THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2014 Sep.; 25(9), 919～929.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2014.25.9.919
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

확률론과 위상학적 모델링을 이용한 이중 공진구조 내의 PCB 주파수 응답해석

Frequency Response Analysis on PCB in Dual Resonant Cavity by Using Stochastical and Topological Modeling

정인환 · 이재욱 · 이영승* · 권종화* · 조춘식

In-Hwan Jung · Jae-Wook Lee · Young-Seung Lee* · Jong-Hwa Kwon* · Choon-Sik Cho

요 약

최근 전자기기의 활용도가 높아짐에 따라 전자기파에 대한 안정성이 요구되었다. 소형화 전자기기 및 다양한 전자부품들은 맥스웰 방정식 (Maxwell Equation)으로 해석되었으나, 복잡도가 높은 대형 구조물에 대한 전자기파 안정성이 요구되는 현시점에 맥스웰 방정식은 여러 한계점을 가지고 있다. 본 논문에서는 복잡한 대형 구조물을 확률론과 위상학적 모델링을 연동하여 해석하고자 한다. 특히, 확률론을 바탕으로 한 해석 방법인 PWB(Power Balance) Method와 BLT(Baum-Liu-Tesch) 방정식을 연동하여 대형 구조물의 주파수 응답을 풀이할 경우, 해석시간이 상당히 줄어드는 장점이 있다. 본 논문에서는 복잡한 대형구조물의 예로 이중 공진구조 내부에 PCB가 존재하는 경우를 고려해 보았다.

Abstract

In recent, the requirements for the safety to the effects of high power electromagnetic wave have been increased along with the development of electricity and electronic equipments. The small sized electronic devices and the various components have been analyzed by using the full-EM simulation and solving a complete set of Maxwell equation. However, the deterministic approach has a drawback and much limitation in the electromagnetic analysis of an electrically large cavity with a high complexity of the structure. In this paper, statistical theory and topological modeling method are combined to analyze the large cavity with a complex structure. In particular, the PWB(Power Balance) method and BLT(Baum-Liu-Tesche) equation are combined and employed to solve the frequency response to the large-scaled cavity with remarkably reduced time-consumption. For instance, a PCB substrate inside box of box are considered as a large structure with a complexity.

Key words: Power Balance Method, Electromagnetic Compatibility, BLT Equation, Topological Analysis, Full Wave Analysis

Ⅰ. 서 론

현대 이동통신의 발전으로 대량의 데이터가 무선으로 전송됨에 따라 높은 전력(high power)과 광대역(ultra wide-band) 전자장 전원(electromagnetic field source)의 사용빈도가 점차 높아지고 있다. 이로 인하여 발생한 공기 중에

한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부(Department of Electronics, Telecommunication and Computer Engineering, Korea Aerospace University)
*한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute)
· Manuscript received July 7, 2014 ; Revised September 5, 2014 ; Accepted September 11, 2014. (ID No. 20140707-09S)
· Corresponding Author: Jae-Wook Lee (e-mail: jwlee1@kau.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

다양한 전자파는 같은 공간에 존재하는 다른 전자기기에 손상을 초래할 뿐만 아니라, 인체에 해로운 영향을 줄 가능성이 있다. 이와 같은 불필요한 전자기파의 영향을 최소화하기 위하여 다양한 국제기관(CISPR, IEC 등)에서 EMI/EMC 관련 규격을 제시해 왔다. 관련 규격을 판단하는 기준 중 하나인 차폐 효과(SE: Shielding Effectiveness)는 외부 전자기파에서 발생한 전자기파가 특정 시스템 내부에 미치는 영향을 정량적으로 나타낸다. 최근까지 차폐 효과 계산은 주로 수치 해석 기법을 활용해 왔지만, 해석대상이 대형 구조물일 경우, 정확한 크기 정보와 매질 정보를 얻을 수 없기 때문에 부정확한 결과값을 주는 문제가 발생하였다. 또한, 상당히 많은 시간과 대량의 데이터를 사용하므로 개선의 필요성이 계속해서 논의되었다[1]. 이와 같은 단점을 극복하기 위한 해결 방법으로 MOM (Method of Moment)을 개선한 알고리즘인 FMM(Fast Multipole Method)과 MLFMA(Multi-Level Fast Multipole Algorithm)를 이용하기도 하며, 컴퓨터 시뮬레이션 가속기를 사용하기도 한다. 다양한 방법으로 과거에 비해 해석 속도 및 데이터량이 개선되었지만, 구조물의 복잡도가 계속해서 높아지고 있고, 고주파 해석을 요구하는 만큼 아직 적용에 어려움이 존재한다. 본 논문에서는 차폐 효과를 수치 해석 기법이 아닌 확률론과 위상학적 기법을 동시에 활용하는 방법을 제시한다[2]. 또한, BLT 방정식(Baum-Liu-Tesche Equation)을 이용하여 이중 공진구조 내부에 PCB가 존재하는 경우에 대해서도 해석해 보고자 한다.

Ⅱ. 확률론을 이용한 해석 방법

대부분의 수치 해석 기법은 그림 1과 같이 해석대상을 주파수 관점에서 unit mesh cell로 나누는 단계를 거친다. 그림 1은 각 축 방향으로 a, b, d의 크기를 갖는 해석 대상을 mesh cell로 나누는 것을 보여주고 있다[3]. 해석 대상이 대형 구조물이거나 해석 주파수 대역이 고주파일 경우 그림 1의 mesh cell 크기가 작아질 뿐만 아니라, 개수가 기하급수적으로 늘어나게 되며, 결과적으로 시간 및 데이터량의 증가를 야기한다. 이와 같은 비효율 측면을 개선하기 위한 방법으로 본 논문에서는 확률론을 적용하고자 한다. 해석대상이 전기적으로 충분히 클 때(electrically large & multi-mode) 해석대상을 MSC(pseudo-mode stirred reverberation chamber)로 등가할 수 있다. MSC 조건에서는 구조체 내부 어떤 임의의 점에서도 전자계의 분포가 일정하며, 확률론을 적용할 수 있다. 위의 가정이 만족할 때 임의의 구조체 내부의 전자계는 하나의 값으로 정의될 수 있다. 그림 2는 주파수가 높아짐에 따라 모드(mode)의 개수가 증가하는 것을 보여주고 있으며, 고주파로 갈수록 다중 모드(multi mode) 조건에 근접하게 된다[4].

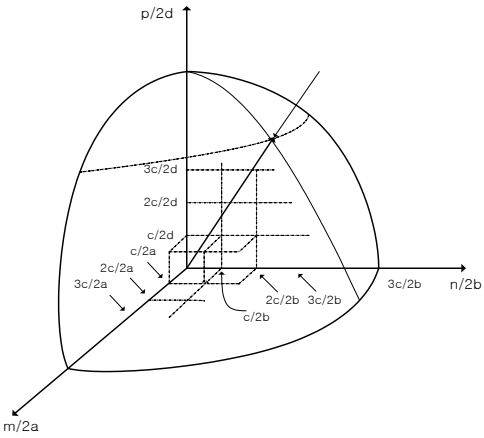

그림 1. Mesh cell 분할의 예[3]
Fig. 1. Example of mesh cell partition[3].

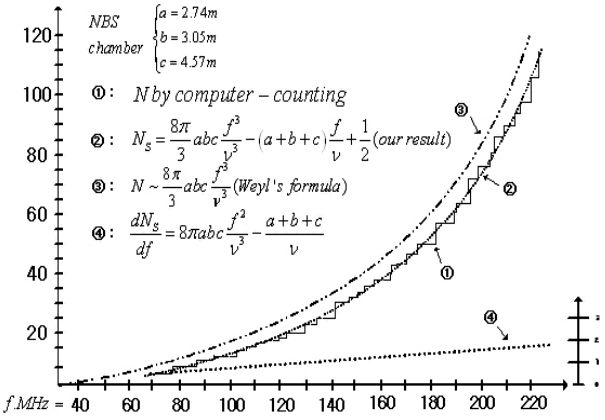

그림 2. 주파수 증가에 따른 모드 개수 변화[4]
Fig. 2. Variation of the number of modes in accordance with the increase of frequency[4].

본 절에서는 앞서 언급한 확률론을 두 가지 경우에 대하여 적용해 보았다. 첫 번째는 박스 속에 박스가 존재하

는 이중 공진구조이며, 두 번째는 비행기 동체 모형이 되겠다.

2-1 구역설정(Zoning)

복잡도가 높은 구조물을 에너지 레벨(energy level) 단위로 구분하는 것을 구역 설정(zoning)이라 부른다[5]. 구역 설정은 전자파 영향 수준, 구성 재질의 차폐 효과(shielding effect), 간섭 경로(interference pathway) 등을 기준으로 구역을 나누며, 해석대상의 복잡도를 낮추는 방법 중 하나다. 전자파 영향을 최대로 받는 에너지 레벨부터 낮은 에너지 레벨 순서로 구역을 설정하는 것이 일반적이다. 나누어진 각 구역을 volume으로 정의하고, volume은 proper volume과 elementary volume으로 나누어진다. 또한, 나누어진 각 구역의 경계면을 surface volume이라 하고, proper surface와 elementary surface로 구별한다[5].

그림 3(a)는 외부 전자파가 건물에 영향을 주는 것을 보여주고 있는 예이다. 그림 3(b)는 그림 3(a)를 에너지 레벨 단위로 구역을 설정한 결과로 외부 전자파의 영향을 최대로 받는 최외각 volume인 $V_{1,1}$부터 전자파 영향을 최소로 받는 volume인 $V_{4,n}(n=1,2,3,4)$까지 표시되어 있다. 최종 위상학적 다이어그램을 얻기 위해 volume과 surface volume을 노드로 등가하고, 전자파의 이동 경로를 튜브로 등가하였다. 그림 3의 위상학적 다이어그램은 그림 4와 같다.

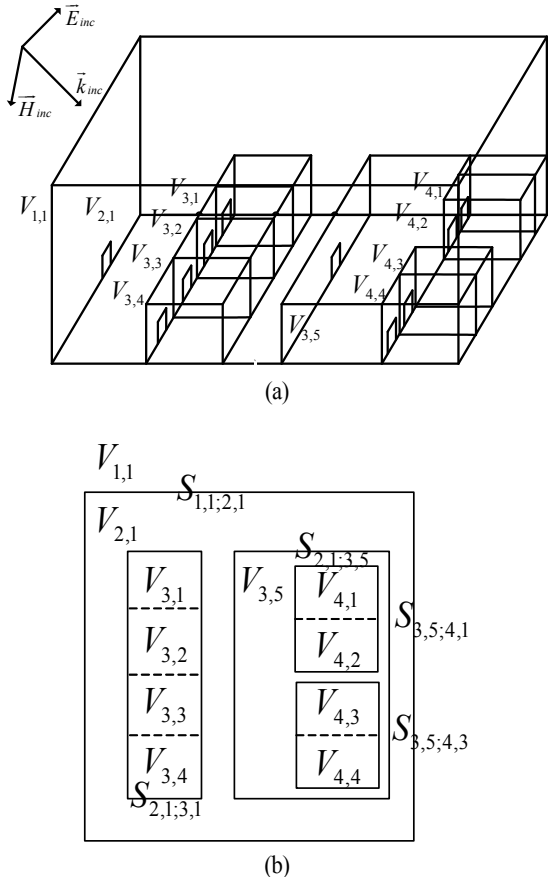

그림 3. 구역설정의 예, $V_{i,j}$: i =차폐단계, j=동일한 차폐 단계에서 volume 수, $S_{i,j;k,l}$: $i,j;k,l$= volumer의 경계면

Fig. 3. Example of zoning, $V_{i,j}$: i =shielding level, j=the number of volume in same shielding level, $S_{i,j;k,l}$: $i,j;k,l$=interface of volumes.

2-2 PWB Method

PWB Method는 단일 cavity에 고주파 응답을 얻기 위한 해석 방법이다. 이 때 단일 cavity는 한 개 이상의 개구면(aperture)과 cavity 내부 벽면 손실이 있으며, 적어도 1개 이상의 수신 안테나를 포함하는 경우를 말한다. 또한, 고주파라는 조건은 단일 cavity가 electrically large 조건을 만족한다는 것을 의미한다. 개구면과 벽면 손실, 수신안테나 등에서 소모되는 전력을 계산하기 위해 quality factor 값이 이용되며 식 (1)로 쓸 수 있다.

$$Q = 2\pi f \frac{W}{P_d} \tag{1}$$

식 (1)에 f는 주파수, W는 구조체 내부에서의 정상 상태 에너지(mean steady state energy)를 의미하며, P_d는 평균 소비 전력(mean dissipated power)이다. 개구면과 벽면 손실, 수신안테나에 대한 자세한 식은 참고문헌 [6]을 통해 알 수 있다. Quality factor의 값을 이용하여 cavity에서 소비된 총 전력을 아래와 같이 표현할 수 있으며, 아래 식에 Q_{total}은 여러 quality factor의 합을 의미한다[6].

$$P_d = \frac{2\pi V}{\lambda Q_{total}} \cdot S \tag{2}$$

$$P_t = P_d \tag{3}$$

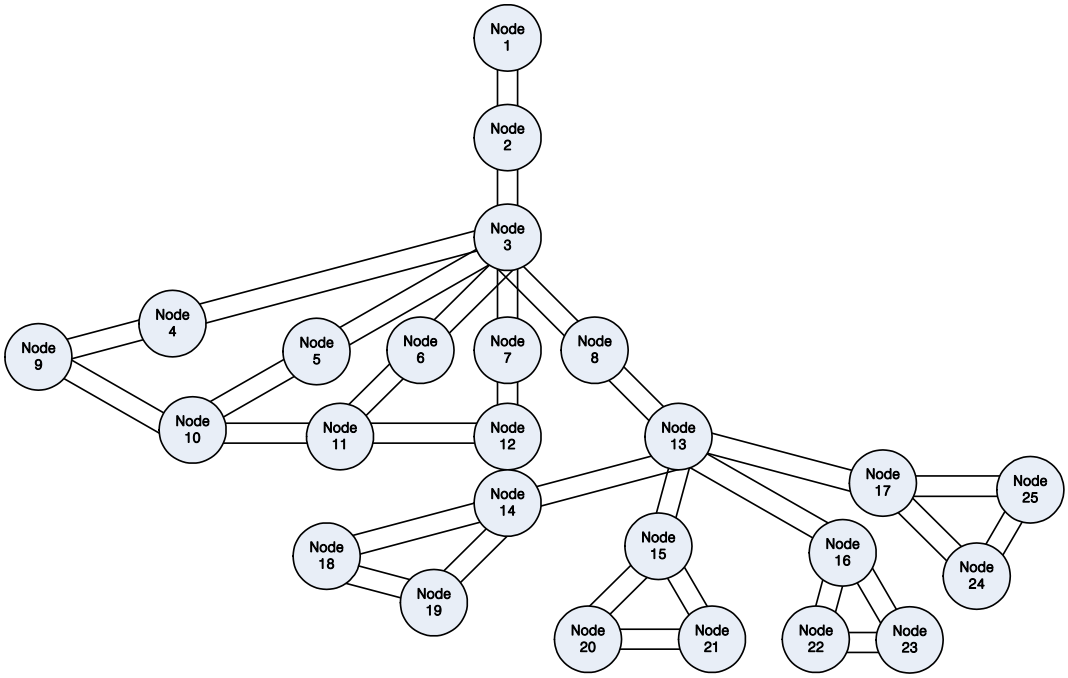

그림 4. 그림 3의 위상학적 모델링
Fig. 4. Topological modeling of Fig. 3.

PWB Method의 핵심 내용은 투과 전력(P_t) 값이 손실된 전력(P_d)과 같다는 것이며, 식 (3)으로 쓸 수 있다.

2-3 차폐효과 계산

2-3-1 이중 공진구조

차폐 효과를 계산하기 위해 첫 번째 시뮬레이션 환경을 그림 5와 같이 가정하였다. 외부 박스는 길이가 60 cm인 정육면체이며, 상단에 길이가 13.5 cm인 정사각형 개구면이 존재한다. 내부에는 외부 박스를 정확히 절반으로 축소한 박스가 우측 상단에 위치한다. 박스의 구성 매질은 구리이며, 박스 내부에는 내부 전자계를 균일하게 만들어 주는 mode stirrer[7]가 밑변 중심으로부터 높이 40 cm 지점에 위치하고 있다.

PWB Method를 적용하기에 앞서 그림 5를 위상학적 모델로 등가해야 한다. 그림 6은 그림 5를 위상학적 등가 모델링한 결과 값으로 개구면을 노드 2, 3(N2, 3)과 노드 5, 6(N5, 6)으로 등가하였으며, 벽면 손실은 노드 4, 7(N4, 7)로 등가하였다. 전원은 자유공간인 노드 1(N1)과 노드 2(N2) 사이에 인가된다.

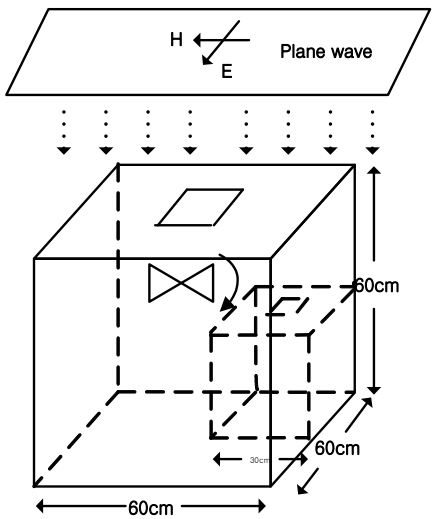

그림 5. 이중 공진구조
Fig. 5. Geometry of double resonance.

인가된 전원은 외부 박스의 개구면과 벽면에서 에너지 손실이 발생하고, 연결된 내부 박스에서도 동일하게 개구

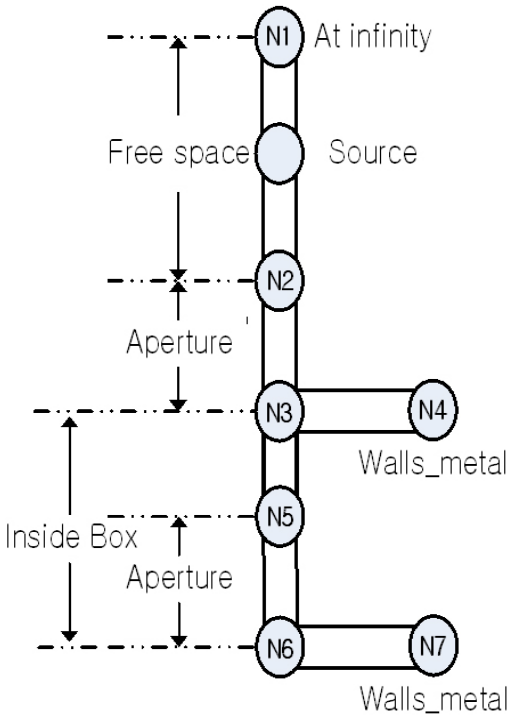

그림 6. 그림 5의 위상학적 모델링
Fig. 6. Topological modeling of Fig. 5.

면과 벽면에서 에너지 손실이 일어난다. 외부 정육면체의 에너지 손실을 Q_{out}으로 정의하고, 내부 정육면체에서의 에너지 손실을 Q_{in}이라고 할 때 구조체에 소비된 전체 전력은 식 (4)로 쓸 수 있다. 식 (4)에 S_{out}, S_{in}은 외부 박스와 내부 박스의 평균 전력 밀도이며 식 (5) 및 식 (6)으로 정의된다.

$$P_d = \frac{2\pi V_{out}}{\lambda Q_{out}} \cdot S_{out} + \frac{2\pi V_{in}}{\lambda Q_{in}} \cdot S_{in} \tag{4}$$

$$S_{out} = \frac{\lambda}{2\pi V_{out}} \cdot \frac{P_{inc}}{\frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} + \frac{1}{Q_3 + Q_4}} \tag{5}$$

$$S_{in} = \frac{\lambda}{2\pi V_{in}} \cdot Q_{in} \cdot \frac{\sigma_{in}}{2} \cdot S_{out} \tag{6}$$

식 (5)에 Q_1, Q_3는 개구면에 관한 quality factor이며, Q_2, Q_4는 외부 및 내부 정육면체의 벽면 손실에 관한 quality factor이다. V_{out}, V_{in}은 외·내부 정육면체의 부피를 말하고 σ_{in}은 mean coupling cross section으로 평균 소비 전력과 평균 전력 밀도의 비를 의미한다. 자세한 식은 참고문헌 [6]에서 확인할 수 있다.

차폐 효과는 식 (4)의 결과를 식 (7)에 대입하여 얻을 수 있으며, P_i는 입사된 전력으로 위의 경우에는 외부에서 입사된 평면파의 전력을 의미한다. 또한, 내부의 전자계가 균일하다는 것을 전제로 하는 PWB Method의 결과값인 P_d는 공진체 내부 어느 지점에서도 동일한 값을 가지며, 통상 내부 한 점에 대한 값으로 계산하는 차폐 효과 정의에 부합한다고 볼 수 있다.

$$SE = 10\log\left(\frac{P_i}{P_d}\right) \tag{7}$$

차폐 효과를 비교하기 위해 상용 full-wave 시뮬레이션 툴을 이용하여 그림 5와 동일한 구조물을 모델링하였다. 내부의 mode stirrer를 5° 각도로 변화시켜가면서 cavity에 발생하는 손실을 측정하였고, 그 결과값을 그림 7에서 확인할 수 있다. 전자계의 제곱의 성분을 사용하는 PWB Method의 특성 상 결과값에 공진이 일어나지 않는 것을 확인할 수 있다. 그림 7을 통해 full-wave 시뮬레이션 결과값이 PWB Method의 결과값과 비슷한 경향을 띄는 것을 확인할 수 있으며, 표 1에서 두 해석 방법의 소요시간과 메모리 소비량을 비교한 결과, PWB Method의 효율이 더 높은 것을 알 수 있다.

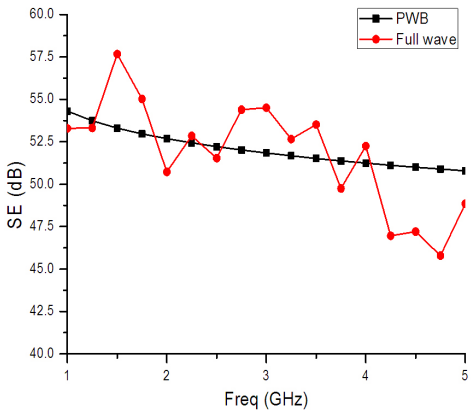

그림 7. PWB Method와 full-wave 시뮬레이션 차폐 효과 비교
Fig. 7. Comparison of the SE in PWB method and full-wave simulation.

표 1. 그림 5의 시뮬레이션 시간 및 데이터 용량 비교
Table 1. Time consumption and computational resources comparison of Fig. 5.

해석 방법	Time(sec)	Memory(kB)
PWB method	0.13	2,208
Full-wave simulation	5,748	1,014,708

2-3-2 비행기 동체 구조

두 번째 시뮬레이션 환경은 비행기 동체 구조로 보잉 757을 20배 축소하여 모델링하였다[2].

평면파가 z방향으로 수직 입사하는 경우에 대해서 PWB Method를 적용하였다. 그림 8을 그림 9와 같이 위상학적으로 모델링하였으며, 그림 9의 노드 3은 이상적 노드로 정의되며, 전력의 합이 0이 되는 노드이다. 이상적 노드는 그림 8의 내부 공간으로 생각할 수 있으며, 아래의 식을 만족한다.

$$\sum_{k=1}^{n} P_{node_k}^{i} = 0 \tag{8}$$

위 식의 $P_{node_k}^{i}$는 노드 k에서 노드 i로 전달되는 평균 전력을 의미하여 그림 9의 경우 i=3이 되겠다. 노드 4에서 노드 21까지는 동체 옆면의 창문을 의미하고, 노드 22는 도체의 벽면 손실을 나타낸다. 각 노드에서의 quality factor를 표 2에 정리하였다.

소비된 전력밀도를 계산하기 위하여 표 2의 quality factor를 사용하였으며, 식 (9)로 쓸 수 있다. 식 (9)의 결과값을 식 (2)에 대입하면 비행기 동체에서 소비된 전력을 구할 수 있다.

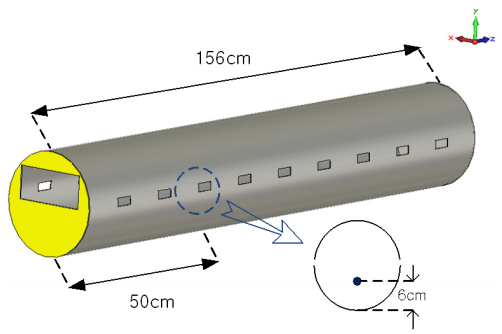

그림 8. 비행기 동체 모형[8]
Fig. 8. The modeling of fuselage[8].

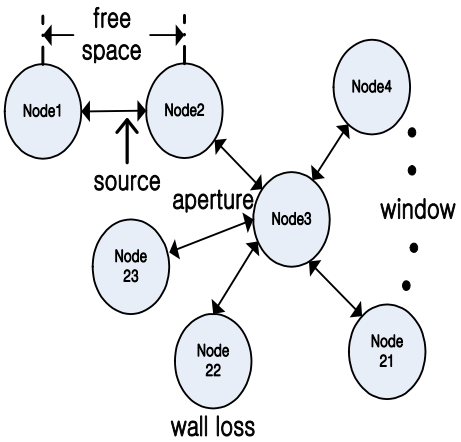

그림 9. 그림 8의 위상학적 모델링
Fig. 9. Topological modeling of Fig. 8.

표 2. 비행기 동체 quality factor
Table 2. Quality factor of fuselage.

	Quality factor
동체 정면 개구면	Q_{ap1}
동체 옆면 개구면	Q_{win}
동체 내부 벽면 손실	Q_W
동체 후면 개구면	Q_{ap2}

$$S = \frac{\lambda}{2\pi V} \cdot \frac{P_{inc}}{\frac{1}{Q_{ap1}} + \frac{1}{Q_W} + \frac{18}{Q_{win}} + \frac{1}{Q_{ap2}}} \tag{9}$$

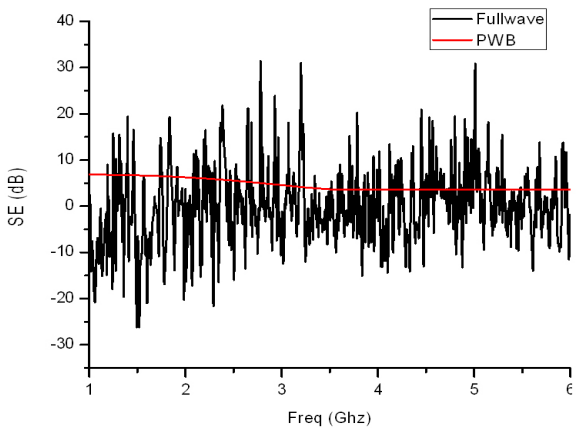

그림 10. 비행기 동체 SE 결과 비교
Fig. 10. Comparison of the SE of fuselage model.

표 3. 그림 8의 시뮬레이션 시간 및 데이터 용량 비교
Table 3. Time consumption and computational resources comparison of Fig. 8.

해석 방법	Time(sec)	Memory(kB)
PWB method	0.138672	4.744
Full-wave simulation	52,479	1,849,964

계산된 결과값으로부터 차폐효과를 계산하면 그림 10과 같은 그래프를 얻을 수 있다.

PWB Method의 결과값이 full-wave 시뮬레이션 결과값의 평균값 부근을 지나는 것을 확인할 수 있으며, 표 3에서 시간 및 데이터 효율 면에서 PWB Method가 full-wave 시뮬레이션에 비해 우수한 것을 알 수 있다.

Ⅲ. 위상학 이론을 활용한 PCB 해석

3-1 BLT 방정식 유도

BLT 방정식은 전파의 전달 특성과 산란 특성을 동시에 고려한 방정식으로 주로 선로 해석에 사용되는 이론이다.

그림 11은 BLT 방정식을 설명하기 위한 간단한 예로, 노드로부터 입사되고 반사되는 파를 정의하였다. 전달방정식인 식 (10)은 인접한 두 개의 노드 사이에 전달 특성을 전달 계수 Γ로 표현하였고, 산란방정식인 식 (11)은 하나의 노드에서 산란 특성을 산란계수 S로 표현한 식이다. 이 두 식을 연립한 식 (12)를 BLT 방정식이라 부른다[9].

$$[V^{inc}] = [\Gamma] \cdot [V^{ref}] + [V_s] \tag{10}$$

$$[V^{ref}] = [S] \cdot [V^{inc}] \tag{11}$$

$$([I] - [S] \cdot [\Gamma]) \cdot [V^{ref}] = [S] \cdot [V_s] \tag{12}$$

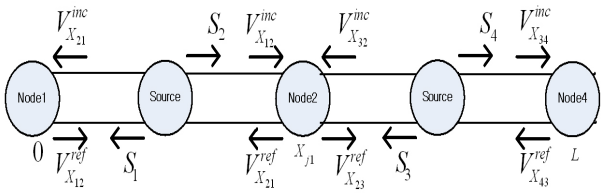

그림 11. 위상학적 다이어그램 전압 정의
Fig. 11. Definition of voltage in topological diagram.

3-2 BLT 방정식을 이용한 PCB 해석

그림 12는 단순한 PCB 모델로 Mitered Bend가 2개 존재하며, 양 끝단에는 82.75 Ω의 저항이 연결되어 있다. 외부에서 평면파가 입사하고 있을 때 좌측 저항에서의 전압 응답을 BLT 방정식을 이용하여 계산하고자 한다. PCB의 물리적 값은 표 4와 같다.

BLT 방정식을 적용하기 위해 그림 12의 mitered bend와 저항을 노드로, 선로를 튜브로 등가하여 위상학적 모델링을 그림 13과 같이 완성하였다.

각 노드에서의 전압을 구하기 위해 BLT 방정식을 식 (13)으로 유도하였다. 위치 X_{j1}, X_{j2}에 존재하는 노드 2, 노드 3의 산란계수가 포함된 것을 확인할 수 있다[10]. 우측 source 행렬은 외부 평면파에 의한 것으로 입사파의 각도와 입사파의 크기에 따라 달라진다[11]. BLT 방정식을 이용하여 좌측 저항에서 전압 응답을 계산한 결과를 그림 14에서 확인할 수 있으며, 상용 full-wave 시뮬레이션과 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

또한, 표 5에서도 알 수 있듯이, BLT 방정식이 시간측면에서 상용 시뮬레이션 툴보다 효율적이다.

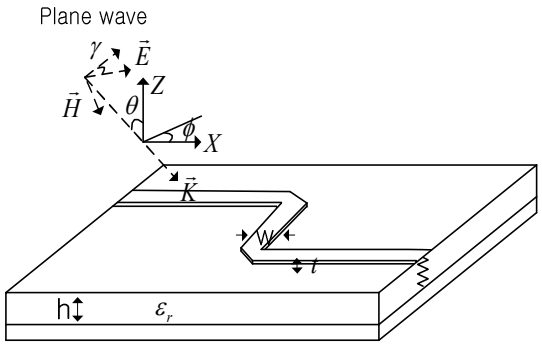

그림 12. Mitered bend가 두 개 존재하는 PCB
Fig. 12. PCB with two mitered bends.

표 4. 그림 12의 파라미터 정보
Table 4. The physical parameters of Fig. 12.

W	h	t
1 mm	1.5 mm	3.5 μm
$\theta = \phi = \gamma$	R	ϵ_r
0 °	82.75 Ω	4.7

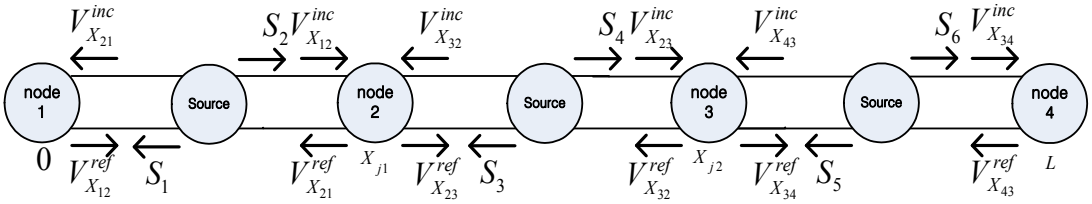

그림 13. 그림 12의 위상학적 다이어그램
Fig. 13. Topological modeling of Fig. 12.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_{X1} \\ V_{X2} \\ V_{X3} \\ V_{X4} \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+\rho_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1+S_{X_{j1}11} & S_{X_{j1}12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{X_{j1}21} & 1+S_{X_{j1}22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1+S_{X_{j2}11} & S_{X_{j2}12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{X_{j2}21} & 1+S_{X_{j2}22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\rho_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\rho_1 & e^{\gamma x_{j1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e^{\gamma x_{j1}} & -S_{X_{j1}11} & -S_{X_{j1}12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -S_{X_{j1}21} & -S_{X_{j1}22} & e^{\gamma(x_{j2}-x_{j1})} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{\gamma(x_{j2}-x_{j1})} & -S_{X_{j2}11} & -S_{X_{j2}12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -S_{X_{j2}21} & -S_{X_{j2}22} & e^{\gamma(L-x_{j2})} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{\gamma(L-x_{j2})} & -\rho_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} \tag{13}$$

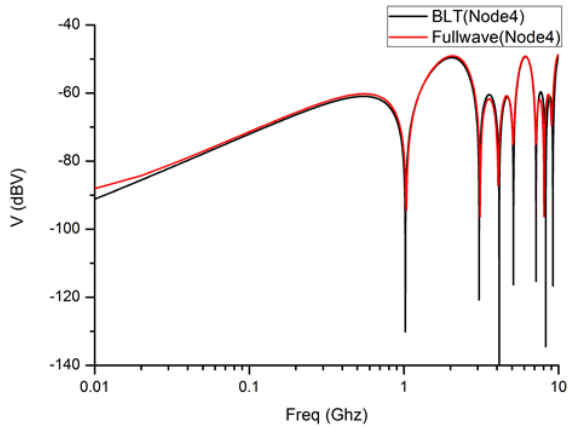

그림 14. BLT 방정식과 full-wave 시뮬레이션 비교
Fig. 14. Comparison between BLT equation and full-wave simulation.

표 5. 그림 12의 시뮬레이션 시간 비교
Table 5. Time consumption comparison of Fig. 12.

해석 방법	Time(sec)
BLT equation	50
Full-wave simulation	3,227

Ⅳ. PWB Method와 BLT 방정식을 연동한 이중 공진구조 내부 PCB 해석

그림 15는 본 논문에서 최종적으로 해석할 해석 대상으로 박스 내부에 또 다른 작은 박스가 존재하며, 작은 박스 내부에 PCB가 존재하는 구조이다. PCB는 너비 1 mm의 단일 직선 선로로 유전체의 두께는 1.5 mm, 상대유전율은 4.7이며, 양 끝단에 82.75 Ω의 저항이 연결되어 있다. 외부 박스 상단 개구면으로 평면파가 입사하고 있을 때 PCB의 위치를 변경해 가며 좌측에 연결된 저항에서 전압 응답을 해석해 보고자 한다. 그림 15의 위상학적 모델링을 그림

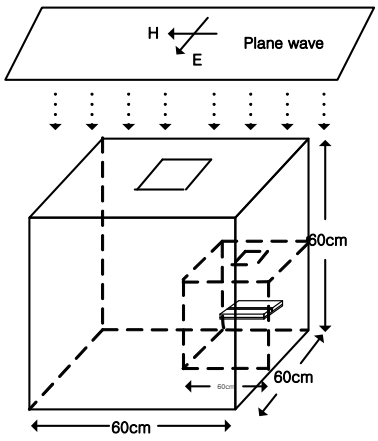

그림 15. 최종 해석 대상
Fig. 15. The final geometry.

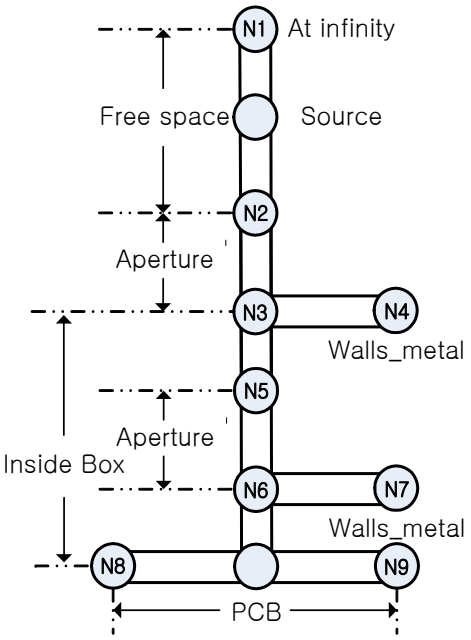

그림 16. 그림 15의 위상학적 다이어그램
Fig. 16. Topological modeling of Fig. 15.

16과 같이 얻을 수 있다.

그림 6과 비교하였을 때 노드 8과 노드9가 추가적으로 모델링되었으며, 이는 각각 PCB 양단의 저항을 의미한다.

앞서 2장에선 차폐 효과를 계산하기 위하여 내부 박스에 투과한 전력을 식 (4)를 통해 계산하였다. 해석 대상이 전기적으로 충분히 큰 구조물일 경우, 식 (4)의 계산 결과값을 PCB에 입력 전원으로 환산하여, 식 (12)의 우측 전원 행렬에 대입하여 좌측 저항단의 전압 응답을 계산할 수 있다. Full-wave 시뮬레이션의 경우, PCB의 위치를 밑면으로부터 5 cm, 15 cm, 25 cm로 변경해가며, 시뮬레이션하여 위치에 따른 영향을 함께 파악해 보았다. 각각의 해석 방법의 결과를 그림 17에서 확인할 수 있다. PWB Method와 full-wave 결과값의 경향성이 비슷한 것을 볼 수 있으며, 위치 변화에 따라서 full-wave 결과값에 차이는 있지만, PWB

표 6. 그림 15의 시뮬레이션 시간 및 데이터 용량 비교
Table 6. Time consumption and computational resources comparison of Fig. 15.

해석 방법	Time(sec)	Memory(kB)
BLT + PWB	0.18	5.152
Full-wave simulation	53,867	2,070,896

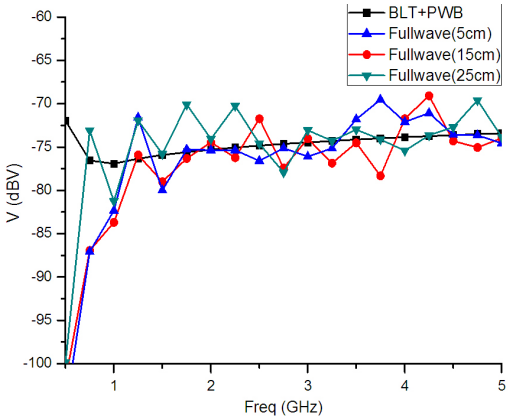

그림 17. 내부 박스 PCB에 좌측 저항의 전압 응답
Fig. 17. The voltage response at the left side resistance of PCB in the inner box.

Method와 비슷한 경향성을 띄는 것은 동일하다. 특히, 표 6을 표 1과 비교해 볼 때, 구조가 복잡해질수록 본 논문에서 제시된 방법이 더욱 효율적인 것을 알 수 있다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 확률론과 위상학 이론을 이용하여 이중 공진 구조 내부에 PCB가 존재하는 경우를 해석해 보았다. 기존의 수치 해석 기법과 비교하였을 때 정확도가 떨어진다는 단점이 있으나, 시간 및 데이터 효율이 상당히 우수한 것을 여러 시뮬레이션을 통하여 알 수 있었다. 시대가 지날수록 계속해서 구조물들이 대형화되고 복잡도가 높아짐에 따라서 제시된 해석 방법의 활용도는 더욱 향상될 것으로 예상된다. 또한, 정확도 향상을 위한 새로운 보정 방법과 여러 해석 방법을 동시에 활용하는 하이브리드(hybrid) 방법이 적용된다면 더욱 효율적인 해석 방법이 될 것이다.

References

[1] I. Junqua, J. -P. Parmantier, and M. Ridel, "Modeling of high frequency coupling inside oversized structures by asymptotic and PWB methods", in *Proc. Int. Conf. Electromagn. Adv. Appl.*, pp. 68-71, 2011.

[2] 정인환, 이재욱, 이영승, 권종화, "PWB Method와 BLT 방정식을 연동한 거대구조 해석 응용", 한국전자파학

회지 전자파기술, 25(3), pp. 24-33, 2014년 5월.
[3] David H. Staelin, Ann W. Morgenthaler, and Jin Au Kong, *Electromagnetic Waves*, Prentice Hall PTR, 1994.
[4] D. Hill, *Electromagnetic Fields in Cavities: Deterministic and Statistical Theories*, IEEE Press, 2009.
[5] D. Mansson, R. Thottappillil, and M. Backstrom, "Methodology for classifying facilities with respect to intentional EMI", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 51, no. 1, pp. 46-52, Feb. 2009.
[6] 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, 2005.
[7] D. A. Hill, "Plane wave integral representation for fields in reverberation chambers", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 40, no. 3, pp. 209-217, Aug. 1998.
[8] A. H. Panaretos, C. A. Balanis, and C. R. Birtcher, "Shielding effectiveness and statistical analysis of cylindrical scale fuselage model", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 42, no. 2, pp. 361-366, May 2005.
[9] F. M. Tesche, C. M. Butler, "On the addition of EM field propagation and coupling effects in the BLT equation", *College of Engineering & Science*, Note 588, Dec. 2003.
[10] Brian C. Wadell, *Transmission Line Design Handbook*, Artech House, 1991.
[11] Marco Leone, Hermann L. Singer, "On the coupling of an external electromagnetic field to a printed circuit board trace", *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.*, vol. 47, no. 4, pp. 418-424, Nov. 1999.

정 인 환

2013년 8월: 한국항공대학교 전자 및 항공전자공학과 (공학사)
2013년 8월～현재: 한국항공대학교 항공전자공학과 석사과정
[주 관심분야] EMI/EMC, RF시스템

이 재 욱

1992년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1998년 3월～2004년 2월: 한국전자통신연구원 디지털방송연구단 전파기반연구그룹
2004년 3월～현재: 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 전자 및 항공전자 전공, 부교수/교수
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 능, 수동 소자 해석 및 설계, EMI/EMC 대책 기술, 고출력 증폭기 및 고출력 안테나 설계, 위성 통신 안테나, 전자장 수치 해석

이 영 승

2006년 8월: 고려대학교 전파통신공학과 (공학사)
2008년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2012년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2012년 3월～현재: 한국전자통신연구원 (ETRI) 선임연구원
[주 관심분야] 전자파 이론 및 산란, EMI/EMC

권 종 화

1994년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
1999년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
2010년 2월: 연세대학교 전기전자공학 (공학박사)
1999년 1월～현재: 한국전자통신연구원 방송통신미디어연구소 전파기술연구부 전자파환경연구실 실장/책임연구원
[주 관심분야] SI/PI 및 EMC 대책 기술 및 표준화, 고출력 전자기파 펄스 대책 및 측정기술

조 춘 식

1887년 2월: 서울대학교 제어계측공학과 (공학사)
1998년 12월: 미국 Colorado 대학교 전기 및 컴퓨터공학과 (공학박사)
1987년～1993년: LG 정보통신
1999년～2003년: 팬택앤큐리텔
2004년 3월～현재: 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 부교수
[주 관심분야] Millimeter-wave IC 설계, 전력증폭기 설계, Analog IC