PWB Method와 BLT 방정식을 연동한 거대구조 해석 응용

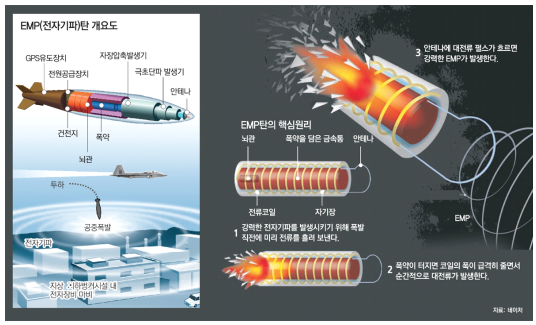
정인환 · 이재욱 · 이영승* · 권종화*

한국항공대학교, *한국전자통신연구원

Ⅰ. 개 요

현대과학 기술의 발전으로 눈에 보이지 않는 전자기파 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근 높은 전력(high power)과 광대역(ultra wide-band) 특성을 지닌 전자장 전원(electromagnetic field source)의 활용도가 높아짐에 따라, 그로 인하여 발생하는 주변 시스템의 오작동 및 인체 유해성 그리고 의도적 전자기파를 활용하는 전자기 무기(electromagnetic weapon)에 관한 연구가 논의되고 있다. 특히, 전자기파의 안전성을 판단하는 데 있어서 거대 구조물은 소형 구조물보다 더욱 엄격한 기준이 필요하다. 그 이유는 의도적인 혹은 의도하지 않은 불필요한 전자기 펄스(EMP: Electromagnetic Pulse)로 인하여 거대 구조물이 피해를 입을 경우, 막대한 재산 피해 및 인명 피해가 우려되기 때문이다. IEC(International Electrotechnical Commission)는 1989년부터 HPEM(High Power EMP)의 안전성에 관한 기준을 제시하였고, 관련 문서인 SC77A, SC77B, SC77C에서는 EMC(Electromagnetic Compatibility), HIRF(High Intensity Radar fields), HEMP(High Altitude Electromagnetic Pulse)관련 내용 등을 기술하고 있다. 특히, HEMP는 공격무기 측면과 방어적 측면 두 가지로 나눌 수 있는데, 공격적 측면에서는 NEMP (Nuclear Electromagnetic Pulse)와 NNEMP (Non-Nuclear Electromagnetic Pulse)로 분류된다[1]. NEMP는 핵폭발이 발생할 때 방출되는 전자기파를 이용하고 NNEMP는 화학에너지 혹은 전기에너지의 펄스를 이용한다. NNEMP가 NEMP에 비해 폭발력은 떨어지지만, 군사적 목적으로 활용할 수 있으며, NEMP보다 활용도가 높을 것으로 예상된다[2]. [그림 1]에서 볼 수 있듯이 EMP가 공중에서 폭파될 시 지상의 전자장비의 마비시킬 수 있으며, 그 범위가 상당할 것으로 예상하고 있다[3].

EMP 공격에 대비하기 위한 방어적 측면 연구도 다양하게 진행되었는데, 특히 본 논문에서는 거대 구조물이 외부 전자계 영향에 얼마나 안전한가를 판단하는 차폐(SE: Shielding Effectiveness) 관련 내용을 소개하고자 한다. 지난 수 백 년 동안 거대 구조물의 전자파 안전성을 판단하기 위해 다양한 해석 방법이 적용되어 왔다. 그 중 대표적 해석 방법인 수치 해석 기법은 비교적 정확한 결과 값을 주는 것으로 알려졌으며, 대부분의 상용 시뮬레이터들은 수치 해석 기법을 기반으로 하고 있다. 하지만 수치 해석 기법을 이용한 상용 시뮬레이터는 해석 대상을 Mesh cell로



[그림 1] EMP탄 개요 및 원리[3]

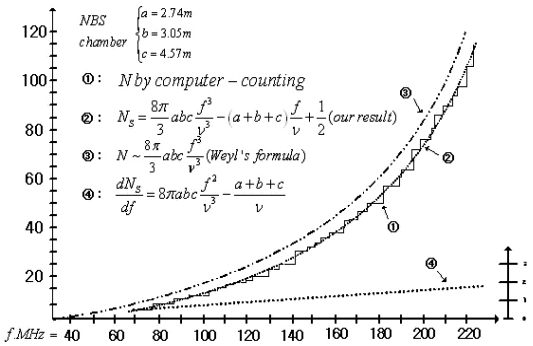
나누는 단계에서 구조가 크거나 복잡할 경우, Mesh cell의 개수가 기하급수적으로 증가하는 단점이 있다. Mesh cell의 증가는 데이터양을 급증하게 만드는 원인이 되며[4], 이는 해석 시간의 증가를 가져온다. 이런 현상은 주파수가 증가함에 따라 모드(mode) 수가 증가하는 [그림 2]의 성질과 유사하다. 또한, 수치 해석 기법의 해가 결정론적(deterministic)이라는 단점도 무시할 수 없다. 급변하는 현대 전자파 환경 속에서 특정한 단일 환경에 대한 전자기파 안전성 판단은 큰 의미를 갖지 못하기 때문이다.

따라서 단시간에 다양한 환경을 분석할 수 있는 해석 방법의 필요성이 요구되어 왔다. 본 논문에서는 위의 단점을 보완하기 위해서 PWB Method와 BLT 방정식을 연동한 해석 방법을 제시하고자 한다. 두 해석 방법을 이용하여 특정 구조물에 대해 차폐(SE: Shielding Effectiveness) 성능을 확인하고, 수치 해석 기법과 시간 및 데이터 활용 측면을 비교하고자 한다.

Ⅱ. PWB Method를 이용한 해석 방법

2-1 대형 구조물에 대한 확률 도입의 필요성

해석하고자 하는 대상의 정확한 크기 및 매질 정보를 알고, 그 구조가 단순할 때 전자기장 해석은 수치 해석으로 풀이하는 것이 정확하다. 하지만, 해석



[그림 2] 주파수 증가에 따른 모드 개수 변화[7]

대상이 거대하고 복잡한 구조일 때에는 크기와 매질 정보를 정확하게 얻기란 어려운 일이다. 특히, 비행기와 건물 같은 구조물은 내부에 수많은 케이블이 연결되어있을 뿐만 아니라, 무선 데이터 통신으로 인한 다양하고 복잡한 전자기장 형태가 존재하게 된다. 이와 같은 구조물을 수치 해석 기법으로 해석하는 것은 한계가 있다. 이에 따라, 수치 해석을 대체할 수 있는 다양한 기법이 소개되어 왔으며, 본 논문에서는 확률론(Stochastic)과 위상학적 다이어그램을 기반으로 한 해석 방법을 제시하고 있다. 본래 확률론 해석은 실내 음향학(acoustics) 분야에 주로 사용되었지만, 근래에는 레이다 단면적(radar cross section) 특성 연구 및 반향실 내에 전자기파 관련 연구에도 활용되고 있다.[5],[6]

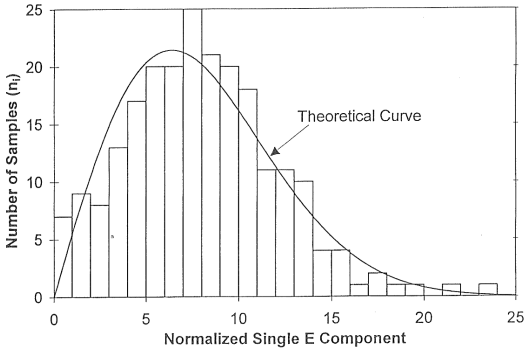
확률론으로 해석한 결과 값의 특성을 파악하기 위해 확률 밀도 함수의 관계를 숙지하는 것은 유용하다. 몇 가지 대표적인 확률 밀도 함수를 소개하고자 한다. 전자장의 단방향 성분은 가우시안 확률 밀도 함수(Gaussian PDF)를 따르며, 아래 식 (1)로 표현할 수 있다. 전자장의 단방향 절대 값은 레일리 분포(Rayleigh distribution)를 따르며, 전자장 절대 값의 제곱은 카이스퀘어 분포(chi-square distribution)를 따른다. 각각 식 (2), (3)으로 쓸 수 있다.[7]

$$f(E_{xr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma}\exp\left[-\frac{\mathrm{E}_{\mathrm{xr}}^2}{2\sigma^2}\right] \tag{1}$$

$$f(|E_x|) = \frac{|E_x|}{\sigma^2}\exp\left[-\frac{|\mathrm{E}_{\mathrm{x}}|^2}{2\sigma^2}\right] \tag{2}$$

$$f(|E_x|^2) = \frac{1}{2\sigma^2}\exp\left[-\frac{|\mathrm{E}_{\mathrm{x}}|^2}{2\sigma^2}\right] \tag{3}$$

전자장의 x, y, z 모든 방향 성분 절대 값은 카이 분포(chi distribution)를 따르며, 절대 값의 제곱은 카이스퀘어 분포(chi-square distribution)를 따른다. 아래



[그림 3] 단일 사각구조 내부에 단방향 전자장의 절대치 측정치와 이론값 비교(레일리 분포)[7]

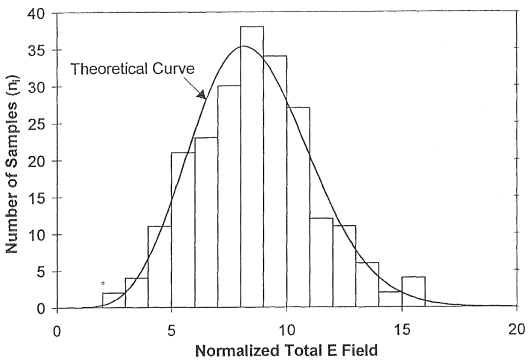
식으로 표현할 수 있다.[7]

$$f(|\vec{E}|) = \frac{|\vec{E}|^5}{8\sigma^6}\exp\left[-\frac{|\vec{E}|^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

$$f(|\vec{E}|^2) = \frac{|\vec{E}|^4}{16\sigma^6}\exp\left[-\frac{|\vec{E}|^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5)$$

위의 4가지 확률밀도 함수를 이용하면 확률 데이터 검증 및 경향성 파악이 가능하다.

2-2 PWB Method



[그림 4] 단일 사각구조 내부에 전자장의 절대치 측정치와 이론값 비교(카이 분포)[7]

PWB Method는 단일 구조체 내부에 고주파 응답을 계산하기 위한 해석 방법으로 D. A. Hill에 의해 처음으로 제안되었다. PWB Method는 확률론을 바탕으로 하고 있으며, 해석 주파수 대역에서 해석 대상 내부 시스템의 파장이 해석 대상 크기에 비해 매우 작아야 한다는 가정을 전제로 하고 있다. 이 가정은 시스템 내부의 모든 지점에서 전자기파의 크기가 균등하게 분포하고 있다는 것을 의미한다. 이 가정이 성립되는 경우에만 PWB Method의 결과를 신뢰할 수 있고, 위의 조건을 만족하는 시스템을 일반적으로 잔향실(MSRC: Mode Stirred Reverberation Chamber)이라고 부른다. PWB Method는 구조체 내부에서 높은 주파수 간섭 현상을 mean quality factor와 mean coupling cross section으로 판단할 수 있으며, 일반적인 quality factor 표현식은 다음과 같다.[8]

$$Q = 2\pi f\frac{W}{P_d} \quad (6)$$

이 식에서 f는 주파수, W는 구조체 내부에서의 정상 상태 에너지(mean steady state energy)를 의미하며, P_d는 평균 소비 전력(mean dissipated power)을 나타낸다. 다음으로 정상상태 에너지 W를 전계의 분산함수 V_E와 구조체의 부피 V로 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$W = 3\epsilon V \cdot V_E \quad (7)$$

구조체 내부에 전력 밀도는 식 (8)로 쓸 수 있으며, η는 구조체 내부 매질의 파동 임피던스(wave impedance)이다.

$$S_c = \frac{3V_E}{\eta} \quad (8)$$

최종적으로 구조체 내부의 평균 소비 전력, P_d는

아래와 같은 여러 가지 전력으로 표현 가능하다. 정상상태인 경우에는 구조체 내부로 전송되는 전력과 내부에서 소비 전력의 크기가 같고, 이는 아래에서 언급한 네 가지의 전력의 합과 같다는 의미가 되겠다.

- 구조체 벽면에서의 손실(P_W)
- Points of entry(POE) 혹은 일반적인 개구(開口)에서의 재복사(P_{ap})
- 구조체 내부에 위치하고 있는 안테나에서 소멸하는 에너지(P_{ant})
- 구조체 내부의 물체에 의한 에너지 흡수(P_{obj})

$$P_t = P_d = P_W + P_{ap} + P_{ant} + P_{obj} \tag{9}$$

또한, 구조체의 mean quality factor를 위의 네 가지 quality factor Q_W, Q_{ap}, Q_{ant}, Q_{obj}의 함수로써 표현이 가능하고, quality factor는 마치 병렬 연결 저항의 합과 같이 표현된다.

$$Q = 2\pi f \frac{W}{P_d} = \frac{1}{\frac{1}{Q_W} + \frac{1}{Q_{ap}} + \frac{1}{Q_{ant}} + \frac{1}{Q_{obj}}} \tag{10}$$

식 (10)의 각각의 quality factor는 다음과 같다.

$$Q_W = 2\pi f \frac{W}{P_W},\ Q_{ap} = 2\pi f \frac{W}{P_{ap}}$$
$$Q_{ant} = 2\pi f \frac{W}{P_{ant}},\ Q_{obj} = 2\pi f \frac{W}{P_{obj}} \tag{11}$$

다음으로 구조체 내부에서 주요 손실 전력을 mean elementary quality factor와 mean coupling cross section으로 표현하는 과정에 대해 알아보겠다. 두 값은 매질과 구조체의 형태에 따라서 달라지는 값이며, 정의된 4가지의 quality factor를 모두 고려하여 아래와 같이 mean power density를 쓸 수 있다.

$$S = \frac{\lambda}{2\pi V} \cdot \frac{P}{\frac{1}{Q_W} + \frac{1}{Q_{ap}} + \frac{1}{Q_{ant}} + \frac{1}{Q_{obj}}} \tag{12}$$

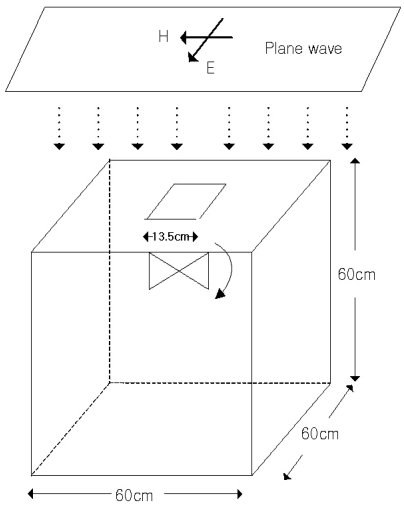
식 (12)에 λ는 파장, V는 구조체의 부피, P는 인가한 전원을 의미한다. 위의 식을 최종 전력식으로 정리하면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$P = \frac{2\pi V}{\lambda Q} \cdot S \tag{13}$$

식 (13)의 Q는 식 (10)과 같은 값이며, 위에 식은 앞서 언급한 4가지 경우의 에너지 변화를 모두 포함한 전력식이다.

2-3 PWB Method 시뮬레이션

PWB Method를 적용하기 위하여 [그림 5]와 같은 정육면체 구조를 모델링하였다. 외부에서 평면파가 구조체 상단 개구면으로 입사하고, 내부에 전자계를 균일하게 만들어 주기 위한 mode stirrer를 높이 40 cm 지점에 위치시켰다. [그림 5]의 경우, 내부 벽면



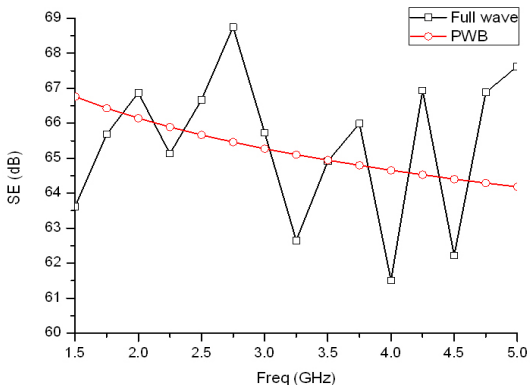
[그림 5] 상단에 개구면이 존재하는 정육면체 구조

과 구조체 상단 개구면에 의한 에너지 손실을 고려해야 하므로 Q_W, Q_{ap}를 이용하여 전력을 계산할 수 있다. 위의 구조체에 해당하는 mean power density S는 식 (14)로 쓸 수 있으며, Q_W와 Q_{ap}는 식 (11)과 같은 식이다. 최종적으로 구조체 내부 벽면에서의 전력 손실을 계산한 P_{wall}을 식 (13)으로 계산할 수 있다. 또한, 본 논문에서 비교할 최종 결과 값인 차폐(SE: Shielding Effectiveness)를 식 (15)로 정의할 수 있다.

$$S = \frac{\lambda}{2\pi V} \cdot \frac{P}{\frac{1}{Q_W} + \frac{1}{Q_{ap}}} \tag{14}$$

$$SE = 10\log\left(\frac{P_i}{P_t}\right) \tag{15}$$

차폐는 입사 전력 P_{in}과 투과 전력 P_t의 비로 나타낼 수 있으며, 해당 구조의 경우, 구조체 내부의 전력 손실은 구조체 벽면 손실뿐임으로 P_t을 P_{wall}와 동일한 값으로 둘 수 있다. PWB Method 식을 통해 구한 결과 값과 상용 Full-wave 시뮬레이터를 활용한 결과 값을 [그림 6]에서 비교하였다. PWB Method의 결과 값이 Full-wave의 중간 값 부근을 나타내는 것을 확인할 수 있다.



[그림 6] [그림 5]의 SE 결과 값 비교

〈표 1〉 시뮬레이션 시간 및 데이터 용량 비교

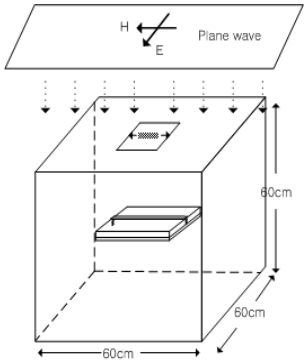
해석방법	Time(sec)	Memory(kB)
PWB Method	0.11	0.480
Full-wave	540	1021260

두 결과가 정확하게 일치하지는 않지만, PWB Method를 활용하면 경향성과 크기 정보를 알 수 있다. 또한, 아래 표에 나타나 있듯이 PWB Method의 경우, 시간적 측면과 메모리 활용 측면에서 우수하다는 것을 알 수 있다.

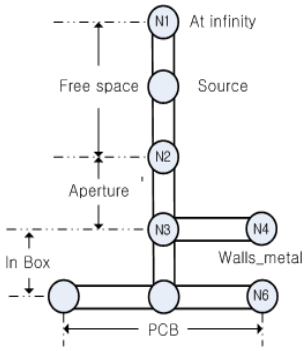
Ⅲ. BLT방정식을 이용한 해석 방법

3-1 위상기하학

BLT 방정식을 적용하기 위해 구조물의 전파 경로 및 구조를 간단하게 표현하는 과정이 필요하다. 이 과정을 전자파 위상기하학(EMT: Electromagnetic Topology)이라 부른다. 위상기하학은 외부에서 입력된 전원을 에너지 레벨로 구분하는데, 이는 차폐 단계에 따라 분류한다고도 말할 수 있다.[9] [그림 7]은 위상기하학을 설명하기 위한 예로 [그림 7] (a)는 외부 평면파가 정육면체 구조물 상단 개구면으로 입사되고 있는 시뮬레이션 상황을 묘사하고 있으며, 구조물 내부에 PCB가 존재하고 PCB 양 끝단에는 저항이 존재하는 것을 확인할 수 있다. [그림 7] (b)는 [그림 7] (a)를 위상기하학으로 표현한 그림이다. 구조물의 불연속 지점과 회로의 수동소자는 노드로 등가할 수 있으며, 전자기파가 이동하는 통로 및 선로는 Tube로 등가할 수 있다. [그림 7] (b)에서 노드는 편의상 N으로 표기하였다. [그림 7] (a)에서 외부 입사파가 들어오는 영역이 제일 높은 에너지 레벨 단계로써 N1으로 등가되고, 개구면은 두 번째로 높은 에너지 레벨 단계로 N2와 N3로 표현하였다. 개구면을 통과한



(a) 내부에 PCB가 존재하는 정육면체 구조



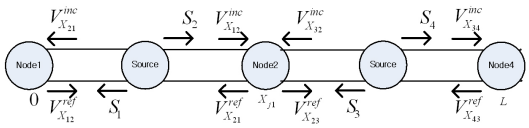
(b) 그림 (a)의 위상학적 모델링

[그림 7] 위상학적 모델링의 예

전자기파의 에너지 레벨을 세 번째로 높은 에너지 레벨 단계로 구분할 수 있으며, 구조체 내부 도체 표면에서의 손실을 N4, 내부 PCB의 양쪽 끝단의 저항을 N5, N6로 등가할 수 있다.

3-2 BLT 방정식

BLT 방정식을 정의하기 위해 앞서 언급한 위상기하학 모델의 입사파와 반사파가 정의되어야 한다. 아래 그림에서 V^{inc}는 노드로 입사하는 전압을 의미하며, V^{ref}는 노드에서 반사되는 전압을 의미한다. 노드 1과 노드 2 사이와 노드 2와 노드 3 사이에 각각 전원(Source)이 존재하며, 전원의 종류는 외부에서 인가된 전자계 혹은 선로상의 전압 및 전류가 되겠다.



[그림 8] 위상학적 다이어그램 전압 정의

위상기하학에 존재하는 모든 전자파가 정의된 후에 BLT 방정식을 유도할 수 있다.

BLT 방정식은 전파방정식(propagation equation)과 산란방정식(scattering equation)을 연립함으로써 구해진다. 첫 번째 전파방정식은 두 노드 사이에 존재하는 전자기파의 전달 특성을 나타내는 식으로 전달계수 Γ로 표현이 가능하며, 식 (16)로 나타낼 수 있다. 산란방정식은 하나의 노드에 대해서 산란 특성을 나타내는 식으로 산란계수 S를 포함한 식 (17)로 표현할 수 있다. 전달방정식과 산란방정식을 연립하여 최종 BLT 방정식을 얻을 수 있으며, 식 (18)이 최종 BLT 방정식이 되겠다.[10]

$$[V^{inc}] = [\Gamma] \cdot [V^{ref}] + [V_s] \tag{16}$$

$$[V^{ref}] = [S] \cdot [V^{inc}] \tag{17}$$

$$([I] - [S] \cdot [\Gamma]) \cdot [V^{ref}] = [S] \cdot [V_s] \tag{18}$$

Ⅳ. PWB Method와 BLT 방정식을 연동한 해석 방법

4-1 PWB Method와 BLT 방정식 연동

본 절에서는 PWB Method와 BLT 방정식의 연동에 관한 내용을 소개하고자 한다. PWB Method를 이용하여 신속하게 계산한 전력 값을 위상학적 모델링을 활용한 BLT 방정식에 전원(Source)으로 대입하면, 복잡한 대형 구조물의 전기적 특성을 파악할 수

있다. 연동된 해석 방법의 해석 단계를 거시적으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

1. 해석 대상의 위상학적 모델 정의
2. PWB Method를 이용한 해석 대상 내부 대표 전력 값 계산
3. 대표 전력 값을 BLT 방정식 입력 Source로 변환
4. BLT 방정식을 이용한 내부 구조 해석
5. 상용 Tool과 비교 검증

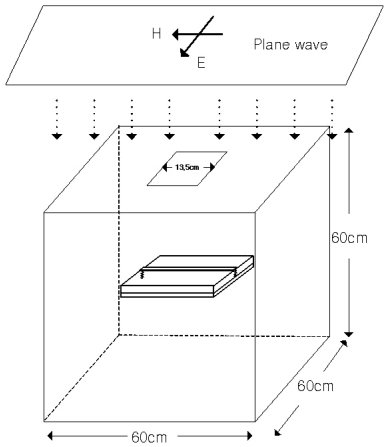
해석 단계 1은 복잡한 대형 구조물을 간단한 위상학적 모델로 등가하는 것을 의미하며, 해석 단계 2, 3, 4는 위상학적 모델을 바탕으로 앞서 언급한 두 가지 이론에 적용하여 해석하는 단계이다. 본 논문에서는 위의 순서에 맞추어 단일 박스 내부의 PCB를 해석하였고, 소형화 된 비행기 동체에 제시된 이론의 적용 가능성을 확인하였다.

4-2 단일 박스 내부 PCB 구조

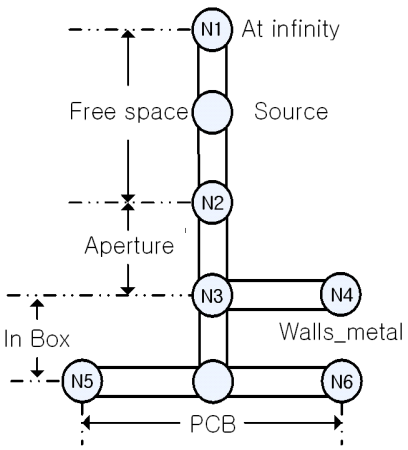
첫 번째 해석 대상은 길이 60 cm 정육면체 박스 내부에 PCB가 존재하는 구조로 박스 상단에서 평면파가 13.5 cm^2의 정사각형 개구면으로 입사하고 있으며, [그림 9]로 확인할 수 있다.

첫 번째 위상학적 모델링 결과는 [그림 10]과 같다. N1은 Box의 외부 자유공간을 나타내고 있으며, N2, N3는 Box 상단에 Aperture 부분을 의미한다. 개구면은 도파관의 성질과 비슷한 경향을 보임으로 두 개의 Node로 등가하였다. N4는 Box 내부 벽면의 손실을 나타내며, N5와 N6은 PCB의 양 끝 저항을 의미한다.

두 번째 단계인 대표 전력 값 계산은 식 (13)을 이용하여 구할 수 있으며, 결과 값을 BLT 방정식에 전원(Source)으로 두어 좌측 저항의 전압 응답 계산할 수 있다. 본 논문에서 제시한 해석 방법의 결과와 상용 시뮬레이션 툴 결과를 비교한 그래프가 아래 그림에 나타나 있다. 두 그래프가 20 dB 범위 내에 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.



[그림 9] 내부에 PCB가 존재하는 정육면체 구조

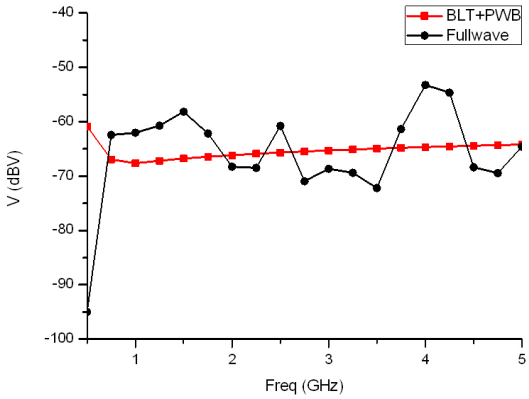


[그림 10] [그림 9]의 위상학적 모델

<표 2>는 PWB Method와 BLT 방정식을 연동한 해석 기법과 상용 시뮬레이션 툴의 시간 및 메모리를 비교한 결과이며, 제시된 해석 방법의 효율이 상용 시뮬레이션 툴에 비해 우수한 것을 확인할 수 있다.

4-3 비행기 동체 구조

본 논문에서 제시한 해석법이 실제 구조물에 적용이 가능한가를 확인하기 위하여 보잉 757을 20배 축소하여 [그림 12]와 같이 모델링하였다.[11] 동체 정면



[그림 11] 좌측 저항의 전압 응답 비교

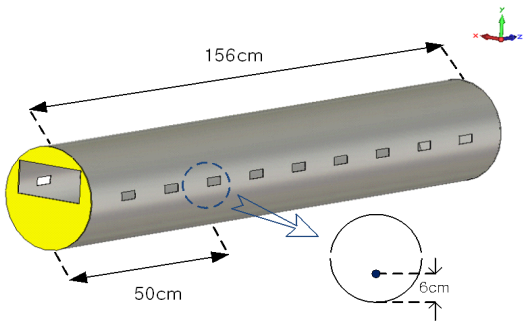
〈표 2〉 시뮬레이션 시간 및 데이터 용량 비교

해석 방법	Time(sec)	Memory(kB)
PWB Method + BLT eq	0.15	4.368
Full-wave simulation	3958	432704

에서 평면파가 입사할 때 동체 정면으로부터 z 방향으로 50 cm, y 방향으로 6 cm 지점에 프로브를 위치시켜 전계를 측정하였다.

PWB Method 해석을 위해 동체에 영향을 주는 Q-factor를 각각 아래와 같이 정의하였다.

Q_{ap1}, Q_{ap2}, Q_{win}은 식 (11)을 이용하여 계산할 수 있다. 정면과 후면의 개구면의 크기는 가로 18 cm, 세로 8 cm이며, 옆면 창문의 크기는 가로 5 cm, 세로 3 cm이다. 다음으로, 동체 내부 벽면 손실을 나타내는 Q_W 역시 식 (11)로 계산할 수 있으며, 계산 시 개구면을 제외한 면적을 이용하였다. 도체 내부에서 손실되는 모든 전력을 계산하기 위하여 개구면과 동체 벽면 손실을 포함하여 식 (13)을 계산하여야 한다. 최종 비교 값인 SE를 상용 시뮬레이션 툴과 비교한 결과를 아래 그림에서 확인할 수 있다. 저주파 대역에서는 PWB Method의 결과 값이 상용 시뮬레이션 툴 결과 오차가 있지만, 주파수가 높아지면서 비슷한 경



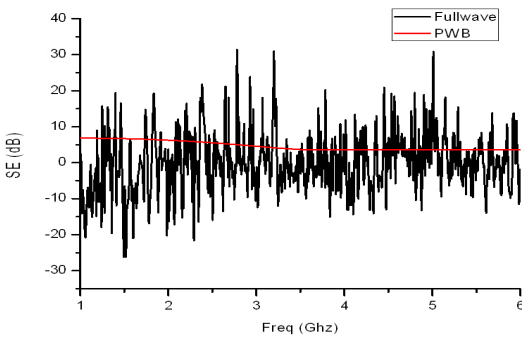
[그림 12] 비행기 동체 구조[11]

〈표 3〉 [그림 12]에 포함된 Q-factor

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

향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 저주파 대역에서는 파장의 길이가 충분히 짧지 않아 PWB Method의 적용이 어렵지만, 파장이 충분히 짧을 경우에는 PWB Method의 적용이 적합하다는 것을 의미한다.

또한, 두 시뮬레이션의 시간과 메모리 측면을 비교한 결과, 상용 시뮬레이션 툴이 상당한 메모리와 시간을 필요로 한다는 것을 알 수 있다.



[그림 13] 비행기 동체 SE 결과 비교

〈표 4〉 시뮬레이션 시간 및 데이터 용량 비교

해석 방법	Time(sec)	Memory(kB)
PWB Method	0.138672	4.744
Full-wave simulation	52479	1849964

Ⅴ. 결 론

현대기술의 발달로 인간의 활동 범위가 전 세계로 넓어지고 있으며, 그로 인한 대형 비행기, 대형 선박 등이 설계, 제작되고 있다. 앞으로도 대형 구조물의 형태와 개수 그리고 크기는 계속해서 증가할 것이다. 따라서 현대까지 대형 구조물의 전자기파 안전성을 판단하던 수치 해석 기법의 시간 효율 및 데이터 용량 부분에 있어서 단점 보완이 시급하다. 본 논문에서는 위의 단점을 극복하기 위한 방법으로 확률론을 바탕으로 한 PWB Method와 위상학적 모델링을 이용한 BLT 방정식을 제시하였다. 두 해석 방법을 연동하여 사용할 경우, 시간 효율과 데이터 효율을 높일 수 있다는 것을 확인하였고, 정확도 측면에서도 우수한 결과를 얻을 수 있음을 보였다. 현재까지 확률론을 이용한 대형 구조물 해석 연구는 주로 국외에서 진행되어왔다. 대형 구조물의 전자기파 안전성이 대두되고 있는 만큼 국내에서도 다양한 연구가 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] 김창일, "High altitude Electromagnetic Pulse(HEMP)의 기술동향", 전기전자재료, 23(3), pp. 3-10, 2012년 3월.

[2] 장태헌, "고출력 전자기파 내성 평가 관련 표준화 동향", 한국정보통신기술협회, 150, pp. 43-51, 2013년 11월.

[3] 동아일보, 北 EMP탄 50 km 상공서 폭파땐 南전역 암흑천지 될 수도, http://news.donga.com/3/all/20140411/62445792/1, 2014년 4월.

[4] D. Hill, *Electromagnetic Fields in Cavities: Deterministic and Statistical Theories, Piscataway*, IEEE Press, 2009.

[5] A. J. Mackay, "Application of the generalized radiance function for prediction of the mean RCS of bent chaotic ducts with apertures not normal to the duct axis", *IEE Proc. Radar Sonar Navig.*, vol. 149, pp. 9-15, 2002.

[6] R. Holland, R. St. John, *Statistical Electromagnetics*. Philadelphia: Taylor & Francis, 1999.

[7] J. Ladbury, G. Koepke, and D. Camell, "Evaluation of the NASA langley research center mode-stirred chamber facility", *U. S. Nat. Inst. Stand. Technol. Tech. Note 1508*, 1999.

[8] 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.

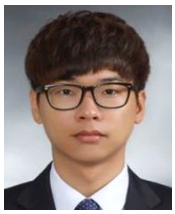
[9] 육종관, 두진경, 현세영, "EM Topology를 이용한 거대구조의 전자파 결합 특성 분석", 한국전자파학회지 전자파기술지, 23(4), pp. 24-31, 2012년 7월.

[10] 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.

[11] 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.

≡ 필자소개 ≡

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