

계단이 포함된 건물 내부의 경로손실 예측과 측정

최태관, 김성진, 김चे영
경북대학교 전자·전기 공학부

Prediction and Measurement of the Path Loss in a Building including the Staircase

Tae-Kwan Choi, Sung-Jin Kim, Che-Young Kim
Dept. of Electronic Eng. Kyungpook National University
E-mail : ctk@palgong.kyungpook.ac.kr

Abstract

A SBR/Image ray-tracing technique using triangular ray tubes to predict the effects of walls, rooms, floors, and staircase is considered. Suggested technique is very efficient to estimate the path loss in three-dimensional buildings including the staircase.

The model to predict the path loss through walls and floors in a multifloored building is presented. Measurements are made for three corridors having the staircase at 850 MHz. Measured data shows a close agreement with a simulated data.

I. 서론

실내에서 전파특성은 건물의 구조와 재질, 그리고 가구 배열에 따라 다양한 특성을 가지며, 주요한 전파 매카니즘은 반사, 투과, 그리고 회절이다. 실내의 전파환경 해석 방법에는 영상법과 광선추적기법이 주로 사용되었다. 영상법은 효과적이긴 하나 단순한 구조에서만 적용이 가능하고, 광선추적기법은 복잡한 전파환경에 적용이 가능하지만 모든 반사와 투과 현상이 고려됨에 따라 계산 수행 시간이 매우 증가하게 되고, 수신점에 도달되는 광선을 구별하기 위해 수신기를 정의하여야 한다[1].

본 논문에서는 다양한 구조를 갖는 건물 내부를 해석하기 위해 삼각광선튜브를 추적하는 SBR/Image ray-tracing 기법을 도입하였다[2]. 건물 내부의 모든 구조를 육면체로 모델링하고 Null-Plane을 색안하여 벽면·바닥·천장에서 다중반사와 투과를 고려하였고 층간을 손실 유전체층으로 두고 투과손실을 포함

하였다. 그리고 고층 건물내의 계단부분을 해석하여 추가하였다. 송신안테나를 고정시키고 수신안테나를 각 층에서 이동시키며 경로손실을 산출하고, 타당성을 검증하기 위해 측정치와 비교하였다.

II. 본론

1. 경로손실 모델과 SBR/Image 기법

경로손실의 예측을 위한 해석의 대상이 되는 구조는 경북대 공학관 9층 건물이다. 실내 전파 분야에서 계단의 구조적인 영향에 대한 연구는 상대적으로 그 수가 적다. 그림 1은 계단의 측면도로서 기본적인 직육면체 모델을 적용하기 어려운 구조이다. 따라서

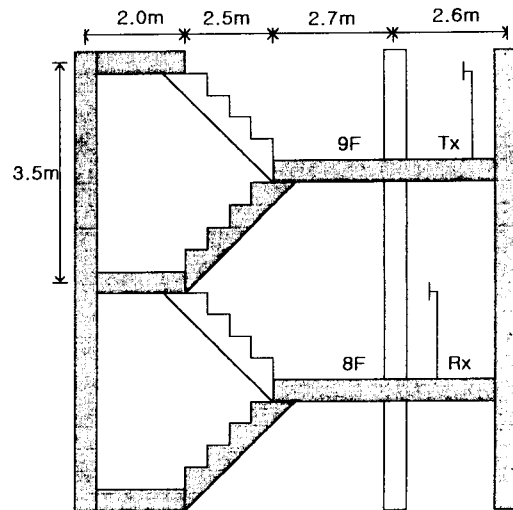


그림 1. 계단의 측면도

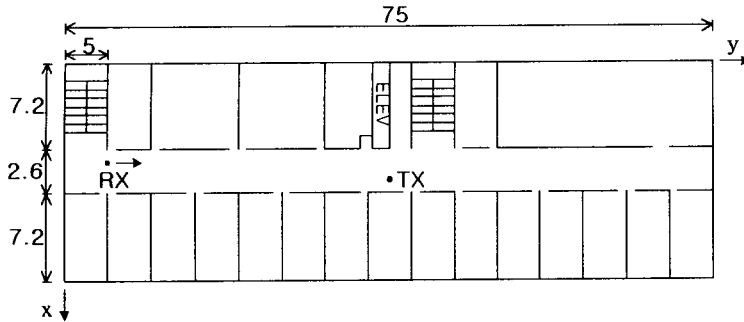


그림 2. 건물의 9층 평면도와 송수신안테나의 위치

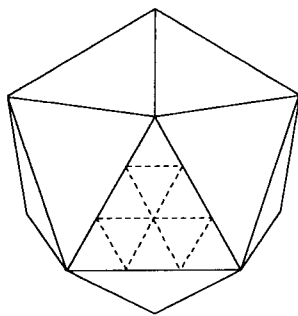


그림 3. 20면체와 분할

계단 부분을 여러 개의 육면체로 나누고 임의의 육면체인 경우에도 적용이 가능하게 모델링하였다. 그림 1에서 흰 막대부분은 복도에서 계단으로 통하는 부분으로 실제로는 벽면이 없다. 이를 Null-Plane으로 정의하여 6개의 면과 8개의 꼭지점을 가진 육면체로 정형화하였다. 송수신안테나는 해석하고자 하는 전체모델의 복도에 위치한다. 그림 2는 9층의 평면도로 복도를 중심으로 양쪽으로 연구실, 강의실 및 계단을 보인다. 해석에 포함된 8층과 7층도 9층과 유사한 평면 구조를 가지고 있다. x축 방향의 평면의 폭은 17m, y축 방향의 길이는 75m, 바닥과 천장의 간격은 3.5m, 그리고 복도의 폭은 2.6m이다. 복도의 중앙부에 송수신안테나가 위치하고 있고 수신안테나는 y축 방향으로 복도를 따라 이동한다.

실내 환경의 경우 전파가 6개의 면에 부딪쳐서 다중반사를 일으키기 때문에, 실내에 존재하는 구조물에 의한 전파를 수용하기 위하여 3차원 광선추적기법이 필연적이다. 송신점을 점전원으로 간주할 경우 방사된 광선이 구면파의 형태를 가져서 파면(Wavefront)이 원을 이룬다. 광선을 구면파로 가정하면, 입체각으로 이루어진 광선다발(Ray tube)간의 빈 간격이 생겨서 4π 전방향에 대한 광선을 정의할 수 없다. 따라서 새로운 형태의 파면을 정의하여야 한다. 송신점에서 방사된

광선을 다면체화하기 위해서는, 송신점으로부터 동일 거리에 동일 입체각을 갖는 각 광선다발의 파면은 동일한 모양과 크기를 가져야 한다. 그리고 이러한 파면의 모양은 광선의 수를 증가시킬 때 그 모양이 유지되어야 한다. 광선을 다면체화하기 위해서 파면을 정삼각형으로 두고 송수신안테나에서 삼각광선튜브를 방사시킨다. 먼저 20개의 동일한 정삼각형으로 이루어진 20면체를 구성하고 20면체를 이루는 삼각형의 변을 분할주파수 N으로 분할한다. 삼각형의 세 변에 평행하게 선을 그리면 그림 3과 같이 더 작은 삼각형으로 나뉘어진다. 이때 주어진 분할주파수 N에 대해서 삼각광선튜브의 수는 $20N^2$ 이 된다. N이 클수록 광선튜브는 더 작아지고 더 많은 계산 시간이 필요하게 된다.

송수신안테나에서 방사된 광선은 실내의 기하학적 구조에 의해 반사 및 투과 현상을 겪으며 수신점에 도달한다. 송수신안테나에서 방사된 광선이 수신점에 도달하는지 여부는 수신점이 삼각광선튜브 안으로 들어오느냐에 달려 있다. 그림 4는 어떻게 삼각광선튜브를 추적하고 R점에서의 수신안테나(RX)가 반사된 삼각광선튜브 안에 포함되는지를 결정하는 방법을 나타낸다.

T는 송신점을 나타내고 V_1, V_2, V_3 는 송신점에서 광선을 방사했을 때 삼각형의 꼭지점을 나타낸다. 그리고 U는 삼각형의 무게중심이다. 삼각광선튜브 $T V_1 V_2 V_3$ 으로 바뀐다. 여기에서 T'은 송신점 T의 반사면에 대한 영상점(Image Point)이다. 삼각광선튜브의 삼각형을 구성하는 꼭지점 V_1, V_2, V_3 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\vec{V}_i = \vec{T} + l\hat{r} + \overline{UV}_i, \quad (1)$$

$$i=1,2,3.$$

여기서 각 벡터의 성분들은 다음과 같다.

$$l = \overline{TU} \quad (2)$$

$$\hat{r} = \overline{TU} / \overline{TU} \quad (3)$$

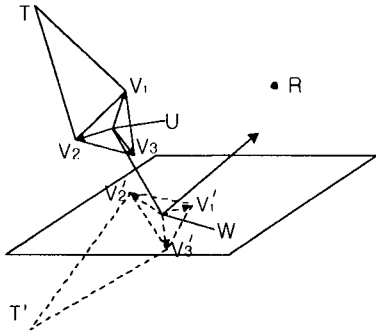


그림 4. 평면에 삼각광선튜브의 입사와 반사

식 (1)을 이용하여 반사후의 삼각광선튜브의 V_1', V_2', V_3' 에 대한 벡터 방정식은 다음과 같다.

$$\overrightarrow{V_i'} = \overrightarrow{T} + l' \widehat{r} + \overrightarrow{WV_i'}, \quad i=1,2,3. \quad (4)$$

여기서 각 벡터의 성분들은 다음과 같다.

$$l' = \overrightarrow{TW} \quad (5)$$

$$\widehat{r} = \overrightarrow{TW} / \overrightarrow{TW} \quad (6)$$

$$\overrightarrow{WV_i'} = \frac{l'}{l'} [\overrightarrow{UV_i'} - 2(\overrightarrow{UV_i'} \cdot \widehat{n})] \widehat{n} \quad (7)$$

반사 후 삼각광선튜브 $T'V_1'V_2'V_3'$ 안에 수신안테나가 포함되는지를 체크하기 위해서 \overrightarrow{TR} 과 삼각형 $V_1'V_2'V_3'$ 와의 교점이 삼각형 내부에 있고 수신점 R 과 삼각형 사이에 장애물이 존재하지 않으면 수신되는 것으로 판단한다.

송신안테나에서 방사된 광선이 다중경로를 통해 반사와 투과를 겪으면서 수신안테나에 도달한다. 안테나의 편파를 고려한 수신전력은 다음과 같다.

$$P_r = \frac{\lambda^2}{4\pi\eta} G_r |\mathbf{E}_{total} \cdot \widehat{h}|^2 = \frac{\lambda^2}{4\pi\eta} G_r \left| \sum_k \mathbf{E}_k \cdot \widehat{h} \right|^2 \quad (8)$$

여기서 \mathbf{E}_{total} 은 전체전장으로 각 전파경로의 전장을 합성한 값이다. 그리고 \widehat{h} 은 수신안테나의 편파 벡터이고 λ 는 파장, η 는 자유공간의 파동 임피던스로서 $120\pi [\Omega]$ 이며, G_r 은 수신안테나의 이득이다. 식 (8)의 광대역 신호에 대한 수신전력 표현식은 다음과 같다[4].

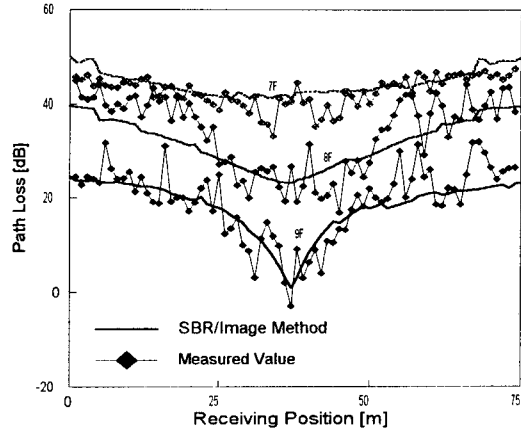


그림 5. 복도에서 경로손실의 예측치와 측정치

$$P_r = \frac{\lambda^2}{4\pi\eta} G_r \sum_k |\mathbf{E}_k \cdot \widehat{h}|^2 \quad (9)$$

위의 두 식에서 협대역 수신전력은 전체전장을 제공하기 때문에 도달하는 경로에 따른 위상이 고려되어 신호 변화가 민감하게 나타나고 광대역 수신전력은 각 전장을 제공하여 합하므로 신호의 빠른 변화 성분은 사라진다. 실내환경과 같이 복잡한 구조를 가지고 있을 때 수신전력을 비교하려면 광대역 수신전력이 구분이 용이하다.

2. 경로손실의 수치결과 및 고찰

지금까지 논의한 SBR/Image ray-tracing 기법을 이용하여 계산된 예측모델의 수치결과를 제시하고자 한다. 예측치의 타당성을 검증하기 위해 측정치와 비교하였다. 측정치와 비교하기 위하여 경로손실을 정의하면 $PL = P_o - P_r [dB]$ 와 같다. P_o 은 예측 또는 측정된 수신전력이고, $P_o = P_t G_t G_r (\frac{\lambda}{4\pi})^2$ 로서 송신안테나로부터 1m 떨어진 지점에서의 수신전력이다. 측정시 P_o 는 전파 무반사실에서 송수신안테나 간의 거리를 1m로 두고 측정된 수신전력이다.

그림 5는 그림 1에서 제시한 모델에서 송신안테나 TX의 위치는 (9.2, 37., 8.6)m, 수신안테나 RX의 위치는 각각 (8., y, 8.6)m, (8., y, 5.1)m, (8., y, 1.6)m로 두었다. 그리고 y축 방향으로 수신점의 위치이동을 1m 간격으로 하였고 850 MHz에서 계산된 경로손실을 측정된 경로손실과 함께 보이고 있다. 경로손실의 산출시 벽의 상대 유전율과 전도도는 각각 $\epsilon_w = 3$ 과 $\sigma_w = 0.005 S/m$ 이며, 천장과 바닥의 상대 유전율과 전도도를 $\epsilon_f = 15$ 와 $\sigma_f = 0.1 S/m$ 로 하였다. 그리고

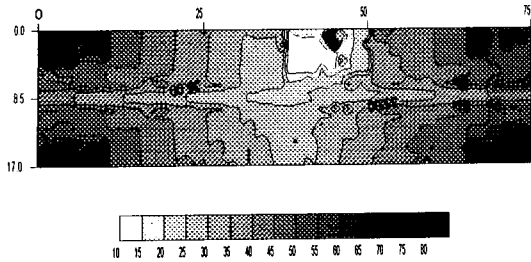


그림 6. 8층에서의 경로손실

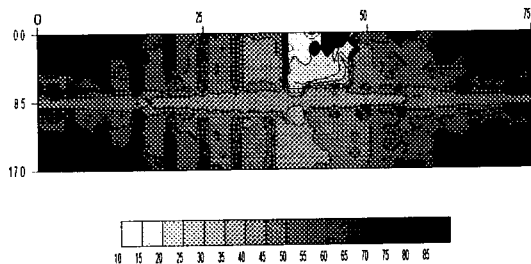


그림 7. 7층에서의 경로손실

벽면과 층간의 두께는 25cm로 하였다[5]. 그림 5에서 보듯이 SBR/Image ray-tracing 기법의 수치결과와 측정치가 유사하다. 경로손실은 복도 중간의 송신점을 중심으로 거리에 따라 증가함을 볼 수 있다. 또 9층과 달리 8층과 7층에서는 거리에 따른 손실뿐만 아니라 투과에 의한 층간손실이 포함되어 있어서 경로손실이 층을 거듭할수록 크게 나타난다.

그림 6과 그림 7은 송신안테나를 9층 (8.5, 37.5, 8.6)m 지점에 두고 수신안테나를 복도와 방, 그리고 계단부분 전체를 이동한다고 가정하고 시뮬레이션한 결과를 보이고 있다. 이것은 투과현상이 우세한 환경에서 계단을 통한 전파의 전달을 해석하기 위한 모델이다. 각각 8층과 7층에서 수신안테나가 이동할 때 벽면과 층간, 그리고 계단에서 반사와 투과를 통해 수신된 신호의 경로손실을 나타낸다. 검게 표시된 부분은 경로손실이 큰 지역으로 전파 음영 지역이라고 볼 수 있다. 그림에서 계단부분을 살펴보면 9층 송신안테나에서 계단을 통해 8층과 7층의 계단 주위가 경로손실이 작아서 상대적으로 수신이 잘 됨을 보여준다. 그리고 그림 2에서 복도 끝에 있는 계단은 송신안테나로부터 멀리 위치하므로 계단을 통한 경로손실 분석에 크게 영향을 미치지 못한다.

III. 결론

다양한 구조물이 있는 실내 전파환경에서의 경로손실을 예측하기 위하여 SBR/Image ray-tracing

기법을 적용시켰다. 이를 위하여 각 방을 육면체로 모델링하고 다중반사에 의한 경로손실과 층간 투과손실 및 계단을 통한 전파특성을 해석하였다. SBR/Image ray-tracing 기법의 수치결과와 측정치가 잘 일치하여 예측 모델의 타당성을 검증하였다. 주로 투과 현상을 통해 도달되는 8층과 7층에서 계단의 구조적인 영향을 크게 받음을 확인함으로써 더 복잡한 실내 환경의 전파특성 분석이 가능하게 되었다.

참고문헌

- [1] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport, "Site-specific propagation prediction for wireless in-building personal communication system design," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, no. 4, pp. 879-891, Nov. 1994.
- [2] S. H. Chen and S. K. Jeng, "An SBR/Image approach for radio wave propagation in indoor environments with metallic furniture," *IEEE Trans. Ant. Propaga.*, vol. 45, no. 1, pp. 98-106, Jan. 1997.
- [3] W. Horncharnko, H. L. Bertoni, and D. Dailing, "Mechanisms governing propagation between different floors in building," *IEEE Trans. Ant. Propaga.*, vol. 41, no. 6, pp. 787-790, Jun. 1993.
- [4] K. Pahlavan and A. H. Levesque, *Wireless Information Networks*, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 50-55, 176-201, 1995.
- [5] 정백호, 김채영, "고층 건물의 층간 경로손실 예측 모델," *Telecommunications Review*, 제7권 제4호, pp. 507-515, 1997. 7-8.
- [6] W. D. Burnside and K. W. Burgener, "High frequency scattering by a thin lossless dielectric slab," *IEEE Trans. Ant. Propaga.*, vol. 31, no. 1, pp. 104-110, Jan. 1983.
- [7] M. C. Lawton and J. P. McGeehan, "The application of a deterministic ray launching algorithm for the prediction of radio channel characteristics in small-cell environments," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, no. 4, pp. 955-968, Nov. 1994.