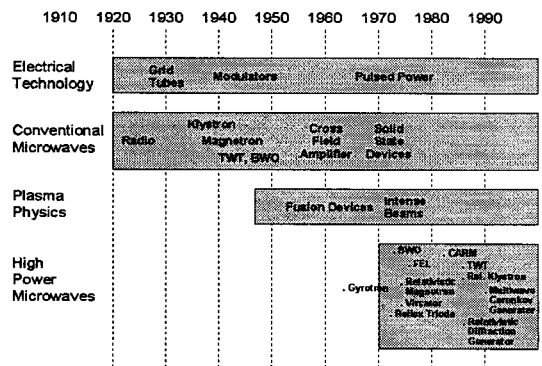
있다. 아래의 도표에서는 각종 HPM의 출력과 주파수를 비교하였다.

이미 선진국에서는 각종 HPM을 연구 개발하고 있고 실제 장에서 시험을 하고 있는 실정이다. 이러한 HPM은 종전의 전자전의 개념을 바꿀 수도 있는 심각한 과제이며 우리 나라에서도 필히 개발하여야겠다. HPM은 약 20년 가량 진행해 왔으므로 우리도 수 년 후면 그들 수준에 진입할 수 있을 것으로 기대된다. [그림 17]은 연대별로 고출력 전자파 발전기가 어떻게 개발되고 있는가를 보여 주며 고출력화 하고 있는 HPM의 개발방향을 보여 주고 있다.

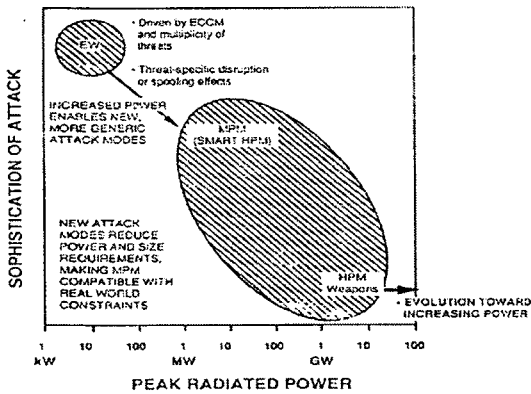
이와 같이 제작된 electromagnetic bomb의 경우 만약 10 GW, 5 GHz의 HPM를 탑재한 경우 수백 미



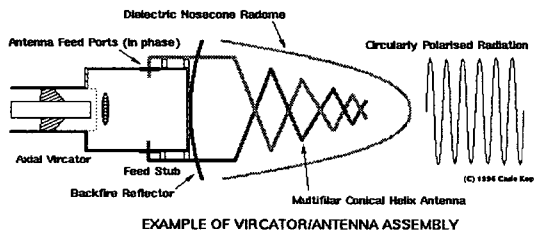
[그림 16] 주파수에 대한 출력; Gyrotron, FEL, Magnetron, Klystron, BWO, Vircator/1990.



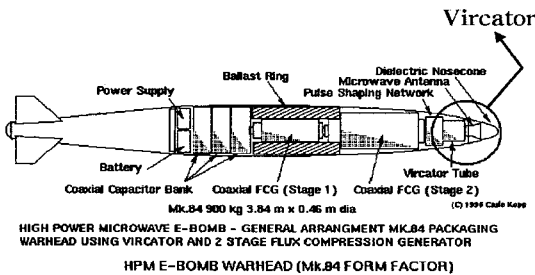
[그림 17] 전자파 발전기의 연도별 개발 상황과 HPM의 개발 현황



[그림 18] HPM의 개발 방향: 고출력화



[그림 19] HPM의 한 예 (Vircator)



[그림 20] HPM Bomb의 구조

터 떨어진 지점에서 직경 약 400~500 m 내에 있는 지상목표물에 미터당 수 킬로볼트의 펄드를 형성시킨다. 이는 노출된 전선 등에 수백에서 수천 킬로볼트의 전압을 형성하여 일대의 거의 모든 전자장비를 무력화시킨다. 특히 반도체에 의존하는 첨단장비

의 경우일수록 그 피해는 막대하게 될 것이다. 그런데 이 폭탄이 갖는 또 하나의 심각한 위험은, 일단 electromagnetic bomb의 공격을 받으면 그 영향을 피할 수 있는 방법이 현실적으로 거의 없다는 것이다. 이는 핵공격을 받았을 때와 흡사하다. 이러한 공격을 막아내는 거의 유일한 수단이 폭탄이 투하되기 전에 미리 비행기 등을 격추시키는 방법 정도이다.

이미 선진국에서는 Electromagnetic Bomb의 핵심이라 할 수 있는 HPM중의 하나인 vircator에 대한 많은 연구와 함께 이와 같은 무기를 개발하기 위한 노력을 하고 있다.

IV. 한국에서의 고출력증폭기 연구개발 동향

최근에 와서야 한국에서 고출력 전자파 증폭기에 대한 관심이 높아졌다. 우리나라는 가정용 전자레인지의 전 세계 시장의 절반이나 점유하고 있는데 이때 쓰이는 마그네트론은 증폭기는 아니지만 유사한 고출력 발전장치이다. 그러나 고출력 증폭기에 대한 연구 개발은 선진국에 비해 초보적 단계라 할 수 있다. 간략히 실험적으로 고출력 증폭기를 연구 개발하는 국내기관을 살펴본다. 원자력연구소에서는 HPM중의 하나인 자유전자레이저를 연구개발하고 있으며 klystron은 입자가속기의 전자를 가속하기 위해 포항가속기연구소에서 쓰이고 있으며 연구개발중에 있다. 이외에 HPM 중 Vircator와 BWO 등을 개발하기 위해 최근 광운대학교와 포항공대에서 연구를 진행중에 있다. 이외에 핵융합의 부대시설로 gyro-klystron이 기초과학지원연구소와 광운대학교에서 진행되고 있다. ECM용 헬릭스 TWT(표 1)를 서울대학교에서는 KMW 및 LG사와 공동으로 국방부의 민간겸용기술사업의 지원으로 개발하고 있다. 이 사업은 정부에서 고출력 증폭기를 국산화하기 위해 지원한 첫 사업이라 할 수 있겠다.

앞으로 국내 전자전이나 통신분야에의 수급으로

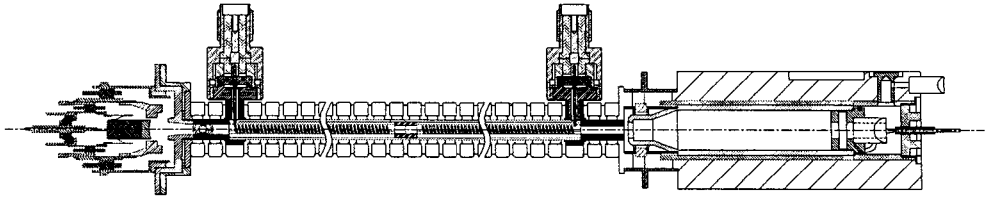
<표 3> 헬릭스 TWT 설계 목표

Parameter		Min	Max	Units
Frequency range		6.0	18.0	GHz
Saturated output power	6~12 GHz	48.0		dBm
	12~18 GHz	46.5		
RF drive power	6~18 GHz	-10	+10	dBm
2nd harmonic	6 GHz		-4.0	dB
	7 GHz		-6.0	
	8 GHz		-8.0	
Noise power(beam on)	6~9 GHz		-28	dBm/MHz
	9~15 GHz		-23	
	15~18 GHz		-28	
Noise power(beam off)			-80	dBm/MHz

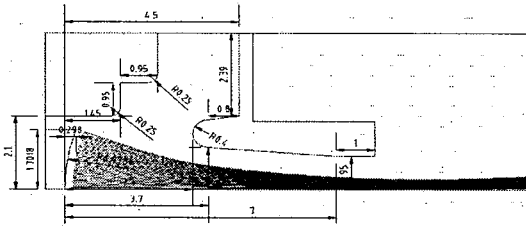
다양한 파급효과가 있으리라 생각한다.

헬릭스 TWT는 민군 겸용으로 쓰일 수 있는 매우 전략적인 고출력증폭기이며 기술에 대한 파급효과도 매우 지대하다. 현재 ECM용 1.5 옥타브(6~18 GHz) 광대역 헬릭스 TWT에 대한 연구 개발이 진행되고 있는데 전자전에서 가장 중요한 고출력 증폭기이므로 현 연구개발에 대해 조금 더 자세히 기술하려 한다. 광대역 헬릭스 TWT는 전자총, 헬릭스 회로, 영구자석(PPM), 입출력 커플러, 콜렉터 등의 주요 구성부품들로 이루어지는데 이를 설계하기 위해서 EGUN 코드, POISSON 코드, 3차원 컴퓨터 코드 HFSS, 그리고 1차원 비선형 이론 등의 각종 이론 및 컴퓨터 시뮬레이션의 도구들이 사용되었다. 이론적으로 예측되는 광대역 헬릭스 TWT의 특성은 6~18 GHz 주파수대역에서 출력은 50 W 이상 그리고 50 dB 가량의 포화된 이득과 2nd harmonic 수준은 -5 dB 미만이다. 서울대학교에서는 이러한 기초 설계를 바탕으로 실제 여러 부품들을 제작하

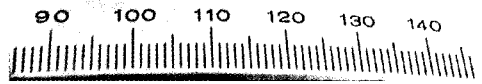
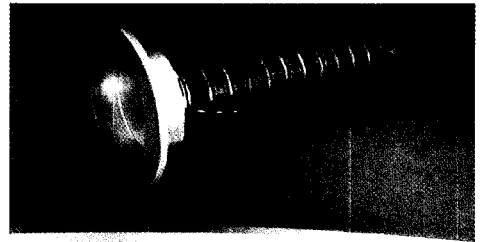
고 있으며 이를 통합하여 완성된 TWT를 만들기 위한 여러 부대 장치가 마련되어 가고 있다. 특히 부품들을 결합하는 진공배기장치가 완료되었고 현재에는 주요 부품들의 일차 보완 실험과 부품 결합 작업이 진행되고 있으며, 웰딩 및 브레이징 후 수행될 RF 실험 등의 작업이 수행중에 있다. [그림 21]은 국내에서 처음 자체적으로 연구 개발되어 2000년 말에 시험하게 될 TWT의 공학설계도이다. 또한 [그림 22]에서 [그림 28]은 제작되어 결합되어야 하는 TWT의 각 부품들을 보여준다. [그림 29]와 [그림 30]은 헬릭스 TWT 제작에서 가장 중요한 요소중에 하나인 RF회로의 위상속도와 임피던스 값의 예측치를 실험치와 비교한 결과이다. 매우 정확히 헬릭스 회로의 위상속도 및 임피던스를 예측할 수 있는 것은 TWT개발의 현실적인 가능성을 확인해 주는 것이다. 이외에도 전자빔의 전파와 RF 매칭의 문제는 헬릭스 회로와 더불어 가장 중요한 부분이다.



[그림 21] 6~18 GHz, 50 W 헬릭스 TWT 공학적 설계



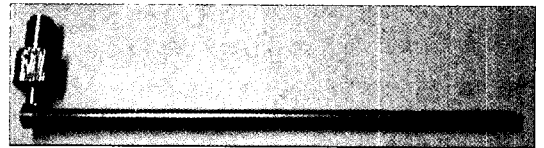
[그림 22] 전자총 시뮬레이션 결과



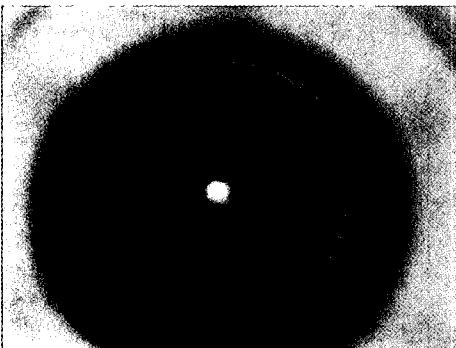
[그림 25] 설계 · 제작된 PPM



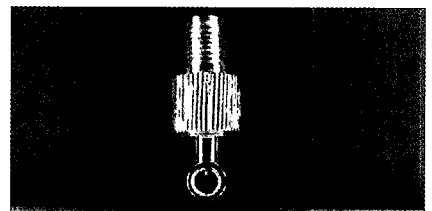
[그림 23] 설계 · 제작된 전자총



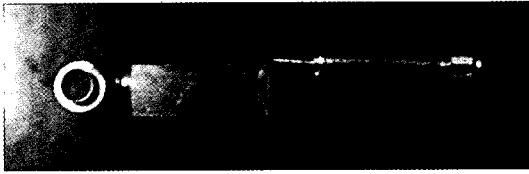
[그림 26] 설계 · 제작된 헬릭스 회로



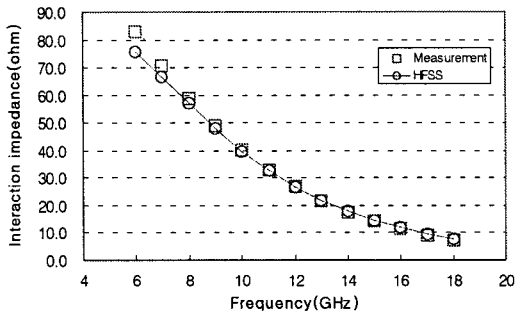
[그림 24] 전자빔이 세륨 유리에 부딪쳐 빛이 나는 모습



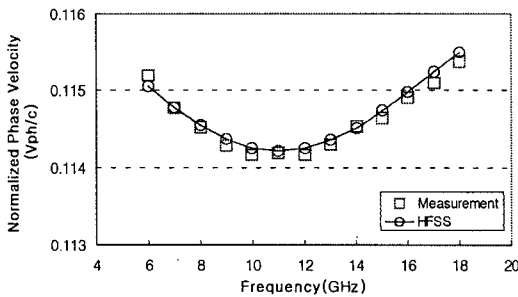
[그림 27] 설계 · 제작된 입출력부



[그림 28] 설계 제작된 콜렉터



[그림 29] 제작된 헬릭스회로의 임피던스 측정치와 예상치의 비교



[그림 30] 제작된 헬릭스회로의 위상속도 측정치와 예상치의 비교

V. 결 론

고출력 증폭기는 각각 다른 형태의 증폭장치에서 초소형화, 초고주파화 및 초고출력화 해가고 있다. 반도체 증폭기는 현재 대략 10 GHz에서 10W CW에서 한계를 가지고 있으며 진공 고출력 증폭기는 고주파영역에서 고출력을 방출하는데 거의 한계가 없어 보인다. 고출력 증폭기중 초소형화 되어가는

TWT는 MMIC와 같은 반도체소자와 연합하여 효율이 높은 초소형 고출력(>100W CW) 증폭기의 혁신을 일으키는 MPM(Microwave Power Module)을 구성하였고 새로운 음극의 개발로 더욱더 초소형화의 노력을 기울이고 있다. 둘째로 고출력(>kW)으로 초고주파화(밀리미터파) 되어가는 Gyro-TWT는 밀리미터파이상의 주파수대역에서 ECM용으로 개발되고 있고 현실적인 증폭기로 개발될 전망이다. 세째로 원리적으로는 현재 무기체계의 전면적인 수정을 불가피하게 할지 모르는 초고출력화(>GW) 되어가는 HPM(High Power Microwaves)이 소개되었다. 마지막으로 한국에서의 고출력 증폭기에 관련된 연구 개발 상황과 TWT 국산화에 대한 현황이 소개되었다.

참고문헌

- [1] Gaponov and Granatstein, *Application of High-Power Microwaves*, Artech House 1994.
- [2] Eaves and Reedy, *Principles of Modern Radar*, Van Nostrand Reinhold Co., 1987.
- [3] *Proceeding of International Workshop on Crossed-Field Devices*, Ann Arbor, 1995.
- [4] J. F. Gittins, *Power Travelling Wave Tubes*, American Elsevier Publishing, 1965, pp. 1-31.
- [5] G. Dohler, D. Gallagher and J. Richards, "Millimeter Wave Folded Waveguide TWTs," *Vacuum Electronics Annual Review proceedings*, Crystal City, Virginia, 1993, pp. V15-V20.
- [6] G. Dohler, D. Gagne, D. Gallagher and R. Moats, *International Electron Devices Meeting, Technical Digest*, 1987, pp. 485-488.
- [7] G. S. Park, S. Y. Park, R. H. Kyser, C. M. Armstrong, A. K. Ganguly, R. K. Parker, *IEEE*

-
- Trans. Plasma Science* vol. 22, no 5, 1994.
- [8] G. S. Park, J. J. Choi, R. H. Kyser, C. M. Armstrong, A. K. Ganguly, R. K. Parker, *Physical Review Letters*, 1995.
- [9] *ESA/NATO 1997 Workshop*, ESTEC, The Netherlands.
- [10] 박건식, 연구 12호, 공군전투발전단, 1997.
- [11] 박건식, 전자파기술 vol. 8, no 1, 1997.
- [12] H. Makishima, H. Imura, M. Takahashi, H. Fukui, A. Okamoto, *Technical Digest of IV-MC97*, 1997.

≡ 필자소개 ≡

박 건 식

1978년: 서울대학교 물리교육학과 학사

1989년: 미국 메릴랜드 주립대학 물리학과 박사

1987년~1995년: 미국 해군연구소 연구원

1995년~1999년: 서울대학교 물리교육과 조교수

2000년~현재: 서울대학교 물리학부 부교수

