

필드 분포 및 Z-점수를 기반으로 한 대형 건축물의 차폐 특성 및 최적화 수신 지점 해석

Analysis of Shielding Characteristics and Optimal Reception Point of Large Buildings Based on Field Distribution and Z-Score

임동준 · 이재욱 · 권종화* · 형창희* · 황정환*

Dong-Jun Lim · Jae-Wook Lee · Jong-Hwa Kwon* · Chang-Hee Hyoung* · Jung-Hwan Hwang*

요 약

본 논문에서는 광선 추적법 기반의 상용 3D 시뮬레이션 툴인 Winprop을 이용하여 대형 건축물 내부의 필드 분포를 분석하고 확률론적 알고리즘인 PEPWB 방법 및 수치 해석 방법 기반의 상용 3D 시뮬레이션 툴과의 비교를 통해 차폐 특성 및 수신 지점을 해석하고자 한다. 대형 건축물의 정확한 차폐 특성을 해석하기 위해서는 공간 내부를 대표하는 수신 지점을 찾는 것이 중요하다. 건축물 내부에서는 전파의 반사, 투과, 회절, 산란 특성에 의해서 공간이 일어나 특정 지점에서 낮거나 높은 수신 전력이 나타날 수 있다. 따라서 내부의 필드 분포를 분석함으로써 실제 측정 환경에서 차폐 특성을 해석하기 위한 적합한 수신 구역을 선정할 수 있다.

Abstract

In this study, we analyze the field distribution in large buildings using Winprop, a commercial 3D simulation tool based on ray tracing. Furthermore, we analyze the shielding characteristics and selection of optimal reception points by comparing them with the probabilistic algorithm PEPWB and numerical analysis methods. To accurately interpret the shielding characteristics of large buildings, it is important to determine a receiving point that indicates the representative values inside the target space. Inside a building, resonance may occur because of the reflection, transmission, diffraction, and scattering characteristics of the radio waves, resulting in a low or high reception power at a specific point. Therefore, by analyzing the internal field distribution, it is possible to select an appropriate receiving area to interpret the shielding characteristics in an actual measurement environment.

Key words: Field Distribution, Ray Tracing, HPEM(High Power Electromagnetic), IEMI(Intentional Electromagnetic Interference), Shielding Characteristics, Z-Score

I. 서 론

현대 사회에서는 무선 통신 기술의 발전으로 전자기파
와 관련된 디바이스를 활용하는 분야가 증가함에 따라

「이 연구는 2020년도 정보통신기획평가원의 지원으로 연구되었음.」

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

*한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute)

· Manuscript received July 11, 2022 ; Revised July 30, 2022 ; Accepted October 25, 2022. (ID No. 20220711-003S)

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

다양한 위협에 노출되는 빈도가 증가하였다. 위협의 대표적인 예시로는 고출력 전자파장(high power electromagnetic, HPEM), 의도성 전자파장해(intentional electromagnetic interference, IEMI), 방해 전파 등이 있다. 이러한 위협들은 국가적 차원의 재난 상황을 야기할 수도 있기에 이에 대한 예방책과 해결책을 마련해야 한다^{[1][2]}. 따라서 건축물이나 시설의 차폐 특성(shielding characteristic) 해석이 중요해지고 있다^{[3][4]}.

대형 건축물을 대상으로 하는 전자파의 영향을 해석하기 위해서 보편적으로 사용하는 대표적인 툴로는 CST와 FEKO가 있다. CST와 FEKO는 모멘트법(method of moments: MOM)과 유한차분 시간영역법(finite difference time domain: FDTD) 등의 수치 해석적 기법의 해석 방법을 제공하여 보다 정확한 해석 결과를 제공해 준다. 그러나 수치 해석적 방법은 대상이 되는 건축물을 격자(mesh)와 그리드(grid)로 나누는 과정이 필요하므로 해석 대상인 건물의 크기, 구조 등에 따라 효율이 달라진다. 본 논문에서 사용하는 3D 시뮬레이션 툴인 Winprop은 광선 추적법(ray tracing) 기반의 근사적인 해석 방법을 사용하기 때문에 고주파에서 대형 건물의 해석에 용이하다^[5].

본 논문에서는 광선 추적법 기반 해석 방법인 3D 시뮬레이터 툴 Winprop과 수치 해석적 기법을 기반으로 해석하는 FEKO와 비교 검증을 통해 시뮬레이터를 검증하고, 이론 모델과의 검증을 위해 확률론을 기반으로 해석하는 PEPWB(performance enhanced power balance) 방법과 비교하여 검증한다^[6]. 또한 대형 건축물의 차폐 특성을 해석하기 위한 건축물 내부의 필드 분포를 확인하기 위하여 Winprop을 사용하고 필드 분포의 각각의 데이터가 대푯값에 어느 정도 떨어져 있는가를 보여주는 척도로 Z-점수(Z-score)를 사용하여 대표지점을 찾아낸다^[7]. 또한 광선 추적법 기반 해석 방법인 Winprop로 찾아낸 대표지점이 수치 해석적 기법을 기반으로 해석하는 FEKO에서도 유사한 경향이 나타나는지 검증한다.

본 논문에서는 II장에서 3D 시뮬레이션 툴인 Winprop을 검증하는 방법과 해석 결과를 비교한다. 또한, 필드 분포 기반 해석의 절차를 제시하고, 대형 건축물에 대한 대표 구역을 찾아낸다. III장에서는 결론으로 끝을 맺는다.

II. 필드 분포 기반 해석 방법

2-1 시뮬레이터 검증

본 논문에서 대형 건축물의 차폐 특성을 해석하기 위해 사용하는 시뮬레이터는 광선 추적법 기반의 해석을 하는 Winprop이다. 근사적인 해석 방법을 사용하기 때문에 해석 결과에 대한 검증이 필요하다. 검증을 위해서 수치 해석적 기법의 해석 방법을 사용하는 FEKO와 무한 벽면이 있는 2차원 구조와 작은 개구면이 있는 3차원 구조에 대해서 이중 검증을 수행하였다. 무한 벽면이 있는 구조에서 매질에 대한 투과 및 반사 성분에 대해 검증하기 위해 그림 1과 같이 벽면 앞쪽에 벽면 뒤쪽에 수신 지점을 각각 2개씩 설정하였다. Point 1 및 point 2는 반사 성분을 확인하고자 송신안테나로부터 3 m, 벽면으로부터 2 m 이격된 위치에 수신 지점을 설정하였고, point 3 및 point 4는 송신안테나로부터 7 m, 벽면으로부터 2 m 이격된 위치에 수신 지점을 설정하였다. Point 2 및 point 4는 벽면에 투과 및 반사되는 파의 각도에 따른 영향을 확인하고자 point 1 및 point 3으로부터 0.5 m 이격된 위치로 설정하였다. 벽면으로 사용된 매질은 CST에서 제공하는 1년산 콘크리트를 사용하였고, 목표 대역 주파수는 1~6 GHz이다.

그림 2는 무한 벽면 구조에 대해 Winprop 및 FEKO를 사용하여 시뮬레이션을 수행한 결과에 대해 보여준다. 벽면에 대한 광선 추적법 해석과 수치 해석 기반의 해석 결과가 일치하는 것을 확인하였다.

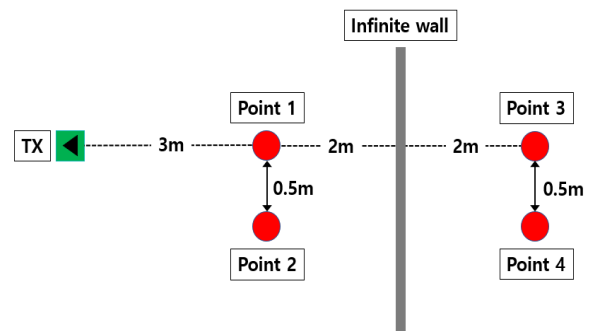
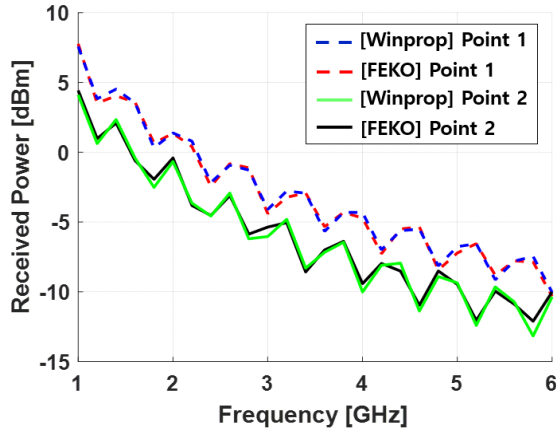
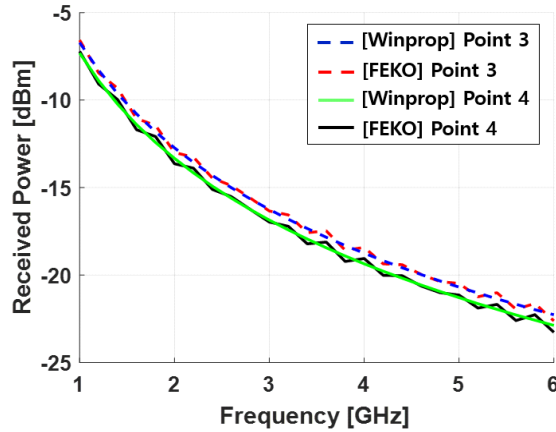


그림 1. 무한 벽면 2차원 구조

Fig. 1. Infinite wall of two-dimensional structure.



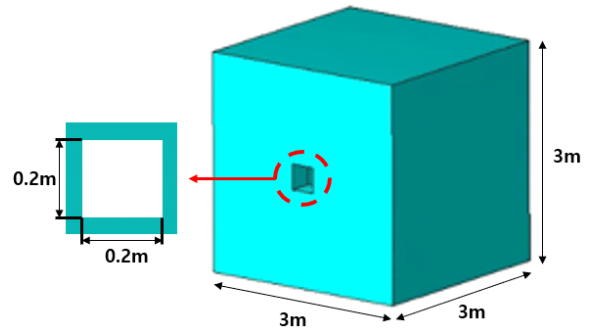
(a) 벽면 반사 지점의 수신 전력
(a) Received power at wall reflection point



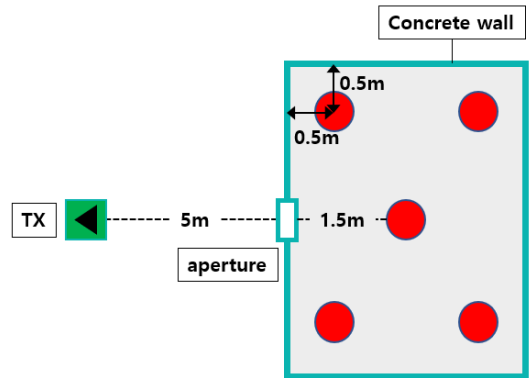
(b) 벽면 투과 지점의 수신 전력
(b) Received power at wall penetration point

그림 2. 무한 벽면 구조의 시뮬레이션 비교
Fig. 2. Simulation comparison of infinite wall structures.

슬롯이 있는 3차원 구조는 그림 3(a)와 같이 콘크리트 매질로 이루어진 가로, 세로, 높이가 3 m의 크기를 가지며, 정중앙에 위치한 개구면의 크기는 가로 0.2 m, 세로 0.2 m의 크기를 가진다. 송신안테나는 건축물로부터 5 m 이격되어 있고, 높이 1.5 m에서 건축물의 개구면에 전자기파를 입사하고, 수신안테나로는 등방성 안테나를 사용하였다. 수신 지점은 그림 3(b)와 같이 벽면으로부터 0.5 m 이격된 지점과 가운데 지점을 포함하여 총 9개가 위치한다. 9개의 수신 지점을 평균하여 FEKO와 Winprop의 시뮬레이션 결과를 비교하였다.



(a) FEKO에서의 3차원 건축물
(a) 3D structure in FEKO



(b) 3차원 건축물 내의 수신 지점
(b) Receiving points within a 3D structure

그림 3. 3차원 건축물의 모델링
Fig. 3. Modeling of 3D structures.

Winprop에서는 투과 2회, 반사 10회, 회절 2회를 적용하여 시뮬레이션하였다. 목표 대역 주파수는 0.5~2 GHz이다. 그림 4로부터 개구면이 있는 3차원 구조에 대해 FEKO와 Winprop의 시뮬레이션 결과가 일치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 근사적 해석 방법인 광선 추적법을 사용하여 대형 건축물의 차폐 특성을 해석할 수 있음을 확인할 수 있다.

표 1은 3차원 구조에 대한 FEKO와 Winprop의 해석에 소모된 총 소요 시간을 나타낸다. FEKO와 Winprop의 해석 결과는 근사적으로 나타나지만 약 79배의 해석 소요 시간의 차이가 나타나고, FEKO는 주파수가 증가할수록 해석 시간이 증가한다. 따라서 Winprop을 활용하여 고주파수에서 대형 건축물에 대해 효율적인 전파 해석이 이루어질 수 있음을 확인할 수 있다.

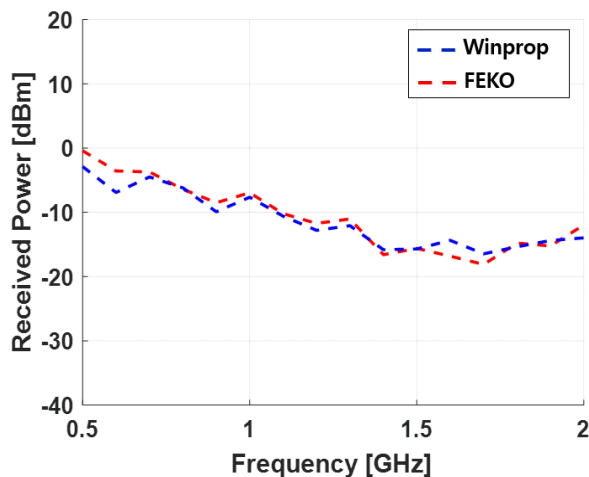


그림 4. 3차원 구조의 시뮬레이션 결과 비교

Fig. 4. Simulation comparison of 3D structures.

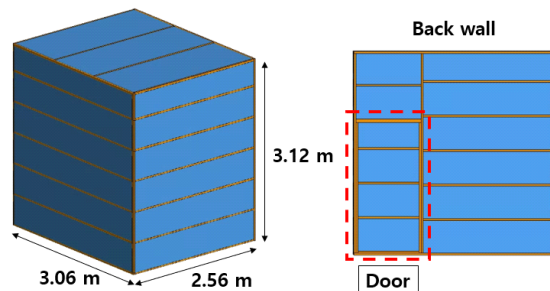
표 1. 3차원 구조에 대한 각 시뮬레이터별 해석 소요 시간
Table 1. Consumption time for 3D structure analysis by different simulators.

	FEKO	Winprop
Consumption time (sec)	32,787	415

2-2 상용 시뮬레이터를 이용한 필드 분포 해석 방법

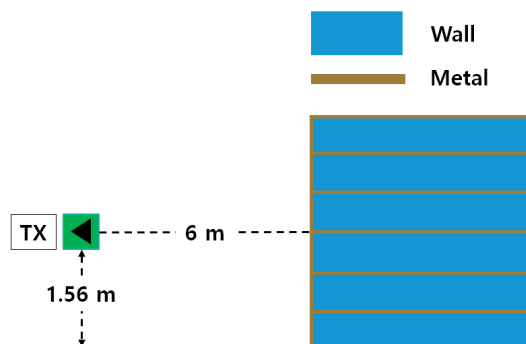
시설이나 건축물의 정확한 차폐 효과를 측정하기 위해서는 건축물 내부의 정확한 수신 전력의 측정이 요구된다. 그러나 해석 대상으로부터 투과, 반사, 회절, 산란에 의해서 위치마다 다른 수신 레벨이 나타나게 되고, 특정 지점에서 공진이 발생하여 부정확한 수신 레벨을 가질 수 있다. 따라서 건축물 내부의 평균 전력을 대푯값으로 정하고, 대푯값과 유사한 수신 레벨을 갖는 대표 구역을 예측하고자 한다. 본 절에서는 상용 시뮬레이터인 Winprop을 사용하여 건축물 내부에서의 필드 분포를 해석하여 수신 지점을 찾는 방법에 대해 소개한다.

해석 대상은 높이 3.12 m, 가로 2.56 m, 세로 3.06 m의 크기를 가지며, 뒷면에는 문이 위치하여 비대칭 구조이다. 시험용 시설의 형상은 그림 5(a)와 같다. 송신 지점은 벽면으로부터 6 m 이격된 거리에 위치하고, 높이는 1.56 m로 시험용 시설의 정중앙에 전자기파가 입사한다. 시험



(a) 시험용 시설의 형상

(a) Geometry of a testing facility



(b) 시뮬레이션 환경

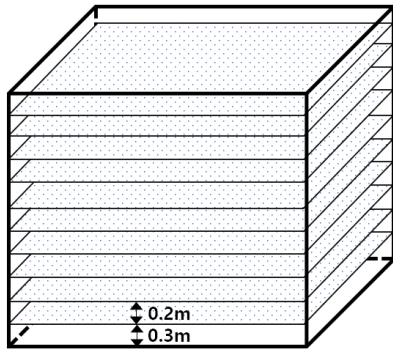
(b) Simulation environment

그림 5. 시험용 시설의 형상 및 시뮬레이션 환경

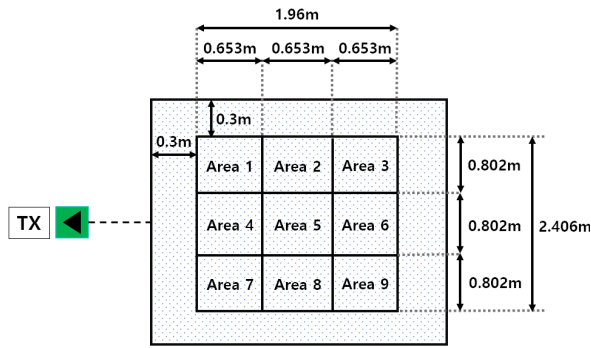
Fig. 5. Geometry and simulation environment of a testing facility.

용 시설은 일반 매질과 도체 프레임으로 이루어져 있다.

필드 분포 해석을 위한 시험용 시설의 내부 수신 지점은 그림 6(a)와 같이 바닥으로부터 0.3 m 높이의 평면으로부터 0.2 m 간격의 높이로 설정하였다. 각 평면은 750 개의 수신 지점이 위치하고 있고, 시험용 시설 내부의 총 수신 지점의 개수는 11,250개이다. 대푯값은 시설 내부의 모든 수신 지점에서의 수신 전력을 평균한 값이다. 광선 추적법 해석이 근사적인 해석이기 때문에 정확한 측정 지점을 찾는 것은 어렵다. 따라서 그림 6(b)의 수신 지점의 평면도와 같이 구역을 9개로 나눠서 대푯값과 유사한 수신 레벨을 갖는 지점의 분포가 많은 대표 구역을 찾고자 한다. 각 구역의 크기는 그림 6(b)와 같이 동일하며 측정 환경을 고려하기 위해서 IEEE Std 299-1997 규격에 따라서 구역을 벽면으로부터 0.3 m 이격된 위치에서 설정하였다^[8].



(a) 시험용 시설의 내부 수신 지점
(a) Receiving points within a testing facility



(b) 수신 지점의 평면도
(b) Plan of the receiving point

그림 6. 시험용 시설의 내부 수신 지점 개념도
Fig. 6. Conceptual diagram of the internal receiving point of the test facility.

시험용 시설 내부에서 수신된 전력 데이터를 히스토그램(histogram)으로 그림 7과 같이 도시하였다. 수신된 데이터를 가우시안 분포(Gaussian distribution)로 나타내면 평균값 근처에 데이터의 분포가 많은 것을 확인할 수 있다. 그림 7은 1.5 GHz 대역에서 시뮬레이션된 데이터이다. 본 논문에서 목표로 하는 평균값에 가까운 수신 지점을 찾기 위한 지표로 Z-점수를 사용하고자 한다. Z-점수는 선택한 값과 집단의 평균값 사이의 값을 표준편차로 나눠서, 선택한 값이 평균값에 얼마나 근접한지 알려주는 척도로 사용된다. 식 (1)은 Z-점수를 구하는 수식이고, x 는 데이터, μ 는 집단의 평균, σ 는 집단의 표준편차이다.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

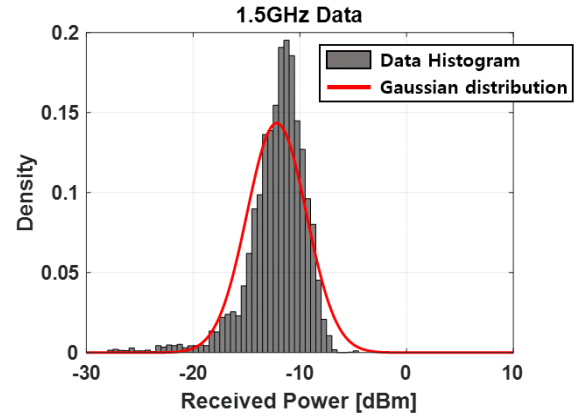


그림 7. 시설 내부에서 수신된 전력 데이터의 분포
Fig. 7. Distribution of power data received inside the facility.

따라서 x 는 시험용 시설 내부의 각 수신 지점의 데이터, μ 는 시험용 시설 내부의 전체 수신 지점의 데이터 평균, σ 는 시설 내부의 전체 수신 지점의 데이터 표준편차로 나타낼 수 있다. Z-점수는 0에 가까울수록 평균값에 근접한 것을 나타내며, 본 논문에서는 $|z| < 1$ 인 수신 지점을 평균값에 근접한 지점이라고 정한다.

Z-점수를 이용하여 높이별 수신 지점의 평면에서 $|z| < 1$ 인 수신 지점을 나타내면 그림 8과 같다. 그림 8은 주파수 1.5 GHz 대역에서 높이 2 m의 xy-평면이다. 평균값에 근접한 수신 레벨을 갖는 지점이 많이 분포하는 대표 구역을 찾기 위해서 구역 내 높이별 수신 지점의 Z-점수를 모두 평균하여 평균한 Z-점수가 0에 가장 가까운 구역을 대표 구역으로 선정한다. 또한 해석하고자 하는

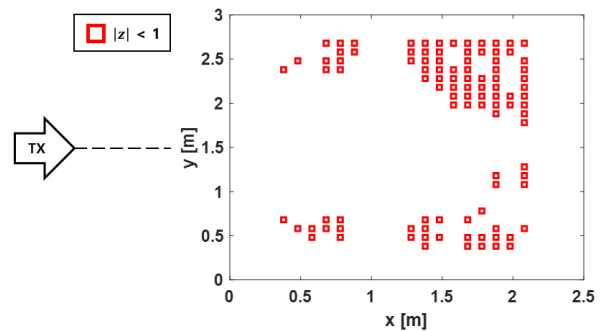


그림 8. 시설 내부에서 $|z| < 1$ 인 지점의 분포
Fig. 8. Distribution of points $|z| < 1$ inside the facility.

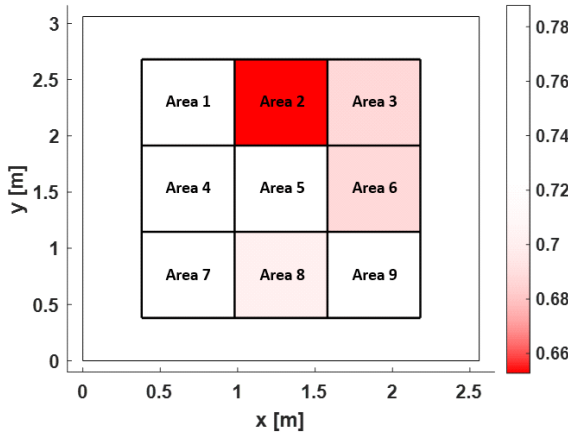


그림 9. xy-평면에서 구역별 수신 지점의 Z-점수 평균
Fig. 9. Average of Z-scores at receiving points by zone in the xy-plane.

모든 주파수 대역의 대표 구역을 선정하기 위해서 각 주파수별 구역의 Z-점수를 평균한다. 따라서 선정한 대표 구역은 해석하고자 하는 모든 주파수 대역 내에서 적용이 가능하다. 그림 9는 0.5~2 GHz의 주파수 대역에서 구역별 평균한 Z-점수를 나타내고, 빨간색이 진할수록 구역 내 수신 지점의 평균 Z-점수가 0에 가까운 것을 나타내어 구역 2가 대표 구역임을 확인할 수 있다.

2-3 시뮬레이션 결과 및 이론 모델 비교 검증

Winprop을 사용하여 필드의 데이터값으로 시험용 시설 내부의 대푯값을 선정하고 Z-점수를 사용하여 대표 구역을 선정하였다. 본 절에서는 확률론적 방법 및 FEKO를 사용하여 Winprop에서 구한 대푯값을 비교하고, FEKO에서 선정한 대표 구역이 Winprop에서 선정한 대표 구역과 일치하는지를 비교하고자 한다.

그림 10은 PEPWB 방법 적용을 위한 시험용 시설에 대한 위상학적 그래프를 나타낸다. 송신부로부터 벽면과 도체 프레임으로 이루어진 벽면을 투과하고, 건축물 내부에는 바닥, 천장, 옆면, 뒷면, 문 등이 위치하고 있다.

PEPWB 방법은 정상상태(steady state)에서 공간 내부에서 손실된 전력(P_d)과 공진기 내부에 입사하는 전력(P_i)이 같다는 가정으로 해석한다. 따라서 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다^[6]. 여기서 공진기 내부에서 발생하는 대표적

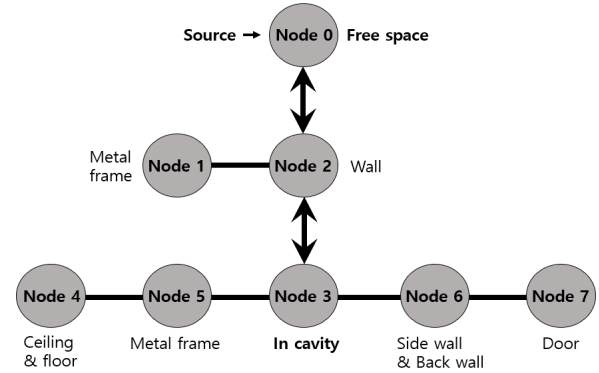


그림 10. 시험용 시설의 위상학적 그래프
Fig. 10. The topological graph of a testing facility.

인 손실은 벽에 의한 손실(P_w), 안테나에 의한 손실(P_{ant}), 개구면에 의한 손실(P_{ap}), 내부 물체에 의한 손실(P_{obj})이 있다.

$$P_i = P_d = P_w + P_{ant} + P_{ap} + P_{obj} \quad (2)$$

공진기 내부에 입사하는 전력(P_i)은 식 (3)과 같이 전자기파가 입사하는 면의 평균결합단면적(mean coupling cross section)과 전력 밀도로 나타낸다. 여기서 입사하는 면은 Node 1과 Node 2의 도체 프레임 및 벽면에 의한 간섭 현상만을 고려한다.

$$P_i = \left(\frac{\langle \sigma_{wall} \rangle T^2 + \langle \sigma_{metal} \rangle}{2} \right) S_i \quad (3)$$

여기서 S_i 는 벽면으로 입사하는 전력 밀도, $\langle \sigma_{wall} \rangle$ 은 벽면의 평균결합단면적, $\langle \sigma_{metal} \rangle$ 은 도체 프레임의 평균결합단면적, T 는 벽면의 투과계수를 나타낸다. 벽면의 평균결합단면적에 T^2 을 곱하여 투과전력밀도를 고려하여 계산한다. 벽면의 평균결합단면적은 식 (4) 및 식 (5)와 같이 해석된다. 여기서 a 는 벽면의 반지름이고 원형으로 치환하여 적용한다.

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

$$\langle \sigma_{wall} \rangle = \frac{\pi a^2}{2}, \quad \left(f > \frac{1.3c}{2\pi a} \right) \quad (5)$$

도체 프레임의 평균결합단면적은 식 (6)과 같이 적용된다.

$$\langle \sigma_{metal} \rangle = \frac{4\pi S}{3\lambda} \sqrt{\frac{\pi f \mu_0 \sigma}{\mu_r}} \quad (6)$$

여기서 S 는 도체 프레임의 표면적, μ_0 는 진공의 투자율, μ_r 은 유효투자율, σ 는 도체의 전도도를 나타낸다. 식 (3)~식 (6)을 통해서 시험용 시설 내부의 수신 전력을 도출할 수 있다.

FEKO에서의 시뮬레이션 환경은 Winprop과 동일하며, 전체 수신 전력 비교를 위하여 Winprop과 동일한 위치에 수신 프로브를 위치시켰다. 그림 11은 시뮬레이터를 이용하여 구한 시험용 시설 내부의 전체 수신 평균 전력과 PEPWB 방법을 이용하여 도출해낸 평균 전력을 비교한 해석 결과다. FEKO와 Winprop에서 구한 평균 수신 전력은 일치하고 PEPWB 해석 결과도 유사한 결과를 나타낸다.

FEKO의 해석 결과로부터 구역 2가 dominant area로 나타나는지 확인하기 위해서 구역별 평균 전력과 전체 평균 전력을 비교하였다. 그림 9에서 구역 2는 평균 Z-점수가 가장 낮은 구역으로 0.6528값을 갖고, 구역 4는 평균 Z-점수가 가장 높은 구역으로 0.7878값을 갖는다. 그림 12는 FEKO로 해석한 시험용 시설의 내부 전체 평균 전력과 구역별 평균 전력을 비교한 그림이다. 구역 2가 구역 4보다 비교적 전체 평균 전력과 유사한 결과를 얻는 것을 확인할 수 있다.

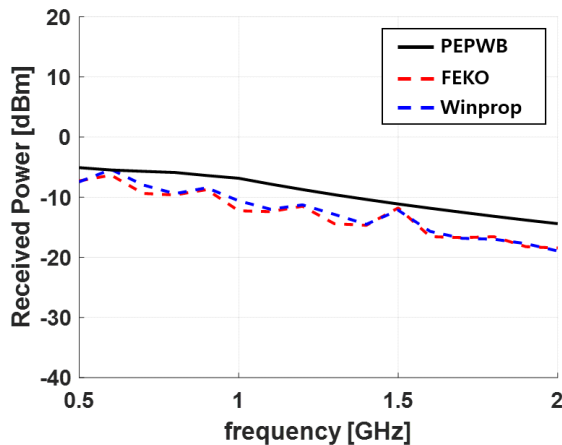
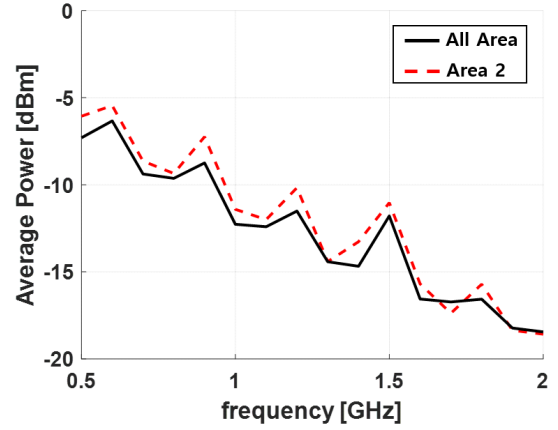
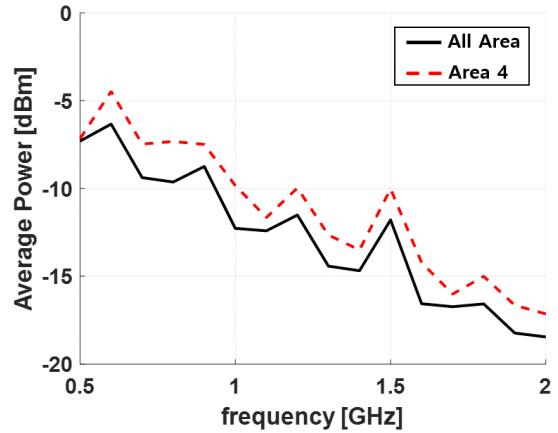


그림 11. 시험용 시설에 대한 전체 평균 수신 전력 비교
Fig. 11. The comparison of overall averaged received power for test facilities.



(a) 시험용 시설의 내부 수신 전력 비교(구역 2)
(a) Comparison of internal received power within a testing facility (Area 2)



(b) 시험용 시설의 내부 수신 전력 비교(구역 4)
(b) Comparison of internal received power within a testing facility (Area 4)

그림 12. 시험용 시설의 내부 전체 평균 전력과 구역별 평균 전력 비교

Fig. 12. Comparison of the regional average power of a testing facility with the total average power.

그림 13에서 FEKO의 해석 결과를 이용하여 시험용 시설 내부의 전체 평균 전력과 구역별 평균 전력의 차이를 도출하였다. 0에 근접할수록 전체 평균 전력과 차이가 적은 것을 나타내며, 구역 2의 평균 전력이 가장 차이가 적고 구역 4의 평균 전력이 가장 차이가 큰 것을 확인할 수 있다. Winprop과 FEKO에서 구역별 평균 전력과 전체 평

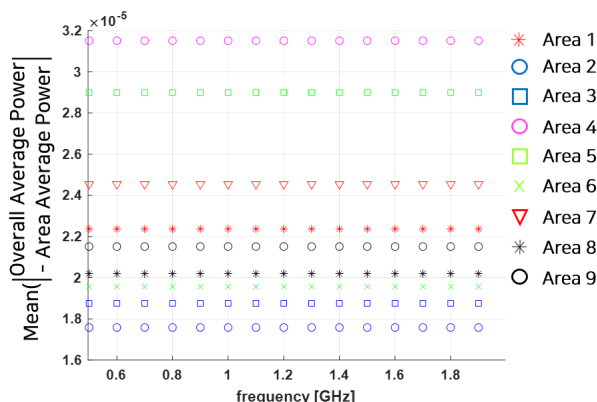


그림 13. 건축물 내부 전체 평균 전력과 구역별 평균 전력의 차이 평균

Fig. 13. Average of the difference between the overall average power inside the building and the average power of each area.

균 전력의 차이가 유사한 경향을 나타내고 있고 선정된 대표 구역으로 측정 지점을 예측할 수 있을 것으로 예상된다.

III. 결 론

본 논문에서는 상용 시뮬레이터인 Winprop과 FEKO를 사용하여 대형 건축물에 대한 해석 결과를 비교하여 검증하였다. II장에서 벽면이 있는 2차원 구조 및 개구면이 있는 3차원 구조에 대해 시뮬레이션하고, 두 시뮬레이터의 해석 결과가 일치하는 것을 확인하여 광선 추적법 기반 해석으로 효율적으로 대형 건축물을 해석할 수 있음을 확인하였다. 또한 Winprop과 FEKO를 사용하여 건축물 내부의 필드 분포 데이터를 구하고 차폐 특성을 나타내는 대푯값을 찾아내었고 확률론적 방법인 PEPWB 방법을 사용하여 유사한 결과가 나타나는 것을 확인하였다. 앞서 구한 대푯값과 인접한 값을 갖는 대표 구역을 Z-점수를 사용하여 선정하고 Winprop과 FEKO가 유사한 경향을 나타내는 것을 확인하였다.

본 논문에서 제안하는 최적화 수신지점 선정 방법은 다음과 같은 절차로 수행된다. 먼저 목표 대상 내부에 높이별 필드 분포 데이터를 시뮬레이션으로 구하고, 필드 분포 데이터를 평균하여 대푯값을 선정한다. 다음으로 각

수신 지점의 Z-점수를 구하고, 구역 내부에 위치한 수신 지점의 Z-점수를 평균한다. 이후 Z-점수값이 가장 작은 구역을 대표 구역으로 선정한다. 만약 해석 대상의 크기, 매질 정보, 송신 지점 등의 정확한 측정 환경을 적용할 수 있다면 시뮬레이터로 예측한 대푯값을 사용하여 측정 결과를 검증할 수 있고 대표 구역을 선정하여 측정 지점을 제안할 수 있을 것으로 예상된다.

그러나 시뮬레이터에서 실제 측정 시 고려해야 할 날씨, 매질 정보, 전파 간섭 등을 모델링에 모두 적용하는 것은 어려움이 있으므로 오차가 발생할 수 있다. 또한 시뮬레이터로 선정한 대표 구역이 측정 환경에서도 적용이 가능한지에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

References

- [1] W. A. Radasky, R. Hoad, "Recent developments in high power EM(HPPEM) standards with emphasis on high altitude electromagnetic pulse(HEMP) and intentional electromagnetic interference(IEMI)," *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*, vol. 2, no. 3, pp. 62-66, Sep. 2020.
- [2] W. A. Radasky, C. E. Baum, and M. W. Wil, "Introduction to the special issue on high-power electromagnetics (HPPEM) and intentional electromagnetic interference (IEMI)," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 46, no. 3, pp. 314-321, Aug. 2004.
- [3] E. B. Savage, J. L. Gilbert, and W. A. Radasky, "Expedient building shielding measurement method for hemp assessments," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 3, pp. 508-517, Jun. 2013.
- [4] D. Micheli, A. Delfini, F. Santoni, F. Volpini, and M. Marchetti, "Measurement of electromagnetic field attenuation by building walls in the mobile phone and satellite navigation frequency bands," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 698-702, 2015.
- [5] Altair, "Winprop 2022.1 user guide," 2022. Available: https://2022.help.altair.com/2022.1/winprop/pdf/Altair_WinProp_User_Guide.pdf

- [6] H. H. Lee, J. W. Lee, "Analysis of electromagnetic effect inside large buildings by external electromagnetic waves using performance-enhanced PWB method," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 1, pp. 12-22, Jan. 2019.
- [7] S. Mcleod, "Z-score: Definition, calculation and interpretation," 2019. Available: <https://www.simplypsychology.org/z-score.html>

- [8] *IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures*, IEEE Std 299-1997, Dec. 1997.

임 동 준 [한국항공대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-2684-0265>



2021년 8월: 한국항공대학교 전자및항공 전자공학과 (공학사)
2021년 9월~현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 석사과정
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파, EMI/EMC 대책 기술, RF 시스템

권 중 화 [한국전자통신연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2132-7403>



1994년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
1999년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
2010년 2월: 연세대학교 전기전자공학 (공학박사)
2021년 9월~2022년 8월: Missouri University of Science and Technology Visiting Scholar

1999년 1월~현재: 한국전자통신연구원 통신미디어연구소 전파 위성연구본부 전파환경감시연구실 책임연구원
[주 관심분야] EMC 대책 기술 및 표준화, 기능 안전 EMC, 고출력 전자파 방호대책 및 측정·평가 기술

이 재 욱 [한국항공대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-2903-5904>



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 항공전자정보공학부 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

형 창 희 [한국전자통신연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-9012-2217>



1996년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)
1998년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학석사)
2013년 2월: 한국과학기술원 정보통신공학과 (공학박사)
1999년 3월~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원

[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 대역 회로 설계, 전자기와 에너지 하베스팅, 전자파 취약성 평가 기술

황 정 환 [한국전자통신연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6072-0443>



1998년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)

2000년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)

2016년 2월: 한국과학기술원 정보통신공학과 (공학박사)

2000년 1월~현재: 한국전자통신연구원 책임

연구원

[주 관심분야] EMP, EMC/EMI, 전자파 인체영향 무선채널 모델