

개구면이 존재하는 공진기의 내부 전자기장 해석

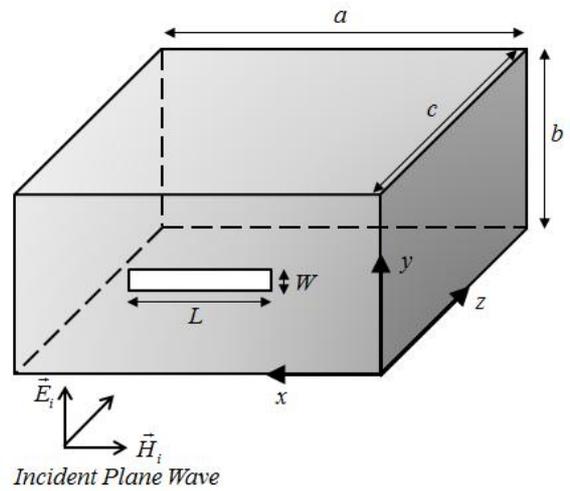
김진혁, 이재중, 정현교
서울대학교

Analysis for Resonance Characteristic of Cavity with Aperture

Jin-Hyeok Kim, Jae-Joong Lee, Hyun-Kyo Jung
Seoul National University

Abstract - 외부에서 발생하는 전자파가 특정 구조물 내에 침투하는 경우, 특히 구조체가 도체로 이루어 졌을 때, 구조체의 크기에 따른 특정 주파수가 공진을 일으켜 내부 PCB(Printed Circuit Board), 회로 등에 악영향을 미친다. 본 논문에서는 개구면이 존재하는 공진기에 전자기파가 입사되는 상황을 모드매칭(MM: Mode Matching)을 이용해서 해석한다. 이때 외부 전자파로 인해 개구면에 생기는 새로운 소스를 표면 등가 이론(Surface equivalence theorem)을 이용하여 등가 자기전류로 모델링하여, 공진기 내·외부의 전자기장을 구한 후 개구면에서 접선성분의 경계조건을 적용시켰다. 본 논문에서 사용된 계산식의 검증을 위해 3차원 유한 요소법(FEM: Finite Element Method)기반의 프로그램인 HFSS를 이용 하였다.

개구면의 벽면에 대한 접선성분의 전기장은 존재하지 않기 때문에 식 (1)에서 x에 대한 함수가 sin형태로 이루어진다. 이 개구면을 자계 전류원(Magnetic Current Density)으로 보면, 표면 등가 원리를 통해 경계면에서의 등가 자계 전류를 다음과 같이 나타낼 수 있다[3].



<그림 1> 개구면을 포함하고 있는 공진기 모델

1. 서 론

특정 구조에 대한 전자파 해석을 할 때 대부분의 경우 그린함수(Green's Function)을 알고 있는 정규구조(Canonical Structure)로 분해할 수 있다. 정규구조물에 대표적인 예로는 직육면체의 구조물, 원통형 구조물 등이 있는데, 이러한 정규구조에 대한 해석은 임의의 구조물에 대한 전자파 해석의 가장 중요한 부분 중 하나이다.

외부에서 발생한 전자파는 확산(diffusion), 개구면(aperture), 도체(conductor)를 통하는 등의 다양한 경로를 통해 공진기 내부 공간으로 침투할 수 있다. 특히 개구면은 공진기 내·외부의 입·출력 회로를 연결하거나 구조물의 통풍구 등으로 사용됨에 있어 필수적인 부분이라 할 수 있기 때문에 대부분의 구조 해석에 보이는 대표적인 침투 경로이다. 특정한 주파수를 가진 외부 필드에 대하여 이 개구면은 효율적인 안테나의 역할을 하여 내부 전계에 큰 영향을 미치게 된다. 또한 반대로 공진기 내부 회로에서 발생하는 전자파에 의하여 주변 장비에 전자기적 간섭을 발생시킬 수도 있다[1].

본 논문에서는 육면체 기반 구조물에 존재하는 개구면을 통해 외부 전자기장이 침투하는 경우를 초점에 두고 구조체 내부의 전계를 분석하고자 한다. 내·외부의 전계를 비교하여 특정 구조체가 외부 필드에 노출되었을 때 어떤 주파수에서 취약한지를 예측한다. 수식전개를 통한 결과는 3차원 Full-wave Simulation결과와의 비교를 통해 검증하였다.

2. 본 론

2.1 공진기 내부 필드 계산

그림 1은 한 개의 사각형 모양의 개구면을 포함한 공진기 모델을 보여주고 있다. 이 육면체 모양의 공진기는 표 1과 같은 제원을 가졌으며, 개구면은 z=0인 표면의 정중앙에 위치하고 있다. 실제 상황에서는 여러 가지 입사하는 경우가 있지만, 본 연구에서는 최악의 상황을 가정하여 개구면에 대하여 수직으로 외부 전계가 입사한다고 가정하였고, 개구면의 크기가 가장 큰 x방향으로의 성분만 존재한다고 가정하였다[나사 3]. 이러한 경우 외부 필드로부터 개구면에 인가된 수평 전계는 TE(Transverse Electric)나 TM(Transverse Magnetic)모드의 전계를 변수 분리법을 이용하여 구할 수 있으며, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다[2].

$$\vec{E}_{apt} = \sum_p \sum_q \hat{y} U \sin\left(\frac{p\pi}{L}\left(\frac{L}{2} + x - x_{cr}\right)\right) \cos\left(\frac{q\pi}{W}\left(\frac{W}{2} + y - y_{cr}\right)\right) \quad (1)$$

식 (1)에서 (x_{cr}, y_{cr}) 은 개구면의 중심좌표이고, U는 pq모드에서의 전계의 크기를 나타낸다. 또한 L과 W는 각각 개구면의 폭과 높이이며, \hat{y} 는 전기장이 y방향만을 가지고 있음을 암시한다. 입사되는 전기장의 방향이 y성분만을 갖기 때문에 개구면에서도 y성분만을 보이게 되며,

$$\vec{M}_s = -2\hat{n} \times \vec{E}_{apt} = -2 \sum_p \sum_q \hat{x} U_{pq} \sin\left(\frac{p\pi}{L}\left(\frac{L}{2} + x - x_{cr}\right)\right) \cos\left(\frac{q\pi}{W}\left(\frac{W}{2} + y - y_{cr}\right)\right) \quad (2)$$

이 때 Ψ_{pq} 는 개구면에서의 임의의 관찰점 (x, y, z) 에서 x방향 자계 전류에 대한 pq 번째 특성 함수로 정의하고 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\Psi_{pq} = \sin\left(\frac{p\pi}{L}\left(\frac{L}{2} + x - x_{cr}\right)\right) \cos\left(\frac{q\pi}{W}\left(\frac{W}{2} + y - y_{cr}\right)\right) \quad (3)$$

식 (2)의 등가 자계 전류로 인해서 공진기 내부에 산란되는 필드는 전기

<표 1> 공진기 모델의 제원

Cavity Characteristics	
Dimension [mm]	300 × 300 × 150
Aperture [mm]	100 × 5
Material	Copper

벡터 포텐셜 \vec{F} 를 이용하여 구할 수 있고, 이는 다음과 같은 식을 따른다[4].

$$\vec{F} = \frac{\epsilon_0}{4\pi} \int_{Ap} 2 \frac{\vec{M}_s}{R} e^{-jk_0 R} ds \quad (4)$$

$$\vec{E} = -\frac{1}{\epsilon_0} \nabla \times \vec{F} \quad (5)$$

$$H = -\frac{j\omega}{k_0^2} (k_0^2 \vec{F} + \nabla(\nabla \cdot \vec{F})) \quad (6)$$

식 (4)에 나타난 개구면에서의 등가 전류에 의한 벡터 포텐셜 \vec{F} 를 식 (5)와 식 (6)에 대입하여, \vec{M}_s 에 의해 산란되는 필드값을 구할 수 있으며, 여기서 \vec{R} 은 소스와 관찰점 사이의 거리 벡터를 의미한다.

공진기 외부, 즉 $z < 0$ 의 영역에서의 전자기장은 입사파와 산란파의 합으로 볼 수 있다. 개구면에서 자기장의 접선성분이 연속임을 이용하기 위해, $z=0$ 인 곳, 즉 개구면에서의 자기장의 접선성분을 표현하면 식 (7)과 같이 나타내어진다.

$$H_{xi} + \sum_{p,q} \frac{\omega \epsilon_0 U_{pq}}{4\pi^2 k_0^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{pqx} \frac{(k_0^2 - k_x^2)}{k_y} e^{jk_x x + jk_y y} dk_x dk_y \quad (7)$$

여기서 k_I 는 외부에서(영역 I)에서의 전파상수이고, k_x 와 k_y 는 각각 x와 y방향으로의 파수, 그리고 ψ_{pqx} 는 식 (3)의 Ψ_{pqx} 의 푸리에 변환을 나타낸다.

또한 공진기 내부의 벡터 포텐셜 \vec{F} 를 사각 공진체의 dyadic Green's function을 이용해서 나타낸 후, 식 (6)을 이용해 내부 자기장의 접선성분은 다음과 같이 구할 수 있다[5].

$$\begin{aligned} \frac{-j\omega}{k_0^2} \sum_{p,q} U_{pq} \sum_{m,n} \frac{-\epsilon_0}{k_I} \frac{\epsilon_{0m} \epsilon_{0n}}{ab \sin(k_I c)} \left(k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \right) \sin\left(\frac{m\pi x}{a} \right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b} \right) \\ \cos(k_I c) \iint_q \Psi_{pqx}(x', y') \sin\left(\frac{m\pi x'}{a} \right) \cos\left(\frac{n\pi y'}{b} \right) dx' dy' \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서 k_I 와 ϵ_{0m} 은 다음과 같은 조건에 의해 결정된다.

$$k_I = \sqrt{k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2} \quad \text{for } k_0^2 \geq \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \quad (9a)$$

$$k_I = -j \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 - k_0^2} \quad \text{for } k_0^2 \leq \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \quad (9b)$$

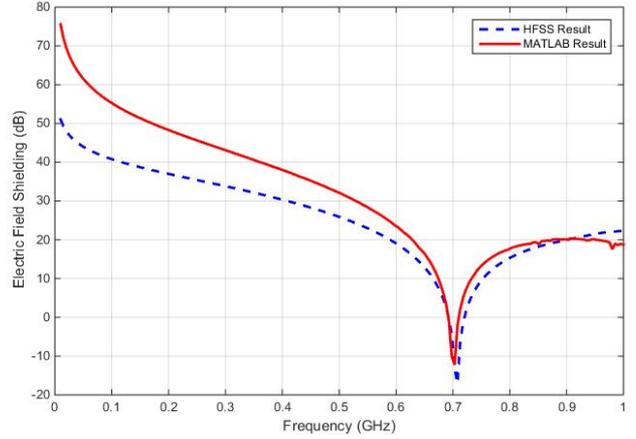
$$\begin{aligned} \epsilon_{0m} &= 1 \quad \text{for } m = 0 \\ \epsilon_{0m} &= 2 \quad \text{for } m \neq 0 \end{aligned}$$

한편, 개구면에서 외부와 내부 전자기장의 접선성분이 연속이어야 하기 때문에, 식 (7)과 식 (8)의 값은 같아야 한다. 이 특성을 통해 pq 모드에서의 전계 크기 상수 U_{pq} 를 구할 수 있고, 식 (7)-(8)을 연립한 후 미지수를 구하기 위해 $\Psi_{p'q'x}^*$ 를 테스트 함수로 하는 Galerkin's method가 적용되었다[6].

2.2 계산 결과 및 비교

위에서 유도한 수식을 이용하여 공진기 내부 전기장 차폐 효과를 도출한다. 이때 주파수 범위는 1MHz부터 1GHz 까지 5MHz 단위로 계산하였다. 주파수 범위를 1GHz로 한정 지은 이유는 본 논문에서 제시한 크기의 공진기가 갖는 특성 주파수가 이론적으로 약 707MHz이기 때문에 위와 같은 범위로 계산하였다. 이때 크기에 따른 이론적 공진 주파수는 식 (10)과 같다[3].

$$(f_r)_{TE}^{TE} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 + \left(\frac{p\pi}{c} \right)^2} \quad (10)$$



<그림 2> 개구면을 포함하고 있는 공진기 모델의 주파수별 공진 특성

내부 전계 측정지점은 공진기의 정중앙에 위치하였고 개구면에서 가장 지배적인 모드인 $p=1, q=0$ 모드와 공진기 내부에서 가장 지배적인 모드인 $m=1, n=0$ 모드만을 고려하였다.

그림 2는 앞서 설명한 공진기 내부 전기장 차폐효과를 도시하였다. 이론적 값과 거의 같은 위치에서 공진이 일어나는 것을 확인할 수 있으며, 3차원 수치해석 프로그램 역시 거의 유사한 결과를 보여주고 있다.

메트랩을 통한 계산 결과와 수치해석결과의 차이는 본 연구에서 공진기와 개구면의 지배모드만을 사용한 것에서 기인한다고 볼 수 있다. 높은 차수의 모드를 고려하면 위의 결과의 차이는 더 줄어들 것이라 예상된다.

3. 결 론

본 논문에서는 개구면을 통해 구조체 내부로 침투한 외부 전자기장에 의해 내부에 발생하는 공진 현상을 분석하기 위해 Mode Matching법을 이용하여 수식을 전개하였다. 이렇게 전개된 수식은 단일 공진기의 특성을 잘 반영하였으며, 유한요소법 기반의 시뮬레이션 결과와의 비교를 통해서 정확성을 검증하였다. 본 논문에서 사용된 수식전개는 유한요소법에 의한 해석에 비해 비교적 간단한 행렬계산을 통한 전자기 해석이 가능하기 때문에, 빠른 해석이 가능하다는 장점을 가지고 있지만, 정규모조의 그린함수를 이용하는 만큼 복잡한 구조에 대한 해석능력이 떨어진다는 단점이 있다. 하지만 공진체의 크기에 대한 정보만으로 빠른 시간 안에 내부에서 발생하는 전기장과 자기장을 분석적으로 계산하여 그 개형을 예측할 수 있었고, 상당히 신뢰성 높은 결과를 얻어낼 수 있었다. 앞으로 본 논문의 수식을 개선하여 구조체의 다양한 위치에 존재하는 두 개 이상의 개구면을 통한 내·외부 필드계산도 가능할 것이며, 이는 전자 시스템의 전자기파 적합성을 예측 및 분석하는 연구에 도움이 될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Frederick M. Tesche, Michael V. Ianoz, and Torbjorn Karlsson, *EMC Analysis Methods and Computational Models*, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [2] M. D. Deshpande, "Electromagnetic Field Penetration Studies", *NASA/CR-2000-210297*, June, 2000.
- [3] Constantine A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- [4] C. J. Reddy and M. D. Deshpande, "User's Manual for CBS3DS Version 1.0," NASA Contractor Report 198236, Oct. 1995.
- [5] M. D. Deshpande, "Analysis of Discontinuities in a Rectangular Waveguide Using Dyadic Green's Function Approach in Conjunction with Method of Moments," *NASA/CR-201692*, April 1997.
- [6] Robinson, Martin Paul, et al. "Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures," *Electromagnetic Compatibility*, IEEE Transactions on 40.3, pp. 240-248, August 1998.