

## 도파관과 손실 유전체를 가진 공동의 결합 해석

정백호, 이희웅, 유지준, 유흥연, 김진중\*  
호서대학교 벤처전문대학원, \*호서대학교 자연과학부

### Analysis of Coupling Waveguide and Cavity with Lossy Dielectric

Baek-Ho Jung, Hwa-Yong Lee, Ji-Jun Ryu, Kwang-Yeon Yoo, Jin-Joong Kim  
Graduate School of Venture, Hoseo University  
\* School of Natural Science, Hoseo University

**요약** - 도파관에서 개구를 통하여 공동으로 마이크로파 전력이 전송되는 구조를 시간영역 유한차분법을 이용하여 해석하였다. 공동 내부에는 손실 유전체가 있으며, 결합 개구면으로부터 전달된 전력을 흡수하는 구조이다. 전원인가 방법으로 미소간격 전원과 프릴 전원 기법을 적용하여 해의 타당성을 확인하였다. 도파관과 공동의 크기 및 개구의 형태에 따라서 전장 분포 산출을 시뮬레이션하였다.

#### 1. 서론

본 연구에서 해석의 대상이 되는 구조는 그림 1과 같이 도파관과 공동 공진기의 결합 구조이다. 이와 같은 구조는 현재 마이크로파를 이용한 새로운 전동 개발에 응용되고 있으며, 전원으로부터 복사된 전력을 최대로 손실 유전체에 전달하고자 함이 목적이다. 사용되는 주파수는 2.45 GHz이며, 손실 유전체에 흡수된 마이크로파 전력은 가시광선으로 변환되게 된다.

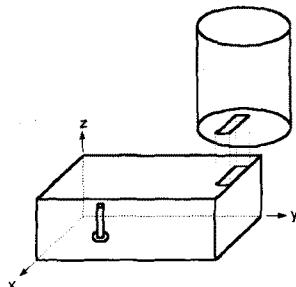


그림 1. 도파관과 공동의 구조

수치해석 기법으로는 시간영역 유한차분법 (Finite-Difference Time-Domain, FDTD)을 사용하였다. 마그네트론으로 여기되는 전원은 모노풀 형태로 대치하였으며, 전자장의 산출시는 정현파를 인가하였다. 전원의 모델링시에는 미소간격 전원과 프릴 전원 모델을 사용하여 계산된 장을 비교하였다.

#### 2. 구조의 모델링과 FDTD

전자장 산출은 시간영역 유한차분법을 이용하여 계산하며, 이 방법은 해석공간이 비균일 매질로 모델링되는 구조에 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다. 전자장 산출을 위한 코드 구현은 Yee 알고리즘을 이용한다 [1]. 본 연구에서는 해석구조가 도체면에 차폐된 구조이므로 흡수 경계조건으로는 도체면에 대한 경계조건을 적용하였다. Courant 안정조건으로  $\Delta t = \Delta x / 2c$ 를 사용하였으며,

여기서  $c$ 는 자유공간의 전파속도이고  $\Delta x$ 는 셀의 크기이다.

마그네트론은 선형도체의 모노풀로 모델링하고, 선도체 주변의 전자장 계산시는 선도체의 반경  $r_0$ 를 파장  $\lambda$ 에 비하여 매우 작게 가정하고, 선도체로부터 방사상의 전장과 선도체를 감싸는 방향의 자장을 선도체로부터의 거리에 반비례한다고 가정하였다 [2]. 전원인가는 2 가지 방법이 있다. 미소 간격 전원과 프릴 전원이다. 먼저 미소간격에 대해 논하기로 하겠다. 도체와 선형도체가 접하는 절점을  $(I, J, K)$ 라고 하고, 전원 전압을  $V(n\Delta t)$ 이라 하면 전장은

$$E_z^n(I, J, K) = -\frac{V(n\Delta t)}{\Delta z} \quad (1)$$

가 된다 [3]. 전원이 인가되는 셀 주변의 자장을 Yee 알고리즘을 통하여 계산된다.

프릴 전압 인가의 경우 도체면과 선형도체가 만나는 절점  $(I, J, K)$  주변의 셀을 개구부로 가정하여, 개구부의 전장  $E_x$ 와  $E_y$ 는 선도체로부터의 방사상 거리  $r$ 에 반비례한다고 가정하고 다음과 같이 쓰기로 한다.

$$E_x(r, J, K) \approx \frac{\Delta x}{2r} E_x(I, J, K) \quad (2)$$

전압과 전장의 관계식인

$$V = - \int_c E \cdot dl \quad (3)$$

를 이용하면, 전장을 계산할 수 있다. 즉 절점  $(I, J, K)$ 에서  $E = \hat{x}E_x$ 이고,  $dl = -\hat{x}dx$ 이다. 그러므로 식 (2)와 (3)으로부터 전압과 전장의 관계를 표현하면

$$E_x^n(I, J, K) = \frac{V(n\Delta t)}{\frac{\Delta x}{2} \ln(\frac{\Delta x}{r_0})} \quad (4)$$

가 된다 [4]. 마찬가지로 주변의 전장에 대해 동일한 방법을 적용하면 된다.

#### 3. 수치 결과

그림 2는 그림 1의 구조의 단면도를 나타내며 문자로 치수를 나타내었다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 그림 2의 실제 치수를 보이고 있다. 원형 공진기 내부에 있는 유전체의 상대 유전율과 전도도는 각각  $\epsilon_r = 4$ 와  $\sigma =$

$1/10^{15}$  S/m로 하였다. 전원의 사용주파수를 2.45 GHz로 두면, 이때 파장은 12.24 cm가 된다. 구형도파관은 WR-340으로 가정하였으며, 이 도파관의 사용주파수 범위는 1.7~2.6 GHz이며, 단면의 크기는  $1.7 \times 3.4$  in이다. 이에 근거하여 구형도파관의 단면 치수인  $a$ 와  $b$ 를 설정하였다.

원통도파관의 기본 모드는 TM<sub>010</sub>이며, 차단주파수는

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \frac{2.4049}{R} \quad (5)$$

이다. 내부가 공기이라면 원통의 반경은 9.37 cm보다 커야 기본모드의 전송이 가능하다. 그리고 TE 모드의 경우 기본모드는 TE<sub>111</sub>이며, 차단주파수는

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{1.8412}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2} \quad (6)$$

가 된다. 따라서 두 모드의 차단 주파수가 같다고 두면, 즉식 (5)과 (6)을 같게 두면  $H/R=2.03$ 이 된다 [5]. 그러므로  $H < 2.03R$  이면 기본모드는 TM<sub>010</sub>이며, 그 역할 경우 기본모드는 TE<sub>111</sub>이 된다. TM<sub>010</sub>를 전송할 경우 사용주파수에 대하여 원통의 반경은 약 4.68 cm 이상이 되어야 하며  $H$ 는 9.5 cm 이하이어야 한다.

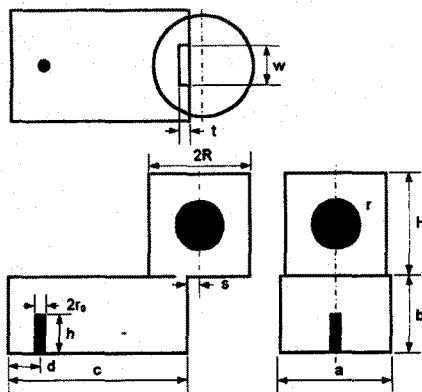


그림 2. 해석 구조(그림 1)의 단면도

표 1. 수치계산에 사용된 치수 (cm)

도파관	$a=8.5$ , $b=4.5$ , $c=12$
원통공동	$R=4$ , $H=9.5$ , $s=1$
유전체	$r=2$
모노풀	$h=2$ , $d=4$ , $r_0=0.05$
결합개구면	$t=1$ , $w=6$

인가전원은 정현전압으로서  $V=V_0 \sin \omega t$ 이며  $V_0=1$  V로 하였다. 시뮬레이션의 최종 시간단계는 1200으로 하였으며, 이는 2.45 GHz의 경우 약 12 주기에 해당된다. 셀의 크기는  $\Delta x=\Delta y=\Delta z=2.5$  mm로 하였다. 정현전압을 인가하여 모델 내부의 전장분포를 계산한 다음, 마지막 반주기 동안 최대치 전장을 이용하여, 이로부터 각 셀의 중심에서 인접하는 4개의 동일성분 전장 평균을 취하였다. 셀 내의 최대치 전장은 각 평

균 전장의 성분을 이용하여  $E^2 = E_x^2 + E_y^2 + E_z^2$ 으로 계산된다.

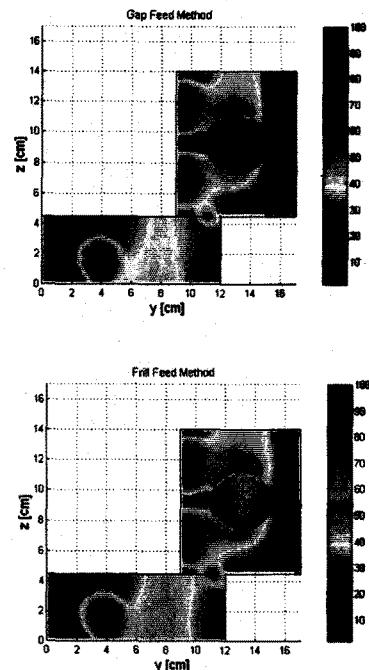


그림 3. 미소간격전원과 프릴전원에 의한 단면의 전장 분포도

그림 3은 표 1의 구조 치수를 근거로 계산된  $yz$  단면의 전장분포를 보이고 있다. 코드의 타당성을 검증하기 위하여 두 가지 방법으로 전원을 인가하여 계산된 전장분포를 비교하였으며, 그림 3에서 보는 바와 같이 전원 인가 기법이 다름에도 불구하고 매우 잘 일치함을 볼 수 있다.

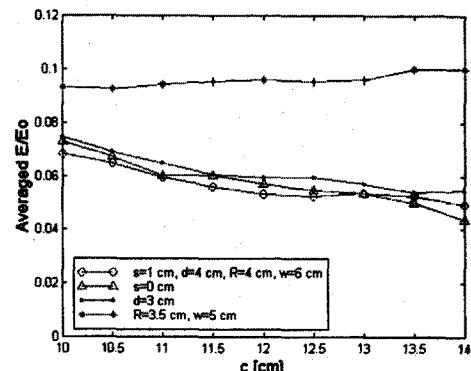


그림 4. 도파관의 길이  $c$ 에 따른 유전체 내부의 평균전장

유전체 내부의 전장 분포에 크게 영향을 미치는 요소를 알아보기 위하여 몇 개의 치수변화를 통하여 시뮬레이션 하였다. 표 1의 치수대로 설정한 다음, 도파관의

$y$ 축 방향 길이  $c$ 를 변화시킴에 따라 유전체 내부의 평균전장을 계산하였으며, 이 결과는 그림 4에서  $s=1$  cm,  $d=4$  cm,  $R=4$  cm,  $w=6$  cm로 표시된 곡선(○)이다. 그림 4에 나타낸 전장은 전원인가 위치의 전장인  $E_0 = V_0 / \Delta z$ 으로 정규화하였다. 도파관의 길이  $c$ 가 증가할수록 유전체 내부의 전장 크기는 감소함을 볼 수 있다. 다음은 그림 2에서 보는 도파관과 공동의 상대적인 위치인  $s=0$  cm로 두고 전장을 계산하였다. 그림 4에 나타낸 이 곡선(△)을 볼 때 원래의 구조  $s=1$  cm일 때 보다 약간 증가하는 듯 보이나 크게 차이는 없다. 또한 모노폴의 위치  $d=3$  cm로 하여 얻은 결과(·)도 거의 유사하다. 그러나 슬롯의 폭과 공동의 반경을 감소시켰을 때 평균전장의 크기는 약 2배가 됨을 볼 수 있다(\*). 즉 원통 크기 변화에 의한 영향이 큼을 볼 수 있으며, 도파관 길이  $c$ 에는 거의 무관함을 볼 수 있다.

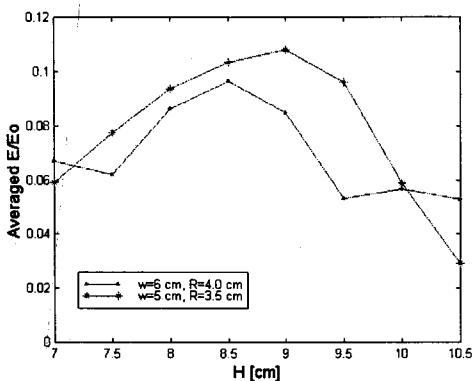


그림 5. 원형공동의 높이  $H$ 에 따른 평균전장

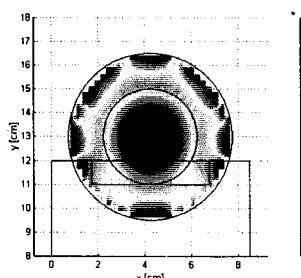
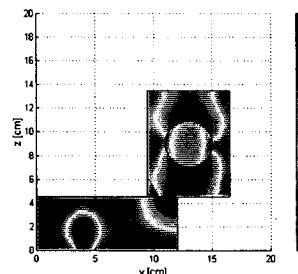


그림 6. 그림 5에서 최대 전장을 가지는 구조의 전장 분포

그림 5는 모든 치수를 표 1과 동일하게 두고 원통의 높이  $H$ 에 따라 계산된 전장을 보이고 있다.  $H$ 가 8.5 cm에서 전장의 값이 최대가 됨을 볼 수 있다(·). 또한 슬롯의 폭과 원통의 반지름을  $w=5$  cm,  $R=3.5$  cm로 감소시킨 다음 동일한 계산을 수행하였다. 이때 그림 5에서 볼 수 있듯이 최대전장을 가지는 높이는 9 cm이었으며, 높이에 의존하는 형태는 동일하였다(\*). 즉 두 곡선 다 최대전장의 상한을 가지는 경향을 보이며, 이는 원통 공진기의 구조에 따라 식(5)와 (6)에 의해 공진주파수가 결정되는 이유이다. 그림 6은 그림 5에서 유전체의 평균 전장이 최대인  $w=5$  cm,  $R=3.5$  cm,  $H=9$  cm일 때 단면의 전장분포를 나타내고 있다.

#### 4. 결론

무전극 전등에 응용되는 도파관과 공동의 결합구조를 시간영역 유한차분법으로 해석하였다. 이를 이용하여 손실 유전체의 흡수전력을 결정하는 최대 전장 분포에 영향을 미치는 변수를 조사하였다. 그 결과 원통공진기의 반지름과 높이 등이 중요한 인자이었으며, 특히 높이의 변화에 따른 영향이 가장 큼을 볼 수 있었다.

본 연구는 1999년도 과학기술부의 정책연구사업 지원에 의한 결과임.

#### (참 고 문 헌)

- [1] A. Taflove, *Computational Electromagnetics: The Finite Difference Time-Domain Method*, Artech House, pp. 51-80, 1995.
- [2] K. S. Kunz and R. J. Luebbers, *Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*, CRC Press, chapter 10, 1993.
- [3] R. Luebbers, L. Chen, T. Uno, and S. Adachi, "FDTD calculation of radiation patterns, impedance, and gain for a monopole antenna on a conducting box," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 40, no. 12, pp. 1577-1583, Dec. 1992.
- [4] R. J. Luebbers and J. Beggs, "FDTD calculation of wide-band antenna gain and efficiency", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 40, pp. 1403-1407, Nov. 1992.
- [5] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*. New York: Wiley, 1989.