

전자기 토폴로지 기법에서의 오차 추정 및 적응적 정션 세분화 연구

A Study of Error Estimation and Adaptive Junction Subdivision for Electromagnetic Topology

박 윤 미 · 정 용 식* · 정 현 교**

Yoon-Mi Park · Young-Seek Chung* · Hyun-Kyo Jung**

요 약

전자기 토폴로지 기법은 복잡한 대상을 전자기 결합 경로에 따라 단순화시키고, 연속적인 해석 영역을 분할하여 각 절점에서의 해를 구하는 방법이다. 따라서 복잡한 대형 시스템에서의 전자기 결합 현상을 해석하는 데에 장점을 갖고 있지만, 해석 대상의 단순화된 모델링으로 인한 오차가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 power balance method에 기초하여 전자기 토폴로지 기법에서의 오차를 추정하고 정션을 세분화함으로써 다양한 공진기 모델에서의 전도성 및 복사성 전자파 특성을 해석하였다. 해석 결과를 통해 세분화에 따른 정확도 개선 효과를 확인하였고, 시간 영역 유한 차분법 결과와 비교하여 소요 시간과 메모리 단축 효과를 확인할 수 있었다.

Abstract

Electromagnetic topology simplifies a complex analysis area in accordance with electromagnetic coupling. And then electromagnetic topology divides the simplified continuous area into sub-areas and analyzes electromagnetic problems at the sub-areas. Therefore electromagnetic topology has a merit to analyze the electromagnetic coupling in large and complex systems, however simplified modeling technique can generate large errors. In this paper, power balance method is used to estimate errors and subdivide junctions in the electromagnetic topology. The method is applied to analyze conducted and radiated electromagnetic coupling in two kinds of cavity models. Improvement of accuracy was accomplished in accordance with junction subdivision. Moreover we could save computation time and memory comparing with FDTD results.

Key words : Adaptive Junction Subdivision, Electromagnetic Topology, Error Estimation, Power Balance Method

I. 서 론

고출력 전자기파 펄스는 전기적 장비의 물리적인 손상 및 오작동을 일으킬 수 있는 강력하고 순간적

인 전자기적 충격파를 말한다. 최근 고출력 전자기파 펄스 발생 장비의 보편화로 대형 전자 시스템에 대한 고출력 전자기파 펄스의 위협이 증가하고 있어, 사전에 이를 모의하고 대책을 세우고자 하는 노

한국전자통신연구원 부설연구소(The Attached Institute of ETRI)

*광운대학교 전자융합공학과(Department of Electronics Convergence Engineering, Kwangwoon University)

**서울대학교 전기·정보공학부(Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University)

· Manuscript received December 3, 2012 ; Revised April 5, 2013 ; Accepted April 30, 2013. (ID No. 20121203-136)

· Corresponding Author : Yoon-Mi Park (e-mail : iamyum@ensec.re.kr)

력이 필요하게 되었다.

기존의 3D 전자기 해석 기법을 이용하여 대형 전자 시스템 환경에서 고출력 전자기파 펄스의 전자파 특성을 해석하는 데에는 요소 분할의 어려움이 있다. 특히, 대형 시스템의 큰 공간을 저주파 대역에서 고주파 대역까지 한 번에 해석하기 위한 작은 요소로 분할하면 많은 수의 요소가 필요하므로, 상당한 메모리가 요구되며, 또한 계산 시간도 많이 소요된다^[1].

따라서 1974년에 C. E. Baum은 대형 시스템에서의 전자기 결합 현상을 해석하기 위하여 공간 분할의 개념을 기초로 한 전자기 토폴로지 기법을 제안하였다^[2]. 대형 시스템에서 고출력 전자기파 펄스의 전자기 결합 현상을 해석할 시에 기존의 3D 수치해석 기법은 해석 시간과 메모리가 많이 소요되지만, 전자기 토폴로지 기법은 공간 분할 후 나누어진 공간별로 해석하므로 시간과 메모리를 줄일 수 있는 장점이 있다.

전자기 토폴로지 기법을 이용한 전자 시스템에서 전도성 및 복사성 전자기 결합 현상의 해석은 다음과 같은 순서로 진행된다. 먼저, 해석 대상의 물리적 구조와 전자기 결합 경로를 파악한다. 구조와 전자기 결합 경로에 따라 해석 도메인을 분할한 후, 도메인 간에는 전자기 결합 경로에 따라 네트워크로 연결하여 토폴로지 네트워크를 생성한다. 토폴로지 네트워크에서는 분할된 공간과 케이블들의 주파수 특성을 재조립하여 전체 해석 대상의 주파수 영역 특성 혹은 시간 영역 특성을 모의할 수 있다^[3].

전자기 토폴로지 기법은 연속적인 해석 영역을 에너지 전달 경로를 따라 정선과 튜브로 해석 영역을 분할하여 연속적인 해가 아닌 각 절점에서의 해를 수치상으로 구하는 방법이다. 이전에 제안되었던 전자기 토폴로지 기법에서는 개구부를 단일 정선으로 모델링 했지만^[3], 해석 시스템의 창문이나 환기구 등 개구부가 큰 경우에 단일 정선으로 모델링하면 해석 결과가 부정확해진다. 따라서 연속적인 해석 영역을 어떻게 분할하는가에 따라 해석 결과의 신뢰성에 영향을 미치게 된다^[4].

일반적으로 영역을 세밀하게 분할하는 경우 해석의 정확도가 향상되지만 정선 증가에 따른 해석 시간 또한 증가한다. 따라서 power balance(PWB)에 따

라 세분화가 필요한 부분의 정선 밀도를 조절하는 적응적 정선 세분화 기법이 제안되었다^[5].

본 논문에서는 제안된 방법을 EMP 방호 시설에서의 전자기 결합 현상 해석에 적용하기 위한 연구의 일환으로, 개구부를 포함한 공간기에서의 전도성 및 복사성 전자기 결합을 하이브리드 전자기 토폴로지 기법으로 먼저 해석하고, PWB에 기초하여 오차를 추정하였다. 추정된 오차를 바탕으로 정선을 세분화함으로써 정확도가 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 시간 영역 유한 차분법과의 해석 소요 자원 비교를 통해 전자기 토폴로지 기법의 장점인 소요 시간과 메모리 절약 효과를 확인할 수 있었다.

II. PWB를 이용한 오차추정 및 적응적 정선 세분화 기법

전자기 토폴로지 기법의 정확도를 개선하기 위해서는 어떻게 오차를 추정하고 정선을 세분화할 것인가에 관한 판단 기준이 필요하다. 본 논문에서는 PWB 기법을 이용하여 전자기 토폴로지 기법으로 계산된 결과의 오차를 계산하고, 결과에 따라 정선 세분화 정도를 결정할 것을 제안하였다.

실제 우리의 전자기 환경은 TV, PC 등 많은 전자 제품과 핸드폰, 기지국 등의 통신 장비가 개구부가 포함된 semi-closed 공간에서 다양한 전자파를 방출하고 있는 모습이다. 이러한 공간에서는 많은 모드가 존재하고, 다양한 각도로 전자파 반사가 발생하게 되므로 교반형 잔향실과 비슷한 동작 특성을 보인다. 그러므로 공간 내의 정확한 위치와 특정 주파수 대역에서의 전자기장은 계산하기가 어려운 실정이다.

PWB는 거시적인 관점에서 공간기 내부로 침투하는 전자기장 에너지의 양과 질을 분석하는 기법으로 전기적으로 크거나 복잡한 시스템 내부 구조와 정확한 위치를 반영하여 전자기 현상을 모델링하는 것이 아니라 평균값을 이용하여 모델링한다. 여기에서의 평균값은 고정된 시간에서 공간 내의 모든 표본 집합들의 평균인 앙상블 평균(ensemble average)이다.

K. S. H. Lee와 C. L. Gardner 그리고 I. Junqua는 전기적으로 큰 공간기 내부에 케이블이 위치하고 있는 대상에서의 전자기 현상을 모의하기 위해 PWB

를 적용하였다^{[6]~[8]}. 전기적으로 크고 내부가 복잡한 공진기는 내부에 많은 모드가 존재하고, 다양한 각도로 전자기 반사가 빈번하게 발생하는 특성 때문에 pseudo-mode stirring chamber처럼 동작하므로 공진기 내·외부에서의 전자기장 전달 특성을 해석하는 데에 PWB를 적용할 수 있다^[9].

본 논문에서는 실제 전자기 환경을 전기적으로 크기가 크고 내부가 복잡한 공진기로 가정한다. 전자기 토폴러지 기법을 이용하여 전자기 현상을 해석한 후 통계적인 방법인 PWB에 근거하여 정확도를 판단한 후 정선의 세분화를 통해 정확도를 개선하였다.

PWB의 기본 원리는 정상 상태에서 개구부를 통과하여 전달된 전력(P_t)은 공진기 내에서 소비된 전력(P_d)과 같아야 한다는 것이다^[10].

$$P_t = P_d \quad (1)$$

그림 1과 같은 전자 시스템의 개구부 transmission coupling cross section이 σ_t 라면 개구부에 전달된 전력(P_t)은 식 (2)와 같이 입사 전력 밀도(S_i)와 σ_t 의 식으로 정의할 수 있다.

$$P_t = \sigma_t S_i \quad (2)$$

공진기 내부 소비 전력(P_d)은 공진기의 양호도(Q)의 정의에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다^[9],^[10]. 여기서 f 는 주파수, U_s 는 공진기 내부의 정상 상태 에너지이다.

$$P_d = 2\pi f \frac{U_s}{Q} \quad (3)$$

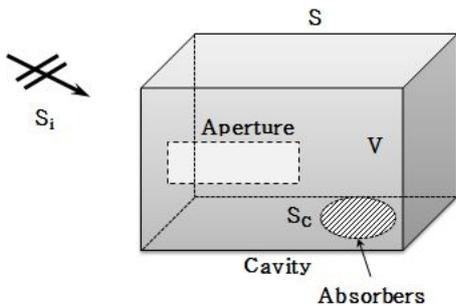


그림 1. 단일 개구부를 포함하고 있는 공진기 모델
Fig. 1. A cavity model including an aperture.

공진기 내부의 에너지 밀도는 모든 곳에서 균일하다는 가정 하에, 공진기 내부의 정상 상태 에너지 U_s 는 평균 에너지 밀도 W 와 체적 V 의 곱으로 정의할 수 있다.

공진기 내부의 에너지 밀도는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$W = \epsilon_0 E^2 \quad (4)$$

이 때 E 는 전계 강도이고 ϵ_0 는 자유공간에서의 전기적인 유전율이다. 에너지 밀도는 균일하므로 E^2 은 앙상블 평균으로 해석되어야 한다^[10].

그리고 공진기에서의 전력 밀도 S_c 는 다음 식 (5)와 같이 정의할 수 있고, 전력 밀도 역시 앙상블 평균으로 해석되어야 한다. 여기서 η_0 는 진공 투자율이고 c 는 빛의 속도이다.

$$S_c = \frac{E^2}{\eta_0} = cW \quad (5)$$

식 (2)~(5)를 (1)에 대입하면 식 (6)과 같이 입력 전력 밀도와 공진기의 전력 밀도의 관계식을 구할 수 있다.

$$S_c = \frac{\sigma_t \lambda Q}{2\pi V} S_i \quad (6)$$

차폐 효과(SE)는 전력 밀도가 공진기 내에서 균일하다고 가정하여 식 (7)에서 정의된 입력 전력 밀도와 공진기의 전력 밀도의 비로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} SE &= 10 \log_{10} \left(\frac{S_i}{S_c} \right) \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{2\pi V}{\sigma_t \lambda Q} \right)_i \end{aligned} \quad (7)$$

그림 1에서 공진기 내부 소비 전력(P_d)은 벽 손실, 유전체 흡수 손실, 개구부 재방사 손실의 합으로 정의할 수 있으므로, 식 (3)에서의 양호도 Q 는 다음 식 (8)과 같이 정의할 수 있다^[9]. 여기서 Q_c 는 공진기의 벽 손실 양호도, Q_a 는 공진기 내 유전체 흡수 손실 양호도, Q_r 는 개구부 재방사 손실 양호도이다.

$$Q = \left(\frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_a} + \frac{1}{Q_r} \right)^{-1} \quad (8)$$

양호도 Q_C 는 다음 식 (9)와 같이 구할 수 있다. 본 논문에서는 모든 입사각의 평면파와 편파된 평면파들의 손실을 평균하여 구하는 잔향실에서의 벽 손실 계산 방법과 같은 원리를 이용한다^[11]. 여기서, P_C 는 공진기 벽에서 손실된 전력, U_e 는 공진기 내 전기 에너지이다.

$$Q_C = \frac{2\omega U_e}{P_C} \tag{9}$$

일반적으로 absorption cross section(σ_a)은 입사각의 입사각과 편파와 밀접한 관계가 있다^[12]. 대형 공진기 내부의 전자기장은 모든 입사각의 평면파와 편파된 평면파들의 합으로 나타낼 수 있으므로^[13], 양호도 Q_a 는 식 (10)과 같이 정의할 수 있다. 여기서 $\langle \sigma_a \rangle$ 는 averaged absorption cross section이다.

$$Q_a = \frac{2\pi V}{\lambda \langle \sigma_a \rangle} \tag{10}$$

공진기 개구부에서의 재방사 손실은 자유 공간과 공진기 내부 사이의 전달 특성을 나타내어 주는 transmission coupling cross section(σ_t)으로 나타내어질 수 있으므로 양호도 Q_r 은 다음 식 (11)과 같다.

$$Q_r = \frac{2\pi V}{\lambda \langle \sigma_t \rangle} \tag{11}$$

여기서 $\langle \sigma_t \rangle$ 은 averaged transmission coupling cross section이다.

개구부 이론에서는 개구부의 크기를 전기적으로 클 때, 작을 때 그리고 파장과 비슷할 때의 세 가지로 구분하여 $\langle \sigma_t \rangle$ 를 정의한다. 본 논문에서 앞으로 해석할 모델은 개구부는 길이가 긴 특징을 가지므로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \langle \sigma_t \rangle &= \langle A \cos \theta \rangle \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\frac{\pi}{2}} A \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta \\ &= \frac{A}{2} \end{aligned} \tag{12}$$

여기서 A 는 개구부의 면적이고, θ 는 입사 양각이다^[9]. 식 (8)~(12)를 식 (7)에 대입하면 PWB에 기초하여 SE를 구할 수 있다. 이처럼 계산된 SE는 전자기 토폴로지 기법을 이용하여 계산된 SE와 비교함으로써

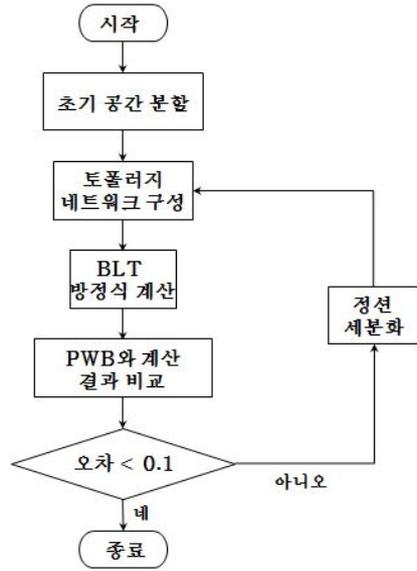


그림 2. 개선된 전자기 토폴로지 기법의 알고리즘 흐름도

Fig. 2. The algorithm flow chart of the proposed method.

써 전자기 토폴로지 기법의 정확성 판단 기준이 된다. SE 값의 비교를 통해 계산된 오차가 크면 오차가 충분히 작아질 때까지 정선의 세분화를 통해 정확도를 개선하게 된다.

전자기 토폴로지 기법에서 정선 세분화의 물리적인 의미는 전자기 커플링 경로를 세분화하는 것이다. 따라서 정선을 세분화해야 할 위치는 커플링 경로를 세분화해야 할 위치를 의미한다. 그림 1과 같이 개구부를 포함한 공진기에서는 개구부를 통해 공진기 외부와 내부의 전자기장이 커플링되므로 개구부를 세분화함으로써 커플링 경로를 세분화할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 개구부를 세분화함으로써 전자기 토폴로지 기법의 정확도를 개선하게 된다.

그림 2는 본 논문에서 제안된 전자기 토폴로지 기법의 오차 추정 및 적응적 정선 세분화 알고리즘을 보여준다. 알고리즘의 순서는 다음과 같다. 토폴로지 접근법에 근거하여 초기 공간을 분할하고 토폴로지 네트워크를 구성한다. 토폴로지 네트워크에서 BLT 방정식을 계산해서 각 정선에서의 주파수 특성을 계산한다. 본 논문에서는 각 정선에서의 전계 강도 주파수 특성을 계산하여 SE를 계산한다. PWB에 기초하여 계산된 SE와의 비교를 통해 오차를 계산

하고, 오차의 종료 조건이 만족되지 않으면 정선의 세분화를 통한 새로운 토폴로지 네트워크를 구성해 오차를 점차 줄여나간다. 이와 같은 과정은 오차가 충분히 작아져 종료 조건을 만족할 때까지 반복된다.

III. 해석 사례

3.1 단일 개구부를 포함한 공진기에서의 복사성 전자기 결합 해석

그림 3은 단일 개구부를 포함한 공진기 모델을 나타내고, 표 1은 공진기 모델의 치수를 보여준다. 개구부를 포함한 공진기 모델은 이전의 논문에서 제안되었던 토폴로지 접근법에 따라 자유 공간의 무한지점, 개구부와 자유 공간의 경계, 개구부와 공진기의 경계, 공진기 내 관찰 지점을 정선으로 정의한다.

각 정선과 튜브에서의 전자기장 전파 특성은 이전 논문에서 제안된 analytical formulation에 기초한 하이브리드 전자기 토폴로지 기법을 이용하여 모델링한다^[3].

초기 해석 시에 개구부는 단일 정선으로 모델링되었고, 계산된 공진기 중심에서의 전계 강도는 그림

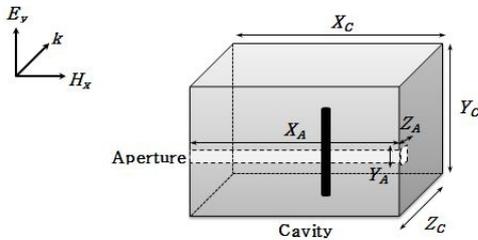


그림 3. 단일 개구부와 케이블을 포함하고 있는 공진기
Fig. 3. The cavity model including an aperture and a cable.

표 1 단일 개구부를 포함한 공진기의 치수

Table 1. The parameters of the cavity model including an aperture.

파라미터	값	파라미터	값
X_C	1,000 mm	X_A	990 mm
Y_C	1,000 mm	Y_A	5 mm
Z_C	500 mm	Z_A	5 mm

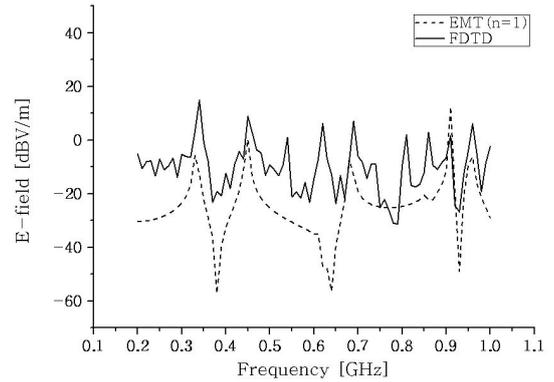


그림 4. 전자기 토폴로지(n=1)와 시간 영역 유한 차분법을 이용한 공진기 중심의 전계 강도 해석 결과 비교

Fig. 4. E-field comparison with EMT(n=1) and FDTD at the center of the aperture-backed cavity.

4와 같다.

그림 4에서 점선은 개구부를 단일 정선으로 모델링 시 전자기 토폴로지 해석 결과이고, 실선은 시간 영역 유한 차분법 해석 결과이다. 0.2~1 GHz 대역에서 전자기 토폴로지 해석 결과는 시간 영역 유한 차분법 해석 결과와 많은 차이를 보인다. 따라서 개구부의 단일 정선 모델링으로는 해석이 어렵고, 정선의 세분화가 필요함을 확인할 수 있다.

그림 5는 개구부의 세분화에 따른 토폴로지 네트워크를 보여준다. 개구부를 세분화할수록 공진기 내부로 침투하는 전자기장의 복사성 경로를 자세하게 모델링 할 수 있다. 그림 5와 같이 개구부를 세분화해서 토폴로지 네트워크를 구성하여 SE를 구한 후, PWB에 기초한 SE 결과와 비교하여 세분화 밀도를

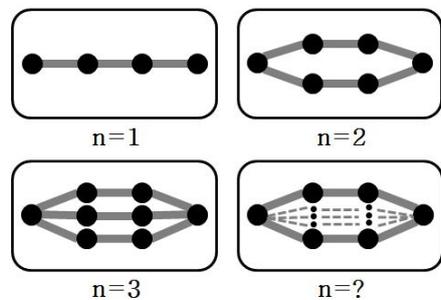


그림 5. 정선 세분화에 따른 토폴로지 네트워크
Fig. 5. The topology networks in accordance with junction subdivision.

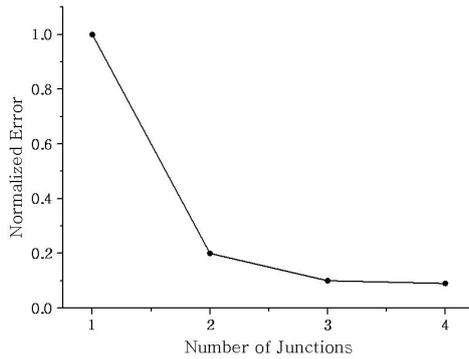


그림 6. 정선 세분화에 따른 오차
Fig. 6. The errors in accordance with junction subdivision.

결정하였다.

그림 6은 정선 세분화에 따른 오차의 개선 효과를 보여준다. 개구부를 세분화했을 때 점차 오차가 감소하는 모습을 보이며, 특히 3개로 세분화했을 때부터 정규화된 오차가 0.1에서 수렴하는 모습을 보인다. 본 논문에서는 전자기 토폴로지 기법과 PWB에 의해 계산된 SE의 정규화된 오차가 0.1보다 작아지면 세분화를 종료하는 것으로 한다. 따라서 그림 3의 해석에서는 개구부를 3개의 정선으로 모델링하는 것이 적합하다고 판단할 수 있다.

정선을 3개로 세분화하여 해석한 결과($n=3$)는 그림 7과 같다. 단일 정선으로 모델링한 그림 4와 비교한 결과, 정선을 세분화함으로써 평균 오차가 7.3

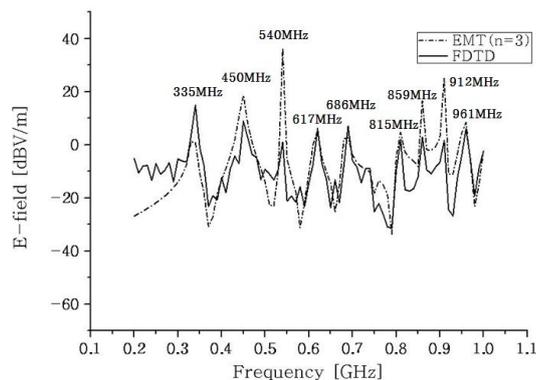


그림 7. 전자기 토폴로지($n=3$)와 시간 영역 유한 차분법을 이용한 공진기 중심에서의 전계 강도 해석 결과 비교

Fig. 7. E-field comparison with EMT($n=3$) and FDTD at the center of the aperture-backed cavity.

표 2. 단일 개구부 모델 해석 소요 자원 비교(세분화된 전자기 토폴로지, 시간 영역 유한 차분법)
Table 2. Used resources comparison with subdivided EMT and FDTD for the aperture-backed cavity.

Subdivided EMT		FDTD	
Time	Memory	Time	Memory
9 s	2,160 kB	1 m 22 s	42,804 kB

dB 개선되었고, 공진기의 모든 공진주파수와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

이번 결과에서는 모든 해석 영역을 해석하지 않고, 전자기 커플링 경로에서만 해석했지만, 필요한 부분만 경로를 세분화함으로써 3D 전자기 해석과 유사한 결과를 얻었다. 또한, 외부에서 입사된 전기장이 공진기 내부에서 높은 수치로 잔존하는 주파수 성분들을 확인함으로써 공진기 내부 전자 장비의 취약 주파수 성분들도 확인할 수 있었다.

단일 개구부 모델 해석 시 소요 시간과 메모리를 표 2에서 비교하였다. 세분된 전자기 토폴로지 기법으로 해석 시에는 9초가 소요되었고, 메모리는 약 2,200 kB가 소요되었다. 반면, 시간 영역 유한 차분법으로 해석 시에는 1분 22초가 소요되었으며, 메모리는 약 43,000 kB가 소요되어 전자기 토폴로지 기법은 계산 시간과 메모리 소비 측면에서 유리한 해석 기법임을 확인할 수 있었다.

3-2 단일 개구부를 포함한 공진기에서의 전도성 전자기 결합 해석

문틈이나 환기구 등의 개구부를 통해 침투한 전자기장은 내부 케이블과 전자기 결합되어 표면 전류를 유지시킨다. 따라서 공진기 내부의 전자기장이 전도성 전자기 결합에 영향을 준다.

그림 3의 단일 개구부를 포함한 공진기 모델 내부 케이블에서의 전도성 전자기 결합 현상을 해석하였다. 내부에 있는 케이블의 길이는 50 mm이고, y 방향으로 길게 위치하고 있다. 해석 알고리즘은 다음과 같다. 하이브리드 전자기 토폴로지 기법을 이용하여 개구부를 통해 공진기 내부 케이블의 주변으로 침투한 전기장을 먼저 계산하고, 계산된 전기장이 케이블에 커플링되어 유지되는 전류를 식 (13), (14)의 pocklington 방정식에 대입하여 계산한다^[3]. 이러한

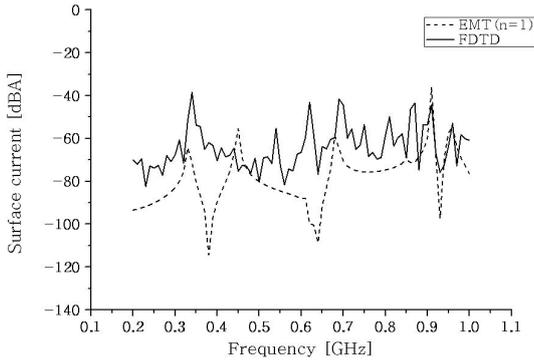


그림 8. 전자기 토폴로지(n=1)와 시간 영역 유한 차분법을 이용한 공진기 내 케이블에서의 표면 전류 해석 결과 비교

Fig. 8. Surface current comparison with EMT(n=1) and FDTD on the cable in the aperture-backed cavity.

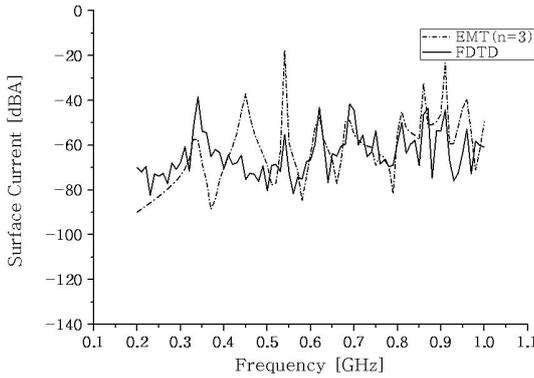


그림 9. 전자기 토폴로지(n=3)와 시간 영역 유한 차분법을 이용한 공진기 내 케이블에서의 표면 전류 해석 결과 비교

Fig. 9. Surface current comparison with EMT(n=3) and FDTD on the cable in the aperture-backed cavity.

알고리즘에서는 케이블로의 커플링만 고려되고, 케이블에서 다시 재방사하는 현상은 고려되지 않는다^[14]. 여기서, l 은 케이블 길이, y' 는 관찰점, R 은 소스와 관찰점 사이의 거리, E_y' 는 관찰점 주변의 전계 강도이다.

$$\int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} I_y(y') \left[\left(\frac{\partial^2}{\partial^2 y} + k^2 \right) G(y, y') \right] dy' = -j\omega\epsilon E_y' \quad (13)$$

$$G(y, y') = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} d\phi' \quad (14)$$

그림 8은 개구부를 단일 정선으로 나타내어 공진기 내부 케이블에 유기된 표면 전류를 해석한 결과를 보여준다. 단일 정선으로 모델링 시 전자기장 해석에 많은 오차가 있었기 때문에 표면 전류 결과, 역시 많은 오차가 발생하였고, 그에 따라 세분화가 필요하게 되었다.

그림 9는 개구부를 3개의 정선으로 세분화하여 해석한 결과이다.

케이블 표면 전류 결과, 역시 단일 정선으로 모델링했을 때보다 오차가 급격히 감소한 모습을 확인할 수 있다.

정선을 세분화함으로써 5 dB의 평균 오차 감소 효과가 나타났으며, 450 MHz의 공진을 제외하고 그 외의 모든 공진 주파수는 시간 영역 유한 차분법 해석 결과와 일치하는 모습을 보였다.

3-3 환기구를 포함한 공진기 내 전기장 해석

다음으로는 그림 10과 같이 환기구를 포함하고 있는 공진기 모델을 해석하였다. 치수는 표 1과 같으며, 환기구 간 거리는 15 mm이다. 3개의 환기구를 포함하고 있는 공진기 모델의 초기 토폴로지 다이어그램은 자유 공간의 무한 지점, 환기구와 자유 공간의 경계, 환기구와 공진기의 경계, 공진기 내 관찰점을 정선으로 나타내어 그림 10과 같이 8개의 정선으로 정의할 수 있다.

각각의 정선들은 전자기 결합 경로에 따라 튜브로 연결되어 네트워크를 생성한다. 각 정선과 튜브에서의 전자파 특성은 analytical formulation에 기초한 하이브리드 전자기 토폴로지 기법을 이용하여 구할 수 있다^[3].

그림 11~13는 환기구의 세분화에 따른 공진기 중심에서의 전계 강도 해석 결과이다. 환기구 당 1개의 정선으로 해석 시 시간 영역 유한 차분법과 많은 차이를 보이는 것을 그림 11에서 확인할 수 있다.

환기구를 세분화함에 따라 그림 13과 같이 점차 오차가 감소했고, 환기구 당 3개의 정선으로 세분화했을 때 그림 13에서 2 dB의 평균 오차 개선 효과를 확인하였으며, 시간 영역 유한 차분법과 가장 일치한 결과를 얻을 수 있었다.

환기구를 포함한 공진기 모델 해석 시 소요 시간과 메모리를 표 3에서 비교하였다. 세분화에 따른

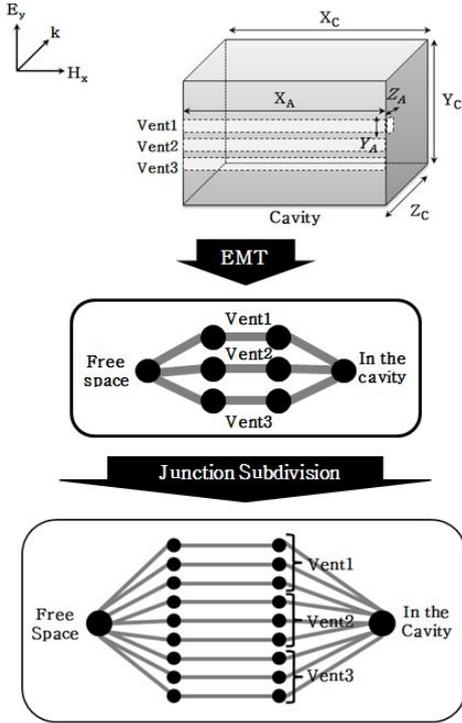


그림 10. 환기구를 포함한 공진기와 정선 세분화에 따른 토폴로지 네트워크
 Fig. 10. The cavity model including vents and the topology network according to junction subdivision.

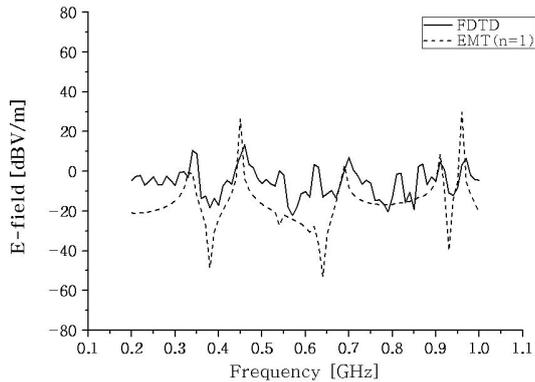


그림 11. 환기구를 포함한 공진기 중심에서 전자기 토폴로지(n=1)와 시간 영역 유한 차분법을 이용한 전계 강도 해석 결과 비교
 Fig. 11. E-field comparison with EMT(n=1) and FDTD at center of the cavity including vents.

전자기 토폴로지 기법의 소요 시간은 세 경우 모두 7초로 큰 차이가 없었으나, 소요 메모리는 세분화가

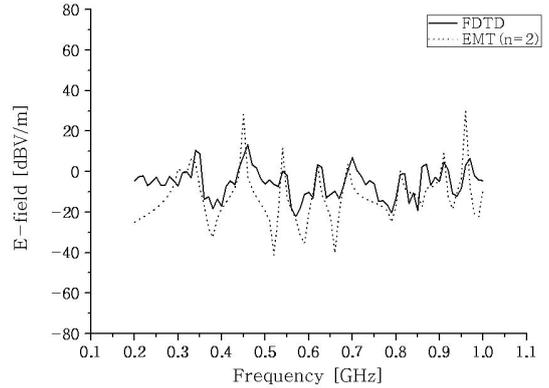


그림 12. 환기구를 포함한 공진기 중심에서 전자기 토폴로지(n=2)와 시간 영역 유한 차분법을 이용한 전계 강도 해석 결과 비교
 Fig. 12. E-field comparison with EMT(n=2) and FDTD at center of the cavity including vents.

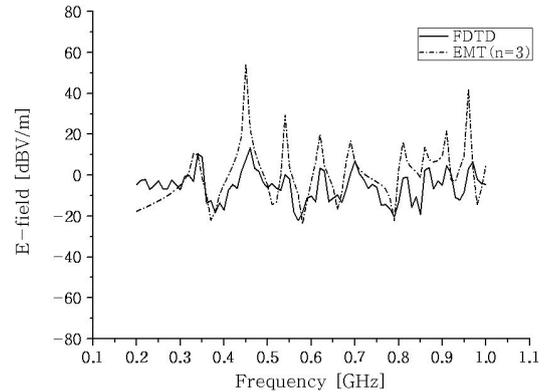


그림 13. 환기구를 포함한 공진기 중심에서 전자기 토폴로지(n=3)와 시간 영역 유한 차분법을 이용한 전계 강도 해석 결과 비교
 Fig. 13. E-field comparison with EMT(n=3) and FDTD at center of the cavity including vents.

진행될수록 점차 감소하여 3개의 정선으로 세분화했을 때 단일 정선일 때 대비 거의 50 % 감소하는 효과를 거두었다. 시간 영역 유한 차분법으로 해석 시에는 58초가 소요되었으며, 메모리는 약 45,000 kB가 소요되었다. 결과적으로 세분화 덕분에 개선된 전자기 토폴로지 기법의 소요 시간은 약 88 % 단축 효과가 있었고, 메모리는 97 % 절감 효과를 보임으로써 세분된 전자기 토폴로지 기법은 시간과 메모리 소비 측면에서 모두 유리한 해석 기법임을 재확인할 수 있었다.

표 3. 환기구를 포함한 개구부 모델 해석 소요 자원 비교(세분화된 전자기 토폴로지, 시간 영역 유한 차분법)

Table 3. Used resources comparison with subdivided EMT and FDTD for the cavity including vents.

Subdivided EMT			FDTD	
#Junction	Time	Memory	Time	Memory
n=1	7 s	2,992 kB	58 s	45,252 kB
n=2	7 s	1,808 kB		
n=3	7 s	1,476 kB		

IV. 결 론

본 논문에서는 기존의 전자기 토폴로지 기법의 정확도를 높이기 위해 오차 추정 및 적응적 정선 세분화가 적용된 전자기 토폴로지 기법을 이용하여 공진기에서의 전도성 및 복사성 전자기 결합 현상을 해석하였다. 대형 시스템에서는 기존의 전자기 토폴로지 기법을 이용한 전자기 결합 현상의 해석 시 오차가 발생할 수 있으므로 전자기 토폴로지 기법의 해석 결과가 PWB를 만족하는지에 따라 오차를 추정 한 후, 적응적 정선 세분화 기법을 통해 전자기 토폴로지 기법의 정확도를 향상할 수 있었다. 본 논문에서는 EMP 방호 시설에서의 전도성 및 복사성 전자기 결합 현상 해석 연구의 일환으로 단일 개구부와 환기구를 포함하고 있는 공진기에서의 전계 강도와 케이블 표면 전류를 해석해서 정선의 세분화에 따른 정확도 개선 효과를 증명하였다. 또한, 시간 영역 유한 차분법과 결과를 비교함으로써 계산 시간과 메모리 절감 효과를 확인하였다.

References

[1] Carl E. Baum, "Numerical coupling models for complex system and results", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 46, no. 3, pp. 359-367, Aug. 2004.

[2] Carl E. Baum, "Reminiscences of high-power electromagnetics", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 49, no. 2, pp. 211-218, May 2007.

[3] Yoon-Mi Park, Younju Lee, Young-Seek Chung, Changyul Cheon, and Hyun-Kyo Jung, "Electromagnetic field penetration analysis of a rectangular aperture-backed cavity based on combination of elec-

tromagnetic topology and mode matching", *Electromagnetics*, vol. 29, issue 6, pp. 447-462, 2009.

[4] 박근, 양동열, "강소성 유한요소해석에서의 사후 오차추정 및 적응적 격자세분화에의 적용", 대한기계학회논문집, A권, 22(7), pp. 1278-1286, 1998년.

[5] 박윤미, "전자기 토폴로지 기법을 이용한 외부 전자파가 전자 시스템의 RF 회로에 미치는 영향 해석", 서울대학교 대학원 박사학위논문, 2010년.

[6] Kelvin S. H. Lee, "Trends and bounds in RF coupling to a wire inside a slotted cavity", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 34, no. 3, pp. 154-160, Aug. 1992.

[7] C. L. Gardner, P. A. Hrubik, "An experimental and analytical study of the use bounds to estimate the coupling to a monopole inside a cavity with an aperture", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 41, no. 1, pp. 64-74, Feb. 1999.

[8] I. Junqua, J. P. Parmantier, and P. Degauque, "Field-wire-coupling in an electrically large cavity", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 52, no. 2, pp. 1034-1040, Nov. 2010.

[9] I. Junqua, J. P. Parmantier, and F. Issac, "A network formulation of the power balance method for high frequency coupling", *Electromagnetics*, vol. 25, no. 7, pp. 603-622, 2005.

[10] D. A. Hill, M. T. Ma, A. R. Ondrejka, B. F. Riddle, M. L. Crawford, and R. T. Johnk, "Aperture excitation of electrically large, lossy cavities", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 36, no. 3, pp. 169-178, Aug. 1994.

[11] J. M. Dunn, "Local, high-frequency analysis of the fields in a mode-stirred chamber", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 32, pp. 53-58, 1990.

[12] H. C. Van del Hulst, *Light Scattering by Small Particles*. New York: Dover, 1981.

[13] D. A. Hill, M. L. Crawford, M. Kanda, and D. I. Wu, "Aperture coupling to a coaxial air line: theory and experiment", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 35, pp. 69-74, 1993.

[14] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design, 2nd Ed.*, John Wiley & Sons Inc., 2005.

박 윤 미



2004년 2월: 충남대학교 정보통신 공학부 (공학사)
2010년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 (공학박사)
2010년 9월~2012년 4월: 삼성전자 책임연구원
2012년 4월~현재: 한국전자통신연

구원 부설연구소 선임연구원
[주 관심분야] 전자장 수치해석, 고출력 전자기파, EMI/EMC

정 현 교



1979년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1981년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
1984년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학박사)
1985년~1994년: 강원대학교 교수

1987년~1989년: Polytechnic University of Brooklyn, Brooklyn, NY 방문교수

1999년~2000년: UC Berkeley 방문교수

2002년~2008년: 기초전력연구원 원장

1997년~현재: 서울대학교 전기·정보공학부 교수

[주 관심분야] 전자장 수치해석 및 최적화, 고출력전자기파, 초고압 차단기 시스템, 전기기기

정 용 식



1989년: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1991년: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
2000년: 서울대학교 전기공학부 (공학박사)
1991년 1월~1996년 5월: LG전자

주임연구원
1995년~2000년: 광주과학기술원 교수
2001년 9월~2003년 2월: Syracuse 대학교 박사후연구원
2003년 3월~2006년 2월: 명지대학교 교수
2006년 2월~현재: 광운대학교 교수
[주 관심분야] 전자장 수치해석, 시간 영역 유한 차분법, 고출력전자기파