

건물내 2 GHz 전파전파의 지연확산과 경로손실 특성의 실험적 분석

정희원 권오극*, 하원**, 박진우**

Experimental Analyses of Delay Spread and Path Loss of 2 GHz Wave Propagation in a Building

Oh Geug Kwon*, Won Ha**, Jinwoo Park** *Regular Members*

요약

이 논문에서는 전파채널 측정 시스템을 이용하여 건물내 무선 채널의 전파특성인 실효 시간지연 확산과 경로손실을 측정하고 분석한 결과를 제시한다. 구성된 측정 시스템은 미끄럼 상관기를 이용한 대역 확산 채널 측정 시스템으로서 2 GHz에서 동작하며 3 m의 거리 분해능을 갖는다. 건물내 무선 채널특성의 측정환경은 송신안테나와 수신안테나가 같은 층에 있을 때, 서로 다른 층에 있을 때, 그리고 사무실 안에 같이 위치할 때의 환경으로 구분하여 실험한다.

ABSTRACT

In this paper the measurements and analyses of the propagation characteristics of the radio channels in a building is presented in terms of the RMS time delay spread and propagation loss. The measurement system used is a sliding-correlation based spread spectrum measurement system, operating at 2 GHz to achieve 3 m resolution in propagation distance. The environments for the measurements of the radio channel characteristics inside a building are classified into three cases depending on the respective positions of the transmitting and receiving antennas; the case that both antennas are on the same floor, the case that they are located on different floors, and the case that both are inside an office.

I. 서론

최근 셀룰라, PCS와 같은 이동 무선통신 서비스가 보편화되고 있으며, 그밖에 무선 LAN, WLL 등의 무선데이터 통신 서비스가 급증하고 있다. 그러나, 이러한 무선통신 시스템은 무선 채널을 통해 신호가 전달되기 때문에 신호의 감쇠, 다중 경로 감쇄 등에 의하여 서비스 지역 그리고 신호 전송율에 큰 제한점을 갖는다^{[1][2]}. 따라서, 높은 신뢰성과 효율성을 제공할 수 있는 무선 통신 시스템을 구현하기 위해서 주어진 특정 전파환경 조건에 적합한 송수신 시스템, 그리고 제공하는 서비스 형식을 신중히

결정해야 한다. 이러한 결정에는 우선적으로 신호를 전달하는 물리적인 채널, 곧 무선채널의 특성에 대한 정확한 정보를 바탕으로 이루어져야 한다.

무선채널의 특성을 나타내는 중요 매개변수로는 전파 경로손실과 시간지연이 있다. 전파 경로손실은 무선 통신시스템의 서비스를 제공할 수 있는 영역의 한계를 설정하는데 필요한 전파 특성이다. 전파 시간지연은 송신기로부터 방사된 전파가 수신기에 도달할 때까지의 시간지연을 의미하며, 이때 무선전파의 다중경로 전파에 의한 지연시간이 분산되어 나타나는데 시간지연 분산량은 무선채널에 따라 다르고 이러한 시간지연 분산은 심볼간 간섭에 직접

* (주)LG정보통신(ogkwon@lgic.co.kr)

** 고려대학교 전자공학과

논문번호 : 98068-0218, 접수일자 : 1998년 2월 18일

연관되어 해당 무선채널의 신호 전송속도를 결정한다. 그러므로 시간지연 특성은 점차 고속 데이터의 전송을 목적으로 하는 무선 전송시스템에 매우 중요한 채널 성능 매개변수이다^[3].

이 논문은 건물내의 전파환경에서 무선채널 특성 측정 실험을 통해 이동 통신 시스템 설계에 유용한 정보, 특히 전파 시간지연과 경로손실에 대한 측정값과 분석에 바탕을 둔 실제적인 정보를 제공하고자 하는데 그 목적이 있다. 최근 실외 뿐 아니라 주거지나 사무실 등과 같은 실내에서의 이동 통신에 대한 수요가 늘어나고 있는데, 이러한 환경에 쓰일 수 있도록 이 논문에서는 건물 내에서의 다중 경로 전파 특성을 측정하고 분석된 결과를 제시하였다. 채널 측정실험은 주로 콘크리트 바닥면과 벽면으로 구성된 건물에서 수행하였는데, 선택한 실험환경은 송수신 안테나가 같은 층에 위치한 환경과 서로 다른 층에 위치한 환경, 건물 밖에 송신 안테나가 위치하고 건물 안에 수신 안테나가 위치한 환경, 사무실 내에 송수신 안테나가 모두 위치한 환경으로 구분한다. 이용한 전파특성 측정시스템은 미끄럼 상관(Sliding correlation)기법을 이용한 대역 확산 측정 시스템으로서 2 GHz의 반송주파수로 길이가 2¹⁵-1인 100 MHz 유사잡음 부호화열을 혼합전송하므로써 약 3m의 거리 분해능을 갖는다^[3].

II. 무선채널 성능 매개변수

1. 다중경로 채널모형

일반적으로 다중 경로 채널을 표현하기 위한 충격 응답 모형에서는 채널을 시변 여파기로 가정한다^{[4][5]}. 다중 경로 채널을 통과하여 수신되는 신호는 감쇠, 시간 지연, 위상 전이를 겪은 송신 신호들의 합으로 가정하여, 다중 경로 채널을 시변 여파기로 표시하는 경우 바탕대역 충격 응답은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$h_b(t, \tau) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i(t, \tau) \delta(\tau - \tau_i(t)) \exp[j\theta_i(t)] \quad (1)$$

위 식에서 $\delta(\cdot)$ 는 단위 충격 함수를 나타내고 있다. $a_i(t, \tau)$ 와 $\tau_i(t)$ 는 각각 시간 t 에서 i 번째 신호의 크기와 시간 지연을 나타내며 $\theta_i(t)$ 는 i 번째 다중 경로 신호가 채널을 통과하면서 겪게 되는 위상 전이를 나타낸다. 또한, N 은 다중 경로의 수를 나타낸다. 이 때, 채널 충격 응답의 순간 파형이 측정 구간에 걸쳐 시간 불변이거나 아주 변화가 작다

면 식 (1)을 아래의 식과 같이 간략화 할 수 있다.

$$h_b(\tau) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i \delta(\tau - \tau_i) \exp[-j\theta_i] \quad (2)$$

다중 경로 채널의 시간 분산적인 특성은 평균 과도 지연과 실효 (root mean square; RMS) 지연 확산에 의해 수량화된다. 평균 과도 지연 $\bar{\tau}$ 는 전력 지연 프로파일의 일차 적률로 정의되며 다음 식과 같이 표현된다.

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_i a_i^2 \tau_i}{\sum_i a_i^2} = \frac{\sum_i P(\tau_i) \tau_i}{\sum_i P(\tau_i)} \quad (3)$$

여기서 τ_i 는 다중 경로 성분의 i 번째 시간 지연, $P(\tau_i)$ 는 다중 경로 성분에서 i 번째 신호의 전력을 나타낸다.

실효 지연 확산 σ_τ 는 전력 지연 프로파일의 이차 적률로 정의되며 다음 식과 같이 표현된다.

$$\sigma_\tau = \sqrt{\bar{\tau}^2 - (\bar{\tau})^2} \quad (4)$$

$$\bar{\tau}^2 = \frac{\sum_i a_i^2 \tau_i^2}{\sum_i a_i^2} = \frac{\sum_i P(\tau_i) \tau_i^2}{\sum_i P(\tau_i)} \quad (5)$$

실내 무선 채널에서의 평균 과도 지연과 실효 지연 확산 값은 건물의 크기나 형태, N-LOS (Non Line-of-Sight)와 LOS (Line of Sight)의 존재에 따라 다른 값을 갖는다.

2. 경로 손실

실내 채널에서 일반적으로 사용하는 경로 손실 모형은 대수정규 분포로 표현되는 평균 전력 법칙 모형이다^[6]. 이 모형은 실험적 결과에 기반을 둔 모형으로서 평균 수신 신호 전력이 송수신 안테나 사이의 거리 증가에 따라 지수적으로 감소하는 것을 표현하며 아래 식 (6)과 같다. 실내 무선 채널 측정을 수행함으로써 실내에서의 경로 손실 값을 계산하고 선형 근사화로부터 n 값을 계산할 수 있다.

$$P_r(d) = P_r(d_0) - 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (6)$$

여기서 $P_r(d)$ 는 거리 d 에서의 수신 전력, $P_r(d_0)$ 는 기준 거리 d_0 에서의 수신 전력, X_σ 는 σ dB의 표준 편차를 갖는 0 dB 평균의 대수정규 확률 변수를 나타낸다.

또한 건물내에서의 전파 경로손실을 좀더 정확히 표현하기 위하여 건물의 재질이나 구조에 따른 영향을 나타내는 감쇠 요소를 생각한 실내 채널의 경로 손실 모형은 다음과 같다¹⁷⁾.

$$PL(d)[dB] = PL(d_0)[dB] + 10n_{SF} \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + FAF[dB] \quad (7)$$

위의 식에서 n_{SF} 는 송수신 안테나가 같은 층에 위치한 경우의 경로 손실 지수를 나타내는 경로 손실지수 값이며, FAF는 층 사이 감쇠인자로서 층 사이의 감쇠 정도를 보상하기 위한 항이다.

III. 채널 측정 및 결과 분석

실내 무선 채널 측정을 위한 측정시스템은 주변 혼입잡음의 배제 특성이 우수하며 시간 분해능이 높은 미끄럼 상관 기법을 적용한 대역확산 무선채널 측정 시스템을 구현하여 사용하였다¹⁸⁾. 반송주파수는 2 GHz이며 길이가 2^{15} -1인 100 MHz 의사 부호 부호열을 만들어 직접수열 방식으로 전송하였고, 송신부와 수신부의 의사 부호열 속도 차이를 0.01 MHz로 하여 약 3 m의 거리분해능을 갖는다. 송수신 안테나는 전방향성 안테나와 지향성 안테나를 상황에 따라 바꾸어가며 사용하였다. 지향성 안테나의 이득은 12 dB이고 반치폭이 120° 인 collinear 안테나를 사용하였다. 전력 지연 프로파일은 송수신 안테나가 모두 고정된 상태에서 측정하며, 특정 지점의 평균 전력 지연 프로파일은 지름 1 m의 원 안에서 수신 안테나 위치를 바꾸어가면서 측정한 30개의 전력 지연 프로파일들을 평균하여 얻었다.

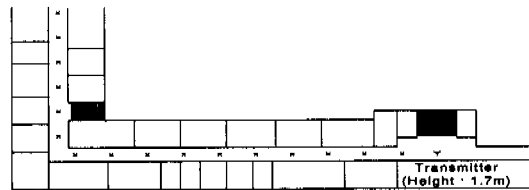
1. 실험 환경

실내 무선 채널 측정 실험이 수행된 장소는 고려대학교 제2공학관과 산학관 건물이다. 제2공학관 건물은 5층 건물로서 전체적인 건물 재질은 콘크리트이고, 건물의 앞면은 유리로 되어 있다. 또한 건물 각 층 천정의 재질은 석고 판넬이다. 중앙 복도를 기준으로 좌우에 서로 다른 크기의 방들이 배치되어 있으며 각 층의 중앙에는 아래층과 위층으로 통하는 계단이 있다. 각 층의 복도는 중앙 복도와 건물 양쪽으로 꺾인 복도가 있다. 제2공학관 건물 내에서의 채널 측정 실험 환경은 송수신 안테나를 같은 층에 둔 실험 환경, 송수신 안테나를 각기 다른 층에 둔 층 사이 실험 환경으로 구분하여 설정하였

다. 또한, 산학관 건물은 바닥이 콘크리트이며 벽면이 석고 보드 재질이다. 산학관 건물 내에서의 채널 측정 실험은 사무실 내에 송수신 안테나를 위치시킨 사무실 안 실험 환경으로 설정하여 수행하였다.

1) 같은 층에서의 전파 실험

먼저 같은 층 실험 환경에서는 그림 1에서의 같이 송신 안테나를 3층 중앙 복도 가운데에 두고 수신 안테나는 중앙 복도를 따라 5 m 간격으로 10개의 지점을 선정해 LOS 환경으로 정했으며 꺾인 복도를 따라 마찬가지로 5 m 간격으로 5개의 지점을 선정해 LOS가 존재하지 않는 NLOS 환경으로 정하였다.



x: 수신 안테나의 위치

그림 1. 같은 층 실험에서 송수신 안테나의 위치

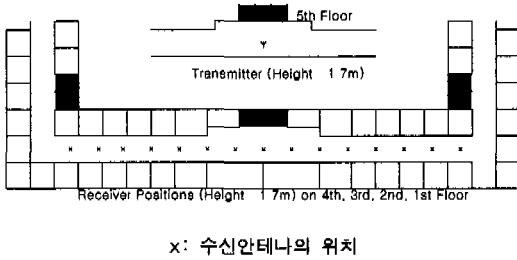
그리고, 똑같은 송수신 안테나 위치를 유지하면서 송신 안테나를 지향성 안테나와 전방향성 안테나를 한번씩 사용하여 각 지점에서 측정된 전력 지연 프로파일들로부터 송신 안테나의 종류에 따른 전파 특성의 변화를 관찰하였다. 지향성 안테나와 전방향성 안테나는 모두 수직 편파 특성을 가진다. 송수신 안테나를 모두 같은 층에 둔 경우 송신 안테나는 3층 중앙 복도 가운데에 두었으며 지향성 안테나가 송신 안테나로 사용되었을 때, 안테나의 방향은 왼쪽 복도 중앙을 향하게 해서 실험을 수행하였다.

2) 층 사이의 전파 실험

그림 2는 층 사이 실험 환경을 보이고 있다. 층 사이 실험 환경에서 송신 안테나는 5층 중앙 복도 가운데에 고정하고, 수신 안테나를 각각 4층, 3층, 2층, 1층의 중앙 복도를 따라 5 m 간격으로 15개 지점에 두고 층간 전파 환경에서의 전파 특성을 분석하였다. 이 때, 송수신 안테나는 모두 전방향성 안테나를 사용하였다.

3) 실내 전파실험

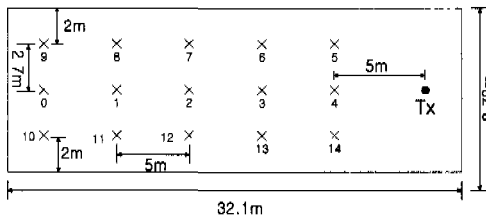
실내 전파실험 환경은 실내에 설치된 구조물에



x: 수신안테나의 위치

그림 2. 층 사이 실험에서 송수신 안테나 위치

의한 산란성 전파 현상을 최소화하면서 실내 공간을 구성하는 단순 벽면 공간 구조에서의 전파 효과를 측정하기 위하여 빈 사무실 공간에서 수행하였다.



x: 수신 안테나의 위치

그림 3. 사무실 안 실험에서 송수신 안테나 위치

실내 전파 특성 측정 실험은 그림 3에서와 같이 32.1 m × 8.78 m인 큰 사무실 공간을 택하여, 사무실 한 쪽에 송신 안테나를 고정시키고 사무실 내의 각 지점에서 전력 지연 프로파일 데이터를 측정하였다.

2. 측정 결과의 분석

같은 층에 송수신 안테나를 둔 경우, LOS 환경과 NLOS 환경에서 실효지연 확산의 누적 확률 분포들을 그림 4에 보이고 있다. 누적 분포 함수는 10 개의 LOS 지점과 10 개의 NLOS 지점에서 측정된 전력 지연 프로파일들로부터 계산된 실효 지연 확산 값으로부터 얻을 수 있다. 그림 4에서의 곡선은 실효 지연 확산 값들로부터 계산된 회귀 (regression) 근사화한 결과이다.

꺾인 복도에 수신 안테나를 둔 경우, 중앙 복도 가운데에 위치한 송신 안테나와 마주 보는 직접 경로는 존재하지 않게 된다.

따라서 이 경우 수신되는 전파들은 주로 건물 바닥과 벽, 천정 등에서 일어나는 반사나 투과, 꺾어진 복도에서의 회절, 또는 건물 안의 곳곳에 있는 매우 작은 크기의 산란체에 의한 산란과 같은 전파

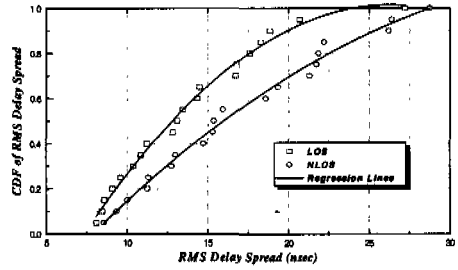


그림 4. 같은 층 실험에서 LOS 및 NLOS 환경에서의 RMS 지연 확산의 누적 분포 함수

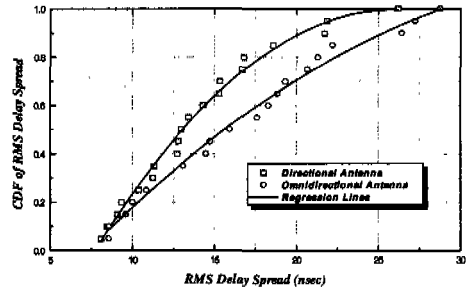


그림 5. 같은 층 실험에서 송신 안테나 종류에 따른 RMS 지연 확산의 누적 확률 분포

과정을 겪고 수신되는 신호들로 구성되게 된다. 따라서, NLOS 지점에서 수신되는 신호들은 LOS가 존재하는 경우에 비하여 상대적으로 작은 수신 전력과 많은 지연을 가지게 되는데 이는 실효 지연 확산 값을 크게 하는 직접적인 원인이 된다. 이 논문의 건물내 채널 측정 실험을 통해 같은 층에 송수신 안테나를 둔 경우 NLOS 환경이 LOS 환경에 비해 평균 3 nsec 정도 실효 지연 확산 값이 큰 것으로 관측되었다.

그림 5는 같은 층에서 송신 안테나의 종류에 따른 실효 지연 확산의 누적 분포 함수를 보이고 있으며 이를 통해 송신 안테나에 따른 실효 지연 확산의 변화를 관측할 수 있다. 그림 5에서 송신 안테나로 전방향 안테나를 사용하면 지향성 안테나를 사용할 때보다 실효 지연 확산 값이 평균 3 nsec 정도 큰 것으로 관측되었다. 전방향 안테나를 사용하면 수신단에 도달하는 다중 경로 성분의 수가 지향성 안테나를 사용하는 때보다 더욱 많아지게 되는데, 이것은 지향성 안테나를 송신 안테나로 쓰면 때에는 송신 안테나로부터의 전파 경로가 안테나의 한정된 빔 폭으로 말미암아 제한되기 때문이다. 따라서, 전방향 안테나를 송신 안테나로 쓰면 지향성 안테나를 쓸 때 보다 실효 지연 확산이 늘어난다.

송수신 안테나를 같은 층에 둔 경우의 경로 손실 특성은 중앙 복도와 꺾어진 복도 각 지점에서 수신 전력을 측정하여 얻었다. 이 때, 각 측정 지점에서의 경로 손실은 기준 거리 1 m에서 측정된 수신 전력에 대한 수신 전력의 감소 정도로 계산되었다.

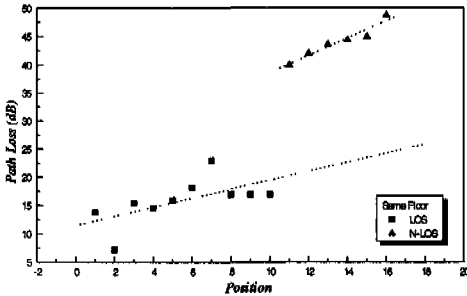


그림 6. 같은 층 실험에서 수신 안테나의 위치에 따른 경로 손실 특성

그림 6은 송수신 안테나를 4층 중앙 복도에 두고 중앙 복도를 따라 5 m 간격으로 10 개의 LOS 환경을 나타내는 지점으로 선정하고, 꺾인 복도를 따라가면서 마찬가지로 5 m 간격으로 6 개의 NLOS 환경으로 선정된 각 지점에서의 경로 손실 특성을 나타내고 있다. 그림에 표현된 점선은 측정된 지점에서의 경로 손실 값들의 선형 근사화를 나타내고 있다. NLOS 환경에서는 송수신 안테나로부터 직접 전달되는 전파 경로는 없으며, 따라서 LOS 환경에 비해 급격한 수신 전력의 감소를 보인다.

그림 6에서 보듯이 NLOS 환경에서의 경로 손실 값은 LOS 환경에서의 값보다 약 20 dB 이상 큰 값을 가지며, 송수신 안테나 사이 상대적 거리의 커짐에 따라 경로 손실이 증가하는 정도도 LOS 환경에서 보다 훨씬 크다. 측정된 값을 바탕으로 한 경로 손실 모형은 선형 근사화를 통해 다음의 식들로 표현된다.

$$\text{LOS 환경: } PL(\text{dB}) = 7.8 \log(d) + 5.25 \quad (8)$$

$$\text{NLOS 환경: } PL(\text{dB}) = 11.42 \log(d) - 153.48 \quad (9)$$

식 (8)과 (9)에서 보듯이 송수신 안테나를 같은 층에 둔 경우 LOS 환경에서의 경로 손실 모형과 NLOS 환경에서의 경로 손실 모형에서 각각의 경로 손실 지수는 0.78과 11.4로 얻어졌다. 이것은 NLOS 환경에서는 송수신단 사이 거리의 증가에 따라 경로 손실 값이 큰 폭으로 증가한다는 것을 의미한다.

또한, LOS 환경에서의 경로 손실 지수 0.78은 전파가 자유 공간을 전파할 때의 경로 손실 지수 2 보다 작는데, 이것은 같은 층에서 LOS 환경에서의 전파들이 중앙 복도를 따라 전파되면서 복도 벽면, 층 바닥과 천정에서의 다중 반사를 거쳐 수신됨으로써 경로 손실 지수가 2보다 오히려 작은 것으로 나타난 것이다. 곧, 중앙 복도가 전파전파의 도파관 역할을 하는 도파 효과 때문에 거리에 따른 경로 손실의 증가 정도가 자유 공간에서 보다 작기 때문이며, 이 결과는 기존의 실험결과와 일치한다^[8].

표 1은 층 사이 실험 환경에서 각 층의 각 지점에서 측정된 전력 지연 프로파일로부터 계산한 실험 지연 확산 값들과 그 값들의 평균을 보이고 있다. 서로 다른 층에서 같은 위치를 갖는 측정 지점에 대한 실험 지연 확산 값들의 상관은 관측되지 않았다.

다중 경로 무선 채널의 충격 응답은 수신단을 둘러싼 반사체와 산란체들에 크게 의존하기 때문에 비록 각 층의 복도 구조는 동일하지만 각 측정 지점의 주변 환경은 동일하지 않기 때문에 각 층의 특정 측정 지점에서 계산된 실험 지연 확산 값들의 상관은 관측되지 않는다.

그러나, 각 층의 특정 지점에서 계산된 실험 지연 확산의 평균값으로부터 송수신단 사이에 존재하는 층 수가 증가하면 평균 실험 지연 확산 값이 점차 증가하게 된다는 사실을 알 수 있다. 곧, 4 층에서 계산된 실험 지연 확산의 평균값은 11.28 nsec이며 3 층과 2 층에서는 13.91 nsec, 16.05 nsec로 각각 계산되었다. 그러므로 송수신단 사이에 존재하는 층 수가 하나의 층에서 두 층, 세 층으로 증가하면 평균 실험 지연 확산 값은 각각 2.63 nsec, 2.14 nsec 만큼 증가하게 된다. 층 사이 전파 전달의 경우 수신안테나의 입력신호는 송수신안테나로부터 전파되어 층 바닥을 통과해 전달되어 먼저 수신단으로 도달하는 신호와 수신단을 둔 곳보다 아래층들에서 반사된 신호, 수신단이 있는 층에 존재하는 여러 반사체와 산란체들에 의해 전달되는 신호들로 구성된다. 따라서 어떤 층에서 다른 층으로 전파가 전달될 때, 송수신단 사이에 존재하는 층의 수가 증가하면 수신단으로 처음 도착하는 신호의 세기는 상대적으로 점차 작아지고 복잡한 다중 경로 전파를 경험한 신호의 세기가 증대되어, 처음 도착하는 신호에 대한 상대적인 크기와 지연 값에 의해서 결정되는 실험 지연 확산 값은 점차적으로 증가하는 경향을 갖는 것으로 추측된다.

표 1. 각 층의 측정지점에 대한 실효 Delay Spread 값들과 그 평균

	1st	2nd	3rd	4th
a	16.94	6.01	5.8	24.74
b	8.81	26.24	27.04	7.66
c	15.94	52.10	9.03	8.60
d	28.85	13.55	24.37	7.42
e	7.14	10.13	10.19	7.45
f	6.53	12.06	23.63	14.23
g	9.41	9.00	9.46	9.99
h	18.77	13.13	10.11	9.21
i	25.54	7.77	5.88	15.83
j	14.02	6.52	9.36	14.06
k	14.86	11.36	22.44	9.12
l	10.41	28.41	9.29	9.90
m	22.92	10.39	10.39	9.05
n	13.81	26.2	21.76	9.23
o	24.04	7.83	9.83	12.7
mean	15.87	16.05	13.91	11.28

그러나, 수신 안테나를 1 층에 둘 경우 각 지점에서 계산된 실효 지연 확산 값들의 평균은 15.87 nsec 로서 수신 안테나를 2 층에 둔 경우보다 0.18 nsec 정도 작아진 것으로 관측되었다. 1 층에서는 2 층에 비해 처음 도착하는 신호의 세기는 작아지지만, 2 층에 존재하는 아래층으로부터의 반사가 없어짐에 따라 다중 경로 성분의 수가 제한된다. 그 결과로 1 층에서는 2 층에서보다 관측된 전력 지연 프로파일들로부터 계산된 평균 실효 지연 확산이 약간 감소하는 것이 측정되었다.

그림 7은 송신 안테나를 5 층 중앙 복도 가운데 고정하고 수신 안테나를 제2공학관 건물의 각 층으로 이동하면서 각 지점에서 측정된 경로 손실 값들을 송수신 안테나 사이의 거리에 대해 표현한 것이다. 또한 그림 7에서는 송수신 안테나를 같은 층에 둔 경우의 경로 손실 특성도 표현하여 층 사이의 경로 손실 특성과 비교하였다. 그림 7에서 점선은 각 층에서 측정된 경로 손실 값들의 선형 근사화를 통해 얻어졌으며 이것으로 층간 전파 특성의 경로 손실 모형을 표현할 수 있다. 다음 식은 각 층에서 측정된 경로 손실 값들로부터 얻어진 경로 손실 모형들을 나타내고 있다.

$$4 \text{ 층: } PL(\text{dB}) = 17.71 \log(d) + 10.50 \quad (10)$$

$$3 \text{ 층: } PL(\text{dB}) = 20.28 \log(d) + 14.99 \quad (11)$$

$$2 \text{ 층: } PL(\text{dB}) = 23.08 \log(d) + 16.06 \quad (12)$$

$$1 \text{ 층: } PL(\text{dB}) = 25.25 \log(d) + 17.06 \quad (13)$$

위의 경로 손실 모형에서 송수신단 사이의 층 수가 1에서 4로 증가할수록 곧, 수신 안테나의 위치가 4 층에서 1 층으로 이동함에 따라 경로 손실 지수 값은 1.77에서 2.53으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

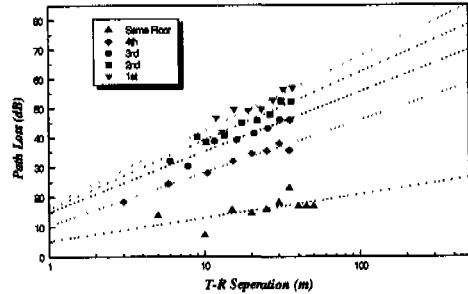


그림 7. 층 사이 실험에서 송수신 안테나 사이의 거리에 따른 경로 손실 특성

이것은 송수신단 사이의 층 수가 증가함에 따라 수신단으로 수신되는 신호의 세기가 층과 층 사이를 전파하면서 선형적으로 감소되고 이로 말미암아 거리에 따른 경로 손실 값의 증가의 정도가 커지기 때문에 일어나는 현상이라 할 수 있다.

실내 전파실험 환경에서는 송신 안테나로부터 방사된 전파가 밀폐된 직육면체 공간 안에서 다각도로 반사를 반복함에 따라 상대적으로 많은 다중 경로 성분이 관측되었다. 사무실 안에서는 송신 안테나로부터 전파된 전자파가 다각도로 반사를 반복함으로써 복도 환경에 비해 다중 경로 성분이 비교적 많이 나타난다. 이에 반해 경로 손실 특성은 사무실의 전파 거리가 비교적 짧아 측정의 중요성을 갖지 않으므로 생략하였다. 측정된 실효 지연 확산은 10 nsec에서 40 nsec까지의 넓은 분포를 갖는다. 그림 8은 실효 지연 확산의 누적 확률 분포를 나타내고 있으며, 실효 지연 확산값이 25 nsec 이내에서 90% 정도로 관측되었다.

일반적으로 심볼 지속 시간이 실효 지연 확산 값의 10 배보다 클 경우, 10^{-3} 정도의 BER을 갖는 전송이 가능한 것으로 알려져 있다. 그러나, 실효 지연 확산 값이 심볼 지속 시간의 0.1 배보다 커지게 되면 감쇄 현상에 의하여 채널 특성이 주파수 선택적으로 되어 전송 오류가 증가하기 때문에 전송 속도가 제한된다. 따라서, 측정 환경에 따른 실효 지연 확산 값의 비교에서 평균 실효 지연 확산 값의 증가는 전송하고자 하는 신호의 최대 허용 전송 속도의 감소를 의미한다.

