[IV~1] [초청]

고출력 전자파 발진기

박건식
플라즈마 및 전자파 연구실
서울대학교 물리교육과

진공관을 이용한 고출력 전자파 발진기의 수요는 현재에도 고출력을 요하는 시스템에 지배적이다. 1960년대 이후로 진공관을 이용한 전자파 발진기들은 고체소자를 이용한 전자파 발진기들에 의해 대체되리라는 예측은 단지 저출력 발진기의 경우를 제외하고는 현실화되지 못했다. 오히려 최근에는 민수용 및 군수용의 각종 응용으로 진공관을 이용한 전자파 발생은 다시 활발히 연구되어지고 있다. 전통적인 전자파 발진기들 중에는 Magnetron, Klystron 및 TWT(Traveling Wave Tube)가 있고 최근에는 밀리미터파를 얻기 위한 노력으로 Gyrotron 및 FEL(Free Electron Laser)가 연구되어지고 있다. 진공관을 이용한 전자파 발진기의 역사와 원리 및 동향에 대해 논의 될 것이다.

Magnetron: Magnetron의 발명은 역사상 매우 중요한 사건이다. 1940년 영국에서 개발되어 히틀러가 영국을 그들의 전투폭격기로 위협하는 이차세계대전시에 영국은 그동안 극비로 개발되어 온 Magnetron을 이용한 레이더를 통해 전쟁을 승리로 이끄는 데 대단히 중요한 역할을 하였다. 전자파 발진기가 개발되기 전인 그 당시만 해도 비행기는 야간이나 기후가 좋지않을 때는 출격할 수가 없었다. 이 들은 또한 폭격기가 오는 것은 막지를 못했지만 어디서 언제 온다는 것을 미리 알게 됨으로 효과적으로 적군의 공격을 대처하고 공격을 할 수 있었다. 거의 때를 같이 하여 일년 먼저 미국에서는 Klystron이라는 전자파 발진기가 개발되어 역시 전쟁을 성공적으로 치루는 결정적적 역할을 하였다. 미국의 경우는 우수한 과학자들을 보스톤지역의 Radiation Lab에 유치해 전시 중과 전시 후 상당한 기간까지 본격적으로 전자파 발진기를 개발하게 하였다. 영국에서는 Randal, Boot 과 Ludi라는 과학자들이 1939년에 magnetron을 버밍햄대학에서 개발하였고 미국에서는 Varian형제들이 1938년에 Klystron을 스탠포드대학에서 개발하게 된 것이다. Magnetron의 역사를 언급하면서 일본의 연구 역사를 뺄 수가 없다. 일본은 영국에 못지 않게 일찍이 Magnetron을 개발해 오고 있었다. 그러나 그 당시 일본에서는 금속을 깎는 기술등이 발전해 있지 못했으므로 실지 현장에서 쓸 수 있는 정도로 개발할 수 없었고 또한 이러한 전자파 발진기의 레이더 응용 등의 중요성을 깨닫지 못하고 있었다. 그러나 그들은 그 당시 상당한 수준의 연구결과를 보유하고 있었다. 그후 그들은 이 Magnetron이 전자레인지에 사용되면서 아직도 세계 제일의 수출국으로 자리 잡고 있다. 1940년 이전에는 고주파를 방출하는 발진기들의 주파수는 수 백 MHz 정도였다. 전쟁을 중심으로 전자파 발진기는 여러나라들의 관심을 끌었고 실지로 연구 개발을 시작한 나라는 프랑스, 미국, 러시아, 일본, 영국 이었다. 이차세계대전의 긴박상황은 여러나라의 과학자들을 자극하였고 불과 수 Watt 정도의 출력을 내던 전자파 발진기들은 매우 짧은 개발 기간안에 Kilo Watt의 고출력을 방출할 수 있는 전자파 발진기를 개발했던 것이다. 현재는 Magnetron은 1GHz 에서 100GHz 까지 높게는 Mega Watt의 출력까지 낼 수 있게 되었다. 응용으로는 아래와 같은 현장에서 쓰이고 있다; 지상레이더, 기상레이더, MTI, 선형가속기, Beacons, 해상 레이더, 과학실험용, IFF, 미사일 seeker 등 매우 광범히 하게 쓰이고 있다.

Klystron: 위에서 잠시 언급한 바와 같이 Klystron 전자파 발진기는 1937년 여름에 발명되었고 1939년 2월 미국의 "The Journal of Applied Physics(응용 물리학회지)"라는 정기학술지에 발표되었다. 그러나 이러한 연구 결과가 당시 타의 추종을 불허할만큼 강력한 군사력을 보유하고 있었던 독일에서는 간과되었던 것이 확실하다. 그러나 당시 레이더 개발등으로 열을 올리고 있던 영국에서는 이를 이용해 가버운 항공레이더에 쓸 수있음을 알고 1940년 Klystron을 야간용 전투기의 레이더 수신기로 사용함으로 영국 전투(Battle of Britain)에서 승리할 수 있었다. 이차대전 중에 개발된 Klystron은 실로 임청난 전쟁무기 개발의 성과라 할 수있다. 그러나 전 후에도 소위 "마이크로웨이브" 라고 불리면서 산업에 다양하게 쓰

이기 시작하였다. 항공 운행에 필수적이 되었고 인공위성을 통해 세계적인 통신의 시대를 이는 견인차의 역할을 하게 되었다. Klystron은 Varian이란 형제와 스탠포드대학의 한센교수에 의해 개발되었다.

TWT(Traveling Wave Tube): 1941년 영국의 Kompfner는 버밍햄대학의 Oliphant교수 밑에서 전자파 발진기에 대한 연구원의 일을 시작하였다. 당시는 전시였고 정부로 부터 많은 과학자들은 무기개발의 협조 부탁을 받고 있었다. Kompfner역시 이러한 상황에서 레이더 등에 사용될 전자파 발진기를 연구하게 되었다. 그는 특별이 klystron 발진기가 갖는 약점인 gap에서의 전자와 전자파와의 상호작용이 약하고 강하게 하기 위하여 gap을 좁게 만드는 것은 실지 제작에 문제가 있으므로 이를 해결해 보고자 연구하였다. 그는 현재에도 널리 쓰이고 있는 Helix형태의 회로를 만들어 전자파 진행에 대해 연구하였고 곧 이러한 Helix형태의 회로는 전자파의 속도를 줄이는 효과를 만들고 이때 전자빔의 속도와 비슷해 질 때 효과적으로 전자빔으로부터 에너지를 전자파로 전환할 수 있게 된다는 것을 알게 되었다. 3년후 그는 1,700 Volt에서 밀리 암페어 되는 전류의 상황에서 이득이 10dB되는 출력을 성공적으로 얻게 되었다. 이후의 의문은 과연 얼마나 넓은 주파수대를 갖는냐였다. 처음 실험에서 얻은 주파수대역(Bandwidth)은 60MHz를 넘었다. 그 당시 레이더 수신기에 쓰이는 전자파 발진기의 주파수대역은 수 MHz정도였으므로 레이더 수신기로서의 주파수대역으로는 충분한 이상이었다. 이렇게 하여 영국에서 Magnetron에 이어 TWT 도 처음으로 발명이 되었는데 실지로 TWT의 작동원리등 이론적이며 자세한 연구는 미국의 당시 벨연구소의 Pierce에 의해 정립되었고 TWT와 같은 광대역 전자파 발진기가 통신에 유용한 것을 깨달아 마이크로파와 통신 등의 이론을 정립하게 되었다. 이 TWT는 그 용도에 따라 여러 가지 형태를 가지는데 이득이나 출력보다는 광대역을 요하는 TWT에서는 나선형의 구조를 가지며 보다 높은 출력과 이득을 요하는 경우에는 Coupled-cavity 형태의 TWT를 쓴다. Coupled-cavity형태의 TWT는 여러개의 cavity가 가까이 서로가 연결한 형태를 가진다. 다른 전자파 발진기와 마찬가지로 이 TWT도 특정한 목적의 TWT는 계속적인 실험의 결과로 적정화되었으나 아직도 이론적으로 컴퓨터를 통한 예측등 새로이 연구 개발할 여지가 많이 남아있다.

Gyrotron(Electron Cyclotron Resonance Maser): 위에 간략히 소개한 전자파 발진기들(Magnetron, Klystron, 및 TWT)은 전자파 발진회로의 특성상 밀리미터의 파장을 내는 전자파 발진기로서는 한계가 있음은 오래전부터 알고 있는 사실이다. 이제까지는 밀리미터파에 대한 수요가 없었고 또한 이러한 주파수 대역(Ka-Band 에서 W-Band)의 전자파를 방출할 수 있는 발진기도 부재한 상태였다. 그러나 점점 더 정밀한 정보 및 통신을 요하게 되었고 상대방이 없는 주파수대역의 전자파 발진기의 개발은 항상 필요하므로 많은 선진 국가에서는 밀리미터파의 전자파를 방출할 수 있는 전자파 발진기 개발을 지난 30년 가량 지속해 오고 있다. 1964년 미국과 러시아(구소련)에서는 독자적으로 거의 동시에 Gyrotron이라는 전자파 발진기를 발명하였다. 미국에서는 에일대학의 교수인 Hirshfield 교수가 첫 실험에 성공하였으며 러시아에서는 응용물리 연구소(Institute of Applied Physics)의 Gaponov가 첫 실험에 성공하게 되었다. 이후 Gyrotron은 응용 분야에 따라 다양한 형태로 발전하게 되었다. 이차 대전 전후에 개발된 전자파 발전기가 방출할 수 없는 높은 출력을 고주파에서 얻을 수 있는 Gyrotron은 주로 35GHz 와 94GHz에서 개발되었다. 형태로는 좁은 주파수대에서 운용되는 Gyrotron Oscillator 발진기와 Klystron과 같이 여러 Cavity에서 전자빔과 상호작용하는 Gyro-Klystron이 있고 광대역의 발진기로는 최근에 Gyro-TWT가 연구 개발되었다. 35GHz Gyro-Klystron은 러시아에서 대공 레이더용 전자파 발진기로 현장에서 쓰이고 있고 현재는 94GHz 발진기를 개발하고 있다. 출력은 10kW 이상 수백 kW에 이르고 있다. 광대역용으로 개발되어 전자전등 통신 등에 쓰일 Gyro-TWT는 이름대로 TWT와 같은 형태의 발진회로를 통해 넓은 주파수대에서(>20% BW) 10-100kW 이상의 출력을 방출할 수 있다. 지난 20년간 러시아는 Gyro-Klystron을 집중적으로 연구 개발하였으며 미국은 Gyro-TWT 분야에서 개발의 마지막 단계에 이르렀다. 이 전자파 발진기는 이제 현장에서 쓰기 위해 크기와 무게에 대한 연구를 수행해야할 시기이다.