

MAGIC3D 코드를 이용한 고출력 마그네트론 발전기의 시뮬레이션

論 文

55C-11-6

Simulation of High-Power Magnetron Oscillators Using a MAGIC3D Code

鄭 淳 信[†]

(S. S. Jung)

Abstract - A high-power continuous-wave (CW) ten-vane double-strapped magnetron oscillator has been investigated using three-dimensional (3D) particle-in-cell (PIC) numerical simulation code, MAGIC3D. The resonant modes and their resonant frequencies of the ten-vane strapped magnetron resonator were obtained to show a large mode separation near the π -mode. An electron cloud formed in an anode-cathode gap, called an interaction space was confined well enough to result in no leakage current. Five spokes were clearly observed in the electron cloud, which definitely ensured the π -mode oscillation in the ten-vane magnetron. Numerical simulations predicted that the saturated microwave output power measured at the coaxial output port was 5.41 kW at the microwave frequency of 893 MHz, corresponding to a power conversion efficiency of 72.6% when the external axial magnetic field was 1150 gauss and the electron beam voltage and current were 6 kV and 1.25 A, respectively.

Key Words : Simulation, Magnetron

1. 서 론

고출력 마그네트론 발전기는 고전압 DC 전기장과 자기장이 서로 직각으로 인가되는 교차장(crossed-field)이 존재하는 고진공 환경에서 전기에너지를 고출력 마이크로파(microwave) 에너지로 변환하여 방사하는 고출력 마이크로파 발전기의 일종이다[1-3]. 이 마그네트론은 음극(cathode), 양극(anode), 안테나(antenna), 전극단자 등으로 구성되어 있다. 마그네트론의 음극은 고온으로 가열될 때 전자(electron)를 방출하는데, 텅스텐이나 토륨팅스텐 재질의 나선형 필라멘트로 만들어져 있다. 마그네트론의 양극은 음극을 감싸면서 바라보는 여러 개의 금속 조각들로 이루어져 있고, 음극과 함께 공진회로(resonant circuit 또는 resonant cavity)를 구성한다. 이 공진회로에서 발생한 마이크로파는 안테나를 통해 외부로 방사된다. 그리고 전극단자는 절연체와 전도체로 구성되는데, 음극과 양극 사이에 DC 고전압의 전기에너지를 공급하기 위해 절연되어 있다. 이러한 마그네트론에서 발생하는 마이크로파의 연속 출력은 915 MHz에서 최대 100 kW, 2450 MHz에서 최대 30 kW에 이르고, 마이크로파로의 에너지 변환효율은 915 MHz에서 80% 이상, 2450 MHz에서 70% 이상이다. 이러한 마그네트론은 고효율, 고출력 마이크로파 에너지원으로서 식품, 신소재, 환경, 섬유, 종이, 고무, 목재, 의료, 이화학, 플라즈마, 통신 등의 다양한 고부가가치 산업에 폭넓게 활용되고 있다[4-7].

고출력 마그네트론은 1940년대 초반이후 많은 연구가 이

루어졌다. 그럼에도 불구하고, 마그네트론 발전기에서 일어나는 전자빔과 전자기파의 복잡한 비선형 상호작용 현상은 보다 깊은 이해를 위해 지금도 연구되고 있다. 마그네트론 동작 메커니즘을 밝히려는 이론적 시도들 중 최근의 수치 해석적 시도들은 주목할 만하다. 6-베인 상대론적 마그네트론에 대한 2차원 수치 해석이 이루어졌다[8]. L-대역(band) 10-베인(vane) rising-sun 형태의 마그네트론에 대한 시뮬레이션이 2차원 PIC 코드인 MAGIC2D에 의해 수행되었다[9]. X-대역 rising-sun 형태의 마그네트론이 3차원 PIC 코드인 MAGIC3D를 이용하여 모델링 및 해석되었다[10]. 최근에는 2450 MHz 1 kW급 가정용 마그네트론에 대한 3차원 수치 해석이 수행되었다[11, 12].

본 논문에서는 MAGIC3D 코드를 이용하여 10-베인 이중 스트랩형(double-strapped) 마그네트론 발전기를 모델링하고 그 해석 결과를 제시한다. 이번 수치 해석에 사용한 마그네트론의 사양은 음극-양극 전압 6 kV, 양극 전류 1.2 A에서 마이크로파 발전 출력이 5 kW이고 마이크로파 발전 주파수가 915 MHz \pm 15 MHz이다.

2. 마그네트론 발전기의 모델링

마그네트론의 컴퓨터 시뮬레이션에 이용한 MAGIC3D 코드는 시간중속(time-dependent) Maxwell 방정식과 Lorentz 힘 방정식 전체를 자체 모순이 없게(self-consistently) 풀어 공간전하(space charge)와 전자기장의 상호작용의 해석 결과를 제공하는 3차원 PIC 코드이다[13]. 이 시뮬레이션 코드는 여러 가지 3차원 유한 차분법 시간 영역(finite-difference time-domain, FDTD) 전자기 알고리즘과 PIC 알고리즘을 결합하여 여러 연구와 설계에서 정상상태와 과도상태에 대한 계산 결과를 빠르고 정확하게 제공한다.

[†] 교신저자 : 한국전기연구원 선임연구원

E-mail : ssjung@keri.re.kr

接受日字 : 2006年 9月 21日

最終完了 : 2006年 10月 9日

본 논문에서 시뮬레이션된 마그네트론은 10개의 배인을 갖고 양극의 상부와 하부에 각각 2개의 전도성 고리를 갖는 이중 스트랩형 마그네트론이다. 이 마그네트론의 시뮬레이션 모델은 두 개의 말단 캡(end caps)을 갖는 원통형 음극, 10개의 배인에 이중 스트랩을 갖는 양극, 그리고 동축 안테나로 구성된다. 시뮬레이션에 사용한 좌표계는 x, y, z 직교좌표계이다. 그림 1은 마그네트론 모델을 xy -면과 xz -면에서 절단한 단면들을 보여주고 있다. 그림 1(a)를 보면, 양극 블록은 홈이 난 10개의 직육면체 전도성 조각들과 원통관형 외피로 이루어져 있다. 전도성 조각들 사이의 쉐기 모양의 공간은 측면 공진기(side resonator)를 형성한다. 10개의 전도성 조각들은 두 개의 전도성 고리에 의해 하나씩 길러 변갈아 연결하여 양극 조각들을 하나씩 건너 변갈아 전기적으로 연결한다. 그림 1(b)를 보면, 음극은 두 개의 전도성 말단 캡을 갖고 있는데, 이것은 음극 필라멘트에서 발생한 전자들이 상호작용 공간 밖으로 빠져나가지 못하게 하는 역할을 한다. 마이크로파 전력을 뽑아내기 위한 동축 안테나는 안테나 급전부, 머리부, 세라믹 윈도우로 구성되어 있다. 본 시뮬레이션 모델에서는 마그네트론 내부를 진공으로 유지하기 위한 세라믹 윈도우를 생략하였다. 본 마그네트론 모델은 DC 전력을 공급하기 위한 입력 포트를 왼쪽 끝에, 공진회로에서 발생된 마이크로파 전력을 흡수하기 위한 출력 포트를 오른쪽 끝에 설정하였다. 이 마그네트론 모델은 약 4백만개의 직육면체 셀(cell)로 이루어져있고 이것은 마그네트론의 상세 구조를 모델링하는데 충분한 숫자이다. 시뮬레이션 시간 스텝(step) Δt 는 Courant 안정 조건, $\Delta t < \Delta x/c\sqrt{2}$ 에 부합

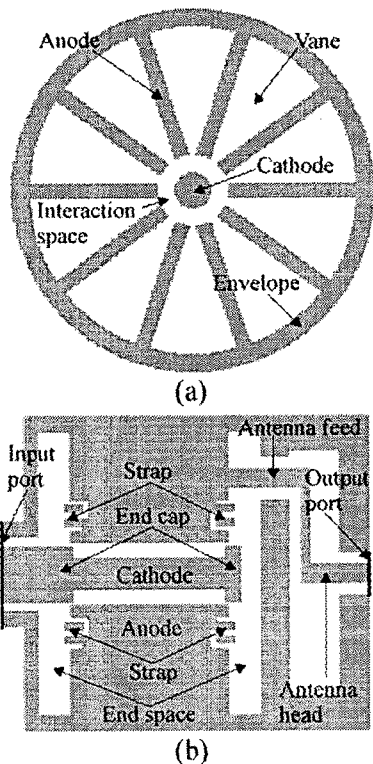


그림 1 MAGIC3D 코드에서 모델링한 이중 스트랩형 마그네트론의 시뮬레이션 모델을 (a) xy -단면과 (b) xz -단면에서 본 모습과 각 부분의 명칭.

하도록 자동으로 정해진다. 여기서 Δx 는 가장 작은 셀의 크기이고 c 는 빛의 속력이다.

실제 마그네트론은 텅스텐이나 토륨텅스텐 재료의 음극 필라멘트에서 열전자와 이차전자 방출을 이용한다. 그러나 본 시뮬레이션 모델에서는 전자들이 Child-Langmuir 법칙에 따라 음극 표면에서 매크로 입자 형태로 방출되는 것으로 모델링하였고, 음극 표면의 이차전자 방출은 포함하지 않았다. 음극 표면에서 방출되는 매크로 입자들의 숫자는 50 시간 스텝마다 음극 표면의 셀 당 한 개의 입자가 만들어지도록 설정하였다. 이는 시뮬레이션 모델에 존재하는 입자수가 너무 많아지지 않도록 하여 시뮬레이션 시간을 단축하기 위함이다.

양극과 음극의 전위차는 시뮬레이션 모델의 입력 포트에서 인가되는데, 그림 2에서처럼 초기에 6 kV를 지나쳤다가 약 6 ns 이후에는 6 kV로 일정한 값이 된다. z -축 방향의 외부 자기장은 처음부터 인가되는데, 약 6 ns까지 0 gauss에서 1150 gauss까지 점차적으로 증가하다가 1150 gauss로 일정한 값이 된다. 이러한 동작 조건은 마그네트론 발진 영역에 들어가고, 이것은 그림 3과 같이 Hull 차단조건과 Hartree 문턱조건에 의해 구해진다[14]. 마그네트론은 Hull

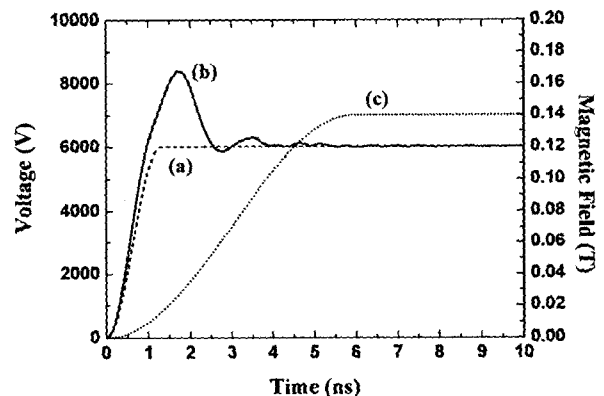


그림 2 (a) 입력 포트에서 시간의 함수로 설정한 입력 전압, (b) 입력 포트에서 측정(계산)한 입력 전압, 그리고 (c) z -축 방향의 외부 자기장

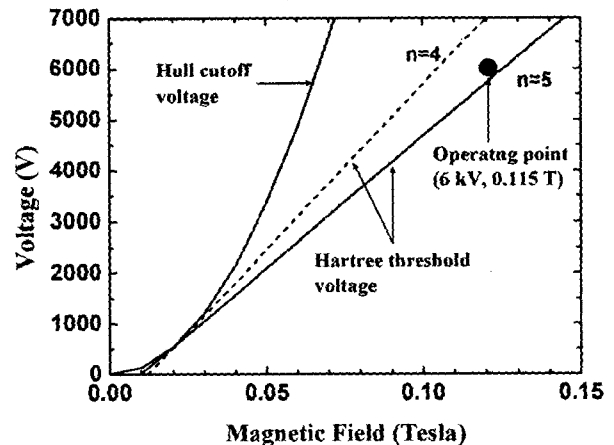


그림 3 Hull 차단전압과 Hartree 문턱전압 관계로부터 구한 마그네트론의 동작 조건.

차단전압 이상에서는 발진하지 않는다. 전자들의 표류속도(drift velocity) $v_d = E/B\gamma$ 가 공진모드의 위상속도(phase velocity)와 일치하지 않기 때문이다. 여기서 E 와 B 는 각각 DC 전기장과 자기장의 세기이다. 반면에 전압이 Hull 차단전압과 Hartree 문턱전압 사이에 있으면 전자들의 표류속도가 마그네트론의 공진모드 중 하나와 동기된다. 이 경우 전자들은 전자기 모드와 상호작용을 계속하고 마그네트론을 발진하게 된다. 특히 π -모드 발진은 모드 수 $n=5$ 에서 구한 Hartree 문턱 곡선 근방에서 일어난다.

스트랩형 마그네트론의 시뮬레이션은 펜티엄-4 3GHz CPU를 장착한 컴퓨터를 이용하여 수행되었다. 전체 시뮬레이션 시간은 보통 500 ns 이상이었고, 이때 시뮬레이션을 완료하는데 필요한 CPU 시간은 보통 200시간 이상이 걸렸다.

3. 결과 및 고찰

앞서 기술하였듯이 마그네트론은 전자들의 표류속도와 공진회로의 위상속도가 거의 일치할 때 발진할 수 있다. 공진회로의 위상속도는 어떤 공진모드에서 위상변화와 공진주파수로부터 결정할 수 있다. 따라서 마그네트론에서 각각의 공진모드에서 공진주파수를 계산하는 것은 매우 중요하다. 마그네트론의 시뮬레이션 모델에서 전자 입자가 없는 조건에서 광대역 주파수 성분을 갖고 있는 극초단(ultrashort) 펄스를 인가하여 마그네트론을 여기한 후 빠른 푸리에 변환으로 구한 주파수 스펙트럼으로부터 공진주파수를 찾는다. 그리고 나서 공진모드는 각각의 공진주파수에서 전기장이나 자기장의 벡터 분포로부터 확인한다. 이렇게 MAGIC3D 코드로 계산한 공진모드, 공진주파수 결과는 3차원 FDTD 전자기 시뮬레이션 코드인 MWS에서 고유모드(eigenmode) 계산법으로 얻은 결과와 비교하였다.

그림 4는 마그네트론 공진회로가 π -모드에서 공진할 때 마이크로파 전기장의 세기와 z -축 방향 자기장의 세기를 보여주고 있다. 마이크로파 전기장 벡터를 확인해보면 이 공진모드는 TE(transverse electric)-모드이다. 또한 그림 4는 공진회로의 측면 공진기에서 마이크로파 전기장의 세기의 변화를 잘 보여준다. 이 측면 공진기는 π -모드에서 $\lambda_p/4$ 의 길이 갖고 있고 경계조건에 의해 음극에 가까워질수록 마이크로파 전기장의 세기가 커지고 음극에서 멀어질수록 전기장의 세기가 작아지다가 진공외피에서 0이 된다. 여기서 λ_p 는 π -모드에서 마이크로파 파장을 의미한다. 이와는 달리 마이크로파 자기장의 세기는 음극에 가까워질수록 작아지고 음극에서 멀어질수록 커진다.

그림 5는 MAGIC3D 코드를 이용하여 계산한 각 공진모드의 공진주파수와 MWS 시뮬레이션으로부터 얻은 결과를 비교한 것이다. 모드 수에 관계없이 MAGIC3D 시뮬레이션 결과가 MWS 시뮬레이션 결과보다 작고, 대체로 모드 수가 증가함에 따라 두 결과의 차이가 커진다. π -모드에서는 MAGIC3D 결과가 MWS 결과보다 약 20 MHz 정도 작아서, MAGIC3D 코드로 계산한 π -모드의 주파수는 895MHz이다. 이는 MAGIC3D 코드에서 마그네트론 구조를 모델링할 때 사용하는 직육면체 셀이 공진주파수에 큰 영향을 미치는 스트랩과 같은 곡면 구조를 구현하는데 한계가 있기 때문이다.

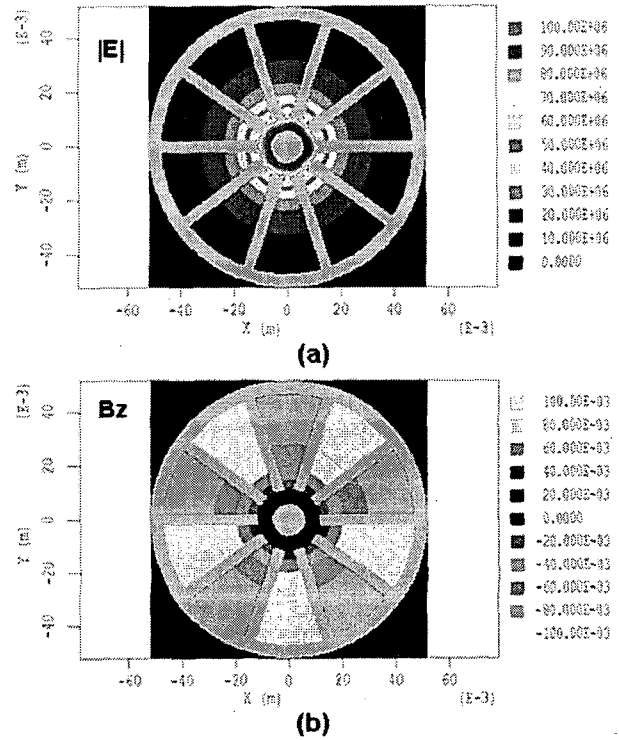


그림 4 10-베인 이중 스트랩 마그네트론의 공진회로에서 계산한 π -모드의 (a) 전기장 크기와 (b) z 축 방향 자기장의 분포 형태.

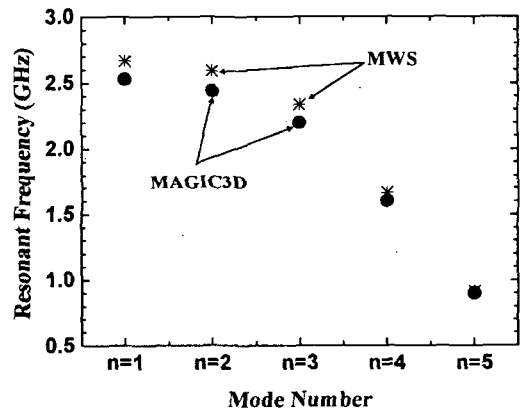


그림 5 10-베인 이중 스트랩형 마그네트론의 공진회로에서 MAGIC3D와 MWS로 계산한 공진모드에 따른 공진주파수 값의 비교.

마그네트론 공진회로는 모드 분리 특성이 좋아야 한다. 이것에 의해 마그네트론의 마이크로파 발진 특성과 모드 이동 특성이 큰 영향을 받기 때문이다. 이에 따라 마그네트론 공진회로의 모드 분리 특성을 확인하기 위해 스트랩 수(정도)에 따라 π -모드인 ($n=5$)-모드와 $4\pi/5$ -모드인 ($n=4$)-모드의 공진주파수를 계산하였다. 그림 6에서 보여주듯이, 스트랩 수가 늘어남에 따라 ($n=5$)-모드의 공진주파수는 감소하는 반면에 ($n=4$)-모드의 공진주파수는 증가하면서 ($n=5$)-모드와 ($n=4$)-모드 사이의 공진주파수 차이가 크게 증가한다. 모드 분리가 스트랩이 없는 경우에는 수 MHz에 불과하

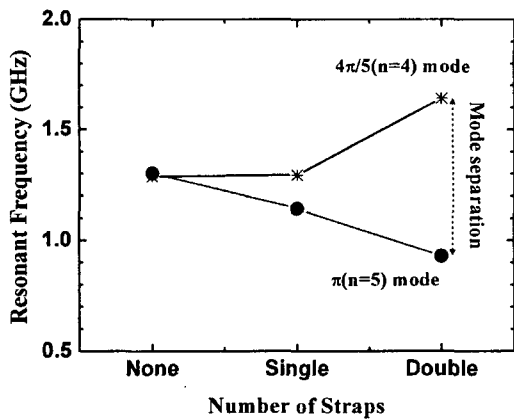


그림 6 10-베인 마그네트론의 공진회로에서 스트랩 수에 따른 $(n=5)$ -모드와 $(n=4)$ -모드 사이의 모드 분리.

였지만 이중 스트랩을 사용한 경우에는 730 MHz를 넘었다. 이는 스트랩을 사용함으로써 π -모드와 $4\pi/5$ -모드 사이의 모드 분리가 분명해져서 마그네트론이 π -모드에서 매우 안정하게 동작할 것임을 의미한다.

10-베인 이중 스트랩 마그네트론 공진회로의 마이크로파 발진 시뮬레이션을 하기 위해서는 음극으로부터 전자 입자들이 방출되도록 해야 한다. 일반적으로 전자 입자들이 포함되면 계산양이 굉장히 크기 때문에 계산 시간이 크게 길어진다. 예를 들어 10-베인 이중 스트랩 915 MHz 마그네트론 공진회로의 경우 500 ns 이상 시뮬레이션하면 보통 9일 이상 소요된다. 특히 마그네트론의 공진회로가 π -모드로 발진을 시작하는데 오랜 시간이 걸린다. 따라서 이 π -모드 발진의 개시 시간을 단축하면 전체 계산 시간을 크게 줄일 수 있다. 이를 위해 고유모드 계산법으로 구한 π -모드 결과를 이용하여 시뮬레이션 초기에 포화 전력의 수 %의 마이크로파 전력을 인위적으로 넣어준다.

앞에서 결정한 마그네트론의 동작조건에서 전자들이 π -모드의 전자기파와 어떻게 상호작용하는지 보기 위해 전자의 운동을 검토하였다.

그림 7은 10-베인 이중 스트랩 마그네트론의 공진회로가 π -모드에서 발진할 때, 시뮬레이션 내의 시간이 5 ns, 10 ns, 15 ns, 100 ns일 때 xz -면의 전자구름이 상호작용 공간에서 시간에 따라 어떻게 변화하는지 보여주고 있다. 음극 표면에서 방출된 전자 입자들을 상호간의 전기적 반발력으로 음극 표면을 따라 퍼진다. 이렇게 음극 표면을 따라 퍼져 가던 전자 입자들을 음극 말단 캡으로 인해 발생한 전위 분포에 의해 더 이상 축 방향으로 나아가지 못한다. 다시 말해서 음극의 말단 캡은 음극에서 발생한 전자들이 축 방향으로 달아나는 것을 막아주어 새는 전류를 차단한다.

그림 8은 10-베인 이중 스트랩 마그네트론의 공진회로가 π -모드에서 발진할 때, 시뮬레이션 내의 시간이 5 ns, 10 ns, 15 ns, 100 ns일 때 xy -면의 전자구름이 시간에 따라 어떻게 변화하는지 보여주고 있다. 초기에는 그림 7(a)처럼 음극에서 방출된 전자들이 양극에 도달하지 못하고 음극 주위를 따라 표류운동을 한다. 이 전자들이 π -모드의 전기장과 상호작용하면서, 그림 7(b)-(c)처럼 마이크로파 전기장에 의해 감속된 전자들이 양극 쪽으로 확장하여 전자구름이 오

각형으로 변한다. 시간이 더 지나면, 그림 7(d)처럼 오각형 전자구름의 꼭짓점이 양극 쪽으로 더욱 더 확장하면서 양극에 도달한다. 결과적으로 전자구름에는 5개의 살이 만들어지고, 이것은 10-베인 마그네트론에서 π -모드 발진을 확증해준다.

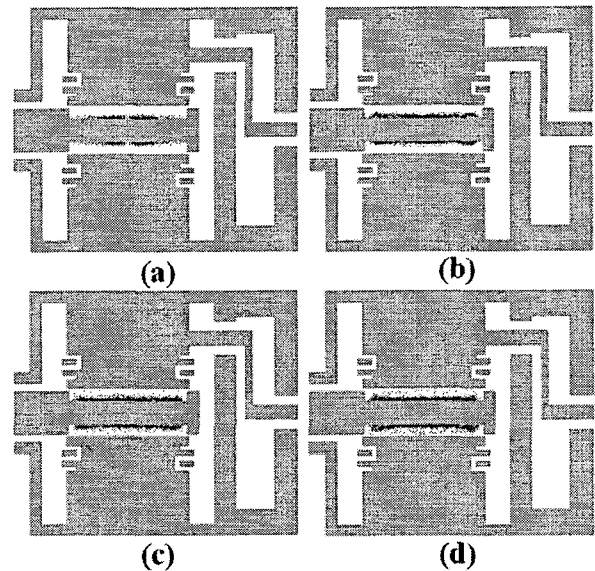


그림 7 10-베인 이중 스트랩 마그네트론이 π -모드에서 발진할 때, xz -평면에서 시뮬레이션 내의 시간에 따라 변화하는 전자구름의 형태.

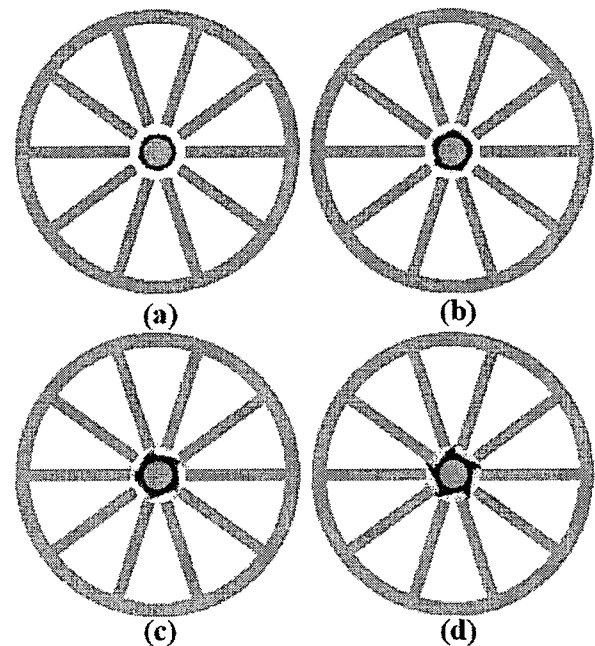


그림 8 10-베인 이중 스트랩형 마그네트론이 π -모드에서 발진할 때, xy -평면에서 시뮬레이션 내의 시간에 따라 변화하는 전자구름의 형태.

그림 7과 8은 마그네트론의 공진회로에서 양극 전류가 어떻게 흐르게 되는지 보여준다. 마이크로파 발진이 시작되기 전에는 음극에서 방출된 전자들이 양극에 도달하지 못하고 음극 주변에만 머물고 있어 양극 전류가 흐르지 않는다. 이후 마이크로파 발진이 강해져서 음극 주변의 공간전하가 확실하게 변형되면, 공간전하 살이 양극에 도달하여 양극 전류가 흐르기 시작한다.

그림 9는 10-베인 이중 스트랩 마그네트론이 π -모드에서 발진할 때, 시뮬레이션 내의 시간에 따라 안테나의 출력단 위치에서 계산한 마이크로파 출력 전압을 보여준다. 이 전압은 시뮬레이션 시간에 따라 점차적으로 증가하는데 500 ns를 넘어서면서 포화되기 시작한다. 그리고 시뮬레이션 초기에 마이크로파 전압이 약 100~150V 가량 존재하는데 이는 앞에서 언급하였듯이 마그네트론 공진회로가 π -모드에서 발진을 빨리 시작하도록 마이크로파 전력을 처음부터 인가하였기 때문이다.

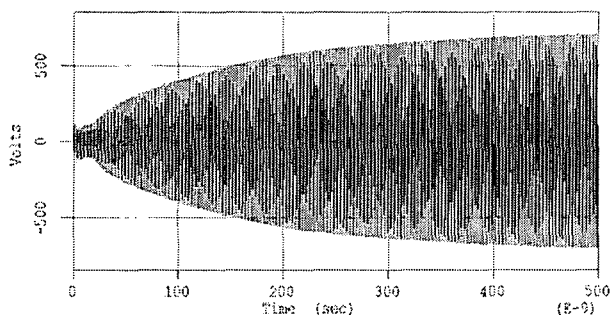


그림 9 10-베인 이중 스트랩형 마그네트론이 π -모드에서 발진할 때, 시뮬레이션 내의 시간에 따라 안테나 출력단 위치에서 계산한 마이크로파 출력 전압.

그림 10은 그림 9의 마이크로파 전압을 빠른 푸리에 변환하여 구한 마이크로파 주파수 스펙트럼을 선형 눈금에서 보여준다. 한 개의 주파수만 예리하게 도드라진 것을 보면 π -모드에서 안정하게 발진하고 있음을 알 수 있다. 이 발진주파수는 공진주파수 895 MHz 보다 2 MHz 작은 893 MHz인데, 앞에서 확인한 공진주파수의 계산 오차 20 MHz를 고려하면 실제 발진주파수는 약 913 MHz가 예상된다. 그리고 그림 9의 주파수 스펙트럼을 로그 눈금으로 다시 그려서 3 dB의 주파수 범위를 확인하면 ± 5 MHz를 넘지 않는다.

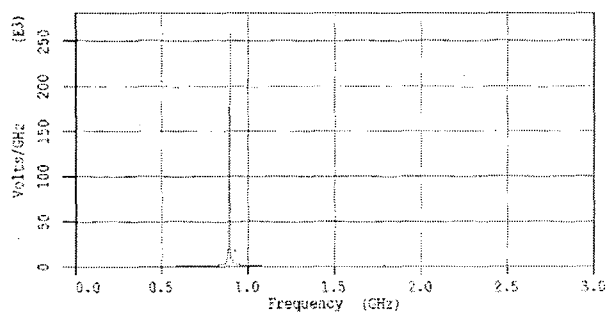


그림 10 10-베인 이중 스트랩형 마그네트론이 π -모드에서 발진할 때, 마이크로파 주파수 스펙트럼.

그림 11은 10-베인 이중 스트랩형 마그네트론이 π -모드에서 발진할 때, 시뮬레이션 내의 시간에 따라 계산한 DC 입력 전력과 마이크로파 출력 전력을 보여준다. 그림 10(a)를 보면 시뮬레이션 초기에 마이크로파 전력이 약 0.1 ~ 0.2 kW 가량 존재하는데 이는 앞에서 언급하였듯이 마그네트론 공진회로가 π -모드에서 발진을 빨리 시작하도록 마이크로파 전력을 처음부터 인가하였기 때문이다. 시뮬레이션 시간이 500 ns를 넘어서면서 DC 입력 전력과 마이크로파 출력 전력이 포화되기 시작한다. DC 입력 전력은 약 7.45 kW에서 포화되고, 마이크로파 출력 전력은 약 5.41 kW에서 포화된다. 이때 마이크로파 발진 효율은 72%가 넘는다.

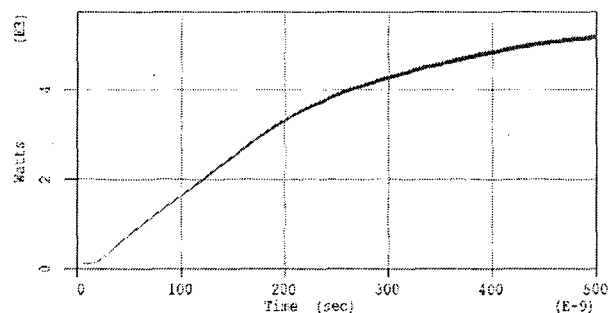


그림 11 10-베인 이중 스트랩 마그네트론이 π -모드에서 발진할 때, 시뮬레이션 내의 시간에 따라 계산한 마이크로파 출력 전력.

4. 결 론

10-베인 이중 스트랩형 마그네트론 발진기를 3차원 PIC 코드인 MAGIC3D를 이용하여 시뮬레이션하고 그 결과를 검토하였다. 이중 스트랩을 사용한 경우에는 π -모드와 ($\pi-1$)-모드 사이의 공진주파수 차이가 730 MHz를 넘어 두 모드 사이의 모드 분리가 분명하였다. 마그네트론 공진회로의 상호작용 공간에 5개의 살을 갖는 전자구름이 형성되었고, 이것은 10-베인 마그네트론이 π -모드에서 발진하고 있음을 확증해준다. 컴퓨터 시뮬레이션은 양극과 음극 사이의 전압과 전류가 각각 6 kV, 1.25 A이고 외부 자기장이 1150 gauss일 때 893 MHz에서 5.4 kW의 마이크로파 전력이 발생한다고 예측하였고, 이때 마이크로파 변환 효율은 약 72%가 넘었다. 그리고 마이크로파 출력의 주파수 스펙트럼 결과는 π -모드 근방에서 모드 경합이 없다는 것을 보증하였다.

참 고 문 헌

- [1] G. B. Collins, Microwave Magnetrons, New York: McGraw-Hill, 1948.
- [2] A. S. Gilmour, Jr., Artech House: Microwave Tubes, Chap. 13, 1986.
- [3] V. L. Granatstein and I. Alexeff, Boston · London: Artech House, Chap. 9, 1987.
- [4] J. Thuery, Microwaves: Industrial, Scientific, and Medical Applications, Boston · London: Artech House, 1992.

- [5] A. C. Metaxas and R. J. Meredith, *Industrial Microwave Heating*, IEE, 1983.
- [6] R. Meredith, *Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating*, IEE, 1998.
- [7] A. K. Datta and R. C. Anantheswaran, *Handbook of Microwave Technology for Food Applications*, New York · Basel: Marcel Dekker, 2001.
- [8] H. Chan, C. Chen and R. C. Davison, "Numerical Study of Relativistic Magnetrons," *J. Appl. Phys.*, 73, 7053, 1993.
- [9] X. Chen, M. Esterson and P. A. Lindsay, "Computer Simulation of a High-Power Magnetron and the Possible Implications for RF Pulse Shortening," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 26, 726, 1998.
- [10] H. Kim, J. Shin, and J. Choi, "Particle-in-Cell Simulations on a Rising-Sun Magnetron Oscillator," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 30, 956, 2002.
- [11] J. I. Kim, J. H. Won, and G. S. Park, "Electron Prebunching in Microwave Magnetron by Electric Priming Using Anode Shape Modification," *Applied Phys. Lett.*, Vol. 86, 171501, 2005.
- [12] J. I. Kim, J. H. Won, and G. S. Park, "Three-Dimensional Particle-in-Cell Simulation of 10-Vane Strapped Magnetron Oscillator," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 32, No. 5, p. 2099, 2004.
- [13] B. Goplen, L. Ludeking, D. Smithe, and G. Warren, "User-Configurable MAGIC for Electromagnetic PIC Calculations," *Comput. Phys. Commun.*, 87, 54, 1995.
- [14] P. A. Lindsay, M. Esterson, and X. Chen, "The Magnetron Threshold Voltage Revisited," *Phys. Plasmas*, 4, 463, 1997.

저 자 소 개



정순신 (鄭淳信)

1974년 3월 12일 생. 1997년 서울대학교 물리교육과 졸업. 2002년 동 대학원 물리학부 졸업(이박). 2001년~현재 한국전기연구원 선임연구원 재직.

Tel : 055-280-1493

Fax : 055-280-1490

E-mail : ssjung@keri.re.kr