

산업용 고출력 마그네트론의 발진 특성 연구

정순신
한국전기연구원

Computational Study on Oscillation Characteristics of Industrial High-Power Magnetron Oscillators

Sun-Shin Jung
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 고출력 마그네트론 발진기는 마이크로파 발생원으로서 식품, 고무, 섬유, 목재, 세라믹, 폐기물 등의 다양한 산업적 프로세스에 응용된다. 여러 가지 새로운 마이크로파 응용분야들이 보고되고 있을 뿐만 아니라 계속 연구되고 있다. 본 연구에서는 3차원 PIC 시뮬레이션 코드를 이용하여 이중 스트랩형 고출력 마그네트론을 모델링하였다. 본 논문에서는 이 마그네트론의 발진모드, 발진주파수, 발진출력 등의 발진 특성 결과가 제시될 것이다.

1. 서 론

고출력 마그네트론(magnetron) 발진기(oscillator)는 고전압 DC 전기장과 자기장이 서로 직각으로 인가되는 교차장이 존재하는 초고진공 환경에서 전기에너지를 고출력 마이크로파 에너지로 변환하는 고출력 마이크로파(microwave) 발진기 중 하나이다[1]. 고출력 마그네트론은 915 MHz에서 100 kW, 2450 MHz에서 30 kW의 연속적인 마이크로파 전력을 발생시킬 수 있다. 이러한 마그네트론은 고출력 마이크로파 발생원으로 식품 조리, 식품 해동, 목재 건조, 고무 가황, 세라믹 소결, 토양 복원 등의 다양한 산업적 응용분야에 널리 사용되고 있다[2].

본 논문에서는 3차원 PIC(particle-in-cell) 코드인 MAGIC3D를 이용하여 발진주파수 915 MHz, 발진출력 5 kW, 발진효율 70%의 이중 스트랩형(double-strapped) 고출력 마그네트론을 모델링하고 그 계산 결과가 제시된다[3-4].

2. 본 론

2.1 마그네트론의 시뮬레이션 모델

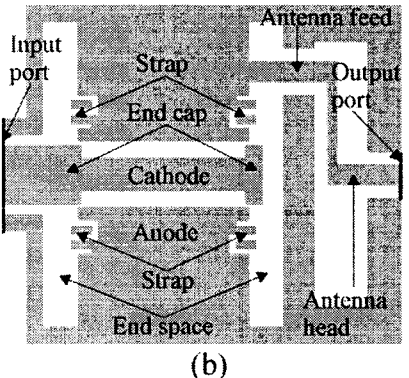
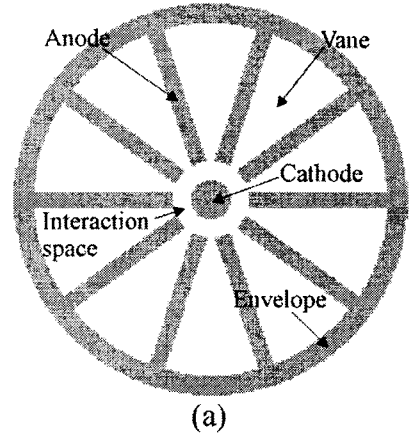
마그네트론의 컴퓨터 시뮬레이션이 이용한 MAGIC3D는 시간중속 Maxwell 방정식과 Lorentz 힘 방정식 전체를 자체 모순이 없게 풀어 공간 전하(space charge)와 전자기장의 상호작용 결과를 제공하는 코드이다. 본 논문에서 모델링된 마그네트론은 양극의 상부와 하부에 각각 2개의 전도성 고리를 갖는 이중 스트랩형 마그네트론이다. 이 마그네트론은 약 915MHz에서 5kW의 마이크로파 전력을 발생시킬 수 있다.

2.1.1 마그네트론 구조의 모델링

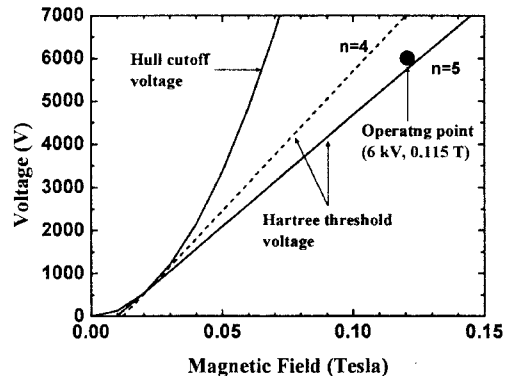
이 마그네트론의 시뮬레이션 모델은 두 개의 말단 캡(end caps)을 갖는 원통형 음극, 10개의 베인(vanes)에 이중 스트랩을 갖는 양극, 그리고 동축 안테나로 구성된다. 시뮬레이션에 사용한 좌표계는 x, y, z 직교좌표계이다. 그림 1은 마그네트론 모델의 단면들을 보여주고 있다. 그림 1(a)를 보면, 양극 블록은 10개의 직육면체 전도성 조각들과 원통관형 외피로 이루어져 있다. 이 10개의 전도성 조각들은 두 개의 전도성 고리에 의해 하나씩 걸러 번갈아 연결하여 양극 조각들을 하나씩 건너 번갈아 전기적으로 연결한다. 그림 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. 발생한 마이크로파 전력을 뽑아내기 위한 동축 안테나는 안테나 급전부와 머리부로 구성되어 있다. 본 모델에서는 마그네트론 내부를 진공으로 유지하기 위한 세라믹 윈도우를 생략하였다. 본 모델은 DC 전력을 공급하기 위한 입력 포트를 왼쪽 끝에, 발생한 마이크로파 전력을 흡수하기 위한 출력 포트를 오른쪽 끝에 설정하였다. 이 마그네트론 모델은 약 4백만개의 직육면체 셀로 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 부합하도록 자동으로 정해진다. 여기서 Δx 는 가장 작은 셀의 크기이고 c 는 빛의 속도이다.

2.1.2 마그네트론의 전기적 모델링

실제 마그네트론은 텅스텐이나 토륨텅스텐 재질의 음극 필라멘트에서 열 전자와 이차전자 방출을 이용한다. 그러나 본 시뮬레이션 모델에서는 전자들이 Child-Langmuir 법칙에 따라 음극 표면에서 매크로 입자 형태로 방출되는 것으로 모델링하였고, 음극 표면의 이차전자 방출은 포함되지 않았다. 음극 표면에서 방출되는 매크로 입자들의 숫자는 50 시뮬레이션 시간 스텝마다 음극 표면의 셀 당 한 개의 입자가 만들어지도록 설정하였다. 이는 시뮬레이션 모델에 존재하는 입자수를 줄여서 시뮬레이션 시간을 단축하기 위함이다.



〈그림 1〉 이중 스트랩형 마그네트론의 시뮬레이션 모델을 (a) xy-단면과 (b) xz-단면에서 그린 모습.

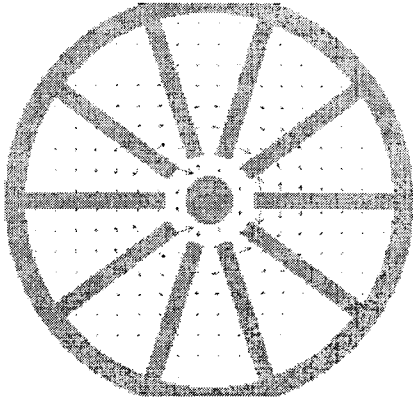


〈그림 2〉 Hull 차단조건과 Hartree 문턱조건으로부터 구한 마그네트론의 동작조건.

양극과 음극의 전위차는 약 DC 6 kV, 입력 포트로부터 인가된다. 시뮬레이션 모델의 입력 포트에서 측정된 전압의 시간 프로파일에 따르면 전압이 초기에는 6 kV를 지나쳤다가 약 6 ns 이후에는 6 kV로 일정한 값이 된다. z-축 방향의 외부 자기장은 처음부터 인가되는데, 6 ns까지 0 T에서 0.115 T까지 점차적으로 증가하다가 0.115 T로 일정한 값이 된다. 이러한 동작 조건은 마그네트론 발진 영역에 들어가고, 이것은 그림 2와 같이 Hull 차단

조건과 Hartree 문턱조건에 의해 구해진다[5]. 마그네트론은 Hull 차단전압 이상에서는 발전하지 않는다. 전자들의 표류속도가 공진모드의 위상속도와 일치하지 않기 때문이다. 반면에 전압이 Hull 차단전압과 Hartree 문턱전압 사이에 있으면 전자들의 표류속도가 마그네트론의 공진모드 중 하나와 동기된다. 이 경우 전자들은 전자기 모드와 상호작용을 계속하고 마그네트론을 발전하게 된다. 특히 π -모드 발전은 모드수 $n=5$ 에서 구한 Hartree 문턱 곡선 근방에서 일어난다.

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

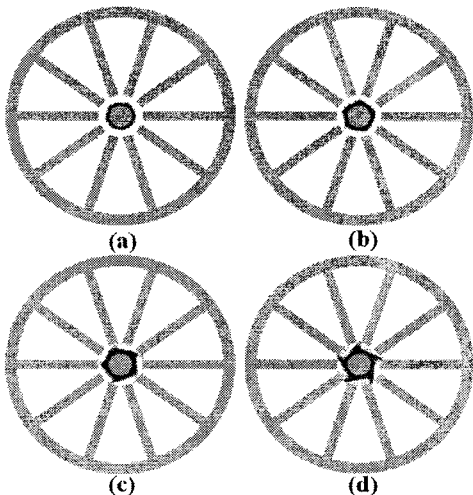


〈그림 3〉 xy-면에서 그린 π -모드의 전기장 벡터 분포.

2.2 마그네트론의 시뮬레이션 결과

마그네트론에서 각각의 공진모드에서 공진주파수를 계산하는 것은 중요하다. 시뮬레이션 모델에서 극초단 펄스를 인가하여 마그네트론을 여기시킨 후 빠른 푸리에 변환으로 구한 주파수 스펙트럼으로부터 공진주파수를 찾는다. 그리고 나서 공진모드는 각각의 공진주파수에서 전기장 벡터 분포로부터 확인한다. 마그네트론의 동작 모드인 π -모드는 약 893 MHz에서 생겼다. π -모드의 전기장 벡터 분포는 그림 3에서 보는 바와 같다. 이웃한 공진기 내의 전기장의 방향이 완전히 반대인 것이 분명하게 보인다. 따라서 이웃한 공진기 사이의 전기장의 위상차는 π 이고, 이것은 공진모드가 π -모드임을 보증한다.

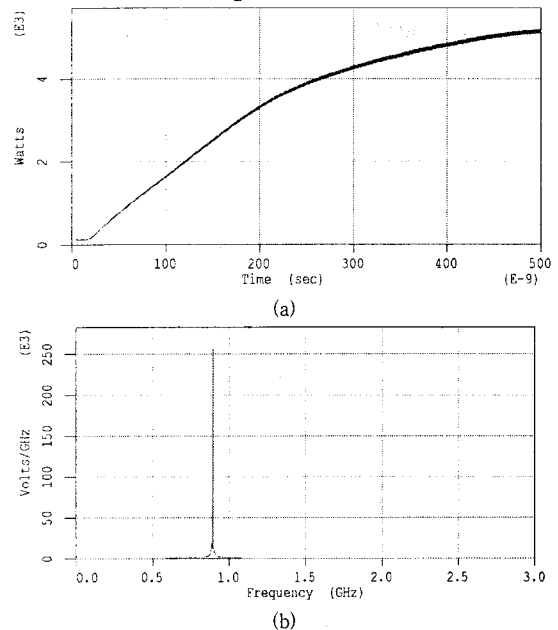
앞에서 결정한 동작조건에서 전자들이 π -모드의 전자기파와 어떻게 상호작용하는지 보기 위해 전자의 운동을 검토하였다. 그림 4는 5 ns, 10 ns, 15 ns, 100 ns에서 xy-면의 전자구름이 시간에 따라 어떻게 변화하는지 보여주고 있다. 초기에는 음극에서 방출된 전자들이 양극에 도달하지 못하고 음극 주위를 따라 표류운동을 한다. 이 전자들이 π -모드의 전기장과 상호작용하면서, 감속된 전자들이 양극 쪽으로 확장하고 오각형을 형성한다. 시간이 더 지나면, 오각형 전자구름의 꼭지점부가 양극 쪽으로 더욱 더 확장하면서 양극에 도달한다. 결과적으로 전자구름은 5개의 살을 형성하고, 이것은 10-베인 마그네트론에서 π -모드 발전을 확증한다.



〈그림 4〉 5ns, 10ns, 15ns, 100ns에 xy-면에서 그린 양극과 음극 사이의 상호작용 공간에서 시간에 따라 발전해가는 전자구름.

그림 5(a)는 동축 안테나의 출력 포트에서 얻은 시간 평균된 마이크로파 발전전력을 보여준다. 마이크로파 전력은 시간에 따라 증가하다가 약 200 ns부터 증가율이 감소하고 약 500 ns 이후 약 5.4 kW로 포화된다. 이때 DC

입력은 약 7.5 kW이기 때문에, 전력 변환 효율은 약 72%이다. 그림 5(b)는 동축 안테나의 출력 포트에서 측정된 마이크로파 전압을 빠른 푸리에 변환을 하여 얻은 주파수 스펙트럼이다. π -모드의 발전주파수는 약 893 MHz에서 관찰되었고, 이것은 공진주파수 895 MHz에서 2MHz 작아진 것이다. 이것은 음극 주변에 형성된 전자구름에 의해 캐패시턴스가 증가하였기 때문이다. 그리고 π -모드와 다른 모드들 간의 진폭 차이가 충분히 크기 때문에, π -모드와 다른 모드들 간의 경합이 없다.



〈그림 5〉 출력 포트에서 얻은 시간 평균된 (a) 마이크로파 전력과 (b) 주파수 스펙트럼.

3. 결 론

10-베인, 이중 스트랩형 마그네트론 발전기를 3차원 PIC 코드인 MAGIC3D를 이용하여 연구하였다. 상호작용 공간에 5개의 살을 갖는 전자구름이 형성되었고, 이것은 10-베인 마그네트론이 π -모드에서 발전하고 있음을 확증한다. 컴퓨터 시뮬레이션은 양극과 음극 사이의 전압과 전류가 각각 6 kV, 1.25 A이고 외부 자기장이 0.115 T일 때 893 MHz에서 5.4 kW의 마이크로파 전력이 발생한다고 예측하였고, 이때 마이크로파 변환 효율은 약 72%였다. 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] J. Thuery, Microwaves: Industrial, Scientific, and Medical Applications, Boston and London: Artech House, 1992
- [3] H. Kim, J. Shin, and J. Choi, "Particle-in-Cell Simulations on a Rising-Sun Magnetron Oscillator", IEEE Trans. Plasma Sci., 30, 956, 2002
- [4] B. Goplen, L. Ludeking, D. Smithe, and G. Warren, "User-configurable MAGIC for Electromagnetic PIC Calculations", Comput. Phys. Commun., 87, 54, 1995
- [5] P. A. Lindsay, M. Esterson, and X. Chen, "The Magnetron Threshold Voltage Revisited", Phys. Plasmas, 4, 463, 1997