

---

# 시간영역 유한차분법을 이용한 실내 전파 채널 모델링

정선오\* · 임영석\*\*

## Indoor Propagation Channel Modeling Using the Finite Difference Time Domain Method

Sun-Oh Chung\* · Yeong-Seog Lim\*\*

### 요 약

실내 전파 채널 해석은 고전적으로 경로추적법이 많이 이용되었으나, 이 논문에서는 3차원 전파해석법인 시간영역 유한차분법을 이용하여 3차원 실내 구조에 대하여 채널 모델링하였다. 시간영역 유한차분법의 여기신호로는 평면파를 이용했으며, 이 때의 평면파의 구성은 TF/SF법을 사용했다. 그리고 흡수경계조건으로는 7개의 흡수층을 사용한 완전정합층법을 이용했다. 실내 채널 모델링의 시뮬레이션을 위한 거실은 벽돌, 도체, 유리, 콘크리트로 이루어졌다. 거실에 가구가 있는 경우와 없을 때에 대하여 각각 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과로 실내 전파 환경에서의 다중경로에 의한 페이딩 현상을 확인할 수 있었으며, 수신기 설계에 도움이 되는 초과지연 평균과 실효지연 확산을 계산할 수 있었다.

### ABSTRACT

Analysis of an indoor propagation channel has conventionally used the ray-tracing method. But, in this paper, we had modelling the channel for three dimensional indoor structure by the finite difference time domain method for three dimensional full wave analysis. An excitation signal of the FDTD method used plane wave. The plane wave was excited using the total field/scattered field method. And absorbing boundary condition used the perfectly matched layer method with 7 layers. An living room for the simulation of indoor channel modeling is surrounded the wall that be composed of the wood, the conductor, the glass and concrete. When there are furniture in the living room or not, it were simulated, respectively. As simulation results, we could identify the fading effect of multipath at indoor propagation environment, calculated mean excess delay and rms delay spread for the receiver design.

### 키워드

실내 채널모델링, 시간영역 유한차분법, 실효지연확산, 초과지연평균

### Key word

Indoor Channel modeling, FDTD, rms delay spread, Mean excess delay

---

\* 정회원 : 한국폴리텍 V대학(csc001@naver.com)

\*\* 정회원 : 전남대학교

접수일자 : 2011. 08. 01

심사완료일자 : 2011. 08. 31

## I. 서 론

이동통신이나 위성통신, 무선 랜, 디지털 방송 같은 무선통신의 발달로 인해 실내에서의 전파의 사용이 날로 증가하고 있다. 따라서 신뢰할 만한 통신시스템을 개발하기 위해서는 실내에서 발생할 수 있는 전파의 구조물에서 반사, 회절, 굴절에 의한 페이딩과 도플러 효과 등 전파 특성에 대한 이해가 필수적이다. 실내 전파 채널의 특성은 계측기에 의한 측정법과 수학적인 알고리즘을 이용하여 계산할 수 있다. 수치적인 방법으로 경로 추적법(Ray-Tracing)이 많이 이용되었으나 이 방법은 복잡한 채널, 즉 3차원 구조물이 많아 다중경로가 많이 발생하는 환경에서는 매우 복잡한 식과 긴 해석시간을 필요로 한다.[1][2][3]

또한 구조물을 새로 추가나 제거시에도 경로를 다시 계산해야하는 번거로움이 있다. 따라서 이러한 단점을 피하면서, 3차원 구조물을 쉽고, 정확하게 해석할 수 있는 시간영역 유한차분법(Finite Difference Time Domain, FDTD)을 이용한 실내 전파 채널 해석이 다양한 구조에 대해서 행해지고 있다.[4][5] 시간영역 유한 차분법은 비록 많은 양의 메모리를 필요로 하지만, 복잡한 모델을 쉽게 해석할 수 있고, 실내 환경에서 구조물의 추가시에도 부차적인 메모리의 사용이 없고, 한 번의 시뮬레이션으로 많은 양의 정보를 얻을 수 있는 장점이 있다. 실내 전파 환경의 해석을 위한 시간영역 유한 차분법에서의 입사 신호는 원거리의 진행하는 파로 여겨 평면파로 가정하였다.

여기서 평면파의 여기법으로는 TF/SF(Total Field/Scattered Field) 방법이 많이 이용된다.[6] 본 논문에서는 TF/SF의 평면파의 여기신호를 입사한 시간영역 유한차분법을 이용하여 LTE와 디지털 TV 주파수 대역인 800MHz 주파수 대역에 대하여 실내 전파 환경을 해석하였다.

## II. 본 론

### 가. 시간영역 유한차분법

시간영역 유한차분법은 소스 신호가 없는 맥스웰 컬 방정식을 차분식으로 이산화하여 변환한 후, 전체와

자계를 교대로 경계조건에 맞게 일정 시간 간격에 따라 업데이트하면서 계산한다. 실내 전파 채널은 여기신호로 원거리에서 진행한 파로 여겨 평면파를 주로 이용한다. 따라서 시간영역 유한차분법을 이용하여 실내 전파 채널을 해석하기 위해서는 평면파를 여기 시켜야 한다. 해석을 위한 여기신호의 평면파의 구성은 그림 1과 같다.

산란체를 둘러싸는 영역을 전체장 영역(Total Field Region), 그 영역 바깥쪽 영역이 산란장 영역(Scattered Field Region)이다. TF/SF법은 해석공간을 산란장 영역과 전체장 영역(입사파와 산란파의 합)의 두 영역으로 나누어서 전체장 영역에 여기된 입사파는 산란장 영역에는 나오지 않는다. 시간영역 유한차분법의 해석은 산란장 영역 밖에 흡수경계조건을 적용하는데, 흡수경계조건으로는 현재 최외각면에서 가장 반사가 적은 완전정합층(Perfectly Matched Layer, PML) 법을 주로 이용한다.

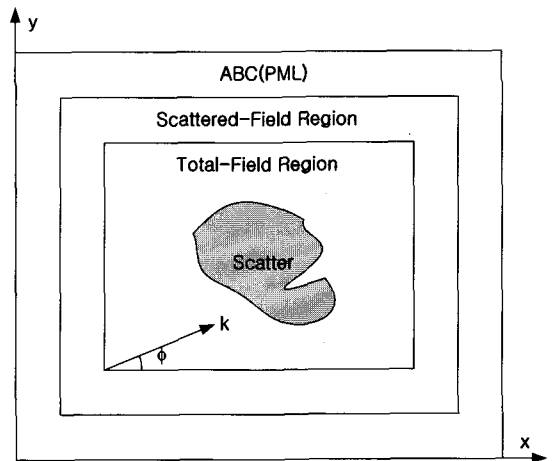


그림 1. TF/SF 구성  
Fig. 1. TF/SF structure

TF/SF법은 맥스웰 방정식의 선형성을 이용하는데, 전체장은 식 (1),(2)와 같이 입사장과 산란장의 합으로 정의한다.

$$E_{tot} = E_{inc} + E_{scat} \quad (1)$$

$$H_{tot} = H_{inc} + H_{scat} \quad (2)$$

(단, 아래첨자 tot는 전체, inc는 입사, scat는 산란을 뜻함)

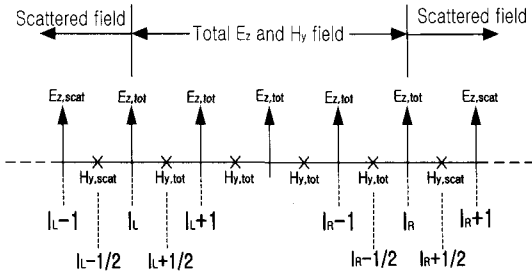


그림 2. 1차원 TF/SF에서의 전자계 성분들  
Fig. 2. One dimensional Electric and magnetic components in the TF/SF region

그림 2는 1차원 TF/SF에서의 전자계 성분들을 나타낸다. 전체장 영역과 산란장 영역의 경계가 되는 곳에서 전자계 성분들이 연속이 되도록 입사파를 구성한다. 이러한 형태의 식이 연속이 되려면 경계면에서의 전자계 성분은 식 (3),(4)와 같다. 식 (3)과 (4)의 우변의 첫 번째 항은 일반적인 FDTD의 계산식에서 계산된 결과이고, 두 번째 항은 평면파의 소스항으로 여기 신호의 종류에 따라 결정된다.

$$E_x^{[n+1]} = E_x^{[n+1]} - \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta} H_{z,inc}^{[n+1/2]} \quad (3)$$

$$H_x^{[n+1/2]} = H_x^{[n+1/2]} + \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta} E_{z,inc}^{[n]} \quad (4)$$

(단,  $\Delta$ 는 셀 격자 크기)

3차원 구조물을 해석하고, 임의의 평면파의 각도를 여기 시키기 위해서는 식 (3)과 (4)의 1차원 TF/SF 식을 3차원 식으로 확장해야 한다.[7]

프로그램의 정확도를 검증하기 위하여 그림 3의 비유전율이 50이고, 반지름이 80 [mm] 인 원통형 유전체에 평면파를 입사시켰다.

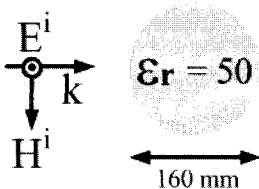


그림 3. 유전체 원통에 평면파 입사  
Fig. 3. Plane wave incidence for the dielectric cylinder

그림 4는 원통형 유전체에 대하여 중심에서부터 바깥쪽으로 전기장의 세기를 MIE의 해석적인 해[8]와 FDTD 시뮬레이션 결과 값을 비교한 것이다. 비교결과 해석적인 해와 FDTD에 의한 수치해석 결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

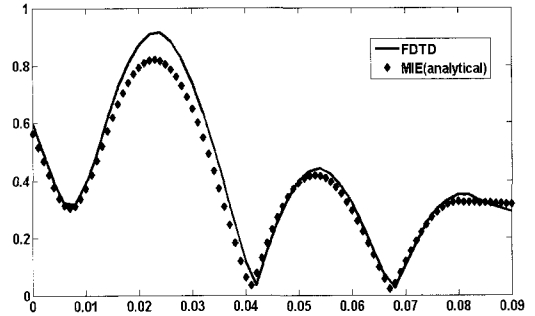


그림 4. FDTD 결과와 해석적 해와 결과 비교  
Fig. 4. Comparison of FDTD result and analytical solution

#### 나. 채널 파라미터

실내 전파 채널의 특성은 수신신호가 수많은 반사파, 즉 한 지점에서 수신되는 신호는 많은 다중경로 신호들의 임의의 크기와 위상과 도착각도를 갖는 수많은 평면파로 구성되어 있다. 이에 따라 나타나는 현상은 다중경로에 의해 같은 신호의 위상차 때문에 신호의 급감이 나타나는 페이딩(Fading) 현상과 움직이는 물체의 영향으로 도플러 효과(Doppler Effect)가 발생한다. 이러한 현상은 BER을 저하시키고, 데이터율을 제한하며, 수신기 설계에 제약이 된다. 다른 다중 경로채널을 비교하고, 무선시스템의 일반적 설계 가이드라인을 발전시키기 위한 파라미터로는 초과지연 평균(mean excess delay)과 실효지연 확산(rms delay spread)이 있다.[9] 광대역 다중경로 채널의 시간 분산 특성들은 이 두 값에 의해서 정해진다. 초과지연 평균은 전력 지연 프로파일(Power delay profile)의 1차 모멘트로서 식 (5)로 정의된다.

$$\bar{\tau} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} ts(t)dt}{\int_{-\infty}^{\infty} s(t)dt} \quad (5)$$

(단,  $\bar{\tau}$ 는 초과지연평균,  $s(t)$ 는 전력지연프로파일)

식 (5)의  $s(t)$ 는 전력 지연 프로파일로써 시간영역 유한차분법을 이용해서는 식 (6)으로 구할 수 있는 데, 전계의 각 성분들의 위치가 서로 다르기 때문에 보간법을 이용하여 오차를 줄여야 한다.

$$s(t) = |E(t)|^2 \tag{6}$$

실효 지연 확산은 전력 지연 프로파일의 2차 모멘트의 제곱근으로 식 (7)로 정의된다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} (t - \bar{\tau})^2 s(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} s(t) dt}} \tag{7}$$

(단,  $\sigma$ 는 실효 지연 확산)

### III. 시뮬레이션 및 분석

실내 전파 채널 모델링을 위한 시뮬레이션 구조는 나무로 된 출입문과 유리로 구성된 거실, 도체인 현관문의 벽면으로 이루어진 그림 5에 도시하였다. 거실의 벽면, 천장과 바닥은 콘크리트로 구성됐다고 가정했다. 실내공간은 가로 6[m], 세로 7[m], 높이는 2.5[m]로 설정했다.

시간영역 유한차분법에 이용되는 파라미터들은 셀 수는 x, y, z 좌표의 각각 340, 390, 175로 총 23,205,000 개이고, 흡수경계 조건인 PML 레이어 수는 각각 7개씩으로 했으며, 이산화량은 셀 크기  $\Delta = 20 [mm]$ , 시간 간격  $\Delta t = 38.52 [ps]$  이고, 해석에 필요한 비유전율은 콘크리트 15, 유리창 5.2, 나무 2.4로 설정했다. 입사 여기신호는 평면파로써 신호 종류는 주파수 변조된 가우시안 펄스를 인가했다. 평면파의 방향은 창문에 수직인 방향으로 입사시켰다. 해석 주파수 대역은 디지털 TV와 LTE에서 사용중인 800MHz의 신호를 인가하였다.

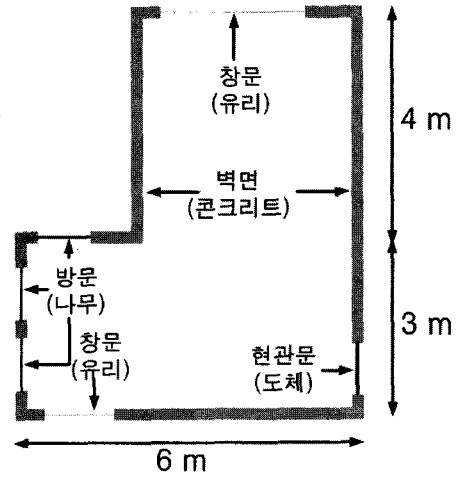


그림 5. 시뮬레이션을 위한 실내 구조  
Fig. 5. Indoor structure for the simulation

그림 6은 거실 중앙 위치와 높이 1.2[m]에서의 전력 지연 프로파일을 보인 것이다. 벽면에 의한 반사로 인해 다중경로가 발생하여 짧은 시간에 신호의 급감이 일어나는 페이딩현상이 나타나는 것을 알 수 있다.

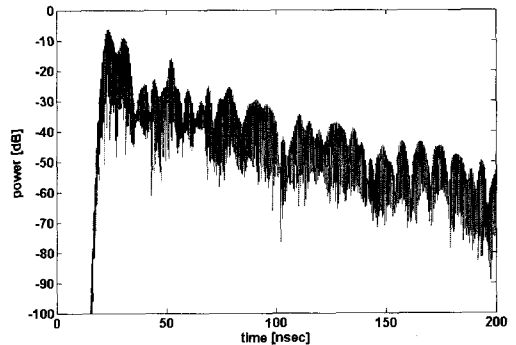


그림 6. 거실의 한 점에서 전력지연 프로파일  
Fig. 6. Power delay profile at a point of living room.

그림 7과 8은 그림 5의 거실의 균일한 75개의 포인트에 대하여 초과지연평균과 실효지연확산을 보인 것이다. 초과지연평균은 최소 15.25 [nsec]에서 최대 40.83 [nsec]로 평균 29.90 [nsec]로 계산되었고, 실효지연확산은 최소 5.01 [nsec]에서 최대 22.24 [nsec]로 평균 12.75 [nsec]로 계산 결과 나왔다.

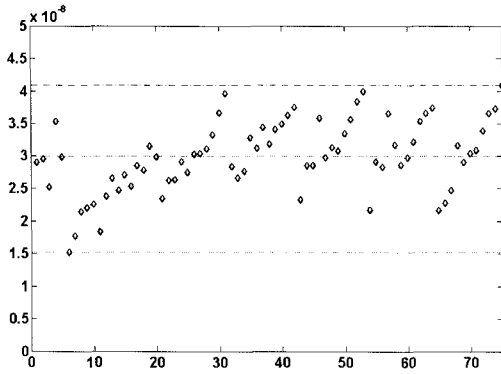


그림 7. 그림 5의 구조에서 초과지연평균  
Fig. 7. Mean excess delay in the structure of Fig. 5.

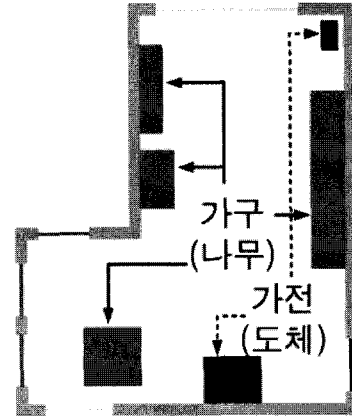


그림 9. 그림 5에서 실내 구조물을 배치한 경우  
Fig. 9. Case placed indoor structures in Fig. 5.

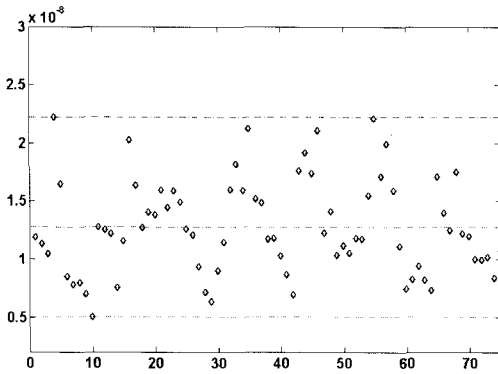


그림 8. 그림 5의 구조에서 실효지연확산  
Fig. 8. rms delay spread in the structure of Fig. 5.

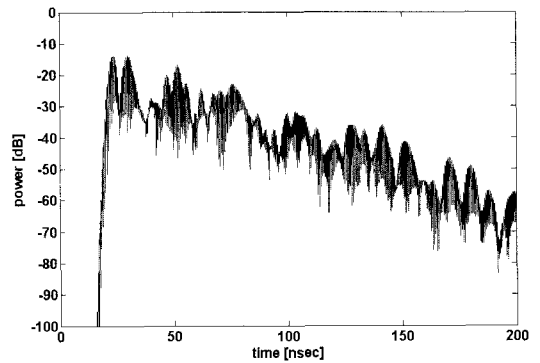


그림 10. 그림 9의 구조에서 한 점에서  
전력지연 프로파일  
Fig. 10. Power delay profile at a point in the  
structure of Fig. 9.

그림 9는 그림 5의 거실에 대하여 냉장고 등의 가전 제품과 식탁이나 다수의 가구물들을 배치한 구조도이다. 그림 10은 거실의 중앙 위치에서 계산한 전력지연 프로파일을 보인 것이다. 그림 10의 결과는 그림 6과 동일한 위치지만 다수의 가구에 의한 다중 반사가 더 많이 발생하므로 페이딩 효과가 더 큰 것을 알 수 있다.

그림 11과 12는 그림 5의 75개 포인트 중에서 가구와 겹치는 4개의 포인트를 제외한 71개의 포인트에 대하여 초과지연평균과 실효지연확산을 보인 것이다. 초과지연평균은 최소 15.22 [nsec]에서 최대 49.82 [nsec]로 평균 33.26 [nsec]로 계산되었고, 실효지연확산은 최소 5.43 [nsec]에서 최대 22.59 [nsec]로 평균 13.54 [nsec]로 계산 결과 나왔다. 거실에 가구 등을 다수 배치한 결과 가구들에 의한 다중 반사의 증가로 가구가 없을 때 보다 지연값들이 더 크게 나타난 것을 알 수 있다.

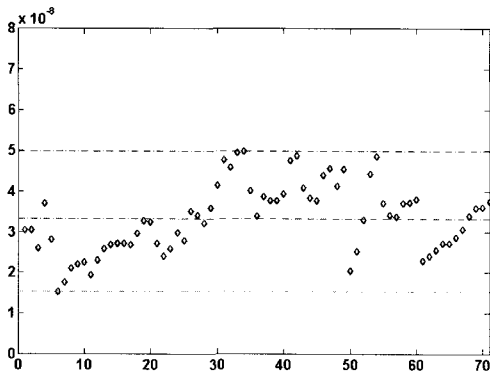


그림 11. 그림 9의 구조에서 초과지연평균  
Fig. 11. Mean excess delay in the structure of Fig.9.

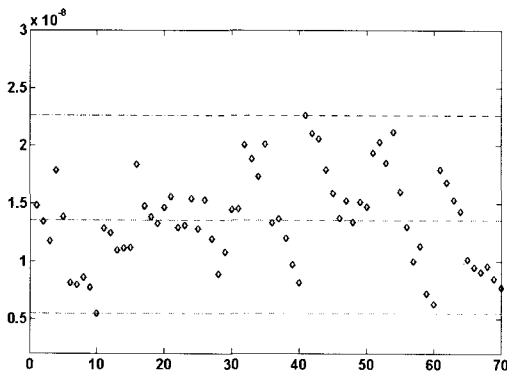


그림 12. 그림 9의 구조에서 실효지연확산  
Fig. 12. rms delay spread in the structure of Fig.9.

#### IV. 결 론

시간영역 유한차분법을 이용하여 실내 거실환경에 대하여 전파 환경을 시뮬레이션 하였다. 실내에서의 전파의 전파는 벽이나 가구 등 많은 산란체에 의하여 반사나 투과, 회절 등이 일어난다. 이러한 수신 전력은 다중 경로에 의해 실내의 지점에 따라 수신 전력의 크기가 불규칙적으로 증감이 일어나는 것으로 페이딩 현상을 확인할 수 있었다.

시뮬레이션은 디지털 TV와 LTE 등이 사용되는 800MHz 주파수 대역에서 해석을 하였다. 결과로써 초과지연 평균과 실효 지연 확산을 계산하였다.

향후 보다 높은 주파수 대역과 다양한 환경에 대하여 연구를 수행할 필요가 있다.

#### 참고문헌

- [1] Christopher L.Holloway, Michael G.Cotton and Paul McKenna, "A simplified model for calculation the decay rate of the impulse response for an indoor propagation channel", IEEE Wireless Communications Conference, pp.210-214,1997
- [2] Christopher L.Holloway, Michael G.Cotton and Paul McKenna,"A model for prediction the power delay profile characteristics inside a room.", IEEE. Trans. vehicular tech., vol.48, pp.1110-1119, July.1999.
- [3] 송재영, 이행선, "실내 전파 특성 계산을 위한 삼각형 모델 기반의 3차원 광선 추적법", 한국전자과학회, 제19권, 7호, pp.733-740, 2008.
- [4] Yasumitsu Miyazaki and Koichi Takahashi, "Electromagnetic compatibility characteristics of wireless LAN for indoor environment of buildings by FDTD method.",Asia-Pacific CEEM 2000. pp.251-256, Shanghai, China
- [5] Wen-Chin Lan, si-Tseng Chou and Hsing-Yi Chen, "Numerical studies of wave propagation through concrete walls using effective material property technique and FDTD method.", IEEE. pp.578-580,1999
- [6] Ugur Oguz, Levent Gurel and Orhan Arikan, "An efficient and accurate technique for the incident-wave excitations in the FDTD method.", IEEE Trans.MTT,vol.46,pp.869-882, June. 1998.
- [7] Allen Taflove and Susan C.Hagness, *Computational electrodynamics*. Artech House, 2000.
- [8] Constantine A. Balanis, *Advanced engineering electromagnetics*, Wie-wiley, 1989.
- [9] Theodore S.Rappaport, *Wireless communications*, Prentice-hall,1996.

## 저자소개



정선오(Sun-Oh Chung)

1993년 2월 : 전남대학교  
전자공학과(공학석사)  
1995년 ~ 현재 한국폴리텍V대학  
자동화시스템과 교수

※ 관심분야 : 안테나, 마이크로파 회로 해석 및 설계



임영석(Yeong-Seog Lim)

1980년 2월 : 서울대학교  
전자공학과(공학사)  
1982년 2월 : 서울대학교  
전자공학과(공학석사)

1989년 2월 : 전북대학교 전자공학과(공학박사)  
1984년 9월 ~ 현재 : 전남대학교 전자컴퓨터공학부  
교수

※ 관심분야 : 전자파 수치 해석, 초고주파 회로 설계 및  
해석, RF 소자 설계, 안테나