

산업용 고출력 마그네트론의 공진 특성 연구

정순신, 원종호*
한국전기연구원, *서울대학교

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

Sun-Shin Jung, Jong-Hyo Won*
Korea Electrotechnology Research Institute, *Seoul National University

Abstract - 고출력 마그네트론 발전기는 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 전자기장 해석용 시뮬레이션 코드를 이용하여 이중 스트랩형 고출력 마그네트론을 모델링하였다. 본 논문에서는 마그네트론의 공진모드, 공진주파수 등의 공진 특성 결과가 제시될 것이다.

1. 서 론

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

마그네트론은 양극의 금속 날개들을 스트랩(strap)을 이용하여 연결하거나 연결하지 않는냐에 따라 스트랩형(strapped) 마그네트론과 그렇지 않은(unstrapped) 마그네트론으로 분류하고, 스트랩형 마그네트론도 스트랩을 한 쌍 사용한 단일(single) 스트랩형 마그네트론, 스트랩을 두 쌍 사용하면 이중(double) 스트랩형 마그네트론으로 분류한다[1]. 이중 스트랩형 마그네트론은 π -모드(mode)에서 마이크로파 발전 특성이 다른 어떤 형태의 마그네트론보다 높아 전 세계적으로 가정용 및 산업용으로 널리 사용되고 있다. 그리고 마그네트론 공진회로(resonant circuit)의 공진기(resonator) 모양은 그림 1과 같은 베인(vane)형이 널리 사용되고 있다.

본 논문에서는 3차원 전자기장 해석 코드를 이용하여 10-베인 이중 스트랩형 마그네트론을 모델링하고, 공진모드와 공진주파수 특성을 해석하였다.

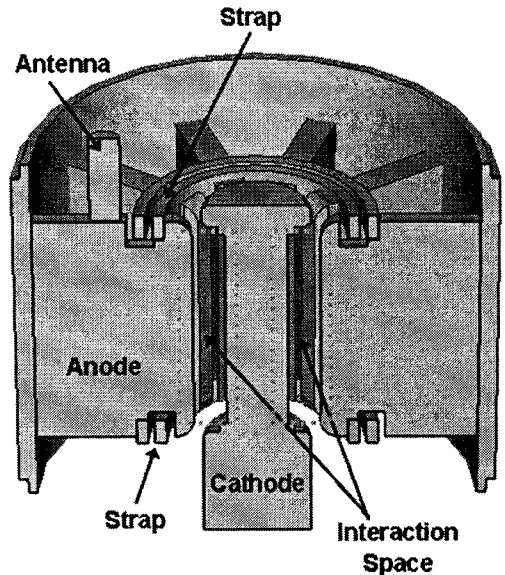
2. 본 론

2.1 마그네트론의 시뮬레이션 모델

본 연구에서는 3차원 전자기장 시뮬레이션 코드에서 그림 1과 같은 10-베인 이중 스트랩형 마그네트론의 공진회로를 모델링하였다. 마그네트론의 시뮬레이션 모델은 두 개의 말단 캡(end caps)을 갖는 원통형 음극, 10개의 베인(vanes)에 이중 스트랩으로 연결된 금속 날개들을 갖는 양극, 그리고 안테나 급전부로 구성된다. 그림 1을 보면, 양극 블록은 10개의 직사각형 전도성 날개들과 환형 외피로 이루어져 있다. 이 10개의 전도성 날개들은 두 개의 전도성 고리에 의해 하나씩 걸러 변갈아 연결하여 양극 날개들을 하나씩 건너 변갈아 전기적으로 연결한다. 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 머리부, 그리고 내부를 진공으로 유지하기 위한 세라믹 윈도우로 구성되어 있는데, 마그네트론 공진회로 모델에서는 안테나 머리부와 세라믹 윈도우를 생략하였다.

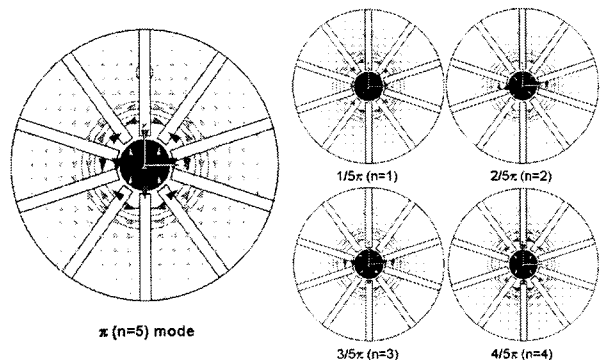
2.2 마그네트론의 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 3차원 전자기장 시뮬레이션 코드에서 그림 1과 같은 10-베인 이중 스트랩형 마그네트론의 공진회로 모델을 만들고 각 부분의 물성과 경계조건을 설정한 후 고유모드(eigenmode) 계산법을 이용하여 공진모드, 공진주파수 등을 계산하였다. 그리고 계산된 각각의 공진주파수에서 마이크로파 전기장 벡터를 그려 어떤 공진모드인지 확인한다. 이렇게 각각의 공진주파수와 공진모드를 대응시키면 그림 2와 같이 공진모드(모드 수 $n=1, 2, 3, 4, 5$)에 따른 마이크로파 전기장 벡터 분포를 얻을 수 있다. 이 모드들의 마이크로파 전기장 분포에서 알 수 있듯이 마그네트론 공진회로의 공진모드 TE(transverse electric)-모드이다. 또한 그림 2는 공진회로의 측면 공진기에서 마이크로파 전기장 세기의 변화를 잘 보여준다. 이 공진기는 베인형 공진기이기 때문에 음극에 가까워질수록 마이크로파 전기장의 세기가 커지고 음극에서 멀어질수록 전기장의 세기가 작아진다. 특히 마이크로파 전기장의 세기는 양극 날개 끝에서 가장 크고, 진공 외피에서 가장 작은 0이 된다.



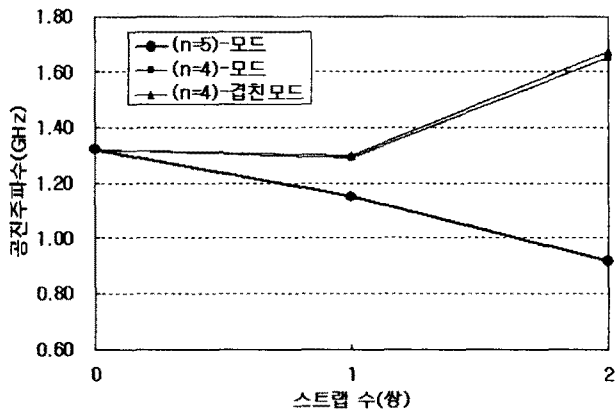
〈그림 1〉 3차원 전자기장 해석 코드에서 모델링한 이중 스트랩형 마그네트론의 단면 모습.

그림 2에서 보여주듯이, 모드 수가 작아지면서 측면 공진기에서 다음 공진기까지의 위상변위가 줄어든다. 10-베인 이중 스트랩형 마그네트론의 공진회로에서는 모드 수 n 이 5, 4, 3, 2, 1일 때, 한 주기당 위상변위가 π , $4/5\pi$, $3/5\pi$, $2/5\pi$, $1/5\pi$ 로 감소한다.

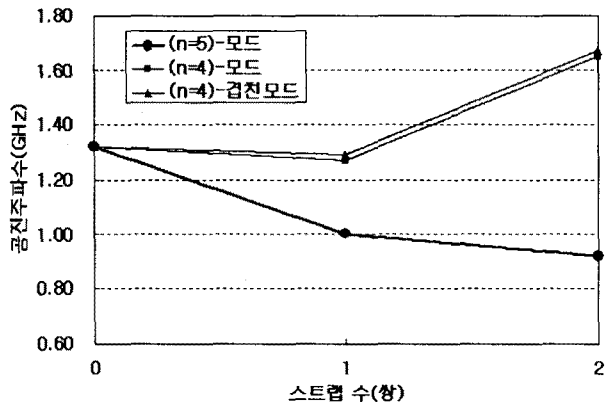


〈그림 2〉 10-베인 이중 스트랩형 마그네트론의 공진회로에서 공진모드($n=1, 2, 3, 4, 5$)에 따른 마이크로파 전기장의 분포 형태.

마그네트론 공진회로는 모든 분리(separation) 특성이 좋아야 한다. 이것에 의해 마그네트론의 마이크로파 발전 특성과 모드 이동(moding) 특성이 큰 영향을 받기 때문이다. 이에 따라 마그네트론 공진회로의 모드 분리 특성을 확인하기 위해 3차원 전자기장 시뮬레이션 코드를 이용하여 스트랩 수(정도)에 따라 π -모드인 ($n=5$)-모드와 $(\pi-1)$ -모드인 ($n=4$)-모드의 공진주파수를 계산하였다. 그림 3에서 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 불과하였지만 이중 스트랩을 사용한 경우에는 730MHz를 넘었다. 즉, 스트랩을 사용하면으로써 π -모드와 $(\pi-1)$ -모드 사이의 모드 분리가 분명해지고 마그네트론 동작시 π -모드에서 $(\pi-1)$ -모드로의 이동도 쉽게 일어나지 않게 할 수 있다.



(a)

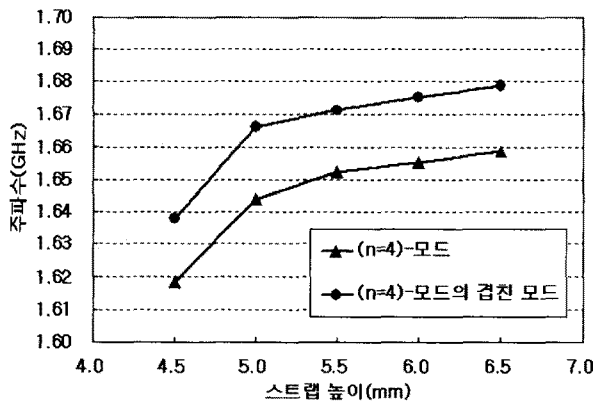


(b)

〈그림 3〉 10-배인 마그네트론 공진회로에서 스트랩 수에 따른 (n=5)-모드와 (n=4)-모드 사이의 공진주파수 차이. 단일 스트랩을 음극과 먼 쪽에 실시한 경우 (a)와 단일 스트랩을 음극과 가까운 쪽에 실시한 경우 (b)

단일 스트랩형 마그네트론 공진회로에서는 스트랩의 위치에 따라, 즉 스트랩이 실시된 위치가 음극에서 가까운 정도에 따라 모드 분리에 미치는 영향이 달라진다. 그림 3에서 알 수 있듯이, 스트랩을 음극에서 가까운 위치에 실시해야 모드 분리가 더욱 커진다. 이는 스트랩이 양극 날개 끝에 가까이 위치할수록 π -모드에서는 공진회로의 캐패시턴스와 인덕턴스를 증가시켜 공진주파수를 낮추고 다른 모드에서는 공진회로의 캐패시턴스와 인덕턴스를 감소시켜 공진주파수를 높인다는 것을 의미한다.

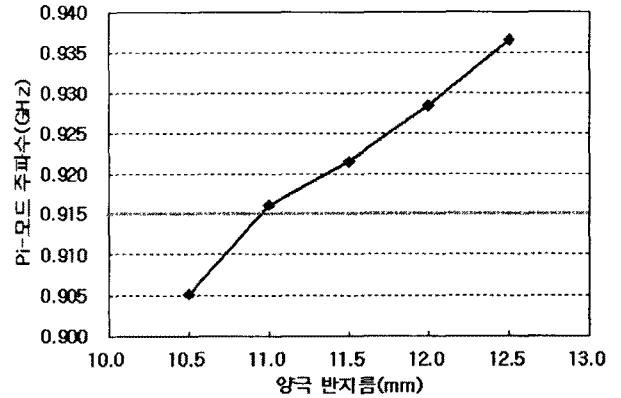
마그네트론 공진회로에서 π -모드를 제외한 공진모드에서는 겹친(degenerate) 모드가 나타난다. 이 겹친 모드는 그림 3과 4에서 보여주고 있다. 특히 그림 4는 스트랩의 높이에 따라 겹친 모드들 사이의 공진주파수 차이와 변화를 보여주고 있다.



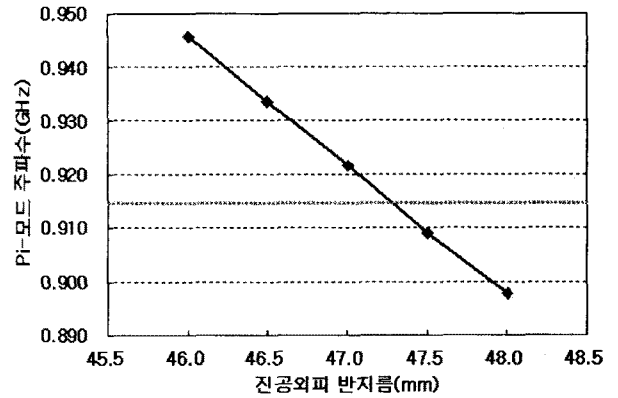
〈그림 4〉 10-배인 이중 스트랩형 마그네트론의 공진회로에서 스트랩 높이에 따른 (n=4)-모드와 이의 겹친 모드의 공진주파수.

10-배인 이중 스트랩형 마그네트론 공진회로에서 이의 구성부품의 주요 기하 변수에 따라 π -모드 공진주파수의 변화를 그림 5와 같이 계산하였다. 이러한 결과들을 바탕으로 마그네트론 공진회로의 기하 변수의 치수를 결

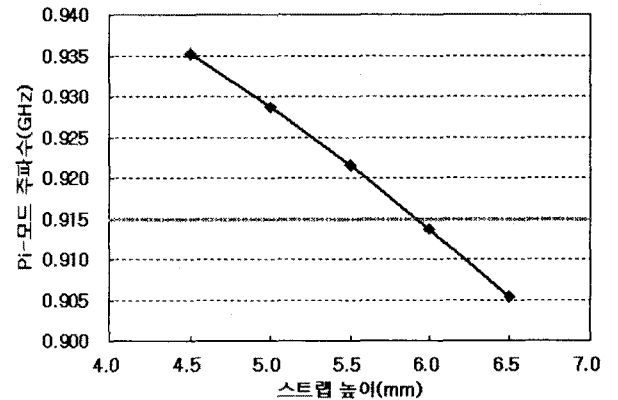
정할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

〈그림 5〉 10-배인 이중 스트랩형 마그네트론 공진회로에서 양극 반지름 (a), 진공외피 반지름(b), 스트랩 높이(c)에 따라 계산한 π -모드의 공진주파수.

3. 결 론

10-배인, 이중 스트랩형 마그네트론 발진기를 3차원 전자기장 해석 코드를 이용하여 연구하였다. 이중 스트랩을 사용한 경우에는 π -모드와 $(\pi-1)$ -모드 사이의 공진주파수 차이가 730 MHz를 넘어 두 모드 사이의 모드 분리가 분명하였다. 마그네트론 공진회로에서 π -모드를 제외한 공진 모드에서는 겹친 모드가 나타났다.

[참 고 문 헌]

- [1] G. B. Collins, "Microwave Magnetrons", McGraw-Hill, New York, 1948
- [2] J. Thury, "Microwaves: Industrial, Scientific, and Medical Applications", Artech House, Boston and London, 1992