

## 성능이 보완된 PWB 방법을 사용한 외부 전자기파에 의한 대형 건물 내부의 전자기파 영향 해석

### Analysis of Electromagnetic Effect Inside Large Buildings by External Electromagnetic Waves Using Performance-Enhanced PWB Method

이 한 희 · 이 재 욱

Han-Hee Lee · Jae-Wook Lee

#### 요 약

본 논문은 외부 전자기파에 의한 대형 건물 내부의 전자기파 해석을 보다 효율적으로 계산하기 위한 방법을 제시한다. 대형 건물에서의 전자기파 해석을 위해 위상학적 해석과 PWB 방법을 도입하였다. 기존 PWB 방법을 소개하고, PWB 방법의 성능을 보완하는 방법을 제시하고 적용하여 정확도를 높였다. 가상의 대형 구조물을 선정하고, 전자기파 입사환경을 설정하여 외부 전자기파에 의한 대형 건물 내부의 전자기파 해석을 진행하였다. 성능이 보완된 PWB 방법의 정확도를 검증하기 위해 상용 시뮬레이션 툴인 Wireless Insite를 사용하였다. 두 결과를 정확도, 시간, 메모리 관점에서 비교한 결과, 외부 전자기파에 의한 대형 구조물 내부의 전자기파 해석에 성능이 보완된 PWB 방법이 효율적인 방법임을 확인하였다.

#### Abstract

This paper presents a method to perform a more efficient electromagnetic wave analysis inside a large building by external electromagnetic waves. Topological analysis and the PWB method are introduced for electromagnetic wave analysis. In addition, a Performance-Enhanced PWB method, which complements the performance of the PWB method is proposed. A large virtual structure was selected and an analysis environment was set up to perform the electromagnetic wave analysis inside a large building from external electromagnetic waves. A commercially available software, Wireless Insite, was used to verify the accuracy of the the Performance- Enhanced PWB method. As a result of comparing the two results in terms of accuracy, time, and memory, We conclude that the Performance-Enhanced PWB method proposed in this paper is a more efficient method in a large building.

Key words: PWB Method, Electromagnetic Compatibility, Topological Analysis, Large-Scaled Building, Building Material

#### I. 서 론

이동통신의 발전으로 대량의 데이터가 무선으로 전송됨에 따라 높은 전력(high power)과 광대역(ultra wide-band)

특성을 갖는 다양한 전자장 전원(electromagnetic field source)의 발전이 이뤄지고 있다. 이러한 전자장 전원에서 발생한 다양한 전자파는 근접한 다른 전자기기의 손상을 초래할 뿐만 아니라, 인체에 해로운 영향을 줄 가능성이 있

한국항공대학교 항공전자정보공학부(Department of Electronics, Telecommunication and Computer Engineering, Korea Aerospace University)

· Manuscript received November 19, 2018 ; Revised December 11, 2018 ; Accepted December 18, 2018. (ID No. 20181119-07S)

· Corresponding Author: Jae-Wook Lee (e-mail: jwlee1@kau.ac.kr)

다. 따라서, 사무자동화와 IoT(Internet of Things) 기술 발달로 우리의 생활과 업무환경이 각종 전자장비로 대체 및 구성되어 가는 요즘, 다양한 전자장원으로 인한 인명 과 재산 피해를 막기 위한 연구의 필요성이 대두되고 있다. 대개 이러한 전자장에 대한 연구는 수치해석 기법을 기반으로 하여 수행되어 왔으며, 대표적으로 널리 사용되는 모멘트 방법(method of moment: MoM), 유한차분 시간 영역법(finite difference time domain method: FDTD) 방법 등이 있다. 수치해석 기법으로 얻어진 결정론적 해(deterministic solution)는 매우 정확하지만, 해석대상이 대형구조물일 경우 정확한 크기 정보와 매질에 대한 전기적 특성을 얻을 수 없는 이유로 부정확하다는 한계가 있으며, 대상이 되는 구조물을 격자(mesh)와 그리드(grid)로 나누는 과정에서 상당히 많은 시간과 대량의 데이터를 사용하므로 비효율적이다. 특히, 대형구조물에서는 목표 구조물 내부의 모드(mode), 전원 및 간섭 전자기파의 인가 각도, 측정 프로브(probe)의 위치 등에 따라 실질적인 전자파 환경이 변하기 때문에 수치해석 기법을 통해 얻어진 결정론적 해를 이용하여 전자파 영향을 해석하기에는 한계가 존재한다.

이에 본 논문에서는 대형구조물 내의 전자기파 해석을 위해 위상학적 해석방법(electromagnetic topology theory: EMT)과 확률론에 기반한 PoWer Balance(PWB) 방법을 연동시킴으로써 수치해석 방법의 한계를 극복하고자 한다. 하지만 기존의 EMT/PWB 방법 역시 전자기파 간섭 현상에 대한 해석에서 도체 매질만을 고려한다는 한계를 드러내고 있는데<sup>[1][2]</sup>, 이를 극복하기 위해 매질의 전기적 특성을 이용하여 EMT/PWB 방법의 성능을 보완하였다. 그리고 상용 시뮬레이션 툴인 Wireless Insite를 사용하여 전파해석을 진행하고, 성능이 보완된 EMT/PWB 방법과 결과를 비교함으로써 정확도를 검증한다. 더불어, 시간과 메모리를 측면에서도 비교하여 EMT/PWB 방법이 대형구조물의 전자기파 해석에 더 효율적인 방법임을 증명한다.

본 논문에서는 2장에서 위상학적 해석과 PWB 방법에 대해 소개하고, PWB 방법에 대한 성능보완 방법을 소개한다. 3장에서는 대형 구조물에 대한 제원, Wireless Insite와 EMT/PWB 방법 각각의 시뮬레이션 환경을 제시한다. 4장에서는 두 가지 해석 방법을 해석 정확도와 시간, 메

모리 관점에서 비교하고, 5장에서 결론으로 끝을 맺는다.

## II. 위상학적 해석과 PWB 방법

### 2-1 위상학적 해석

위상학적 해석방법은 전자기파의 간섭, 차폐 수준에 따라 간섭경로를 설정하고, 높은 에너지 수준에서 낮은 에너지 수준으로 전자기파 구역을 설정한다. 위상학적 방법으로 손실요소와 전파 해석공간을 나타내는 정선(junction)과 에너지의 이동 또는 흐름을 나타내는 노드(node)로 해석 구조물을 모델링하며, 최종적으로 에너지흐름을 쉽게 파악할 수 있는 위상학적 그래프로 나타내어 해석한다. 이러한 해석방법은 복잡도가 일반 건물에 비해 높은 대형구조물에서 효율적으로 사용된다.

### 2-2 PoWer Balance(PWB) 방법

해석 대상이 대형화되고 해석 주파수가 증가함에 따라 해석요소와 해석 시간이 기하급수적으로 증가하기 때문에 대형구조물에서의 전자기파 해석은 쉽지 않다.

이러한 한계를 극복하고자 PWB 방법이 제안되었다. 이 방법의 중요한 가정은 해석하고자 하는 대상이 전자기파의 파장에 비해 매우 클 경우, 전자기파가 해석 대상의 내부에서 확률 법칙에 따라 균일하게 분포되어 있다는 확률론에 기반을 두고 있다. 잔향실(mode stirred reverberation chamber: MSRC)은 이러한 조건을 만족시키는 환경인데<sup>[3]</sup>, 대형 구조물은 주파수의 파장 대비 전기적으로 큰 구조이므로 모드가 기하급수적으로 증가하기 때문에 잔향실의 환경과 유사하다고 할 수 있고, 이에 따라 대형구조물에서 PWB 방법을 적용할 수 있다. 또, 하나의 가정은 공진기 내에 입사한 전력( $P_i$ )이 정상상태(steady state) 조건에서 공간 내부에 손실된 전력의 합( $P_d$ )과 같다는 것이다. 식 (1)과 같은 수식으로 나타낼 수 있으며, 이는 전력균형방법이라는 PWB 방법의 의미와도 일치한다.

$$P_i = P_d = P_w + P_{ant} + P_{ap} + P_{obj} \quad (1)$$

식 (1)에서 공진기 내부에서 발생하는 총 전력 손실을 뜻하는  $P_d$ 는 대표적인 4종류의 내부 손실전력의 합으로 표현된다<sup>[4]</sup>.

PWB 방법은 해석 대상이 되는 구조물 내부의 주파수 간섭 현상과 손실 요소를 평균결합단면적(Mean coupling cross section ( $\sigma$ ))와 평균 Q인자(Mean quality factor (Q))로 나타내고, 식 (2) 및 식 (3)과 같이 정의한다<sup>[4]</sup>.

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

$$Q = 2\pi f \frac{W}{P_d} = \frac{2\pi V}{\lambda \sum_j P_{jd}} S = \left( \sum_j \frac{1}{Q} \right)^{-1} \quad (3)$$

$V$ 는 공진기의 부피,  $P_d$ 는 구조물 내부의 다양한 손실 매커니즘의 총합,  $S$ 는 전력밀도,  $W$ 는 구조물 내의 에너지이다. 일반적인 공진기 내부에서의 손실은 내부 물체에 의한 손실( $P_{obj}$ ), 안테나에 의한 손실( $P_{ant}$ ), 개구면에 의한 손실( $P_{ap}$ ), 벽에 의한 손실( $P_{wall}$ )이 있으며, 각각을 다음과 같은 식 (4)~식 (7)로 나타낸다<sup>[4]</sup>.

$$\langle \sigma_{obj} \rangle = \frac{2\pi V}{\lambda Q_{obj}} \quad (4)$$

$$\langle \sigma_{ant} \rangle = \frac{2\pi V}{\lambda Q_{ant}} \quad (5)$$

$$\langle \sigma_{ap} \rangle = \frac{2\pi V}{\lambda Q_{ap}} \quad (6)$$

$$\langle \sigma_{wall} \rangle = \frac{2\pi V}{\lambda Q_{wall}} \quad (7)$$

구조물 내부의 일반적인 4종류의 손실 중 주로 개구면에 의한 손실과 벽에 의한 손실이 주요한 손실로서 작용하는데, 개구면에서 발생하는 손실의 평균결합단면적(mean coupling cross section)은 반지름이  $a$ 인 원형 개구면에 대해 식 (8) 및 식 (9)와 같이 정의된다<sup>[4]</sup>. 만약, 개구면의 모양이 원형이 아니라면 동일한 면적을 가진 원형 개구면으로 치환하여 적용한다.

$$\langle \sigma_{ap} \rangle = \frac{16}{9\pi} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 a^6, \left( f \leq \frac{1.3c}{2\pi a} \right) \quad (8)$$

$$\langle \sigma_{ap} \rangle = \frac{\pi a^2}{2}, \left( f > \frac{1.3c}{2\pi a} \right) \quad (9)$$

위 식을 살펴보면 개구면에 의한 손실은 주파수와 개구면의 크기에 따라 결정되는 것을 알 수 있다.

벽에 의한 손실에 대한 평균결합단면적은 식 (10)과 같이 정의된다<sup>[4]</sup>.

$$\langle \sigma_{wall} \rangle = \frac{4SR_s}{3c\mu_0} = \frac{4\pi S}{3\lambda} \sqrt{\frac{\mu_r}{\pi f \mu_0 \sigma}} \quad (10)$$

$S$ 는 구조물의 표면적,  $R_s$ 는 표면저항,  $c$ 는 빛의 속도,  $\sigma$ 는 벽의 전도도,  $f$ 는 주파수,  $\mu_r$ 는 유효투자율,  $\mu_0$ 는 진공의 투자율이다. 식 (10)을 통해, 벽에 의한 손실은 벽을 이루고 있는 물질의 전기적 특성과 주파수에 의해 결정되는 것을 알 수 있다. 이처럼 평균결합단면적은  $Q$ 인자와 연관된 값인 동시에 식 (2)처럼 전력밀도로부터 손실되는 전력량의 비를 나타내는 값이다.

### 2-3 성능이 보완된 PWB 방법

기존의 PWB 방법은 대부분 해석대상이 도체성 벽으로 되어 있다. 그러한 구조에서는 그림 1처럼 각 영역 간의 전자기파 간섭 현상이 개구면을 통해서만 이뤄진다. 그렇기 때문에 전자기파 간섭이 발생하는 경계면을 모델링하면 그림 1처럼 개구면 주위를 도체로 되어 있는

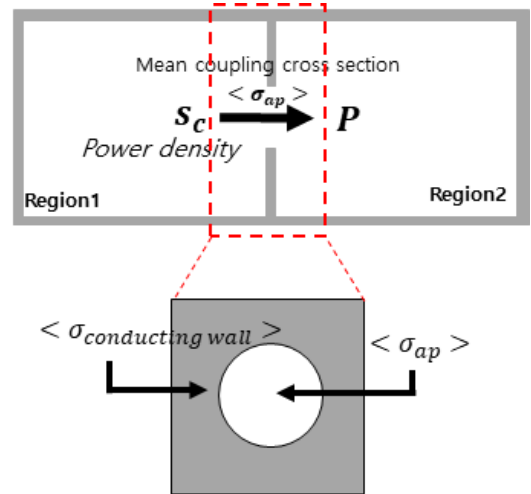


그림 1. 기존 PWB 방법의 전자기파 간섭 매커니즘과 경계면 모델링

Fig. 1. Electromagnetic interference mechanism and interface modeling of the conventional PWB method.

벽이 감싸고 있는 구조이다. 이때, 벽의 평균결합단면적( $\langle \sigma_{conducting\ wall} \rangle$ )은 식 (10)를 통하여 계산된다. 결국, 개구면에 의한 간섭 현상만을 고려한 수신전력( $P$ )은 식 (11)로 나타낼 수 있다.

$$P = \langle \sigma_{ap} \rangle * S_c \quad (11)$$

하지만 일반적인 대형 구조물에서 기존의 방법을 사용한다면 정확한 해석이 불가능하다. 일반적인 대형 구조물에서 사용되는 매질은 도체로만 되어 있지 않기 때문에 매질의 전기적인 특성을 알아야 보다 더 정확한 전자기파 영향 해석을 할 수 있다. 그림 2처럼 일반적인 매질을 가진 해석 대상에서의 전자기파 간섭 현상은 개구면을 통한 간섭뿐만 아니라, 벽의 매질을 통해 투과되는 전자기파의 간섭 현상도 고려해야 정확한 해석이 가능하다.

성능이 보완된 PWB 방법에서 전자기파 간섭 현상이 발생하는 경계면을 모델링하면 그림 2처럼 나타낼 수 있다. 벽에서도 간섭현상이 발생하기 때문에 벽의 평균결합단면적( $\langle \sigma_{wall} \rangle$ )은 개구면과 유사하게 식 (8)과 식 (9)로 모델링되지만, 개구면과는 다르게 투과특성을 갖는다는 차이점이 있다. 투과특성은 벽을 구성하는 물질의 전기적 특성에 따라 달라진다. 그리하여, 벽의 투과 특성까

지 고려한 벽 매질의 평균결합 단면적( $\langle \sigma_{Twall} \rangle$ )은 식 (13)으로 계산될 수 있다. 여기서,  $T_{medium}$ 은 매질의 투과계수이다. 더불어 식 (14)와 식 (15)처럼 전자기파의 간섭현상이 발생하는 경계면의 면적 대비 개구면과 벽이 차지하는 비율에 따른 요소도 추가적으로 고려해야 한다.  $D_{ap}$ 와  $D_{wall}$ 은 각각 간섭현상이 발생하는 경계면의 면적 대비 개구면과 벽의 면적에 대한 비율이다.

$$P = (D_{ap} \langle \sigma_{ap} \rangle + D_{wall} \langle \sigma_{Twall} \rangle) * S_c \quad (12)$$

$$\langle \sigma_{Twall} \rangle = T_{medium} * \langle \sigma_{wall} \rangle \quad (13)$$

$$D_{ap} = \frac{\text{Dimension of aperture}}{\text{Total dimension}} \quad (14)$$

$$D_{wall} = \frac{\text{Dimension of wall}}{\text{Total dimension}} \quad (15)$$

### III. 목표 대형 구조물에 대한 전자기파 해석

#### 3-1 목표 대형 구조물의 제원

외부 전자기파에 의한 대형 구조물 내부의 전자기파 해석을 위해 그림 3과 같은 가상의 대형 구조물을 모델링하였다. 목표 대형 구조물의 높이는 3,000 mm로 일정하며, 방은 가로 10,700 mm, 세로 9,900 mm이며, 복도는 가로 14,500 mm, 세로 2,500 mm이며, 벽의 두께는 300 mm로 일정하다. 목표 대형구조물은 창틀이 있는 2개의 창문과 1개의 문, 8개의 기둥, 2개의 복도 개구면으로 이루어져 있으며, 그림 4는 창문, 문, 기둥에 대한 제원이다. 창틀, 문, 기둥은 모두  $10^7$ [S/m]의 전기전도도를 갖는다.

#### 3-2 Wireless Insite 해석 환경

성능 보완된 PWB 방법과의 비교를 위해 상용 시뮬레이션 툴인 Wireless Insite를 선택하였다. 이 시뮬레이션 툴은 광범위한 전파 경로 해석 문제에 주로 사용되는데, 지형 및 도시 건물의 물리적 특성을 모델링하고 광선을 추적하여 형상면의 반사, 회절, 투과를 포함한 광선의 상호작용을 계산함으로써 전파 해석을 진행한다<sup>[5]</sup>. 그림 5(a)는 목표 대형 구조물을 앞서 언급했던 제원을 적용하여 시뮬레이션에서 모델링한 모습이다. 그림 5(b)는 Wire-

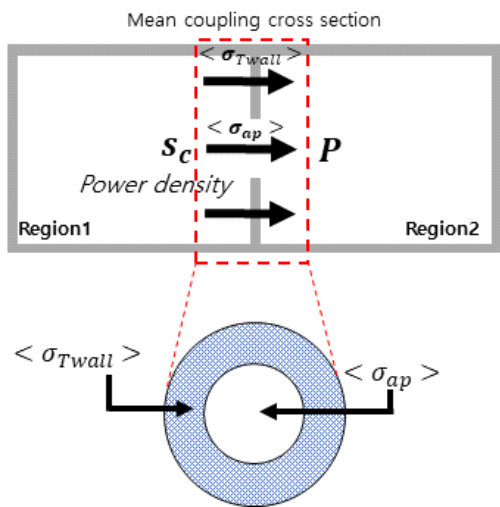


그림 2. 성능이 보완된 PWB 방법의 전자기파 간섭 매커니즘과 경계면 모델링

Fig. 2. Electromagnetic interference mechanism and interface modeling of the performance-enhanced PWB method.

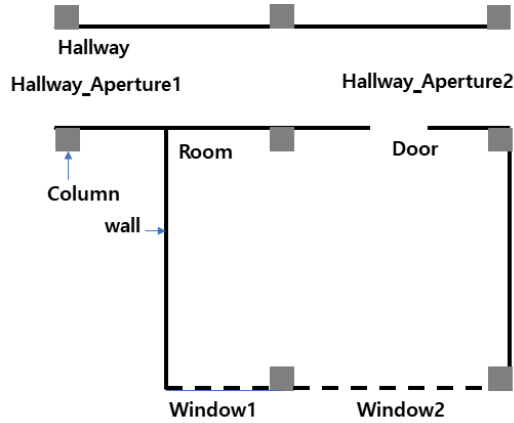


그림 3. 목표 대형 구조물의 형상  
Fig. 3. Geometry of targetted large structure.

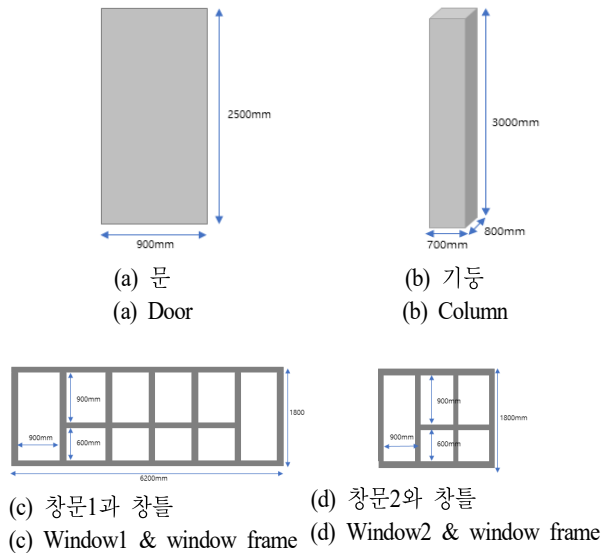
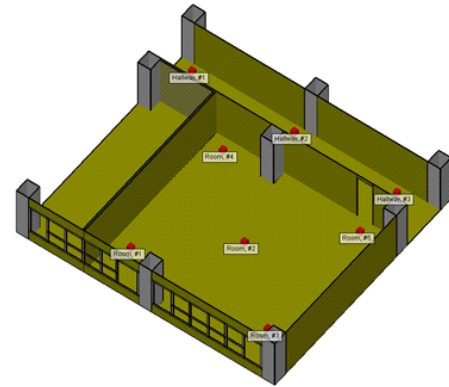


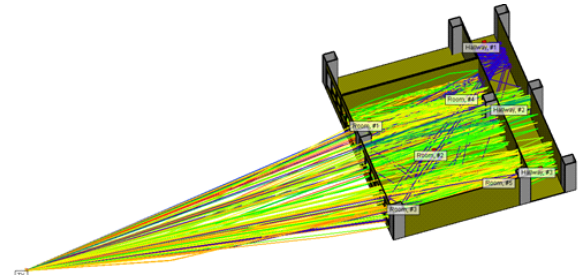
그림 4. 목표 대형 구조물의 상세도면  
Fig. 4. The detailed description of targetted large structure.

less Insite에서 목표 대형 구조물을 해석한 후 광선을 쏘아 10번의 반사, 1번의 회절, 5번의 투과를 고려한 전파 해석이 진행된 모습이다.

외부 전자기파는 그림 6과 같이 창문과 벽을 통해 목표 대형구조물로 입사한다. 송신 지점과 목표 대형 구조물 간의 거리는 25 m이며, 5 dBi의 이득을 가진 방향성 안테나를 사용하고, 송신 파워로 37 dBm을 사용하여 목표 대형 구조물로 전자기파를 방사한다. 송신안테나로부터 21 m



(a) Wireless Insite에서의 목표 대형 구조물  
(a) Targetted large structures in Wireless Insite



(b) Wireless Insite의 전자기파 전달 경로  
(b) Wave propagation path using Wireless Insite

그림 5. 목표 대형 구조물(a)과 전파전달특성(b)  
Fig. 5. Targetted large structure and wave propagation characteristic.

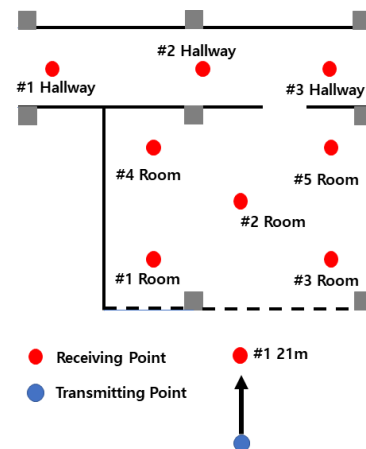


그림 6. 목표물 내의 관심 영역과 송신지점  
Fig. 6. The region of interest and received point inside targetted structure.

떨어진 곳 수신안테나 1개, 방의 모서리로부터 1,500 mm 떨어진 지점에 4개의 수신안테나와 방 한 가운데에 1개의 수신 안테나를 설치하고, 수신안테나로 등방성 안테나를 사용했다. 모든 안테나의 높이는 1,400 mm로 동일하다.

복도에는 3개의 수신지점에 동일한 안테나를 설치하였고, 파형으로는 정현파를 사용하고, 목표 주파수 대역은 0.6~6 GHz이다.

대형 구조물의 벽의 물질은 콘크리트로 모델링되었다. 대표값을 사용하기 위하여 상용 시뮬레이션인 CST의 물질 중 40년산 콘크리트의 데이터( $\epsilon = 4.3$ ,  $\sigma = 0.032$ )를 Wireless Insite에 적용하여 투과 계수를 얻었다. 그림 7은 Wireless Insite에서 사용한 콘크리트의 주파수별 투과계수의 크기를 보여주는 그래프이며, 이를 대형구조물 해석에 사용하였다. 또한, 목표 대형 구조물 외부의 지면은 유전율( $\epsilon = 8.12$ ), 도전율( $\sigma = 0.14$ )을 가진다.

### 3-3 EMT/PWB 방법을 사용한 전자기파 해석

EMT/PWB 방법을 사용하여 대형 구조물에서의 전자파 해석을 진행하기 위해서는 우선적으로 목표로 하는 대형 구조물에 대한 전자파 영향을 위상학적 그래프로 나타내

표 1. 송수신측 정보

Table 1. Transmitter and receiver information

Receiving antenna gain	0 dBi
Waveform	Sinusoidal
Transmitting power	37 dBm
Target frequency	0.6~6 GHz

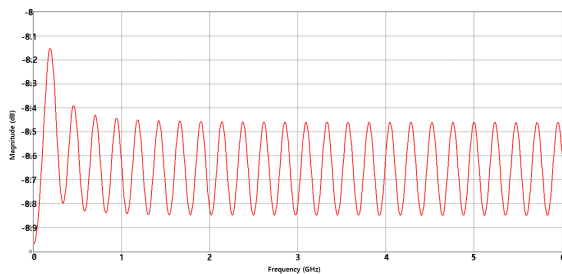


그림 7. Wireless Insite에서 콘크리트의 투과계수의 크기  
Fig. 7. Magnitude of transmission coefficient of concrete in Wireless Insite.

표 2. 방과 복도에서의 손실 정의

Table 2. Loss definition in room and hallway

Room	$Q_{win1}$ - Loss for window1 $Q_{win2}$ - Loss for window2 $Q_{win-frame}$ - Loss for window frame $Q_{Rcolumn}$ - Loss for column in room $Q_{door}$ - Loss for door $Q_{Rwall}$ - Loss for wall in room
Hallway	$Q_{door}$ - Loss for door $Q_{Hcolumn}$ - Loss for column in hallway $Q_{Hwall}$ - Loss for wall in hallway $Q_{Hap}$ - Loss for aperture in hallway

야 한다. 이를 위해 표 2에서 방과 복도의 손실을 정의했다. 방에서는 창문과 창틀, 기둥, 문, 방과 벽에 의한 손실이, 복도에서는 문, 기둥, 벽, 개구면에 의한 손실이 발생한다.

외부 전자기파는 창문 1과 창문 2와 벽을 통하여 방으로 입사되고 방의 창문, 창틀, 기둥, 문, 방 벽에 의해 손실이 발생한다. 방을 투과한 전자기파는 방과 복도 사이의 문과 벽을 통해 복도로 입사된다. 복도에서는 문과 기둥, 벽, 개구면에 의한 손실이 발생한다. 최종적으로 모든 손실과 전자기파 간섭 경로를 고려하여 그림 8과 같은 목표 대형 구조물에 대한 위상학적 그래프를 유도할 수 있다.

방과 복도에서의 손실에 대한 총  $Q$ 인자를  $Q_{room}$ 과  $Q_{hallway}$ 라고 정의하고, 아래의 식처럼 나타낼 수 있다.

$$Q_{room} = \left( \frac{1}{Q_{win}} + \frac{1}{Q_{win-frame}} + \frac{1}{Q_{column}} + \frac{1}{Q_{wall}} + \frac{1}{(Q_{door} + Q_{hallway})} \right)^{-1} \quad (16)$$

$$Q_{hallway} = \left( \frac{1}{Q_{door}} + \frac{1}{Q_{wall}} + \frac{1}{Q_{ap}} + \frac{1}{Q_{column}} \right)^{-1} \quad (17)$$

창틀과 방의 기둥, 복도의 기둥은 식 (10)을 통해, 창문과 문, 복도 개구면은 식 (8)과 식 (9)를 통해, 방의 벽과 복도의 벽은 식 (8)과 식 (9) 및 식 (13)을 통하여 손실을 계산한다. 마지막으로 총 방과 복도의  $Q$ -인자는 식 (16)과 식 (17)을 통해 계산한다.

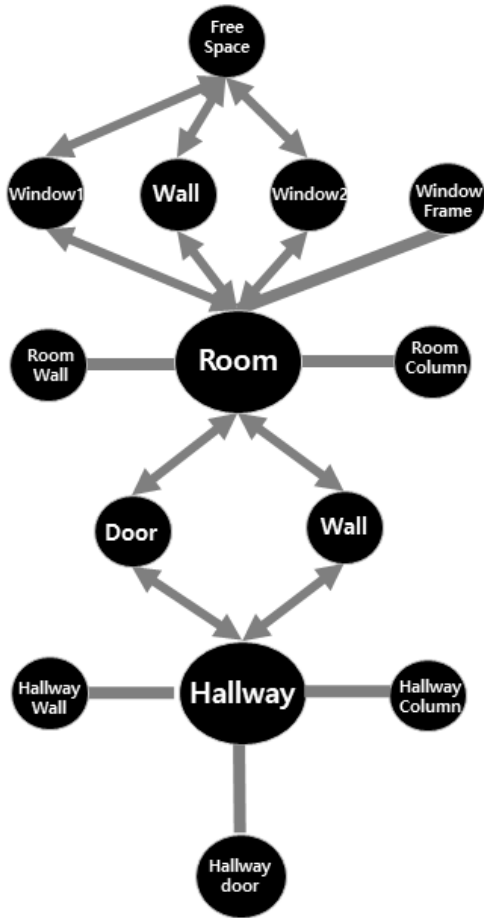


그림 8. 목표 대형 구조물의 위상학적 그래프  
Fig. 8. The topological graph of the targetted large structures.

위 식을 이용하여 방과 복도의 평균전력 밀도  $S_{room}$  과  $S_{hallway}$  를 식 (18)과 식 (19)로 나타낼 수 있다.

$$S_{room} = \frac{\lambda Q_{room}}{2\pi V_{room}} P_{\in put} \quad (18)$$

$$S_{hallway} = \frac{\lambda Q_{hallway}}{2\pi V_{hallway}} P_{room} \quad (19)$$

$P_{\in put}$  은 외부에서 입사되는 전자기파의 전력으로 입사된 전자기파의 전력밀도에 창문과 투과특성을 고려한 벽의 평균결합단면적을 곱한 값이며,  $P_{room}$  은 방에서 복도로 전자기파가 입사될 때의 전력밀도에 문과 투과특성을 고려한 벽의 평균결합단면적을 곱한 값이다.

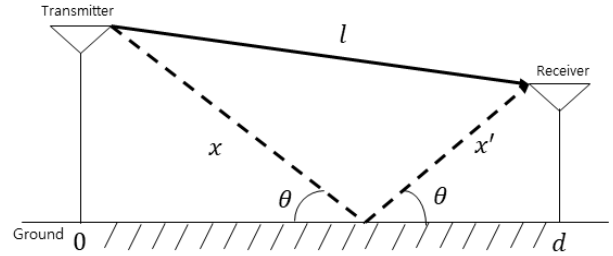


그림 9. 지면 반사를 고려한 경로 모델  
Fig. 9 Two-ray ground-reflection model.

EMT/PWB 방법에서 외부 전자기파의 입사는 목표 대형 구조물과 만나기 직전의 전자기파를 고려해야 한다. 위의 조건을 만족시키기 위하여 그림 9와 같은 Two-ray ground-reflection model을 사용했다<sup>[6],[7]</sup>. 이 모델은 지면의 전기적 특성을 고려하여 송신된 신호와 수신된 신호를 다음과 같은 식 (20)~식 (22)를 통하여 계산한다.

$$\Gamma(\theta) = \frac{\sin\theta - \sqrt{\epsilon_g - \cos^2\theta}}{\epsilon_g} \quad (20)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi(x + x' - l)}{\lambda} \quad (21)$$

$$P_r = P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{\sqrt{G_{los}}}{l} + \Gamma(\theta) \sqrt{G_{gr}} \frac{e^{-j\Delta\phi}}{x + x'} \right|^2 \quad (22)$$

$\Gamma(\theta)$ 은 지면의 반사계수,  $\epsilon_g$ 는 지면의 유전율,  $P_r$ 은 수신파워,  $P_t$ 는 송신전력이다. 앞선 3-2절에서 언급된 Wireless Insite의 시뮬레이션 환경을 적용하고, 지면 반사를 고려한 식 (22)을 계산하여 EMT/PWB 방법의 입력으로 사용한다.

#### IV. 시뮬레이션 톨 검증

PWB 방법과의 비교를 위해 상용 시뮬레이션 톨인 Wi-reless Insite를 사용하였다. 이 두 가지 방법이 대형 구조물에서의 전자기파 영향 해석 시 비교할만한 정확한 해석을 제시하는지를 확인하기 위하여, 우선적으로 단순한 구조인 직육면체 차폐함에서 두 방법을 비교하기 위하여 표 3에서 언급된 송신측 정보를 바탕으로 Wireless Insite



표 3. 차폐함 구조의 송수신측 정보

Table 3. Transmitter and receiver information in shield room.

Transmitting antenna gain	5 dBi
Polarization	H-H/H-V
Waveform	Sinusoidal
Transmitting power	18 dBm
Target frequency	0.6~6 GHz

시뮬레이션과 EMT/PWB 방법을 동일한 환경에서 실행하였다.

차폐함은 가로 3,000 mm, 세로 2,500 mm, 높이 2,500 mm의 크기를 가지며, 가로 20 mm, 세로 570 mm의 크기를 가진 개구면이 1개 존재한다. 송수기로부터 2.25m 거리에 있는 차폐함의 개구면을 통해 전자기파는 입사하며, 차폐함 내부에 위치한 수신안테나로는 등방성 안테나를 사용하였다. 그림 10(b)처럼, 수신지점마다 500 mm, 1,500 mm, 2,000 mm의 높이를 가진 수신기를 위치시켜 Wireless Insite 해석을 진행하였다. 하지만 차폐함에서 Wireless Insite의 해석은 PWB 방법과 근본적인 차이점을 갖는데, 이 차이점은 PWB 방법은 공진기 내부에 전자기파가 균일하게 분포하고 있다는 가정에서 비롯된다. 이러한 차이점의 영향을 최대한 줄이기 위해 27개 수신기의 주파수별 Co-pol.과 Cross-pol. 수신 전력의 평균을 취하여 결과값을 도출하였으며, PWB 방법 역시, 표 3에 나온 송수신의 정보를 바탕

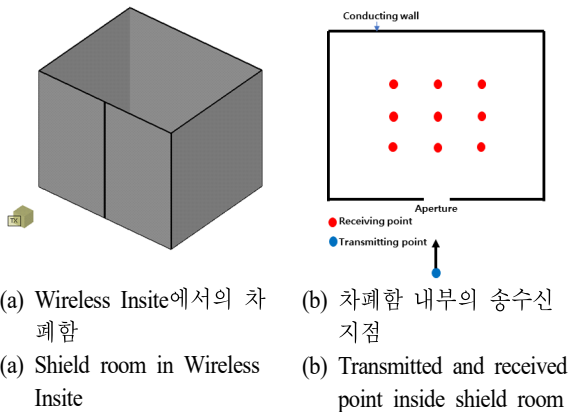


그림 10. 차폐함 형상과 송수신지점

Fig. 10. Geometry of shield room and transmitting and receiving point.

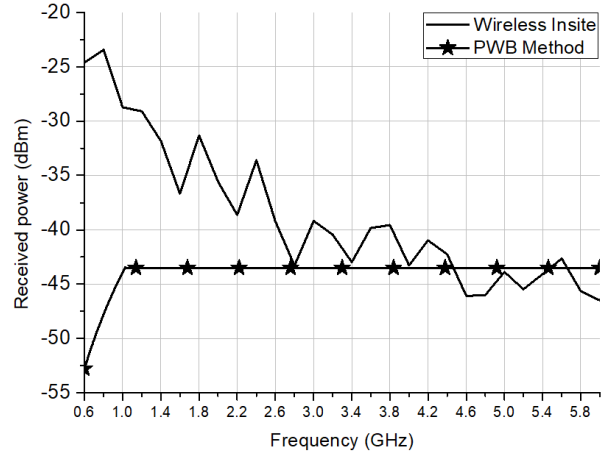


그림 11. 차폐함에서 수신되는 전력

Fig. 11. Received power in shield room.

으로 해석을 진행했다.

그림 11은 차폐함 내부에서 PWB 방법과 Wireless Insite를 사용하여 얻은 수신전력을 비교한 그래프이다. 두 곡선이 고주파 지역에서는 유사한 경향을 보이나 저주파 지역에서는 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 오차는 주파수의 파장과 비교하여 전기적으로 큰 구조물에서 모드가 기하급수적으로 증가하여 전자기파가 구조물의 내부에서 확률 법칙에 따라 고루 분포한다는 조건을 갖는 PWB 방법의 특성 때문에 발생한다고 볼 수 있다. 이러한 이유로 파장의 길이가 차폐함과 비교하여 점점 작아지는 고주파 환경에서 두 해석결과가 유사한 경향성을 갖는다. 차폐함에서는 이러한 조건을 만족시키기 위해 주로 교반기를 사용하지만, Wireless Insite에서는 교반기를 사용하는 해석을 지원하지 않기 때문에 그림 11과 같은 결과를 보인다.

## V. 대형구조물 시뮬레이션 결과 비교

Wireless Insite와 EMT/PWB 방법을 비교하는데 있어서 가장 중요한 것은 두 시뮬레이션의 환경을 동일하게 설정하는 것이다. 그림 12는 송신안테나로부터 21 m 떨어진 곳에서의 Wireless Insite 해석결과와 동일 지점에서 EMT/PWB 방법의 입력신호로 사용한 식 (22)를 계산한 결과를 비교한 그래프이다. 이를 통해 두 방법에서 목표 대형구



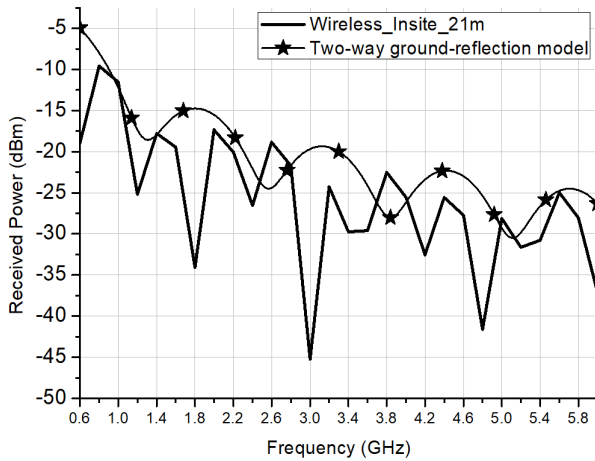


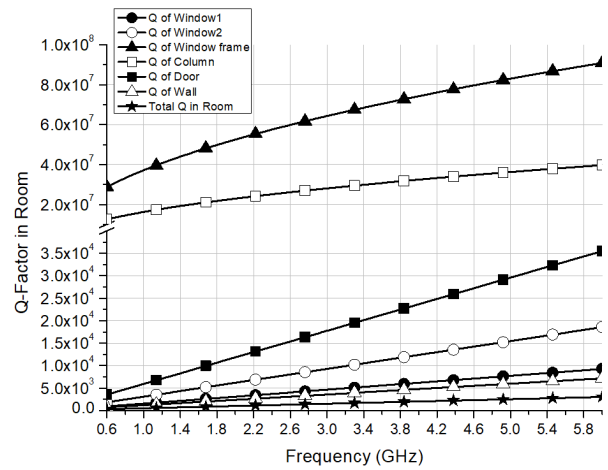
그림 12. 송신안테나로부터 21 m 떨어진 지점에서 수신 전력 비교

Fig. 12. Comparison of the received powers at 21 m away from the transmitting antenna.

조물로 입사되는 전자기파의 크기가 유사한 경향성을 가지고 있다는 것을 확인할 수 있으므로 두 해석방법이 비슷한 환경에서 해석이 진행된다는 것을 알 수 있다.

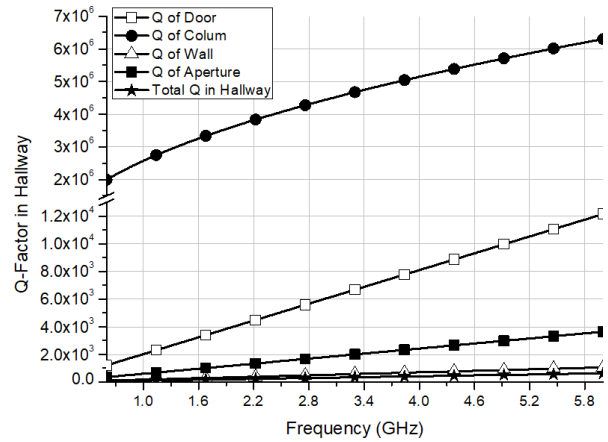
그림 13은 표 2에서 정의된 손실에 대해 각각의 Q-인자와 방과 복도의 총 Q-인자를 계산한 결과를 나타낸 그래프이다. 창틀, 방과 복도의 기둥에 대한 Q-인자는 다른 Q-인자에 비해 월등히 높은 값을 보이지만, 총 Q-인자 계산시 역수를 취한 후 다른 Q-인자들 값과 더해지기 때문에 그 효과는 미비하다. Q-인자를 계산한 결과로 보아, 방에서는 벽과 창문에 대한 손실, 복도에서는 벽과 복도 개구면에 대한 손실이 지배적인 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

그림 14(a)는 방에서, 그림 14(b)는 복도에서 Wireless Insite와 EMT/PWB 방법을 각각 비교한다. 그림 14(a)에서 보면, 성능이 보완된 PWB 방법이 기존의 PWB 방법보다 낮은 수신레벨을 갖는데, 그 이유는 전자기파가 방으로 입사할 때 전체면적 대비 창문과 벽의 비율을 의미하는  $D_{win}$ 과  $D_{wall}$ 이 다른 간섭 현상의 요소보다 지배적인 영향을 미치기 때문이며, 성능이 보완된 PWB 방법이 Wireless Insite 결과와 유사한 경향을 보인다. 그림 14(b)는 복도에서의 수신된 전력을 비교한 것이다. 기존의 PWB 방법보다 성능이 보완된 PWB 방법의 수신된 전력이 증가



(a) 방에서의 Q-인자

(a) Quality factor in room



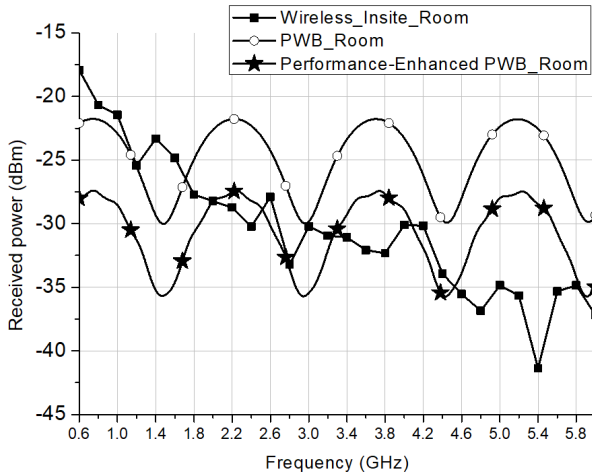
(b) 복도에서의 Q-인자

(b) Quality factor in hallway

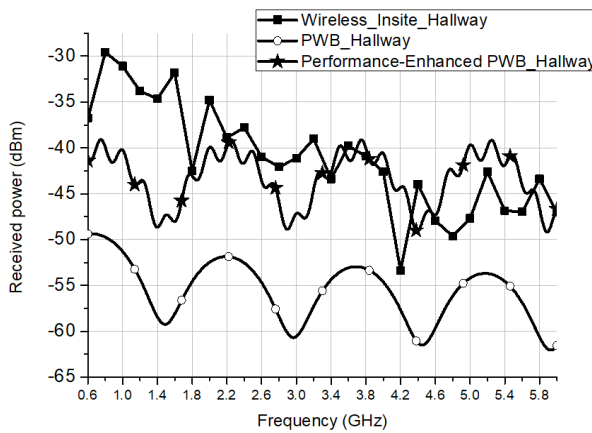
그림 13. 방과 복도의 Q-인자

Fig. 13. Quality factor of room and hallway.

한다. 그 이유는 벽의 투과 특성을 고려하였기 때문이다. 기존의 PWB 방법은 벽의 투과 특성을 고려하지 않고 오직 개구면에서의 간섭 현상만을 고려했기 때문에 성능이 보완된 PWB 방법에 비해 낮은 수신전력을 나타낼 수밖에 없다. 그렇기 때문에 성능이 보완된 PWB 방법이 Wireless Insite의 결과와 더 유사한 경향을 보인다. 더불어, 그림 14(a)와는 다르게 그림 14(b)의 곡선에서 진동이 발생한 이유는 방과 복도사이에서 전자기파 간섭현상이 발생하는 전체면적 중 벽의 비율이 개구면의 비율보다 크기



(a) 방에서 수신되는 전력  
(a) Comparison of received power in the room



(b) 복도에서 수신되는 전력  
(b) Comparison of received power in the corridor

그림 14. 수신전력 비교

Fig. 14. Comparison of received power.

때문이며, 이는 벽의 투과 특성이 전자기파 간섭현상에서 지배적인 영향을 미치기 때문으로 파악된다.

표 4는 Wireless Insite와 성능이 보완된 PWB 방법의 해석 시간과 메모리를 비교하였다. 성능이 보완된 PWB 방법의 해석시간은 단 2.921초이다. 이에 반해서 Wireless Insite의 해석시간인 4,012초와 비교하면 성능이 보완된 PWB 방법의 해석시간이 Wireless Insite의 해석시간보다 약 2,000 배 빠르게 해석을 수행한다. 메모리 또한, 성능이 보완된 PWB 방법이 Wireless Insite에 비해 약 0.02 %밖에 차지하지

표 4. 해석 시간과 메모리 비교

Table 4. Comparison of analysis time and memory

	Analysis time	Memory
Wireless Insite	4,012 s	57 MB
Performance-enhanced PWB	2.921 s	15 KB

않는 것으로 보아 Wireless Insite보다 성능이 보완된 PWB 방법이 시간과 메모리 측면에서도 더 효율적인 것을 볼 수 있다.

## VI. 결 론

본 논문은 성능이 보완된 PWB 방법을 사용하여 외부 전자기파에 의한 대형 구조물 내부에서의 전자파 영향을 해석하였다. 위상학적 그래프와 PWB 방법을 설명하고, PWB 방법에 관한 성능보완 방법을 제시했다. 상용 시뮬레이션 툴인 Wireless Insite와 성능이 보완된 PWB 방법을 같은 환경에서 비교함으로써 정확도를 확인하였으며, 시간과 메모리를 비교하였다. 그 결과, Wireless Insite보다 성능이 보완된 PWB 방법이 대형 구조물 해석에서보다 효율적임을 보였다. 이로써 성능보완 PWB 방법은 대형 구조물의 전자기파 해석에 유용하게 쓰일 것으로 예상된다.

## References

- [1] 정인환, 이재욱, 이영승, 권종화, "PWB method와 BLT 방정식을 연동한 거대구조 해석 응용," 한국전자과학회 전자파기술지, 25(3), pp. 24-33, 2014년.
- [2] J. Liu, X. Zhao, and K. Huang, "Generalization of network formulation based on power balance method and its application," in *2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, Chengdu, May 2010, pp. 262-265.
- [3] D. A. Hill, "Plane wave integral representation for fields in reverberation chambers," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 40, no. 3, pp. 209-217, Aug. 1998.
- [4] I. Junqua, J. P. Parmantier, and F. Issac, "A network formulation of the power balance method for high fre-

quency coupling, *Electromagnetics*, vol. 25, no. 7-8, pp. 603-622, Feb. 2005.

[5] Wireless Insite 3.3.0 User's Guide.

[6] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*, New

York, IEEE Press, 1974.

[7] T. S. Rappaport, S. Theodore, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002.

이 한 희 [한국항공대학교/석사과정]



2018년 2월 : 한국항공대학교 전자및항공  
전자공학과 (공학사)

2018년 3월~현재: 한국항공대학교 항공  
전자공학과 석사과정

[주 관심분야] EMI/EMC, RF시스템, 위성  
SAR시스템 및 신호처리

이 재 욱 [한국항공대학교/교수]



1992년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학  
사)

1994년 2월: 한국과학기술원 전기및전자  
공학과 (공학석사)

1998년 2월: 한국과학기술원 전기및전자  
공학과 (공학박사)

1998년 3월~2004년 2월: 한국전자통신연  
구원 디지털방송연구단 전파기반연구그룹

2004년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학부 전자  
및항공전자전공, 교수

[주 관심분야] 마이크로파및밀리미터파, 수동소자해석 및 설계,  
EMI/EMC 대책 기술, 고출력증폭기 및 고출력안테나설계, 위  
성통신안테나