

## 복잡한 대형 구조물의 효율적인 전자파 해석을 위한 통계적인 PWB 방법의 유용성에 관한 연구

### A Study on the Utility of Statistical Power Balance Method for Efficient Electromagnetic Analysis of Large and Complex Structures

이 영 승 · 박 승 근

Young-Seung Lee · Seung-Keun Park

#### 요 약

전자 통신 기술의 발전 추세에 따라 유비쿼터스 환경이 구축되면서 일상 생활에서 전자 기기의 밀집도는 폭발적으로 증가하는 추세를 보이고 있다. 이러한 다양한 전자 기기들이 ICT 건물 등의 사회 기반 시설에 설치될 시 이들 사이의 전자파 적합성 및 간섭 분석과 파악을 위해서는 효율적이고도 빠른 대형 구조물의 전자파 해석 기법이 필수적이다. 이에 본 논문에서는 이러한 전자파 해석을 위하여 확률론적 기반의 PWB(Power Balance Method) 해석 방법을 소개하고 그 유용성을 고찰한다. 기존의 맥스웰 방정식에 입각한 결정론적 해석 결과와의 관계를 제시하기 위해 손실이 존재하는 2차원 직각 캐비티(cavity)에서 시뮬레이션을 수행하여, PWB 방법의 기저에 깔린 가정 및 통계적인 결과가 하나의 결정론적 문제에서 필드 분포의 부피 평균(volume average)에 해당함을 보였다. 복잡한 대형 구조물에서 full-wave 전자파 해석이 계산 비용과 시간적인 측면에서 큰 한계점이 있음은 이미 자명한 사실이므로, 통계적인 개념에 기반을 둔 본 PWB 해석 방법이 대형 구조물의 전자파 해석에 있어서 충분히 현실적인 대안이 될 것이다.

#### Abstract

With the trend of technological advances in electronic communications and the advent of ubiquitous environments, the density of existing electronic equipment in the surroundings is increasing significantly. It is hence great importance to study the numerically efficient and fast algorithm for complex and large environments to identify their electromagnetic compatibility and interference characteristics of equipments installed in those structure. This paper introduces a statistical-based power balance method(PWB) for the analysis of these problems and considers its practical utility. The 2-dimensional lossy rectangular cavity was numerically revisited to clarify its relationship with the classical deterministic analysis solutions based on the Maxwell's equation. It can be shown that the statistical assumptions and analysis results from the power balance method correspond to the volume average over the realistic deterministic domain. This statistical power balance approach should be a sufficiently practical alternative to the electromagnetic problem of complex and large environment since it is apparent that the full-wave analysis methods have some severe limits of its computational burdens under the situation of complex and large environment.

Key words : Large Environment, Power Balance Method, Statistical Electromagnetics

한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute)

· Manuscript received November 20, 2012 ; Revised January 3, 2013 ; Accepted January 23, 2013. (ID No. 20121120-130)

· Corresponding Author : Young-Seung Lee (e-mail : lys009@etri.re.kr)

## I. 서 론

최신 전자 통신 기술의 발달과 더불어 한정된 공간 내에 설치되거나 공존하게 되는 기기의 수는 점점 증가하는 추세에 있다. 이러한 전자 기기 배치의 가속화되는 고밀도화는 각 기기들이 단품 단위에서 전자파 적합성 시험을 만족시킴에도 불구하고, 실제 환경에서 내성 규격을 초과하는 잡음을 수신하게 되는 등의 문제를 일으키게 된다. 군사 시설뿐만 아니라 각종 사회 기반 시설에서도 각종 전자 제품 및 통신 기기들의 밀집도가 높아지는 현 상황에서, 기반 시설의 전자파 잡음 전파 특성을 파악하고 효율적인 대책 마련을 위해서는 이와 같은 대형 복합 구조에 대한 효율적인 전자파 해석 기법이 필수적이라 할 수 있다.

전자파 수치 해석 기법은 그 발전되어져 온 역사가 깊고 여러 가지 다양한 방법이 존재하나, 그 기반이 되는 원리는 미분 혹은 적분 형태로 주어지는 맥스웰 방정식을 효율적으로 풀이하여 관측 위치에 따른 필드 변화를 구하는 데에 있다. 모멘트 법(method of moment), 유한 요소법(finite element method), 시간 영역 유한차분법(finite difference time domain method) 등 다양한 방법이 이에 해당하며<sup>[1]</sup>, 대상체나 해석 문제의 특성 등에 따라 계산 시간이나 유효성에 다소 차이가 있으나, 그 근본은 대상 공간을 격자(mesh)나 그리드(grid) 등으로 나누어 필드 분포를 구하는 데에 있다. 그러나 이러한 엄밀한 맥스웰 방정식 기반의 풀 웨이브 해석(full-wave analysis) 방법들이 비록 정확한 근을 제공한다고 할지라도 대상 영역의 복잡도 및 크기가 증가함에 따라 계산 비용 및 시간이 증가하게 될 것임은 자명한 사실이다. 이러한 과장에 비하여 큰 대형 공간에서 맥스웰 방정식을 직접 풀이하지 않는 광선 추적법(ray tracing method)<sup>[2]</sup>이나 경험적인 모델<sup>[3]</sup>이 각종 무선 전파 특성을 파악하기 위해 사용되어지고 있으나, 특정한 환경조건하에서만 적용이 가능하거나, 그 정확도에 한계가 있는 단점은 피하기 어렵다.

역사적으로 전자기 펄스(electromagnetic pulse) 혹은 낙뢰 등에 의한 고출력 전자기파(high-power electromagnetics)에 의한 방호 시설에의 침투 간섭 영향을 분석할 때에는 위상기하학적 방법(topological ana-

lysis)이 사용되어져 왔다<sup>[4]</sup>. 이는 대상 구조물을 차폐(shielding) 단계에 따라 위상학적으로 모델링한 후, 복잡한 전체 구조를 동일 차폐 단계를 나타내는 전자파 구역(EM zone) 등에 따라 각각의 서브 구조와 문제로 나누어 간략화시켜서 각 구획별로 침투나 간섭 경로를 파악한다. 이를 토대로 해당 분석 영역의 적절한 신호 흐름도나 상호 작용 다이어그램(interaction sequence diagram)을 구한 후, 각 접점과 튜브별로 BLT(Baum-Liu-Tesche) 방정식을 세우고, 간섭 신호를 계산하는 과정을 거친다. 이러한 위상기하학적인 방법은 위상학적 역변환(topological inversion)을 토대로 생각해 보면 외부로부터의 고출력 전자기파 침투 등의 영향 문제뿐만 아니라, 전자파 노이즈 원천이 해당 전자파 구역의 내부에 존재할 시에도 적용이 가능해진다<sup>[5]</sup>. 케이블 등을 따라 전달되는 전도성 잡음 경로에 대해서는 상대적으로 간섭 전달 경로의 파악 및 상호 작용 다이어그램의 작성이 용이하여 다중 전송선<sup>[6]</sup>, 꼬임 케이블<sup>[7]</sup>, 비선형 부하<sup>[8]</sup> 등의 다양한 문제에 대해서 수많은 연구와 모델링이 진행되어 왔다. 하지만 복사성 전달 경로의 전자파 잡음에 대해서는 복잡한 주변 환경에 따라 매우 다양한 산란 및 간섭의 영향을 받기 때문에 BLT 방정식 설립의 기준이 되는 접점과 튜브를 효율적으로 생성하거나, 상호 작용 다이어그램을 작성하는 원칙을 세우기가 어렵거나 거의 불가능하다. 2000년대에 들어와서 이 위상학적인 기법을 복사성 경로에까지 확장하려는 시도가 계속 이루어져오고 있으나, 자유 공간이나 상대적으로 계산이 용이한 합체 등에 대해서 주로 연구가 진행되어져 왔다<sup>[9],[10]</sup>.

본 논문에서는 대형 구조에서의 복사성 전자파 분포의 빠르고도 효율적인 해석을 위한 하나의 방법으로서 통계적인 분포에 기반을 둔 전력 균형 방법(Power Balance Method: PWB)에 대해 다루고, 그 유용성을 고찰하고자 한다. 이러한 통계적 개념과 분포에 기반을 둔 분석 방법은 복잡한 케이블 결합량 분석 등의 실험적인 측면이나 잔향실 내부의 특성 파악 측면에서 주로 사용되어 왔으며<sup>[11]</sup>, 전력 균형의 개념과 맞물려서 실제 공간에서 위상학적인 모델링 및 해석이 시도된 것은 최근의 일이다<sup>[12]</sup>.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 이러한 PWB의 기본 개념에 대해 살펴보고, 위상학적 모델

링에 필요한 기본 파라미터에 대해 소개한다. 3장에서는 2차원 선전류 급전 손실 캐비티 규범 구조에서 PWB를 기반으로 한 해석을 통해 실제 해석 공간에서 통계적인 필드 분포가 가지는 의미와 가정에 대해 살펴본다. 4장에서는 요약과 함께 결론을 맺는다.

## II. PWB 해석 방법

PWB 해석 방법은 전자기 캐비티 이론에서부터 시작한다. 공진 상태의 캐비티에서 Q 인자(Quality factor)는 다음과 같이 정의된다.

$$Q = 2\pi f \frac{W}{P_d} \quad (1)$$

여기서  $f$ 는 주파수,  $W$ 는 공간 내에 저장되는 전체 에너지,  $P_d$ 는 캐비티 공간 내에서 소모되는 전체 전력을 나타낸다. PWB의 기반은 과장에 비하여 크기가 큰 캐비티 내부의 필드는 랜덤 변수(random variable)을 따른다고 가정하는 것이다<sup>[12]</sup>. 그러나 실질적으로 전자파 분포를 공간적으로 해석이 어렵더라도 원천이 존재하고, 그 해가 맥스웰 방정식으로 인해 유일하게 주어지는 하나의 결정론적 공간에서 내부의 전자파 분포가 랜덤 변수로 주어지기 위해서 는 그에 합당한 인자가 있어야 한다.

동작 주파수가 높고(=과장에 비하여 전체 크기가 크고) 폐쇄된(closed) 환경에서는 필드 측정값이나 분포가 주변 환경이나 위치 등의 변화에 민감도가 매우 높은 것은 이미 잘 알려져 있는 사실이다<sup>[11]</sup>. 이에 정확한 경계면이나 개구면 등의 위치의 불확실성이나 급전 주파수 등의 민감성 등을 고려할 때 시스템 전체의 복잡도가 상승하므로 이런 측면에서 종종 분포의 통계적인 접근이 시도되곤 했다<sup>[13]</sup>. 환경의 복잡성이 늘수록 통계적 파라미터의 수렴성은 큰 수의 법칙(laws of large numbers) 등으로 인하여 더 좋아지게 되지만, 이러한 접근 방식은 “맥스웰 방정식”이라는 지배방정식을 이론적인 바탕으로 두고 있는 이제까지의 수치 해석 방법들에 비하여 경험적인 접근(heuristic approach)이라는 측면이 강하다. 따라서 PWB 방법이 한 공간의 전자파 분포의 통계적 처리에 근본을 두고 있는 상황에서 이를 “해석” 방법이라고 부를 수 있으려면 결국 맥스웰 방정식과

결부시킬 수 있을 근본적인 연결고리가 존재해야만 한다.

통계적인 해석 이론과의 이와 같은 연결고리가 가장 잘 정립된 곳은 잔향실이라고 할 수 있다. 잔향실 내부의 전자파 분포는 각 모드 스테러(mode-stirrer) 위치마다의 결정론적인 분포로 주어지지만, 그 해석이 만만치 않으므로 각도 방향의 평면파 파수 전개(angular spectral plane wave expansion)로부터 출발하여 그 스펙트럼 피적분 함수가 랜덤 변수가 되도록 가정하고, 커널에 해당하는 평면파 함수가 맥스웰 방정식을 반드시 만족하도록 기저가 되는 근의 형태를 정한다<sup>[14]</sup>. 이 전개는 그린 함수와 고유 함수의 직교성에 바탕을 둔 여타의 파수 영역 적분 전개와는 달리 실수 영역의 각도 방향 파수 성분만을 고려한 것으로, 맥스웰 방정식으로부터 유도된 헬름홀츠 편미분 방정식을 반드시 만족하도록 정립되었다는 점에서 큰 의의가 있다. 이상적인 잔향실이라면 전장 직각 성분의 실수부 및 허수부 총 6개 성분이 모두 분산이 같고, 평균이 0인 가우시안 분포(Gaussian distribution)를 따르게 되며, 전장의 절대값 및 그 제곱 성분 등은 동일 가우시안 랜덤 변수의 곱이나 합으로 나타나지므로 그 성분에 따라 레일리 분포(Rayleigh distribution)나 고차 카이 제곱 분포(Chi square distribution) 등을 따르게 된다. 이 현상의 물리적인 원인은 고주파 환경에서 수많은 광선의 다중경로 반사들의 합으로 주어지는 필드값이 모드 스테러가 일회전함에 따른 평균을 내면 0이 되기 때문이며, 편파와 위상이 임의로 얽히므로 각 직교 성분 사이의 상관 관계가 없어지는 데 기인한다.

위의 이유로 인하여 잔향실 내부에서 복소 포인팅 벡터의 평균은 0이 나오게 되므로(각 평면파 성분이 다른 방향으로 동일한 정도의 전력을 수송한다.) 이를 통해 평균 전력량을 표기하는 것은 무리가 있다. 그러므로 저장 에너지  $W$ 를 빛의 속도로 나누어 전력 밀도의 단위가 되도록 맞춘 물리량을 평균 전력 밀도(mean power density)로 정의하며, 그 양  $S$ 는 참고문헌 [14]의 (7.28)과 (7.31)로부터

$$S = \frac{3\text{Var}(E)}{\eta} \quad (2)$$

로 주어진다. 여기서  $\text{Var}(E)$ 는 각 전장 성분의 분

산율,  $\eta$ 는 배경 매질인 공기의 특성 임피던스를 의미하며, 참고문헌과 2배의 차이가 나는 것은 [14, (1.6)]에서는 rms(root mean square) 페이저가 사용된 데에서 기인한다. 잔향실 이론을 기반으로 유도된 식 (2)를 잘 살펴보면 PWB 해석의 기반에 사용되어진 평균 전력 밀도 정의와 일맥 상통한다. 이로부터 PWB 해석법과 잔향실 분석 이론 사이에는 그 기저에 밀접한 관련 및 유사성이 존재함을 알 수 있으며, 실제로 그 대상 검증 모형에서도 통계적인 필드 분포를 구현하기 위해 모드 스테러를 설치하여 측정하였다.

하지만 실제 전자 기기들이 작동하는 공간에서는 모드 스테러가 존재하지 않는다. 통상적으로 잔향실의 스테러 효과를 이해할 때 경계조건이 각 스테러 위치마다 등가적으로 변한다고 설명하며, 이를 평균낸다는 것은 고정된 관측점에서 다양한 경계조건을 가한 캐비티들의 전장들로 인한 “양상불 평균(ensemble average)”이라고 생각할 수 있다<sup>[15]</sup>. 모드 스테러뿐만 아니라 안테나나 각종 계측 장비의 이동으로도 고주파의 복잡도가 높은 환경에서는 등가적인 경계 조건이 민감하게 바뀌므로, 결국 전자파 분포의 통계적인 분석이란 이 “양상불”들이 너무 잘 확보되는 공간에서 나타나는 필드값들을 처리하는 방법을 일컫는다고 할 수 있다. 디리클레 조건을 만족하여 고유함수가 존재하는 완전한 캐비티에서는 이 경계 조건 변화에 따른 “양상불 평균”이 고정된 경계조건 하에서 해당 캐비티 전체 공간 내부의 전자파를 평균으로 낸 “부피 평균(volume average)”과 상호 등가적이라는 것이 이미 증명되었다<sup>[16]</sup>. 이로부터 PWB 해석의 기저에 깔린 통계적인 파라미터의 실제 공간에서의 근본적인 의미는 그 공간 내부 전자파의 “부피 평균”임을 추측해 볼 수 있으며, 고유함수가 존재하지 않는 곳에서의 의미와 가정 등에 대한 깊이 있는 논의는 3절의 손실 2차원 캐비티 규범 구조 모델에서 더 자세히 다룬다.

전력 균형(power balance)의 개념은 하나의 캐비티 공간 내에 입사하거나 급전된 전력  $P_i$ 가 정상 상태(steady-state)에서 공간 내부에서 손실되는 전력들의 총합  $P_d$ 와 같다는 것이다.

$$P_i = P_d = P_w + P_{ant} + P_{ap} + P_{obj} = \sum_j P_{jd} \quad (3)$$

식 (3)에서 전체 전력 손실  $P_d$ 는 공간 내부에서 크게 네 종류의 메카니즘에 의해 나타나는데, 캐비티 벽( $P_w$ ), 송수신 안테나( $P_{ant}$ ), 개구면 방사나 투과( $P_{ap}$ ), 내부 물체에 의한 흡수( $P_{obj}$ )가 그에 해당한다. 이들을 각각  $j$ 번째 손실이라 하면 전체 손실 전력  $P_d$ 는 그 손실들의 총 합  $\sum_j P_{jd}$ 로 주어진다.

전체 저장 에너지  $W$ 는 에너지 밀도의 공간 적분으로 나타내어지므로 이를 평균 전력 밀도  $S$ 와의 관계로 나타내면

$$W = \sqrt{\mu\epsilon} \int S dV = \sqrt{\mu\epsilon} SV \quad (4)$$

위 식에서  $V$ 는 캐비티의 전체 부피를,  $\mu$ 와  $\epsilon$ 은 각각 투자율과 유전율을 나타낸다. 식 (4)와 (3)을 식 (1)에 대입하고 정리하면

$$Q = \frac{2\pi V}{\lambda \sum_j P_{jd}} S = \left( \sum_j \frac{1}{Q_j} \right)^{-1} \quad (5)$$

의 관계로 주어지며,  $\lambda$ 는 파장을 의미한다. 식 (5)의 우변은 식 (3)의 관계와 고전적인 전자파 캐비티 이론으로부터 전체 캐비티  $Q$  인자의 역수가 각  $Q_j$  인자의 역수의 합으로 주어진다는 것으로 익히 잘 알려져 있는 사실이다. 이 관계식은  $Q$ 의 역수로 관계가 주어져 취급에 불편함이 따르므로 다음과 같은 평균 결합 단면적(mean coupling cross section)  $\langle \sigma \rangle$ 를 정의하여 전력 밀도와 소모 전력 간의 관계를 묘사한다.

$$\langle \sigma \rangle = \frac{2\pi V}{\lambda Q} = \sum_j \langle \sigma_j \rangle = \frac{P_d}{S} \quad (6)$$

식 (6)에서 전체 결합 단면적  $\langle \sigma \rangle$ 은 개별 손실로 인한 단면적의 합  $\sum_j \langle \sigma_j \rangle$ 으로 주어지며, 이는 식 (5)와 등가적인 표현이다. 맨 우변의 관계를 살펴보면  $\langle \sigma \rangle$ 는 평균 전력 밀도  $S$ 로부터 손실 전력량  $P_d$ 으로 결합되어(coupling) 넘어가는 양을 나타내주는 척도라고 할 수 있으며  $\langle \sigma \rangle$ 의 값이 클수록 손실 전력량도 커진다. 벽이나 안테나 손실, 개구면 등에 의한 개별  $\langle \sigma_j \rangle$ 의 값은 캐비티  $Q$  인자나 안테나의 유효 면적, 개구면의 유효 투과 면적 및 산란체의 흡수 단면적(absorption cross section) 등으로부터 정의되

며, 대표적인 구조들에 대한 값들은 잘 알려져 있다. 식 (6)의 마지막 오른쪽 두 항의 관계와 식 (3)으로부터 공간 내부의 최종 평균 전력 밀도는 각 개별 손실의 합으로 나타내어질 수 있으며, 그 관계는 그 손실 메커니즘에 상응하는 개별 결합 단면적  $\langle \sigma_j \rangle$ 로 나타내어진다.

$$P_{jd} = \langle \sigma_j \rangle S \quad (7)$$

따라서 PWB 해석의 최종 결과는 위 식 (7)의 관계식로부터 공간 내의 손실 전력량들을 고려한 최종 평균 전력 밀도  $S$ 가 된다. 이  $S$ 는 식 (2)로부터 전장 성분의 통계적인 분산값과 상호 연관되어지게 된다.

전력 균형 개념은 일찍이 합체의 통계적인 전자파 차폐율(shielding effectiveness)이나 잔향실의 시간 정수(time constant) 등을 도출하기 위해 이미 적용된 바가 있으나<sup>[14]</sup>, 식 (7)을 기반으로 한 위상학적인 모델링과 맞물려서 실제 구조에 대해 체계적인 해석 및 접근이 시도된 것은 최근의 일이며, 미사일을 모델링한 원통형 캐비티에 대해 위 식 (6)과 (7)을 기반으로 손실 전력량과 평균 전력 밀도 사이의 중첩 관계를 바탕으로 상호 작용 다이어그램 및 BLT 방정식을 세우는 과정이 소개되었다. 이를 다시 고찰해 보면 공간 내의 가장 큰 손실은 주로 면적이 우세한 캐비티 벽에 의하여 나타나게 될 것이고, 이미 평균 전력 밀도  $S$ 를 통계적인 값을 사용하기 때문에(식 (2) 참조), 평균 결합 단면적도 위치의 함수가 아니므로 민감한 분포 변화를 매번 계산하지 않아도 된다. 또한, 손실 전력  $P_{obj}$ 은 흡수 단면적(absorption cross section) 등에 기인하는 양인데, 이는 공간 내부 산란체 유전율의 실수부가 아니라 허수부에 의해 주어지므로, 이 또한 우세한 전계 필드 성분에 큰 영향을 미치지 않는다. 그리고 실제 full-wave 해석을 할 때에도 내부 산란체에 허수부까지 포함시켜 시뮬레이션하는 경우도 드물다.

### III. 2차원 손실 캐비티 시뮬레이션

하나의 전자파 분포 해석 문제에서 PWB 기법의 최종 결과는 공간 내 평균 전력 밀도  $S$ 로 주어지며, 이는 식 (2)로부터 각 필드 성분들의 분산값에 해당된다. 이 통계적 분산으로부터 주어지는 전장의 확

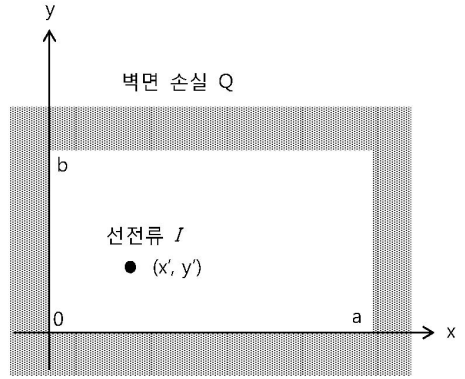


그림 1. 선전류로 급전된 2차원 직각 손실 캐비티  
Fig. 1. A 2D rectangular lossy cavity excited by a electric line source.

률 밀도 함수(probability density function: pdf)는 평균 0인 정규 분포를 따르게 되는데, 이 pdf의 실제 상황에서의 물리적 의미는 “부피 평균”에 상응한다는 것은 앞 절에서 언급했듯이 고유함수가 존재하는 공간에서는 증명이 된 바 있다. 하지만 실제 대형 시설에서는 경계면 및 내부 구조가 매우 복잡하게 주어지고, 내부 전력 손실 또한 다양하게 존재하므로(=Q 인자 값이 낮아지므로), 이러한 “부피 평균”의 추측과 함께 각 전장 복소 성분의 동일 분산 등의 가정이 손실이 있는 일반적인 경우에도 실제로 성립되는지를 살펴볼 필요가 있다.

본 논문에서는 기반이 되는 가정들의 물리적인 의미와 상황을 살펴보는 것이 목적이므로 그림 1과 같이 잘 알려진 간단한 2차원 선전류 급전 손실 캐비티 문제를 통해 이를 살펴본다.

크기  $I$ 를 가지는 선전류가  $(x', y')$ 에 위치할 시 완전 도체 경계면인 경우 이 문제의 해는 이미 잘 알려져 있다<sup>[14]</sup>.

$$E_z = -\frac{2i\omega\mu I}{a} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{m\pi x'}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)}{\zeta_m \sin\zeta_m b} \times \sin\zeta_m (y_{>} - b) \sin\zeta_m y_{<} \quad (8)$$

여기서  $\omega=2\pi f$ 는 급전 선전류의 각 주파수(angular frequency)이고,  $\zeta_m = \sqrt{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2}$ ,  $y_{>}$ 와  $y_{<}$ 는  $\max(y, y')$ 와  $\min(y, y')$ 을 각각 의미한다. 만일 캐비티가 공간 내에 손실이 존재한다면 이는 손실을

나타내는  $Q$ 인자와 연관시켜 식 (8)에서 파수  $k$ 를 다음과 같이 근사시킴으로써 계산할 수 있다.

$$k \rightarrow k \left( 1 + \frac{i}{2Q} \right) \quad (9)$$

이 문제를 이제 PWB의 관점에서 재해석해 본다. 평균 전력 밀도  $S$ 는 2차원 상에서 다음과 같이 정의되며<sup>[14]</sup>

$$S = \frac{\langle |E_z|^2 \rangle}{2\eta} = \frac{E_0^2}{2\eta} \quad (10)$$

위 식에서  $\langle \rangle$  기호는 평균값을 의미하며,  $E_0^2$ 은  $\langle |E_z|^2 \rangle$ 으로 정의되는 양이다. 캐비티 내에 저장되는 전체 에너지  $W$ 는 다음과 같다.

$$W = \sqrt{\mu\epsilon} SA = \frac{\epsilon}{2} E_0^2 A \quad (11)$$

여기서  $A=ab$ 는 2차원 캐비티의 전체 단면적을 가리킨다. 2차원 손실 캐비티의  $Q$  인자는 식 (1)과 (11)을 결합하여 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$Q = 2\pi f \frac{W}{P_d} = \frac{2\pi A}{\lambda} \frac{S}{P_d} \quad (12)$$

3차원에서의 정의처럼 2차원에서의 손실 결합량을 나타내는 평균 결합 폭(mean coupling width)  $\langle \sigma_l \rangle$ 을 표 1과 같이 정의한다.

$$\langle \sigma_l \rangle = \frac{P_d}{S} = \frac{2\pi A}{\lambda Q} \quad (13)$$

손실 캐비티에 급전되는 전체 전력은 선전류로부터 방사되는 전력이며, 이는 자유 공간 그린함수를 사용할 경우 다음과 같이 주어진다.

$$P_i = \frac{|I|^2 \eta k}{8} \quad (14)$$

PWB 해석은 정상 상태에서  $P_d = P_i$ 의 관계를 만족시키므로 식 (14)를 식 (10) 및 식 (13)과 결부시키면

$$E_0^2 = \frac{|I|^2 \eta^2 Q}{4A} \quad (15)$$

의 관계식을 얻는다. 따라서 단위 크기의 선전류가 급전되었을 때, 정규화 상수  $C_n = \frac{\eta^2 Q}{4A}$ 로 정규화시킨다면  $E_0^2 = \langle |E_z|^2 \rangle$ 의 값은 1이 나와야 한다. 이  $E_0^2$

은 식 (10)의 관계식으로 평균 전력 밀도  $S$ 와 연관되어지며, 이상적인 상황이라면  $z$ 성분 전장의 각 실수부와 허수부에 직교 위상 성분이 서로 얽힘으로써 동일한 양만큼의 분산이 배분되어 다음의 관계식이 만족되어야 한다.

$$\langle E_{zr}^2 \rangle = \langle E_{zi}^2 \rangle = \frac{E_0^2}{2} \quad (16)$$

여기서  $E_{zr}$ 과  $E_{zi}$ 는 각각  $z$ 성분 전장  $E_z$ 의 실수부와 허수부를 의미한다.

위의 개념을 통해 살펴본 PWB 해석의 결과가 가지는 “통계적 분산”의 의미를 물리적으로 살펴보고 검증하기 위하여 식 (8)과 (9)를 통해 시뮬레이션을 행하였다. 표 1은 손실 정도를 의미하는  $Q$ 인자의 변화에 따라 캐비티 전장 성분의 분산값이 변화하는 추이를 나타낸 것이다. 캐비티 크기는  $a=4.57$  m,  $b=3.05$  m이며, 급전 주파수는 4 GHz이어서 캐비티는 파장에 비해 충분히 커서 고주파 환경을 만족하며, 전원점은  $x'=0.5$  m,  $y'=0.5$  m에 위치한다. 전체 관측점의 수는 1,000개이며, 균등 분포(uniform distribution)를 갖는 난수 발생기로 캐비티 면적  $A$  전체를 커버하도록 하여 앞 절에서 추정된 “부피 평균”의 가설이 손실이 존재하는 구조에서도 타당한지 살펴보았다. 위에서 살펴볼 수 있듯이  $Q$ 값이 감소하여 공간 내에 어느 정도의 손실이 점점 증가할수록 정규화된  $E_0^2$ 는 1로 수렴하며, 이 때 각 복소 전장 성분의 분산도 거의 동일 분산을 가져가는 것으로 파악된다. 반면  $Q$ 가 너무 커서 완전 도체에 가까울수록  $E_0^2$ 는 1보다 작은 값을 가지게 되며, 복소 전장 성분의 개별 분산도 허수부가 실수부를 압도하게 된

표 1.  $Q$  인자 변화에 따른 정규화된 캐비티 전장의 분산값 변화

Table 1. Variances of the cavity normalized electric field as a function of the quality factor.

$Q$	$\langle E_{zr}^2 \rangle$	$\langle E_{zi}^2 \rangle$	$E_0^2$
$10^6$	$3.185 \times 10^{-5}$	0.0394	0.0394
$10^5$	0.0253	0.3273	0.3528
$10^4$	0.3667	0.2788	0.6451
$10^3$	0.4277	0.5429	0.9697
$10^2$	0.5032	0.4672	0.9762

다. 이는 식 (8)을 통해 살펴볼 수 있듯이 손실이 없는 이상적인 캐비티에서는 전장이 허수 성분을 가지게 되는데, 손실이 충분치 않으면 우다중 광선 반사가 위상의 상호 얽힘 효과를 충분히 주지 못하여 우세한 본래 입사 성분이 그대로 남게 되기 때문이다. 또한, 식 (15)로 인하여 정규화된  $E_0^2$ 는  $P_d = P_i$ 의 관계로부터 결국 입사 전력  $P_i$ 로 정규화된 것이다. 캐비티 내부 손실이 작을 경우에는 이 입사 전력  $P_i$ 를 소모시킬 만한 상황이 공간 내에 존재치 못하고, 정상 상태에서도 위의 가정이 붕괴하여 이러한 결과가 나온다는 것을 살펴볼 수 있다. 이 입사 전력  $P_i$ (식 (14))는 물론 자유 공간에서의 도출값을 사용한 것이지만, 실제 안테나의 이득 파라미터 등이 자유 공간 원거리장 기반 물리량을 살펴볼 때 충분히 타당한 모델이라 볼 수 있다.

PWB의 또 다른 기반 가정은 앞 절에서 살펴보았듯이 각 개별 복소 전장 성분들이 평균 0의 정규 분포를 따른다는 것이다. 이를 살펴보기 위해 그림 2는  $Q=10^3$ 의 경우에 앞의 표 1의 시뮬레이션 파라미터와 같은 경우를 상정하여, 덜 우세한 성분인 실수 성분의 분포 히스토그램과 PWB 해석을 통해 계산된 분산값  $\langle E_{zr}^2 \rangle$ 을 가지고 도시한 평균 0의 정규 분포 곡선을 나타낸 것이다. 상호 간에 매우 유사한 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 그림 3은 같은 파라미터를 상정한 경우이나 주파수를 10배 낮추어 상대

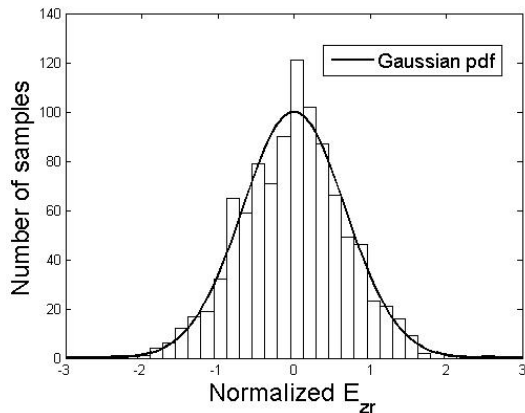


그림 2.  $E_{zr}$ 의 분포 히스토그램과 정규 분포 곡선과의 비교( $f=4$  GHz)

Fig. 2. Comparison of the histogram data of  $E_{zr}$  with the Gaussian pdf( $f=4$  GHz).

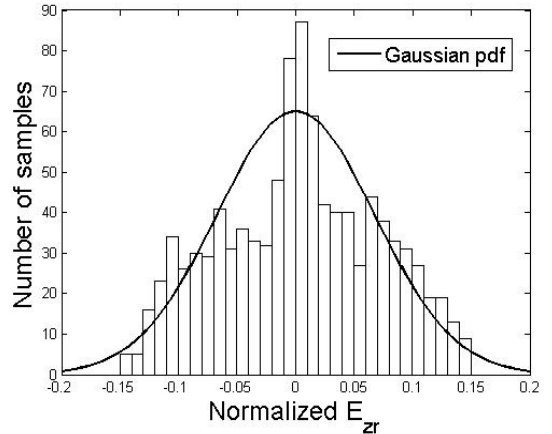


그림 3.  $E_{zr}$ 의 분포 히스토그램과 정규 분포 곡선과의 비교( $f=400$  MHz)

Fig. 3. Comparison of the histogram data of  $E_{zr}$  with the Gaussian pdf( $f=400$  MHz).

적으로 저주파인 경우에 히스토그램 데이터와 pdf 곡선의 양상을 살펴본 것이다. 저주파 영역에 들어서면 이처럼 정규 분포 가정이 붕괴한다는 것을 살펴볼 수 있다. 이를 위의 해석 공간에서 물리적으로 살펴보면 관측점의 분포로 인해 “부피 평균” 효과가 일어날 시, 저주파 영역의 경우에는 캐비티 내부에 충분히 상쇄 및 얽힘 효과가 발생할 만큼 필드의 변화가 심하지 않기 때문이라 할 수 있다. 이는 낮은 주파수 영역에서 관측 전장이 정규 분포가 깨져가는 잔향실의 상황과도 유사하다. 통상적으로 잔향실과 같은 실제 캐비티에서는 위와 같이 필드의 양상불집합이 정규 분포를 따르는 동작주파수 영역을 과모드(overmode) 여기되었다고 부르며, 이 과모드 조건으로 진입하는 천이주파수의 추정치는 첫 번째 공진 주파수의 약 3배가 되는 주파수로서 약 60개의 모드가 발생하는 지점으로 정하거나<sup>[15]</sup>, 흑체 복사 이론의 원리에 따른 근사치를 사용하기도 한다<sup>[17]</sup>. 위 논의로부터 이와 같은 “부피 평균”이 손실이 있는 실제 상황에서도 PWB의 해석 결과의 기반이 되는 물리적인 의미를 제공한다는 것을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 대형 시설 및 환경의 효율적인 전자파 해석에 사용될 수 있는 통계적 기반의 PWB 해

석 방법을 살펴보고, 그 기반이 되는 물리적인 의미를 고찰하였다. 잔향실 이론과의 유사성을 이용하여 맥스웰 방정식과의 연관성을 살펴보고, 그 앙상블 평균과의 등가적인 관계를 통해 본 방법의 기저에 깔린 통계적인 해석 결과값이 “부피 평균”에 해당함을 알아보았다. 또한, 손실이 존재하는 일반적인 실제 공간에서도 이러한 관계가 성립함을 2차원 손실 캐비티 규범 구조를 통해 보이고, 그 해석 결과로부터 다양한 물리적인 의미 및 현상을 살펴보았다. 또한, 고주파 환경에서는 해석 공간 내의 실제 전장 분포를 PWB 해석 결과로서 주어지는 필드의 분산을 기반으로 한 “가우시안 분포” 모델링하는 것이 충분히 타당성이 높다는 사실도 설명하였다. 이와 같은 확률론적 기반의 PWB 해석 방법은 폴 웨이브 해석에 한계가 있는 복잡한 대형 구조물 해석에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

- [1] M. N. O. Sadiku, *Numerical Techniques in Electromagnetics*, CRC Press, 2000.
- [2] Z. Ji, B. Li, H. Wang, H. Chen, and T. K. Sarkar, "Efficient ray-tracing methods for propagation prediction for indoor wireless communications", *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 43, no. 2, pp. 41-49, Apr. 2001.
- [3] M. Rak, P. Pechac, "UHF propagation in caves and subterranean galleries", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 4, pp. 1134-1138, Apr. 2007.
- [4] 육중관, 두진경, 현세영, "EM Topology를 이용한 거대구조의 전자파 결합 특성 분석", *한국전자파학회지 전자파기술*, 23(4), pp. 24-31, 2012년 7월.
- [5] J. P. Parmantier, "EM topology and cable networks - applied EM topology", *HPE 2011 Presentation*, part. 2, 2011.
- [6] X. Wei, Q. Wang, "Analysis of irregular multiconductor transmission line structures with external electromagnetic field", *Int. Conf. on Microw. Millimeter Wave Tech. 2007*, vol. 55, no. 4, pp. 1-4, 2007.
- [7] P. Kirawanich, N. E. Islam, and S. J. Yakura, "An electromagnetic topology approach: crosstalk characterization of the unshielded twisted-pair cable", *Progress in Electromag. Research, PIER* 58, pp. 285-299, 2006.
- [8] F. M. Tesche, "On the analysis of a transmission line with nonlinear terminations using the time-dependent BLT equation", *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 49, no. 2, pp. 427-433, May 2007.
- [9] F. M. Tesche, C. M. Butler, "On the addition of EM field propagation and coupling effects in the BLT equation", *Interaction Note* 588, Dec. 2003.
- [10] Y. Li, J. Luo, G. Ni, and J. Shi, "Electromagnetic topology analysis to coupling wires enclosed in cavities with apertures", *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2010, pp. 1-11, Sep. 2010.
- [11] R. Holland, R. St. John., *Statistical Electromagnetics*, Taylor & Francis, pp. 3-23, 1999.
- [12] I. Junqua, J. P. Parmantier, and F. Issac, "A network formulation of the power balance method for high-frequency coupling", *Electromagnetics*, vol. 25, no. 7-8, pp. 603-622, Feb. 2007.
- [13] T. M. Antonsen Jr., G. Gradoni, S. Anlage, and E. Ott, "Wave chaotic characterization of complex cavities: distributed ports and coupling", *Proc. of the 10th Int. Symp. on Electromag. Compat.*, pp. 549-554, Sep. 2011.
- [14] D. A. Hill, *Electromagnetic Fields in Cavities - Deterministic and Statistical Theories*, IEEE Press, Chap. 1 & 7-9, 2009.
- [15] IEC 61000-4-21 : IEC Standard, Electromagnetic Compatibility(EMC), Part 4 : Testing and measurement techniques - Reverberation chamber test methods, pp. 17-40, 2011.
- [16] T. H. Lehman, "A statistical theory of electromagnetic fields in complex cavities", *Interaction Note* 494, May 1993.
- [17] L. R. Arnaut, "Compound exponential distributions for undermoded reverberation chambers", *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 44, no. 3, pp. 442-457, Aug. 2002.

이 영 승

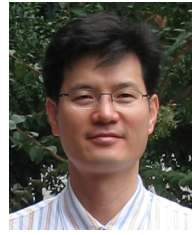


2006년 8월: 고려대학교 전파통신  
공학과 (공학사)  
2008년 8월: 한국과학기술원 전기  
및 전자공학과 (공학석사)  
2012년 2월: 한국과학기술원 전기  
및 전자공학과 (공학박사)  
2012년 3월~현재: 한국전자통신연

구원(ETRI) 연구원

[주 관심분야] 전자파 이론 및 산란, EMI/EMC

박 승 근



1991년 2월: 고려대학교 응용통계  
학과 (이학사)  
1993년 2월: 고려대학교 응용통계학  
과 (이학석사)  
2004년 2월: 충북대학교 정보통신  
과 (공학박사)  
1993년 8월~현재: 한국전자통신연

구원(ETRI) 책임연구원

[주 관심분야] 디지털통신, 스펙트럼공학, EMC