

# 초광대역신호의 벽 투과특성

최진원, 김영훈, 강준성, 성유석, 김용화<sup>o</sup>, 김성철  
서울대학교 전기컴퓨터공학부, 뉴미디어통신공동연구소  
한국전기연구원<sup>o</sup>

## Through-wall Characterization of Ultra WideBand signal

Jinwon Choi, Young-Hoon Kim, Jun-Sung Kang, Yu-Suk Sung, Yong-Hwa Kim<sup>o</sup>, Seong-Cheol Kim

Department of Electrical Engineering and Computer Science & INMC, Seoul National University

Korea Electrotechnology Research Institute<sup>o</sup>

sckim@maxwell.snu.ac.kr, caesar@maxwell.snu.ac.kr

### 요 약

초광대역통신은 실내환경 근거리에서 운용되는 다양한 시스템으로 적용 가능한 통신기법이다. 본 논문에는 초광대역통신의 효율적인 망 구성을 위해 필요한 초광대역 신호의 벽 재질에 따른 감쇄에 대한 연구결과가 나타나있다. 분석은 일반 건물에 주로 사용되는 4 가지 재질의 벽에 대하여 3GHz 대역의 600MHz 신호를 투과시켜 특성을 모델링하였다. 분석기법은 전자기학과 유한차분시간영역법을 이용하여 이론적 감쇄량을 예측한 후 회로망분석기 기반의 측정시스템을 사용하여 측정결과를 모델링하는 방식이다. 수직입사 시에 감쇄량의 분석은 선택된 주파수 영역의 평균 감쇄량과 함께 주파수에 따른 감쇄량의 표준편차 값이 주파수 선택특성분석을 위해 비교되었으며 벽을 통과한 후 수신되는 각도에 따른 감쇄량을 분석하여 수신지점에 따른 감쇄경향을 모델링하였다.

### 1. 서론

근래에 들어 초광대역 (Ultra WideBand, UWB) 통신이 근거리에서 고속의 데이터를 전송할 수 있는 차세대 통신기술로 각광받고 있다. 초광대역 통신의 500MHz 이상 대역폭을 가지는 신호는 시간영역에서 매우 짧은 폭의 펄스모양으로 전파함으로 인해 다중경로환경에 강하고 고속의 데이터를 전송할 수 있다. 또, 낮은 송신전력을 사용함으로 인해 다른 통신시스템들과 공존이 가능하며 간단한 송, 수신기 구조로 저가의 시스템구축이 가능하다는 장점들을 가지고 있다[1]. 이러한 장점들을 기반으로 실내 고속 데이터 통신은 물론 실내, 외 위치측위까지 초광대역통신을 적용하고자 하는 연구들이 활발하게 진행되고 있지만, 초광대역 통신의 넓은 주파수 대역폭을 고려한 실제 환경에서의 통신시스템 구축 방안에 대한 연구는 아직 미진한 실정이다[2-5].

본 논문에서는 초광대역통신시스템의 실내환경의 효율적인 시스템 구축을 위한 벽 투과특성모델링을 다루고 있다. 실제 건축물을 주로 구성하는 4 가지

종류의 벽을 대상으로 초광대역통신의 표준에서 제시하는 주파수 대역 신호를 통과시켜 광대역의 주파수를 고려한 투과특성모델링을 수행한다. 모델링은 이론적 모델로 전자기학 이론과 유한차분시간영역법(FDTD, Finite Difference Time Domain)을 이용하였고 실측적 모델로 회로망분석기를 이용한 측정결과를 이용하였다. 기존에 발표된 논문 [5]의 경우 여러가지 벽에 대한 초광대역 신호의 감쇄에 대한 분석은 이루어져있지만 측정을 통한 결과값과 상대적인 손실에 대한 분석만 이루어져 전반적인 망 설계에 적용하기에는 부족한 면이 있다. 먼저, 전자기학 수식에 벽의 재질을 고려한 변수 값을 입력하여 예측 감쇄량을 얻어내었다. 유한차분시간영역법 모의실험에서는 주요 변수인 단위격자 크기를 변화시키며 전자기학 수식에서 얻어지는 값과의 오차량을 비교하였다. 측정은 전력증폭기와 저잡음증폭기를 이용하여 충분한 동적 범위를 확보한 측정시스템을 이용해 600MHz 대역의 주파수 영역을 선행스위핑하는 방식으로 이루어졌으며 각각의 벽 재질에 대하여 감쇄량 변화를 모델링하였다. 수직으로 입사하는 신호의 감쇄량에 대해 논의한 후 벽 재질에 따

라 주파수별 감쇄 변화량 차이를 정리하였고 마지막으로 수신각도에 따른 감쇄량의 변화를 모델링하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2 장에서 이론적 분석으로 전자기학적 수식전개와 유한차분시간영역법결과를 비교한 후 3 장에서 측정시스템을 소개하고 4 장에서 측정결과를 정리한다. 마지막으로 5 장에서 결론을 맺기로 한다.

## 2.이론적 연구

### 2.1 전자기학적 수식전개

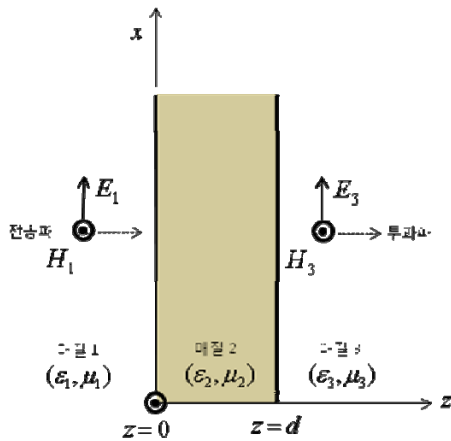


그림 1. 다른 매질이 존재하는 환경에서의 입사하는 전기장과 투과하는 전기장의 세기 세기

전자기학에서 다른 성분의 매질을 통과하는 전자파의 세기는 다음과 같이 표현된다 [6].

$$E_3 = \frac{1}{2} \left\{ (\Gamma + 1) + \frac{\eta_2}{\eta_1} (1 - \Gamma) \right\} E_1 e^{-j\beta_2 d} e^{j\beta_3 d} + \frac{1}{2} \left\{ (\Gamma + 1) - \frac{\eta_2}{\eta_1} (1 - \Gamma) \right\} E_1 e^{-j\beta_2 d} e^{j\beta_3 d} \quad (1)$$

여기서 반사계수,  $\Gamma$  는  $z=0$  에서의 매질 2 의 자체장도 세기에 대한 전계장도의 세기,  $Z_2(0)$ , 와 매질 1 의 고유임피던스,  $\eta_1$ , 로 결정되며  $\Gamma$  와  $Z_2(0)$  의 수식은 다음과 같이 표현된다.

$$\Gamma = \frac{Z_2(0) - \eta_1}{Z_2(0) + \eta_1} \quad (2)$$

$$\eta_i = \sqrt{\frac{\mu_i}{\epsilon_i}} \quad (3)$$

$$Z_2(0) = \eta_2 \frac{\eta_3 \cos \beta_2 d + j\eta_2 \sin \beta_2 d}{\eta_2 \cos \beta_2 d + j\eta_3 \sin \beta_2 d} \quad (4)$$

여기서  $E_1$  는 입력 전계장도,  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  은 각 매질의 고유임피던스,  $\beta_2, \beta_3$  은 각각 매질 2,3 의 위상상수,  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  는 각각 매질 1,2,3 의 유전율,  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  는 각각 매질 1, 2, 3 에서의 투자율 그리고  $d$  는 매질 2 의 두께를 나타낸다. 본 논문에서 매질 1, 3 은 자유공간의 특성을 따르며 매질 2 는 각각의 벽 재질에 따른 변수 값을 갖는다고 가정한다.

### 2.2 유한차분시간영역법 (FDTD)

유한차분시간영역법은 미분방정식 형태의 맥스웰 방정식을 차분 방정식으로 치환하여 수치 해석적으로 원하는 필드의 세기를 계산하는 방법이다[7,8]. 전파 과정의 기본이 되는 맥스웰 방정식을 그대로 이용한 방법이기 때문에 주위 환경 구조의 복잡성이 문제되지 않으며, 전파의 주파수, 물질의 유전율 또는 도전율과 같은 속성을 원하는 대로 조절하는 것이 가능하다. 본 모의실험에서는 특정 유전율, 도전율을 갖는 물질의 임의 두께의 벽이 수직 입사되는 평면파를 가로막고 있는 상황을 설정하고 FDTD 방법을 이용하여 벽을 투과하는 전파의 세기를 계산하고 이를 기반으로 하여 경로 손실을 도출해 내었다. 시뮬레이션을 위해 3.4GHz 의 평면파를 이용하였으며, 한 파장 거리,  $\lambda$  의 1/20 부터 1/80 까지를 단위격자 크기로 변화시켰다.

### 2.3 이론적 연구 비교

입사파의 전기장 세기를 1 로 주었을 때, 투과파의 전기장 세기의 크기로부터 계산한 감쇄량을 표 3 에 비교하였다. 표 2 에는 모의실험에 설정된 각 벽 매질별 변수값들을 나타냈다. 일반적인 유한차분시간영역법에서의 단위격자의 크기는  $\lambda$  의 1/20 로 설정하는 것으로 알려졌으나 그러할 경우 전자기학 결과값에 대한 상대적 오차가 평균 38% 정도로 나타났다 [7].

표 2. 전자기학 수식 전개와 모의실험에 사용된 변수 값

	두께 [cm]	유전 상수	도전율	비유전율
콘크리트	24	6.25	0.0699	6.25-j0.37
벽돌	10	4.4	0	4.4
나무	2.54	2	0	2
유리	0.1	5.1	0.0045	5.1-j0.024

표 3. 전자기학과 유한차분시간영역법의 감쇄량 비교 (단위: dB)

	전자기학 결과	유한차분시간영역법		
		$\lambda/20$	$\lambda/50$	$\lambda/80$
콘크리트	12.84	13.71	12.96	12.88
벽돌	1.20	1.69	1.49	1.41
나무	0.16	0.28	0.19	0.16
유리	2.63	3.45	2.63	2.65
전자기학결과 대비 평균 오차비율 (단위:%)		38.0	10.9	5.1

감쇄량 오차를 그보다 단위격자를 작게 설정하여  $\lambda/50$  으로 정할 경우 오차는 약 11%,  $\lambda/80$  으로 설정할 경우는 5%로 줄어들어 드는 것으로 나타나, 실제 이론적 수치와 5% 이하의 오차를 가지는 모의 실험을 실시할 경우 단위격자의 크기는  $\lambda/80$  이하로 설정해야 함을 알 수 있었다. 하지만 이럴 경우 단위격자 크기의 감쇄로 인해 모의실험상에서 계산량과 계산시간이 증가하는 단점 역시 고려되어야 한다.

### 3. 측정시스템

초광대역 신호의 벽 투과특성을 연구하기 위하여 그림 2 와 같은 구조를 가진 측정시스템을 구성하였다. 측정시스템은 회로망 분석기 (Vector Network Analyzer, Agilent 8719ES) 와 충분한 송신전력을 확보하기 위한 전력증폭기 (Power Amplifier, PA), 안정적인 측정범위를 확보하기 위한 저잡음증폭기 (Low Noise Amplifier, LNA) 그리고 방향성 안테나들로 이루어져있다. 측정 주파수 대역은 3.1GHz~ 3.7GHz 대역으로 이는 초광대역 통신을 위해 제시된 표준에서 제일 낮은 주파수 대역을 포함하고 있다. 회로망 분석기는 600MHz 대역폭을 한번의 스위칭 당 1MHz 단위로 주파수응답을 얻어내며 한 스위칭에 걸리는 시간은 총 300ms 이다. 측정시스템의 동적범위는 80dB 이고 하나의 벽 재질에 대하여 총 200 개의 주파수 응답을 얻어낸다. 측정을 통해 얻어진 데이터는 GPIB 케이블을 통해 연결된 노트북에 저장되며 무반향실에서 얻어진 측정결과로 보정되는 후처리 과정을 거친다. 측정시스템에 사용된 안테나는 3~3.8GHz 대역에서 선형적으로 동작하는 방향성 안테나로 1.5m 높이의 삼각대 위에 위치하였다. 그림 3 에 콘크리트벽을 투과한 신호의 대표적인 채널 응답이 나타나있다.

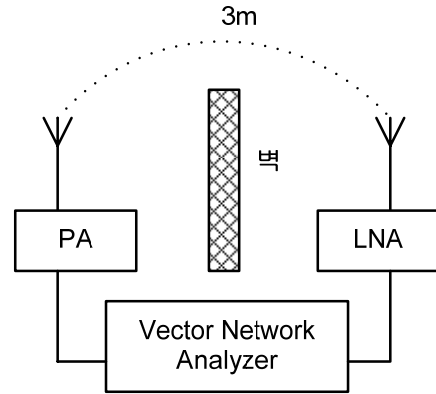


그림 2. 측정시스템 구성도

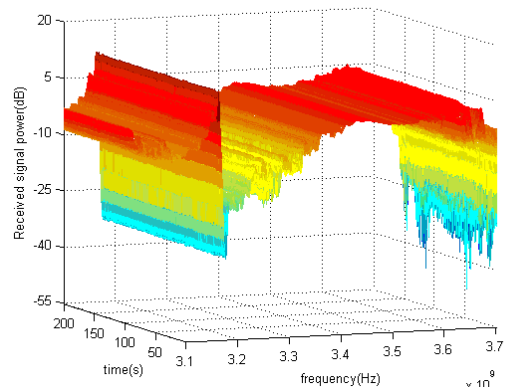


그림 3. 대표적인 초광대역 채널의 주파수 응답

### 4. 측정결과

#### 4.1 수직입사 감쇄

각각의 벽 재질에 대하여 수직으로 입사시킨 초광대역 신호가 벽을 투과한 후 감쇄되는 평균감쇄량이 표 3 에 나타나있다. 표 4 의 측정값은 200 번 측정된 주파수 응답의 값을 전체 주파수 대역에 대해서 평균을 취한 결과이다.

실내 유리창의 경우 예측된 감쇄량이 2.6dB 인데 반하여 실제 측정값은 4.9dB 로 실측 차이는 약 2.3dB 였으며 콘크리트 벽의 경우에는 예측된 12.84dB 보다 작은 4.01dB 와 10.62dB 였다. 유리창의 경우 실제로 설치되어 있는 실내용 유리창이 뿌옇게 처리되어 있어서 모의실험에서 가정한 균일한 유리보다 더 큰 감쇄량이 측정되었으며 콘크리트벽의 경우에는 모의실험의 균일한 콘크리트벽과 달리 실제 건축환경에서 사용되는 콘크리트가 벽돌모양으로 이루어져있기 때문에 벽돌 사이의 비어있는 공간으로 인하여 감쇄정도가 작게 나왔다. 아울러, 벽 한쪽면에 금속으로 이루어진 소화전 철문이 부착된 경우에는 실제 콘크리트벽보다 6dB 정도의 더 감쇄됨을 알 수 있었다.

표 4. 벽 재질에 따른 평균감쇄량

종류	특징	측정값 [dB]
유리창	사무실과 복도 사이 유리창	4.87
콘크리트 벽 1	24cm 두께의 실내 콘크리트벽	4.01
콘크리트 벽 2	콘크리트벽 1의 한면에 소화전 철문부착	10.62
나무재질 파티션 1	세미나실을 가로지르는 나무재질 파티션	0.26
나무재질 파티션 2	나무재질 파티션 1 속의 금속 기둥	7.84

2 개의 나무판으로 이루어진 파티션의 경우 나무로 이루어진 부분을 통과할 때 발생하는 감쇄량은 0.26dB 로 나무판 2 개를 통과할 때 발생하는 감쇄량 0.32dB 와 거의 차이가 없는 것을 알 수 있었다. 그러나 2 개의 나무판을 연결하고 있는 금속 지지대를 통과시킬 경우 발생하는 감쇄량은 이보다 큰 7.8dB 로 나타났다.

#### 4.2 주파수에 따른 감쇄량의 변화

초광대역 통신을 이용한 망 설계단계에서 기존의 통신기법과 다르게 고려해야 할 사항은 광대역의 신호를 주고 받는데 있어서의 주파수 선택특성을 고려하는 것이다. 본 논문에서는 주파수에 따른 감쇄량의 분산정도를 나타내는 변수로 주파수별 채널 응답의 표준편차 값을 사용하였다. 표 5 에 각 벽 재질별 표준편차 값이 나타나있으며 이 값은 1MHz 간격으로 측정된 3.1~3.7GHz 의 600 개의 주파수 응답의 표준편차를 의미한다. 나무로만 이루어진 나무재질 파티션 1 의 경우가 주파수에 따른 채널응답의 차이가 가장 작은 것으로 나타났으며 이 값은 유리창을 투과하는 경우와 큰 차이가 없는 것으로 약 5dB 정도의 값을 가졌다. 반면, 소화전 철문이 있는 콘크리트 벽 2 와 나무 사이에 철기둥이 존재하는 나무재질 파티션 2 는 7dB 이상의 표준편차를 가지고 있어서 단일매질이 아닌 금속이라는 다른 매질이 존재하는 환경에서 의한 주파수 선택 감쇄 현상이 더 심화된 것으로 생각된다.

표 5. 주파수별 채널 응답의 표준편차

종류	표준편차 [dB]
유리창	5.67
콘크리트 벽 1	6.02
콘크리트 벽 2	7.83
나무재질 파티션 1	5.21
나무재질 파티션 2	7.15

#### 4.3 수신각도에 따른 감쇄량 변화

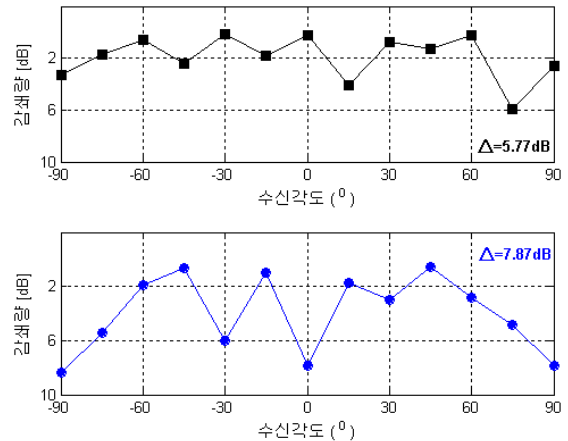


그림 4. 수신각도에 따른 감쇄량의 변화 (위 : 나무파티션 1, 아래 : 나무파티션 2)

실제 건축환경에서 쉽게 접할 수 있는 금속 구조물의 경우에는 4.1 에서 보듯이 감쇄량을 증가시키고 4.2 에 나타났듯이 주파수별 감쇄 차이 역시 크게 만드는 것으로 나타났다. 이뿐만 아니라 금속 구조물에 정면으로 입사하는 전자파의 경우에는 구조물에 의해 좌우로 반사, 회절 그리고 산란되기가 쉬울 것으로 예상된다. 그에 따라 금속 구조물에 입사하는 초광대역 신호의 수신각도에 따른 감쇄정도를 그림 4 에 정리하였다. 그림 4 에서 위의 그림은 나무재질 파티션 1 에 대한 수신각도별 감쇄량이고 아래 그림은 나무재질 파티션 2 에 대한 결과이다. y 축의 감쇄량은 절대적인 감쇄의 정도를 dB 단위로 나타낸 것을 의미한다. 나무로만 이루어진 부분을 투과한 신호는 수신각도에 대한 감쇄량의 변화가 심하지 않았다. 한 각도에서의 감쇄량만 6dB 정도로 상대적으로 컸을 뿐 다른 각도에서는 2dB 내외로 비교적 고른 것으로 나타났다. 반면 아래 그림의 나무재질 파티션 2 의 경우에는 금속지지대를 투과할 경우 감쇄량이 약 7dB 정도였으며 좌우로 30 도 부근에서도 감쇄량이 큰 것으로 나타났다. 감쇄량의 최대값과 최소량의 차이 역시 나무부분을 투과할 때는 5.77dB 였으나 금속 지지대를 통과할 때는 7.87dB 로 약 2dB 이상의 차이가 나는 것을 알 수 있었다.

#### 5. 결론

본 논문은 효율적인 초광대역 통신 기반의 망 구성을 위한 초광대역 신호의 벽 투과특성을 다루고 있다. 전자기학 수식전개와 유한차분시간영역법을 이용하여 이론적인 감쇄량을 예상한 후 주파수 영역의 측정시스템을 통해 결과값을 바탕으로 벽 재질에 따른 감쇄모델을 제시하였다. 우선 이론적 예측에서는 초광대역 통신의 특성을 효과적으로 예측하

는 유한차분시간영역법 구성을 위해서는 단위격자의 크기가 주파수의 50 분의 1 이하가 되어야 함을 알 수 있었다. 측정결과에서는 벽이 단일매질이 아니라 금속구조물을 가지고 있을 때 추가적인 감쇄가 발생하며 주파수별 채널응답값의 차이도 커짐을 알 수 있었다. 뿐만 아니라 금속구조물이 존재하는 경우 신호의 산란되는 정도 역시 변화가 심한 것으로 나타났다. 이와 같은 내용에 추가적으로 더 많은 벽 재질에 대한 실험과 모델링이 더해져서 효율적인 초광대역 통신시스템 구성방안이 마련될 수 있을 것이다.

---

본 논문은 Brain Korea 21 project 와 서울시 산학연 협력사업 (10544)의 도움으로 작성되었습니다.

---

## 6.참고 문헌

- [1] I.Oppermann, M. Hamalainen and J. Linatti, *UWB theory and applications*, Plenum Press, 1981.
- [2] M. Z. Win and R. A. Scholtz, "Impulse radio: how it works," *IEEE Communications Letters*, vol.2, no. 2, pp. 36-38,1998.
- [3] J. H. Reed, *An introduction to Ultra WideBand communication systems*, Prentice Hall, 2005.
- [4] Jinwon Choi, Noh-Gyoung Kang, Yu-Suk Sung, and Seong-Cheol Kim, "Empirical ultra wideband pathloss model in office environments," *in proc. of IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 1956-1960, May. 2006.
- [5] A. Muqaibel, A. Safaai-Jazi, A. Bayram, A. M. Attiya, and S. M. Riad, "Ultrawideband through-the-wall propagation," *in proc. of IEE Microwavers, Antennas and Propagation*, pp.581-588, Dec. 2005.
- [6] David K. Cheng, *Field and wave electromagnetics 2<sup>nd</sup> ed.*, Addison-Wesley, 1989.
- [7] Allen Taflove and Susan C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method 2<sup>nd</sup> ed.*, Artech House, 2000.
- [8] Jinwon Choi, Noh-Gyoung Kang, Jong-Min Ra, Jun-Sung Kang, and Seong-Cheol Kim, "Effect of metal door on indoor radio channel," *in proc. of IEEE PIMRC 2007*, pp.1-5, Sept. 2007.