

초목이 포함된 건물에서의 경험적 모델을 적용한 전자파 경로 손실 예측

Path Loss Prediction Applying Empirical Model in Civil Buildings with External Trees

박기태 · 이한희 · 이재욱 · 권종화* · 형창희* · 황정환*

Ki-Tae Park · Han-Hee Lee · Jae-Wook Lee · Jong-Hwa Kwon* · Chang-Hee Hyoung* · Jung-Hwan Hwang*

요 약

본 논문은 외부의 전자기파에 의한 건물 내부의 광선추적 기반의 전자파 해석 시뮬레이션에 있어 외부요소인 나무들에 의한 영향을 일반화된 경로손실 모델로써 적용하는 방안에 대하여 연구하였다. 본 연구에서 사용된 전자파 해석 모델인 광선추적법과 경로손실모델이 설명되었으며, 전자기파 해석 시뮬레이션에는 0.6 GHz부터 6 GHz까지의 대역을 사용하였다. 목표로 하는 건물의 전자기파 해석 시뮬레이션은 광선추적법(ray tracing)을 기반으로 하는 상용 시뮬레이션 툴인 Wireless Insite를 사용하였고, 실험환경에서 실험에 영향을 끼치는 나무들의 크기와 위치를 고려하여 경로손실 모델을 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 최종적으로 경로손실 모델이 적용된 시뮬레이션 결과값과 실제 실험을 통하여 얻어진 결과값의 비교를 통하여 나무의 영향을 고려한 시뮬레이션의 정확성을 확인하였다.

Abstract

This study investigated the method to apply the influence of trees, which are external factors, as a generalized path loss model in the simulation of ray tracing-based electromagnetic analysis inside a building by external electromagnetic waves. The ray tracing method and path loss model, which are electromagnetic wave analysis models used in this study, were described, and the frequencies ranging from 0.6 GHz to 6 GHz were used for electromagnetic wave simulation. The electromagnetic simulation for the target building was performed using Wireless Insite, a commercially available simulation tool based on ray tracing, and a path loss model was applied considering the size and location of trees affecting the experiment in the experimental environment. Finally, the accuracy of the simulation considering the influence of trees was confirmed by comparing the simulation result value applied with the path loss model and the result value obtained through actual experiments.

Key words: EM Simulation, Ray-Tracing Method, Path Loss Model, Foliage Attenuation, Electromagnetic Compatibility

「이 연구는 2020년도 정보통신기획평가원의 지원으로 연구되었음.」

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

*한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunication Research Institute)

· Manuscript received January 30, 2023 ; Revised February 12, 2023 ; Accepted March 6, 2023. (ID No. 20230130-008)

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

I. 서 론

현대의 전자파 산업이 급격히 발전함에 따라 무선 통신과 무선 통신을 이용한 국가 인프라가 구축되었고, 자동차, 시계 등의 여러 사물에도 전자파 자원이 요구되는 초연결 사회가 도래하였다. 지금도 전자파 자원을 사용하는 서비스가 공급 및 소비되고 있고, 전자파 자원을 사용하는 다양한 서비스가 연구 및 개발 중에 있다. 즉, 전자파 자원은 민간과 군을 막론하고 필수적이고 중요한 요소로 자리 잡았다. 하지만 전자파 자원은 다른 전자기기의 누설 전자파에 의해 교란되기도 하고, 경로상의 예상치 못한 다양한 요소에 의하여 신호의 왜곡이 발생하기도 한다. 또한 사회의 필수적인 요소인 전자파 자원이 누군가의 의도적인 고출력 전자파에 의해 교란된다면 사회적 혼란, 재산피해 등은 피할 수 없다. 따라서 전자파 자원을 지키기 위한 전자파환경 연구는 필수적이다.

전자파에 의한 건물 내부의 전자파환경 연구에 있어 계절에 따른 나무의 상태, 날씨에 따른 대기의 상태 등의 제어할 수 없는 환경 요소는 전자파 측정에 큰 오차를 만들 수 있다. 특히 이러한 외부환경 요소 중 가장 흔하게 접할 수 있는 나무는 크기, 생김새 등의 형상이 모델링이 불가능할 뿐 아니라, 계절에 따른 나무의 수분 상태에 따라 전기적 특성이 변화하므로 나무에 의한 영향을 전자파환경 해석 실험에서 정량적으로 분석하는 것은 매우 까다롭다.

본 논문에서는 건물 외부에서 내부로 전파되는 전자파 신호의 측정을 통하여 나무를 포함하는 건물에 의한 전자파 감쇠를 관찰하고, 측정 환경을 전자파 시뮬레이션 상에서 구현하여 나무의 영향을 무시한 경우와 나무의 영향을 포함하는 경우의 전자파 시뮬레이션 결과 분석이 수행된다. 크기 및 전기적 특성을 정확히 파악할 수 없는 나무에 경험적으로 일반화된 경로손실 모델을 적용하여 더 정확한 전자파 시뮬레이션 방법을 제안한다. 나무에 의한 경험적 경로손실 모델링을 위한 다양한 연구가 이뤄지고 있으며, MED, ITU-R, FITU-R 그리고 COST235 등 여러 모델이 개발되었다.

한 연구는 전자파 신호의 나무에 의한 감쇠 실험 결과와 기존의 경험적 모델들의 감쇠값과의 비교가 수행되었

다. 3.5 GHz 대역에서 수행된 실제 측정 결과를 기반으로 전자파가 숲 외부에서 내부로 진행되는 경우와 숲 속에서 전자파가 진행되는 경우로 나누어진 경험적 모델을 개발하는 연구가 수행되었다. 실제측정 결과는 FITU-R 모델과 가장 유사하였으며 개발된 모델 역시 FITU-R 모델과 유사함을 확인하였다^[1].

다른 한 연구에서는 기존의 경험적 모델들이 온대기후의 나무들의 감쇠특성을 기준으로 개발되었기 때문에 열대기후에 맞는 경험적 모델의 필요성을 강조하였다. 이에 따른 열대기후에 분포하는 총알나무의 밀리미터 대역에서의 실제측정 감쇠값과 각 경험적 모델의 감쇠값을 비교하는 연구를 진행하였다. 비교 결과, 2 GHz~18 GHz 대역에서 COST235 모델, FITU-R 모델과 가장 유사한 모습을 확인하였다^[2].

그 외에 복사에너지 이동(radiative energy transfer: REF) 모델에 의해 4가지의 파라미터를 측정된 데이터에 의하여 모델링하는 방법이 연구되었다. 하지만 계산의 복잡도와 나무에 의한 감쇠예측에 있어 감쇠예측이 필요한 지점에서의 측정된 데이터가 필요하다는 점 등의 단점이 있다^{[3][4]}.

나무의 영향은 영상레이다의 연구에서도 확인 가능한데 한 연구에서는 자율주행을 목적으로 차량에 탑재된 레이더 설비에 있어서 수풀의 감쇠량을 측정하고 특성을 관찰하여 이를 바탕으로 레이더 운용 대역을 설정하는 연구를 수행하였다. 제안된 레이더로 수풀 내부의 4.3 m, 7 m, 8.2 m 그리고 11 m에 위치한 표적을 탐지한 결과, 2 GHz~4 GHz의 낮은 대역에서는 4개의 표적을 모두 탐지할 수 있는 반면, 6 GHz~8 GHz, 8 GHz~10 GHz의 높은 대역에서는 4.3 m의 표적만을 탐지하는 모습을 보였다^[5].

전자파 환경 해석 및 전자파 시뮬레이션은 대학교 내에 위치한 하나의 강의실을 대상으로 수행하였고, 시뮬레이션 툴은 광선추적법을 기반으로하는 상용 시뮬레이션 툴인 Wireless Insite를 사용하였다. 건물, 땅 그리고 창틀 등 전기적으로 모델링이 가능한 부분은 실제 크기에 맞게 설계를 하였고, 나무들은 경험적 경로손실 모델들을 적용하여 설계하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 과거부터 현재까지의 여러 일반화된 경로손실 모델들이 개발 과정에

사용된 실험방법과 관찰한 나무의 수종 실측에 사용된 주파수 대역 등을 소개하고, 각 모델의 수식을 소개한다. III 장에서는 본 논문에서 수행된 건물 외부에서 내부로 진행되는 전자파에 의한 건물 내부의 전자파환경 해석 시뮬레이션에 앞서 경험적 경로손실 모델을 전자파환경 해석 시뮬레이션에 적용하기 위한 검증이 제시된다. 또한 전자파 시뮬레이션의 목표 건물에 관한 제원과 콘크리트, 창틀 그리고 땅에 관한 유전율 등을 제시하고, 나무에 경로손실 모델을 적용하여 전자파해석 시뮬레이션을 진행한다. 경로손실 모델이 적용된 시뮬레이션 결과값과 실제 측정값 사이의 오차를 산출하고, 경로손실 모델이 적용된 경우와 적용되지 않은 경우의 차이를 비교 및 분석한다.

II. 경로손실 해석 이론

2.1 광선추적법 모델

광선추적법은 기존의 해석대상의 크기에 한계가 있던 유한차분 시간영역법(finite difference time domain method : FDTD), 모멘트 방법(method of moment: MOM) 등의 수치해석법에 의한 전자기파 해석방식을 극복한 근사적인 해석방법이다. 이는 해석 대상이 해석 주파수의 파장보다 큰 경우 효율적으로 사용될 수 있다. 즉, 고주파 대역의 전자파 해석에 유리하다. 전자기파의 진행경로를 광선의 진행 경로로 근사시켜 전파경로 해석을 수행한다. 각 경로에 대한 전자기장의 세기는 LOS인 경우와 반사, 투과가 발생하는 경우에는 기하광학(geometrical optics)과 물리광학(physical optics) 이론을 바탕으로 계산되며, 회절이 발생하는 경우 UTD(uniform theory of diffraction)이론을 바탕으로 계산을 수행한다.

이러한 광선추적법은 영상법을 사용하여 전파경로를 해석하는 방법과 광선 발사법을 사용하여 전파경로를 해석하는 방법으로 나뉜다. 영상법을 사용한 방법의 경우, 그림 1과 같이 수신지점에 대한 송신지점의 전파경로를 영상법을 사용하여 추정한다. 이 경우 해석 대상의 구조가 복잡하거나 반사, 투과 그리고 회절의 횟수가 증가할수록 복잡도가 지수적으로 증가한다.

이와 달리 광선 발사법을 사용한 방법은 광선 발사, 광

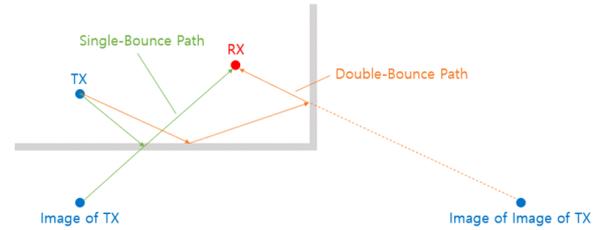


그림 1. 영상법 기반의 광선추적법

Fig. 1. Ray tracing method based on image method.

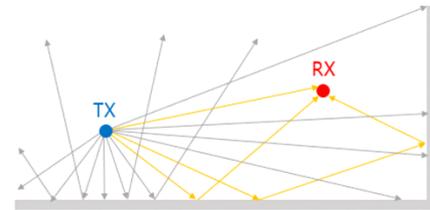


그림 2. 광선 발사법 기반의 광선추적법

Fig. 2. Ray tracing method based on ray shooting.

선 추적, 광선 수신 세 단계로 나뉜다. 이는 그림 2와 같이 송신지점으로부터 임의의 등 간격으로 광선을 발사한 뒤 각각의 광선의 경로를 추적하여 수신구(reception sphere)에 도달한 경로를 해석하는 방법이다. 이 때 광선 발사법에 의해 해석된 경로의 정확도는 발사된 광선의 간격과 수신구의 크기에 따라서 바뀔 수 있다.

2.2 초목에 대한 경험적 모델

전파는 반사, 회절 그리고 산란에 의하여 전달된다. 이러한 전파 전달은 간단한 지형에서는 수식적인 방법을 이용하여 전자기파 해석을 할 수 있고, 조금 더 복잡한 건물과 같은 구조물에서는 수치해석 방법을 통해 전자기파 해석이 가능하지만, 수풀과 나무들에 의해 영향을 받은 전자기파는 현재로서는 경험적인 방법을 제외한 방법으로는 해석이 복잡하고 까다로우며 대부분의 경우 불가능하다[6].

이론적 예측 모델의 한계는 실제 나무들의 경로손실을 측정하여 측정값 데이터의 보정곡선을 사용한 경로손실 모델을 개발하여 극복할 수 있다. 경험적인 경로손실 모델로 나무에 의한 전자파의 감쇠를 예측함으로써 실생활에

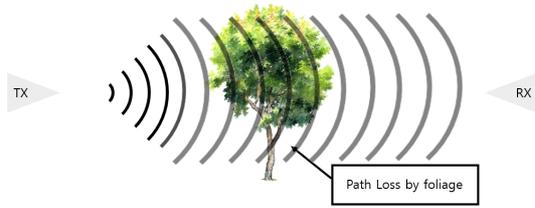


그림 3. 나무들에 의한 수신전력 감쇠
Fig. 3. Received power attenuation by trees.

보다 넓게 일반화하여 적용할 수 있다. 다만 다양한 경로 손실 모델들은 각각 계절, 나무의 수종 등의 측정환경에 차이가 있어 사용자의 상황에 적절한 경로손실 모델의 선정이 중요하다.

나무에 의하여 발생하는 손실을 경험적으로 모델링한 경로손실 모델은 일반적으로 나무의 직경과 전파의 대역 두 가지를 변수를 가진 보정곡선으로 모델링된다.

그림 3은 본 논문에서 고려된 나무에 의한 경로손실 모델의 개요도이다.

2-2-1 Modified Exponential Decay(MED) Model^[7]

MED 모델은 미국 Defense Technical Information Center의 Electromagnetic Compatibility Analysis Center의 Weissberger가 1982년에 작성한 보고서^[7]에서 제안되었다. 온대 기후의 잎이 붙어있는 단일수종의 나무를 대상으로 나무의 감쇠를 관찰하였고, 해당 데이터의 보정곡선이 사용된 모델이다. 하나의 나무의 영향보다는 숲의 영향에 초점이 맞춰져 있다. 숲의 직경이 0 m부터 14 m까지의 수식과 14 m부터 400 m까지의 수식이 나뉘어 개발되었다. 해당 모델은 230 MHz에서 95 GHz 사이의 대역에서 사용이 권장된다.

$$L(dB) = 1.33f^{0.284}d^{0.588} \quad 14 \text{ m} < d < 400 \text{ m} \quad (1)$$

$$L(dB) = 0.45f^{0.284}d \quad 0 \text{ m} < d < 14 \text{ m} \quad (2)$$

f 는 GHz 단위의 주파수, d 는 미터 단위의 직경이다.

2-2-2 ITU-R Model^[8]

ITU-R 모델은 국제표준기관 ITU의 과거 상설 기관인 CCIR에서 1986년에 채택한^[8] 모델이다. MED 모델을 개

발하기 위하여 측정된 온대기후의 단일수종 감쇠 데이터의 보정곡선이 사용되었으며 ITU-R 모델의 경우 숲의 직경이나 잎의 여부에 상관없이 한 수식에 통해 나무의 감쇠를 모델링하였다. 다른 두 모델과 달리 숲의 직경이나 계절에 따른 상태에 맞게 보정할 수 있는 수단이 없다는 단점이 있다. 해당 모델은 300 MHz에서 95 GHz 사이의 대역에서 사용이 권장된다.

$$L(dB) = 0.2f^{0.3}d^{0.6} \quad (3)$$

f 는 MHz 단위의 주파수, d 는 미터 단위의 직경이다.

2-2-3 COST-235 Model^[9]

COST-235 모델은 1996년 참고문헌 [9]에서 제안되었다. 해당 모델의 개발을 위하여 Horse Chestnut, Lime, Sycamore, Pecan 그리고 Apple Orchard 다섯 수종에 대한 측정이 수행되었다. 수식과 측정 데이터 사이의 가장 작은 표준편차를 가지는 보정 곡선을 사용하였다. 다른 모델들과 다르게 COST-235 모델은 감쇠수식의 주파수의 지수항의 값이 1 이하의 작은 값의 음수이기에 주파수가 낮아질수록 감쇠가 커지며 0일 때는 발산하는 특징이 있다. 또한 주파수에 값의 변화에 따른 영향이 매우 적다. 해당 모델의 권장대역은 참고자료에서 확인할 수 없다. 다만 주파수의 지수항의 영향으로 대역에 따른 영향이 매우 적으므로 주파수에 따른 감쇠의 변화를 관찰할 때 주의할 필요가 있다.

$$L(dB) = 15.6f^{-0.009}d^{0.26} \quad \text{out of leaf} \quad (4)$$

$$L(dB) = 26.6f^{-0.2}d^{0.5} \quad \text{in leaf} \quad (5)$$

f 는 MHz 단위의 주파수, d 는 미터 단위의 직경이다.

2-2-4 FITU-R Model^[10]

FITU-R 모델은 1998년 참고문헌 [10]에서 제안되었다. 해당 모델의 개발을 위하여 세 측정지점 Fermi Avenue, The Mound, Ridgeway에서 Horse Chestnut, Lime, Sycamore 등의 흔히 볼 수 있는 세 수종의 다양한 계절에 걸친 11.2 GHz, 20 GHz 대역에서의 측정이 수행되었고, 측정된 데이터의 보정 곡선을 사용하였다. 계절에 따른 나무의 상

태를 보정할 수 있도록 잎사귀의 유무에 따른 두 수식으로 나뉘어 개발되었다. 해당 모델은 10 GHz에서 40 GHz 사이의 대역에서 사용이 권장된다.

$$L(dB) = 0.37f^{0.18}d^{0.59} \quad \text{out of leaf} \quad (6)$$

$$L(dB) = 0.45f^{0.39}d^{0.25} \quad \text{in leaf} \quad (7)$$

f 는 MHz 단위의 주파수, d 는 미터 단위의 직경이다.

그림 4는 3 m 직경의 나무를 1 GHz~6 GHz 대역에서 각 경로손실 모델로 해석한 결과이다.

앞서 소개된 MED, ITU-R 모델 등은 FITU-R 모델과 달리 단일 수종 측정 데이터의 보정곡선을 사용한 모델이다. 반면 FITU-R 모델은 여름과 겨울 두 시기에 세 가지 수종에 대한 측정 데이터의 보정곡선을 사용한 모델이다. 또한 본 논문의 측정 실험에서 사용된 대역과 같은 대역에서 임의의 수종에 대한 감쇠를 측정된 결과를 경로손실 모델의 결과를 비교하였을 때, MED, ITU-R 모델에 비하여 FITU-R 모델이 더 우수한 경로손실 예측을 수행할 수 있음을 확인하였다¹¹⁾.

따라서 다양한 수종의 영향과 계절에 따른 영향을 고려한 FITU-R 모델을 선정하여 대학교 내의 강의실 건물 내부의 전자기파 해석 시뮬레이션을 수행하였다.

2.3 경험적 모델의 적용 및 검증

초목이 포함된 건물의 전자기파 해석 시뮬레이션을 위

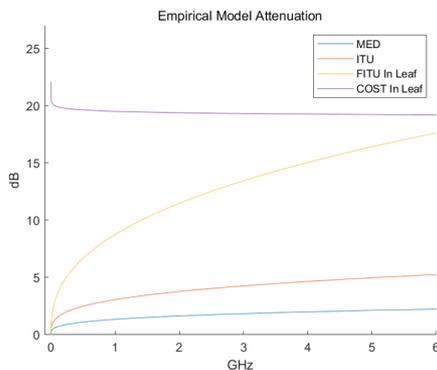


그림 4. 주파수에 따른 경험적 모델 감쇠량
Fig. 4. Empirical model attenuation with frequency.

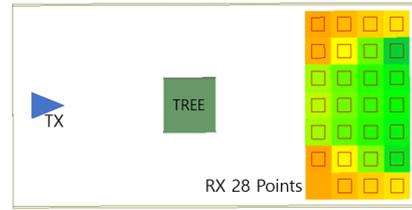


그림 5. 시뮬레이션의 나무 감쇠 시험환경
Fig. 5. Tree attenuation test environment in simulation.

하여 사용된 광선발사법 기반의 광선추적법 시뮬레이션 툴 Wireless Insite에서 경로손실 모델에 의한 나무의 감쇠 영향을 구현하고 그 값이 시뮬레이션에서 정확하게 도출되는지를 그림 5와 같이 관찰하였다. 나무는 그림 6과 같이 1 m×1 m의 가로세로 길이를 가지고 3 m의 높이를 가지는 직육면체를 통해 형상이 모델링되었고, 경로손실 모델에 의한 감쇠값은 5 dB/m으로 입력되었다. 모델링된 나무의 감쇠를 관찰하기 위해서 28개의 지점에서 모델링된 나무가 없는 자유공간에서의 수신 전력과 모델링된 나무가 있을 때의 수신 전력의 차를 구함으로써 나무의 감쇠값을 산출하였다.

그 결과는 그림 6과 같이 시뮬레이션상의 송신지점과 수신지점 사이의 구간이 모델링된 나무에 의해 NLOS가 될 때 입력된 감쇠값을 반영함을 확인하였다. 또한 모델링된 나무의 일부가 광선경로에 스쳐지나가는 경우, 그 감쇠량은 경로와 나무가 겹치는 길이에 비례하여 적어지는 점을 확인하였다.

Attenuation(dB)			
0	0	0	0
1.02	2.27	3.51	4.75
4.99	5	4.99	4.99
4.98	4.98	4.98	4.98
4.98	5	4.99	4.99
1.28	2.55	3.82	5.03
0	0	0	0

그림 6. 시뮬레이션의 나무 감쇠 시험 결과
Fig. 6. Tree attenuation test result in simulation.

III. 실험 및 시뮬레이션

3-1 실험환경 및 시뮬레이션환경

실험은 나무의 영향이 큰 경우와 나무의 영향이 적은 경우 총 두 번의 실험이 수행되었다.

3-1-1 실험환경

논문에서 수행된 실험1의 대학교 내 강의실 실험환경에 위치한 나무들의 모습은 그림 7과 같다. 실험은 7~8월 사이에 진행되었으며 실험환경 내 위치한 나무들은 모두 잎사귀가 있는 상태이다.

대학교 실험환경 내에서 영향을 고려해야 될 나무들은 그림 7(b)~ 그림 7(d) 그리고 그림 7(e)에서 볼 수 있는 4가지의 수종으로 이루어져 있다. 대학교 내 강의실 건물은 20년된 4층 건물이며 전자파 해석 실험이 수행된 방은 13.6 m×7.3 m×2.6 m 크기의 강의실이다.

수신지점은 그림 8와 같이 대학교 내 강의실 방 안의 5개의 지점에 위치하며, 수신전력은 5개의 지점에서 지향성 안테나를 90도씩 돌려가며 수신된 전력의 평균값이 사용되었다. 수신된 전력의 평균값을 사용하였다. 송신지점은 그림 9와 같이 건물에서 25 m 떨어진 지점에 위치하며 측정의 대상이 되는 강의실에 입사되는 전자파를 평면파로 근사시킬 수 있도록 충분히 먼 거리로 설정되었다.

그림 8은 논문에서 수행된 실험 2의 대학교 내 강의실 실험환경 전면부의 모습이다. 실험에 영향을 끼치는 나무는 한 그루로 그 수가 실험1에 비하여 적다. 대학교 내 강의실 건물은 20년 된 4층 건물이며 전자파 해석 실험이 수행된 방은 10.75 m×7.3 m×2.6 m 크기의 강의실이다.

수신지점은 그림 9와 같이 대학교 내 강의실 방 안의 9개의 지점에 위치하며 수신전력은 9개의 지점에서 지향성 안테나를 90도씩 돌려가며 수신된 전력의 평균값이 사용되었다. 송신지점은 아래의 그림 9와 같이 건물에서 20 m 떨어진 지점에 위치하며 실험환경 1과 마찬가지로 측정의 대상이 되는 강의실에 입사되는 전자파를 평면파로 근사시킬 수 있도록 충분히 먼 거리로 설정되었다.

실험에 사용된 안테나는 대수주기 안테나로 그림 10과 같다. 또한 해당 안테나는 송신 및 수신지점에서 동일하



(a) 실험환경 #1 전면부
(a) Front part of experiment environment #1



(b) 실험환경1 내 수종1
(b) Tree species #1



(c) 실험환경1 내 수종2
(c) Tree species #2



(d) 실험환경1 내 수종3
(d) Tree species #3



(e) 실험환경1 내 수종4
(e) Tree species #4

그림 7. 대학교 내 실험환경 #1

Fig. 7. Experiment environment #1 in university.

게 사용되었다. 안테나의 이득은 대략 5 dBi이며, 송신전력은 대역에 따라서 30 dBm~37 dBm으로 설정되었다.

3-1-2 시뮬레이션 환경

시뮬레이션은 광선추적법 기반의 시뮬레이션 툴 Wireless Insite에서 수행되었으며, 광선발사법이 이용되었다. 시뮬레이션을 위해서 그림 11과 같이 실험의 대상이 되는 건

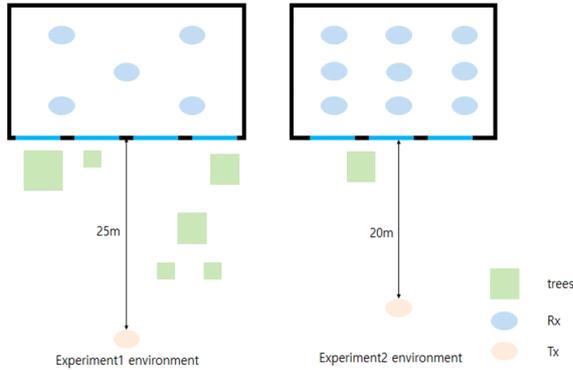


그림 8. 실험 내 송수신 지점 환경(각각 실험환경 #1, 실험환경 #2)

Fig. 8. Receiving and transmission environment in experiment (respectively, #1, #2).



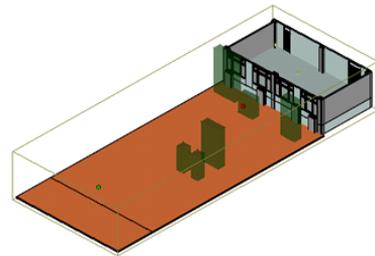
그림 9. 실험환경 #2 전면부

Fig. 9. Front part of experiment environment #2.

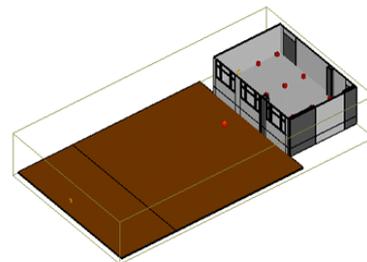


그림 10. 전자파 실험에 사용된 안테나
Fig. 10. Antenna setup used in experiment.

물의 모델링이 수행되었다. 시뮬레이션 모델로 사용된 콘크리트의 경우, 상용 시뮬레이션 툴 CST의 매질 라이브러리의 40년산 콘크리트의 전기적 특성을 기준으로 설정되었다. 비유전율의 경우 4.4의 값을 가지며 전도도의 경우 0.032의 값을 가진다. 지면의 경우 콘크리트와 마찬가지로 CST 라이브러리의 지면의 전기적 특성을 기준으로 설정되었고, 비유전율은 8.12 전도도는 0.14의 값을 가진다. 창틀의 경우 완전전도체로 설정이 되었고, 유리의 경우 공기와 같은 전기적 특성을 가지도록 설정되었다. 마지막으로 실험환경1의 나무는 크기에 따라서 1.5 m와 3 m의 직경을 가지는 나무로 각각 모델링되었고, 실험환경 2의 나무는 1.5 m로 모델링되었다. 직경 및 주파수에 따른 감쇠는 나뭇잎의 영향을 고려한 FITU-R 경험적 모델에 의해서 정해졌다. 계산된 감쇠값은 그림 11(a)의 초록색 직육면체 형상으로 모델링된 나무매질에 입력되어 그 영향이 반영되었다. 또한 시뮬레이션상에서의 감쇠의 영향은 그림 5 및 그림 6에서 확인이 가능하다.



(a) 시뮬레이션 환경 #1
(a) Simulation environment #1



(b) 시뮬레이션 환경 #2
(b) Simulation environment #2

그림 11. 시뮬레이션 환경
Fig. 11. Simulation environment.

3-2 실측 및 시뮬레이션 결과 분석

그림 12는 실험1의 실험결과와 시뮬레이션 결과 값이다. “Ray Tracing without trees”값은 나무의 영향을 반영하지 않았을 경우의 시뮬레이션 결과이고, “Ray Tracing with trees”값은 나무의 영향을 반영하였을 경우의 시뮬레이션 결과이다. 두 결과를 측정 결과인 그림 12의 “Measurement”값과 비교해 보았을 때 나무의 영향을 고려하였을 때 더 우수하게 수신전력 측정결과를 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

다음으로 그림 13은 실험2의 실험결과와 시뮬레이션 결과값이다. Ray Tracing with Trees값과 Ray Tracing without Trees는 실험환경2의 시뮬레이션 결과값이다. 두 결과의 차이가 크지 않아 실험환경2의 나무의 영향은 매우 적은 것으로 보인다. 또한 두 결과를 그림 13의 “Measurement”와 비교하였을 때 그림 12의 “Measurement” 값과 “Ray Tracing without trees”의 경우보다 더 유사함을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

전자파 측정환경에서의 초목의 존재는 측정 실험에 기존의 방법으로는 예측 불가능한 영향을 끼치며, 대부분의

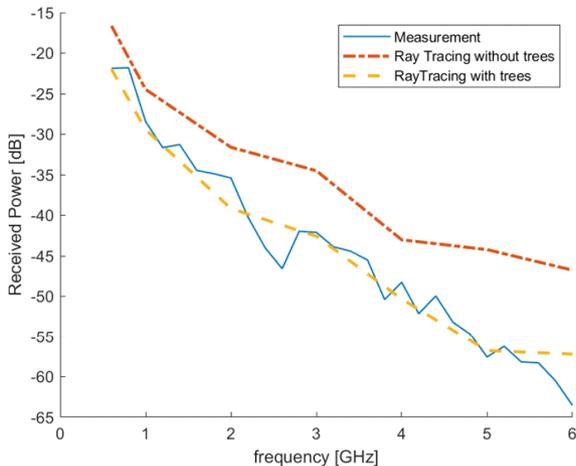


그림 12. 실험 1의 측정 결과와 시뮬레이션의 결과
Fig. 12. Simulation and measurement results of experiment #1.

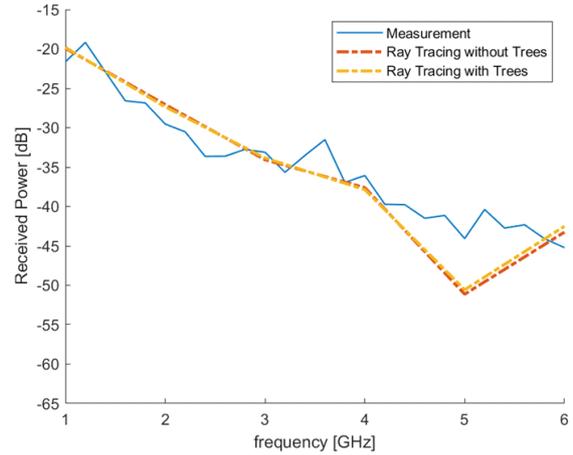


그림 13. 실험 2의 측정 결과와 시뮬레이션의 결과
Fig. 13. Simulation and measurement results of experiment #2.

경우 실험환경 변경을 통한 해결이 불가능하다. 대학교 강의실에서 진행된 실험 #1에서는 총 여섯 그루의 나무에 의해 영향을 받았다. 이러한 영향은 상용시뮬레이션 툴 Wireless Insite의 전자파 해석 시뮬레이션에서 경험적으로 모델링된 경로손실 모델의 적용을 통하여 예측할 수 있었다. 시뮬레이션 결과 높은 대역에서 나무에 의한 영향을 고려한 경우의 결과값이 실험을 통하여 얻은 측정값에 더 유사함을 확인하였고 정확한 해석 시뮬레이션을 수행할 수 있음을 확인하였다. 또한 실험 #2의 나무의 영향이 적은 실험 결과값과 시뮬레이션 결과값의 비교를 통하여 광선추적법 시뮬레이션의 정확성과 나무가 전자파에 끼치는 영향을 검증하였다.

본 논문의 결과를 이용하여 향후 진행될 전자파 측정 실험에서 예측할 수 없는 외부요소를 고려하여 더 정확한 전파환경 분석을 진행할 수 있을 것으로 보인다.

References

- [1] M. Elshayeb, S. Betti, "Study of attenuation in vegetation media and prediction model at microwave frequencies," *Science Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, vol. 7, no. 1, pp. 1-7, Mar. 2018.
- [2] H. M. Rahim, C. Y. Leow, T. A. Rahman, A. Arsad, and M. A. Malek, "Foliage attenuation measurement at

- millimeter wave frequencies in tropical vegetation," in *2017 IEEE 13th Malaysia International Conference on Communications(MICC)*, Johor Bahru, Nov. 2017, pp. 241-246.
- [3] I. T. Han, M. W. Jung, and J. K. Pack, "Measurement and modeling of vegetation loss in the frequency range of 1~6 GHz," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 18, no. 1, pp. 96-104, Jan. 2007.
- [4] R. A. Johnson, F. Scherwing, "A transport theory of millimeter wave propagation in woods and forests," Fort Belvoir, VA, Defense Technical Information Center, Feb. 1985.
- [5] S. G. Sun, B. L. Cho, G. C. Park, and S. H. Nam, "Feasibility study of forward-looking imaging radar applicable to an unmanned ground vehicle," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 21, no. 11, pp. 1285-1293, Nov. 2010.
- [6] B. H. Koo, C. Y. Kim, and J. D. Mok, "Prediction models for the path loss in mobile communications," *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 11, no. 2, pp. 17-29, Jul. 1996.
- [7] M. A. Weissberger, "An initial critical summary of models for predicting the attenuation of radio waves by trees," Fort Belvoir, VA, Defense Technical Information Center, Jul. 1982.
- [8] International Radio Consultative Committee[CCIR], "Influences of terrain irregularities and vegetation on troposphere propagation," CCIR, Geneva, CCIR 236-6, 1986.
- [9] G. A. J. Dooren, H. J. F. G. van Govaerts, and M. H. A. J. Herben, *COST 235: Radiowave Propagation Effects on Next-Generation Fixed-Services Terrestrial Telecommunications Systems*, Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven, 1997.
- [10] M. O. Al-Nuaimi, R. B. L. Stephens, "Measurements and prediction model optimisation for signal attenuation in vegetation media at centimetre wave frequencies," *IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 145, no. 3, pp. 201-206, Jun. 1988.

박 기 태 [한국항공대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0003-4548-8599>



2022년 2월: 한국항공대학교 전자및항공 전자공학과 (공학사)
 2022년 3월~현재: 한국항공대학교 항공 전자정보공학과 석사과정
 [주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파, 전자장 수치 해석, 소재의 물성 추출, EMI/EMC 대책 기술

이 한 희 [한국항공대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-8515-971x>



2018년 2월: 한국항공대학교 전자및항공 전자공학과 (공학사)
 2018년 2월~2022년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학석사)
 2019년 12월~현재: 한국산업기술시험원 전파응용기술센터 주임연구원
 2023~현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 박사과정
 [주 관심분야] EMI/EMC/EMP, 소재의 물성 추출

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

현재: 한국항공대학교 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, 전자기파 에너지 하베스팅, 전자파 취약성 평가 기술

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 전파위성연구본부 전파환경감시연구실 책임연구원

[주 관심분야] EMC 대책 기술 및 표준화, 기능 안전 EMC, 고출력 전자파 방호대책 및 측정·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

책임연구원

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