

축소 실험 모형을 이용한 다중경로 페이딩의 공간분포 특성 분석

An Analysis of the Spatial Distribution of Multipath Fading using Miniaturized Experimental Setup

허 정 · 신성현 · 한명우 · 이창은 · 최홍주

Jung Hur · Seong-Hyeon Shin · Myoung-Woo Han · Chang-Eun Lee · Hong-Ju Choi

요 약

축소 실험 모형을 이용하여 다중경로 페이딩의 공간분포 특성을 분석한다. 특히 페이딩의 주기 특성 분석을 위해서 공간 푸리에변환을 통해 페이딩의 공간 주파수 성분을 찾아내는 방법을 이용한다.

축소 실험 모형은 실제 환경에 비해 1/5배로 축소되었다. 따라서 실제의 전파모델 분석에서 사용하는 주파수는 2 GHz이지만, 축소 실험 모형을 이용한 측정에서는 10 GHz를 사용한다. 그리고 페이딩의 정밀한 측정을 위해서 안테나 자동이송 시스템을 제작하여 실험에 이용하였다. 축소 실험 모형에서의 측정 결과와 이에 대응하는 실제 전파환경에 대한 시뮬레이션 결과는 전계분포 곡선과 공간 주파수 밀도분포 곡선으로 나타내어 비교하였다.

Abstract

The spatial distribution of multipath fading using miniaturized experimental setup was analyzed. The spatial Fourier transform was carried out for the analysis of the period of fading and we could find out spatial frequency component of fading. Thus the analysis using this method shows the validity of miniaturized experimental setup.

The miniaturized experimental setup was made by 5 times reducing of the real size. The simulation was performed at 2 GHz and the measurement was carried out at 10 GHz. Automatic antenna moving system was made for exact measurement of the multipath fading. Both simulated and measured results in miniaturized experimental setup were shown by electric field distribution and spatial frequency density distribution curves.

I. 서 론

도심지 소규모 셀이나 실내환경에서는 여러 가지 지형 지물의 영향에 의해 정확한 전파현상의 규명이 어려우며, 특히 다중경로 페이딩(multipath fa-

ding)은 소규모 전파환경에서의 전파 특성을 더욱 복잡하게 한다. 이러한 다중경로 페이딩의 분석은 공간 다이버시티(diversity) 등과 같은 페이딩의 극복 방안 마련에 필수적인 정보를 제공해 주므로, 여러 전파예측 모델과 실제 현장에서의 측정을 통한 페이딩 분석이 다방면으로 시도되고 있다. 그러

「이 논문은 1997년도 건국대학교 지원에 의한 논문임」

건국대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Engineering, Kon-Kuk University)

· 논문 번호 : 980123-011

· 수정완료일자 : 1998년 6월 10일

나 현장에서의 측정은 경제적 부담과 시간 소요의 문제점을 극복해야 하고, 예측 불가능한 변수들 때문에 실측 결과와 이론치의 일치를 기대하기는 어렵다.

본 논문에서는 축소 실험 모형을 사용하여 다중경로 페이딩 특성을 분석하는 방법을 소개한다. 그리고 페이딩의 주기성 분석을 위해서는 공간에 대하여 푸리에변환을 수행함으로써 페이딩에 포함된 공간 주파수(spatial frequency) 성분을 찾아내는 방법을 사용하였고, 이를 통하여 축소 모형의 타당성을 제시하게 될 것이다^{[1],[2]}.

측정 결과와 비교하기 위한 전파 예측모델은 전파경로 추적(ray tracing) 기법이 사용되었고, 정확한 반사파의 경로를 추적하기 위하여 가상 스크린(imaginary screen) 개념을 사용한 영상이론(image theory)가 도입되었다^{[3]~[5]}.

축소 실험 모형의 기본적인 개념은 예측하고자 하는 주파수보다 매우 높은 주파수를 사용하였을 때, 실제 구조의 크기를 축소하여 고려할 수 있다는 것이다^[6]. 그러므로 제작이 쉽고, 예측 불가능한 변수를 제거할 수 있으며, 개별적인 전파요소에 대한 엄밀한 측정이 가능하므로 이론적인 전파예측 모델의 실증에 유용하다. 축소 모형에서는 수신전계의 정확하고 효율적인 측정을 위하여 안테나 자동이송장치를 포함한 페이딩 특성 측정시스템을 제작·사용하였다.

축소 실험 모형에서 벽면은 다양한 재질로 구성할 수 있지만, 실제의 전파환경에서 사용되는 재질의 유전율과 도전율은 재질별로도 다양한 값을 가지기 때문에 실험 결과와 이론적인 결과의 정확한 비교·분석이 어려워진다. 따라서 본 논문에서는 실험 결과와 이론적인 결과의 비교·분석의 정확성을 기하기 위하여 유전율과 도전율이 명확한 완전도체를 우선적으로 사용하였다. 아울러 도심지의 다양한 도로 구조에서 전파전파 특성을 분석하기 위하여 우선적으로 공간이 없는 연속 벽면 구조와 교차로처럼 도로 양쪽의 벽면에 공간이 있는 구조를 대표적으로 다루었다. 실제의 전파환경을 분석하기 위한 예측모델에서는 2 GHz의 주파수를 사용하지만, 축소 실험 모형을 이용한 측정에서는 10 GHz를 사용하였다. 전파모델 분석에서의 주파수를

2 GHz로 선택한 것은 특정 통신 시스템에서 사용하는 주파수를 선택한 것이 아닌, 임의의 주파수에 대한 축소 실험 모형의 재관성을 보이기 위함이다.

II. 축소 모형을 이용한 페이딩 특성 측정장치

2-1 축소 모형의 제안과 구조

측정을 위해 제안된 모형은 분석하고자 하는 실제 전파환경보다 1/5배로 축소하여, 그림 1과 같이 LOS(line of sight) 전파경로를 가지면서 도심에서 가장 쉽게 접할 수 있는 두 가지 구조에 대하여 제작하였다. 그림 1(a)는 직선 도로의 양쪽으로 기지국의 송신 안테나보다 충분히 높은 빌딩들이 연속적으로 밀집되어 늘어서 있는 구조를 가정한 것으로, 양쪽으로 뻗뻗이 밀집된 빌딩들은 각각 연속된 벽면이 도로를 중심으로 서로 마주보는 구조로 고려할 수 있다. 반면 뻗뻗한 빌딩과 빌딩의 사이에 교차로나 골목 등이 존재하는 경우에는 그림 1(a)와 같은 구조에서 도로 양쪽 벽면에 공간이 존재하는 것으로 그림 1(b)와 같이 간단하게 제작할 수 있다.

벽면에 대한 유전율과 도전율은 실제의 환경과 마찬가지로 건물의 종류와 재질에 따라 매우 다양한 값을 적용할 수 있다. 축소 실험 모형을 통한 측정에서는 우선 벽면과 바닥면을 완전도체로 가정함으로써 반사 경계면에서의 손실오차를 최소한으로 줄여 이론적인 결과와 정확한 비교·분석이 가능하도록 하였다. 물론 이것이 실제적인 환경과는 크게 다르지만, 이러한 모델의 분석을 통해서 다른 실제 구조물에 대한 기준이 되는 자료로 제시할 수 있다.

축소 실험 모형에서 구조물의 도로폭은 3 m로 제작하였다. 이것은 실제 전파환경에서 분석하고자 하는 도로폭을 15 m로 가정하고 이를 1/5배 축소한 것이다. 송신 안테나는 실제 안테나의 높이가 5 m라고 가정하고 1/5배로 축소하여 1 m의 높이로 세웠으며, 기지국의 송신 안테나가 건물벽에서 약 2 m 정도 떨어진 보도 블록 위에 위치한 경우를 가정하여 한쪽 벽면에서 도로의 폭 방향으로 0.4 m에 위치 시켰다. 수신 안테나는 사람의 평균키를 고려하여 1.7 m의 높이에 위치한다고 가정하고, 축소 실험 모형에서는 0.34 m 높이로 안테나 자동이송

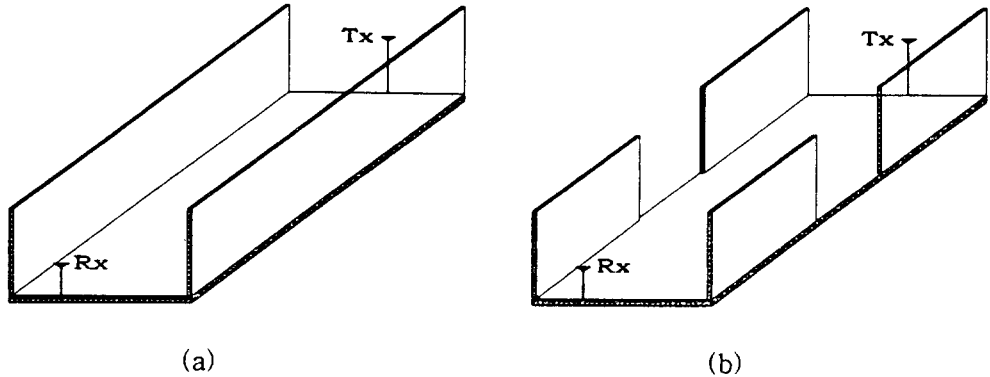


그림 1. 축소 실험 모형의 구조. (a) 연속 벽면 (b) 빈 공간이 존재하는 불연속 벽면
 Fig. 1. Structure of miniaturized experimental setup. (a) Wall without empty space. (b) Wall with empty space.

장치의 이동부 위에 탑재되었다. 구조물의 재질을 완전도체로 구성하기 위하여 알루미늄을 바닥과 벽면에 골고루 씌웠다. 표 1에서는 위에서 가정한 실제 환경과 축소 실험 모형에 대한 크기를 서로 비교하였다.

표 1. 실제 환경과 축소 실험 모형의 비교.

Table 1. Comparison between real environment and miniaturized experimental setup.

구 성		실제환경	축소모형
주 파 수		2 GHz	10 GHz
송신 안테나	높 이	5 m	1 m
	기준 벽면과의 거리	2 m	0.4 m
		13 m	2.6 m
수신 안테나	높 이	1.7 m	0.34 m
	기준 벽면과의 거리	2 m	0.4 m
	이동거리	1.55 m	0.31 m
도 로 폭		15 m	3 m

2-2 페이딩 특성 측정장치의 구성

페이딩 특성 측정을 위해 설치하는 시스템은 크게 송신부와 수신부로 구성된다. 그림 2는 안테나 자동이송 장치와 페이딩 특성 측정시스템의 구성도를 보여준다.

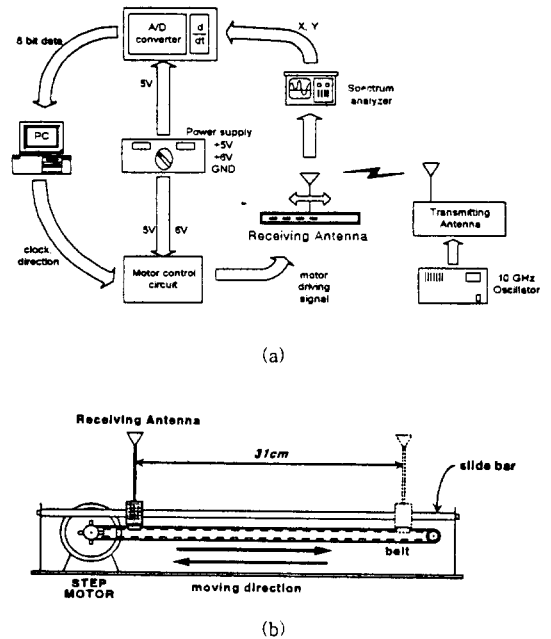


그림 2. 페이딩 측정시스템. (a) 구성도 (b) 안테나 자동이송 장치

Fig. 2. Fading measurement system. (a) Block diagram. (b) Automatic antenna moving system.

송신부는 10 GHz용 발진기와 안테나로 구성하며, 정보가 실리지 않은 연속파를 수신부로 보낸다. 수신부는 안테나 이동부와 데이터 수집부로 나누어진다. 송·수신에 이용한 안테나는 바닥면에 수직

으로 세워진 $\lambda/4$ 모노폴 안테나로써 등방향성 복사 패턴을 갖고, VSWR은 10 GHz의 주파수에서 1.8715와 1.2799의 값으로 양호한 성능을 보이며, 수신 신호의 손실을 줄이기 위하여 성능이 좋은 것을 수신 안테나로 선정하였다.

안테나 이동부에서는 수신 안테나가 선형으로 이동이 가능하도록, 위치 제어가 용이한 스텝 모터와 기어를 벨트로 연결하였다. 안테나의 이동 범위는 선형으로 31 cm이며, 그 구간 동안 수신된 신호를 365번 샘플링하도록 프로그래밍하였다. 샘플링시마다 안테나가 정지하며, 샘플링이 완료되면 다시 이동한다. 한번 이동하는 거리는 약 0.85 mm(310/365 mm)로서 매우 정밀한 측정 결과를 얻을 수 있다. 모터 구동 회로는 스텝 모터 구동 전용 IC인 L297과 L298로 구성되며 PC에서 방향과 클럭 신호를 받아서 모터를 회전시킨다.

데이터 수집부는 스펙트럼 분석기와 샘플링 회로로 구성된다. 샘플링 회로는 A/D 컨버터와 동기 신호를 발생시키는 미분기를 포함하고 있다. 수신 안테나가 한번씩 이동할 때마다 스펙트럼 분석기는 안테나에 수신된 신호전력의 스펙트럼을 표시하며 이 정보는 스펙트럼 분석기의 외부 출력(Y)을 통해 샘플링 회로로 전달된다. 스펙트럼 분석기는 sweep 시간에 따라 톱니파를 발생시켜 외부 출력(X) 단자로 내보낸다. 샘플링 회로는 이 X 신호를 미분하여 스펙트럼 분석기의 sweep이 시작되는 시기를 포착하는 것에 의해 샘플링을 시작하고, 이때부터 안테나가 정지된 상태로 300회 샘플링을 하도록 프로그래밍 했다. 샘플링시마다 신호는 8비트 A/D 변환기를 통해 디지털 정보로 변환되어 PC로 전송된다.

프로그램은 수신 안테나 이동을 위한 모터 제어와 샘플링된 변환 정보를 표시하고 저장하는 역할을 한다. 안테나가 한번 정지할 때마다 샘플링 및 A/D 변환이 이루어지고, 이는 그래픽으로 PC에 디스플레이 되어 스펙트럼 분석기의 출력 파형을 그대로 볼 수 있다. 이때 출력파형의 피크치를 선택해서 배열에 저장하고, 안테나의 이동이 끝나면 지정된 파일 이름으로 저장한다. 그림 3은 이 프로그램 알고리즘의 흐름도를 나타낸다.

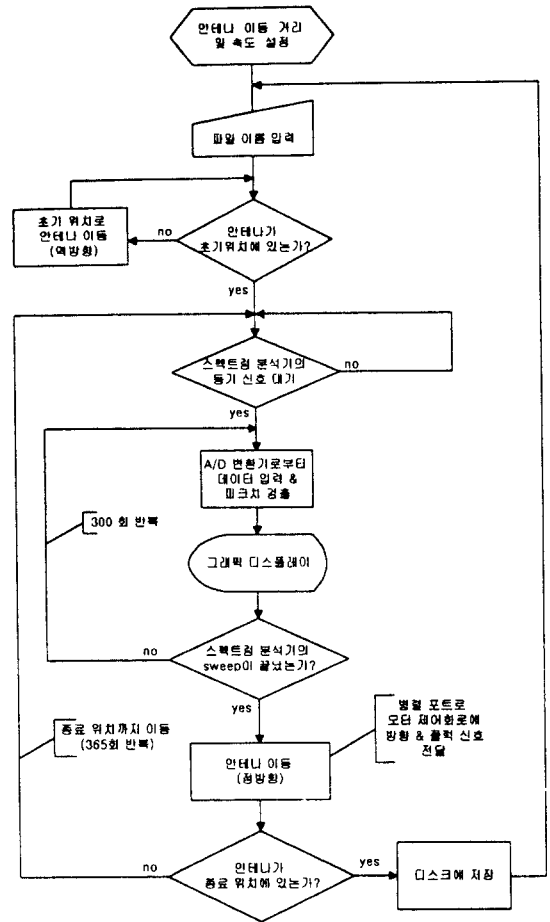


그림 3. 페이딩 특성 측정장치의 프로그램 흐름도
Fig. 3. Flowchart of fading measurement system.

III. 축소 모형에서의 측정 결과 분석

3-1 페이딩 특성 분석을 위한 측정 구조

제작된 축소 실험 모형에서 다양한 페이딩의 특성을 분석하기 위한 안테나의 위치와 이동 방향에 대하여 설명한다. 그림 4는 도로를 위에서 바라본 것으로, 도로에서 전계가 어떤 형태로 분포되어 있는지를 쉽게 알아볼 수 있는 대표적인 두 가지의 이동 방향을 도시하였다. 첫번째 경우는 수신 안테나가 도로의 길이 방향, 두번째 경우는 수신 안테나가 도로의 폭 방향으로 이동하는 경우를 나타내고 있

다. S_1 와 S_2 은 기준 벽면으로부터 송·수신 안테나가 위치한 각각의 거리를 나타내고, 안테나의 이동 방법에 따라 S_{11} 과 S_{12} 로 나누어 표시했다. 기준 벽면은 그림 4의 아래쪽 벽면으로 정하였다. W 는 도로의 폭, d 는 송·수신 안테나 사이의 거리 그리고 l 은 수신 안테나가 측정을 시작하여 마칠 때까지 이동하는 거리이다. 수신 안테나는 안테나 자동이동 시스템에 의해 선형적으로 이동한다.

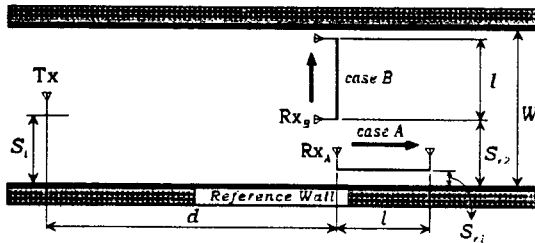
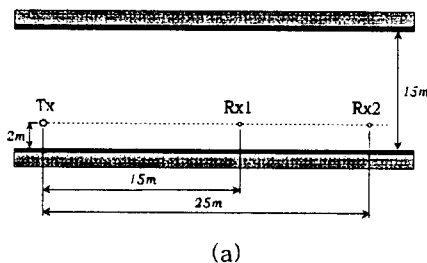


그림 4. 안테나의 이동 방향
Fig. 4. Antenna moving direction.

그림 1과 같은 축소 실험 모형의 두 가지 구조에 따라 수신전계를 측정하기 위한 안테나의 위치를 그림 5에 나타내었다. 작은 원은 그림 4에서 수신 안테나가 측정을 시작하는 출발 위치를 나타내고, 송·수신단의 거리에 따라 15 m와 25 m의 두 지점에서 페이딩을 분석하였다. 실제로 축소 실험 모형에서 측정할 때는 실제 길이보다 1/5배 축소하여야 하므로 3 m와 5 m의 거리에서 측정을 수행하였다.

3-2 측정 결과

축소 실험 모형에서의 실험은 신뢰성을 높이기



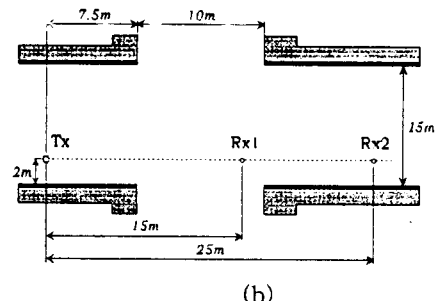
(a)

위해 매 경우마다 5회씩 반복 측정했다. 그림 6은 축소 실험 모형에서 안테나 자동이송 장치를 이용해 5회씩 측정된 수신전계를 나타낸다. 그림에서 (a)~(d)는 연속 벽면 구조에서, (e)~(h)는 빈 공간이 있는 불연속 벽면 구조에서 측정한 것이다. 그리고 송·수신 안테나의 거리를 (a), (c), (e) 그리고 (g)는 3 m, (b), (d), (f) 그리고 (h)는 5 m로 하여 각각 측정하였다. 실제 구조에서는 각각 15 m와 25 m가 된다. 또한 수신 안테나의 이동 방향은 (a), (b), (e) 그리고 (f)는 도로의 길이 방향으로, (c), (d), (g) 그리고 (h)는 도로의 폭 방향으로 측정한 결과이다.

측정된 곡선의 모양은 축소 실험 모형에 의해 형성된 페이딩이며, 5개의 곡선이 거의 정확하게 일치하고 있는 것으로 보아 매우 신뢰성이 높고 페이딩의 특성을 분석하는 데 중요한 평가 요소가 될 수 있다. (a)와 (c), (b)와 (d)는 각각 같은 위치에서 측정한 것으로서, 페이딩의 모양에서 보여지는 것처럼 도로의 폭 방향이 길이 방향보다 더 많은 페이딩이 형성한다는 것을 알 수 있다. 그러나 (e)에서 (h)의 경우에서처럼 벽면의 공간에 의해 페이딩이 수신되는 전파의 개수와 측정 경로, 전파의 경로차 등 여러 조건에 따라 그 개수가 달라질 수 있으므로, 페이딩의 수를 비교하는 것이 큰 의미를 갖지 못한다.

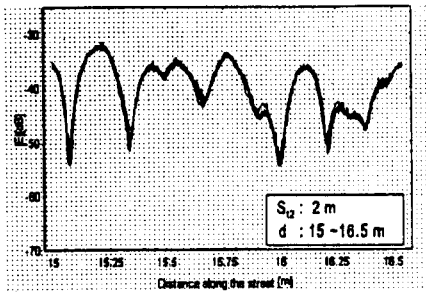
IV. 실제 전파환경에 대한 시뮬레이션과 측정 결과의 비교

4-1 수신전계분포 비교

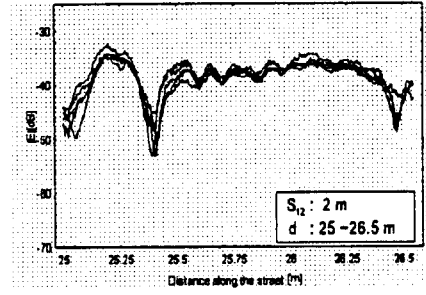


(b)

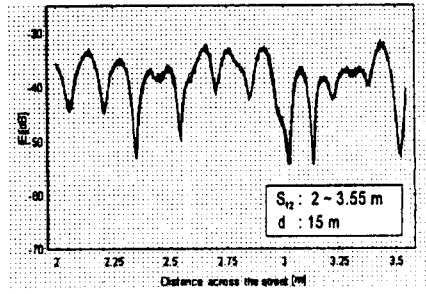
그림 5. 안테나의 위치 (a) 연속 벽면 (b) 불연속 벽면
Fig. 5. Antenna location. (a) Wall without empty space. (b) Wall with empty space.



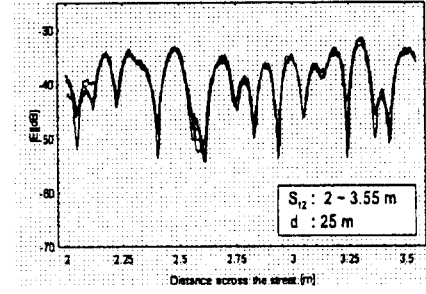
(a)



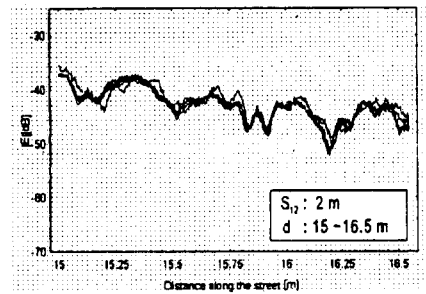
(b)



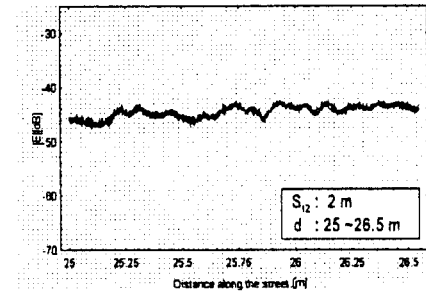
(c)



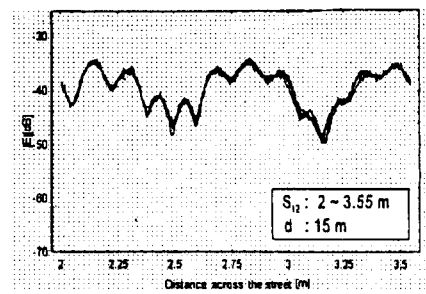
(d)



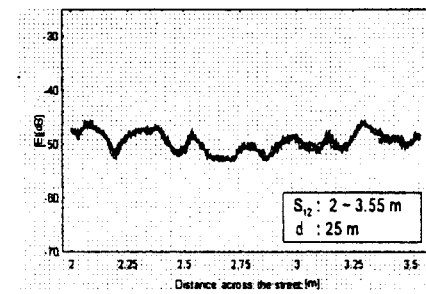
(e)



(f)



(g)



(h)

그림 6. 5회씩 측정된 수신전계분포 곡선 (a)-(d) 연속 벽면 (e)-(h) 불연속 벽면

Fig. 6. 5 times measured field distribution curves. (a)-(d) Wall without empty space, (e)-(h) Wall with empty space.

실제 전파환경에서의 페이딩 특성을 분석하기 위한 시뮬레이션은 전파의 경로를 찾아내기 위해 전파경로 추적기법(ray tracing method)을 사용하였는데, 정확한 반사파의 경로를 추적하기 위하여 가상 스크린 개념을 이용한 영상이론(image theory)을 도입하였다. 연속 벽면 구조에서는 수신되는 전파경로의 수가 무한하므로 수신전계의 모양에 영향을 줄 수 있는 임계값인 8회 반사파까지만 고려하였고, 벽면에 빈 공간을 고려한 구조에서는 수신 안테나의 근처에 공간을 두어 수신되는 전파의 수가 유한하도록 Mathematica를 사용해 프로그램하였고, 측정 결과는 5회 측정한 데이터의 평균값을 취했다. 그리고 두 결과는 비교가 용이하도록 함께 도시하였으며 시뮬레이션 결과는 실선으로, 측정 결과는 점선으로 나타내었다.

페이딩의 주기적인 특성 분석을 위해서 푸리에변환을 통한 공간 주파수 밀도분포 곡선을 사용하였는데, 이 곡선의 가로축은 1 m 구간 동안 포함되어 있는 공간 주파수 성분을 나타내어 페이딩의 개수를 쉽게 알 수 있게 하며 단위는 [cycle /m]이다. 또한 세로축은 전계 곡선에 포함된 공간 주파수 밀도(spectral density)로서 가장 두드러진 공간 주파수 성분을 추출할 수 있게 한다. 측정된 자료와 계산된 자료는 공간 주파수 밀도분포 곡선에서 여러 개의 공간 주파수(spatial frequency) 성분으로 분리된다^[1]. 주파수 밀도가 가장 큰 공간 주파수 성분을 도미넌트 주파수(dominant frequency)라고 하고, 이 도미넌트 주파수가 전계분포 곡선에 포함된 페이딩의 주기가 된다. 그림 7은 시뮬레이션(실선)과 측정 결과의 평균치(점선)를 함께 나타낸 것으로, 각각의 경우는 그림 6과 같다.

전체적으로 두 곡선이 일치하지는 않지만, 각 경우마다 서로 유사한 형태를 가지는 것을 알 수 있다. 시뮬레이션과 측정 결과가 일치하지 않는 이유는 여러 가지가 있겠지만, 주요한 원인으로는 첫째 구조물 자체의 영향 즉 제작된 축소 모형은 벽면과 바닥면의 평평한 정도와 서로 이루는 각도, 두 벽면 사이의 일정한 거리 유지 정도, 면에 썩워진 알루미늄의 작은 기복 등에 의해 많은 오차 가능성을 포함하고 있다. 이들 오차는 전파의 예상 반사 지점과 실제의 반사 지점을 일치하지 않게 하고, 결국 시뮬

레이션과 측정치는 서로 다른 전파 경로를 가져 전계의 크기와 위상이 일치하지 않는 결과를 초래한다. 둘째는 안테나의 패턴이 무지향성으로 나타나지 않는데 기인한다. 무지향성의 경우는 송신되는 파나 수신되는 파의 크기가 방위각에 관계없이 일정하지만, 실제의 안테나는 그렇지 못하므로 계산된 전파 성분의 크기와 실제 전파 성분의 크기는 다른 값을 가지게 된다. 그런데 수신전계에서 페이딩의 모양에 직접 기여하는 전파 요소로는 위상과 함께 크기도 민감한 작용을 하기 때문에, 시뮬레이션과 측정 결과의 수신전계는 서로 차이를 보이게 된다. 지금까지의 두 경우에서처럼 측정 결과에서 얻어진 전파 성분이 시뮬레이션에서 계산된 전파 성분과 같지 않기 때문에 두 수신전계분포 곡선은 동일하지 않은 형태로 나타나게 된다.

연속 벽면에 대해서 (a), (b)와 (c), (d)를 서로 비교해 보면 3.2절에서 언급된 것과 같이 측정 결과와 시뮬레이션 모두 도로의 폭 방향으로 많은 페이딩이 발생하는 것을 볼 수 있다. 그리고 (b)보다 (a)에서 많은 페이딩이 발생하는 것으로 보아 길이 방향으로는 원거리보다 근거리에서 페이딩 변화가 심한 것을 알 수 있다.

한편 벽면에 공간이 있는 구조인 (e)~(h)의 곡선들은 (g)만 제외하고는 시뮬레이션과 측정 결과가 상당히 큰 차이를 나타낸다. (e), (f)와 (h)는 벽면 반사파들이 공간 밖으로 모두 빠져나가고 직접파와 지면 반사파만 수신되므로 시뮬레이션의 전계 곡선은 매끄럽게 나타나지만, 측정 결과에 의한 곡선의 모양은 약 2~8dB 정도의 적지 않은 페이딩이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 이것은 2개의 전파 성분 외에 다른 성분이 간섭을 일으키는 것으로 보이며, 가장 큰 가능성은 공간의 모서리에 의한 회절 성분에 의한 영향으로 추측된다. 그리고 (e)의 오른쪽 부분과 (f)의 왼쪽 부분은 직접파와 지면 반사파의 상쇄 간섭으로 시뮬레이션 곡선이 깊은 페이딩을 나타내지만, 측정된 곡선은 크게 감쇠하지 않고 시뮬레이션보다 약 10 dB 정도 큰 값을 나타낸다. 이 현상은 직접파와 지면 반사파 외의 다른 전파성분이 더해져 정확한 상쇄 간섭이 이루어지지 않기 때문에 계산된 값보다 높게 나타난다고 생각된다. (h)는 시뮬레이션의 전계 곡선이 거의 직선

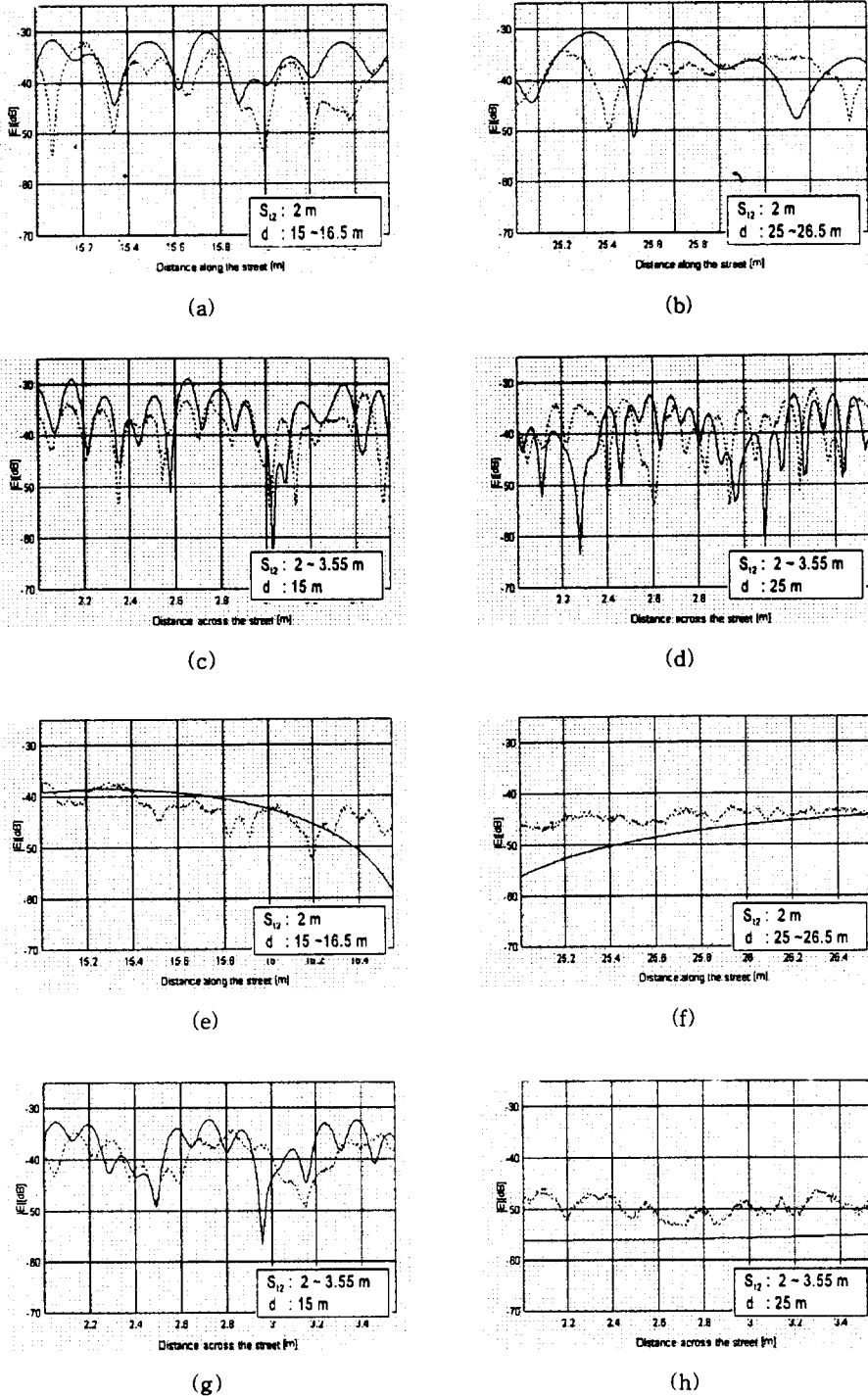


그림 7. 평균수신전계분포 곡선 (a)-(d) 연속 벽면 (e)-(h) 불연속 벽면 구조

Fig. 7. Average field distribution curves. (a)-(d) Wall without empty space. (e)-(h) Wall with empty space.

모양이고 측정 결과에 의한 곡선보다 적은 값을 가진다. 이 경우의 수신 안테나 출발 위치는 (f)의 출발 위치인 25 m 지점에서 도로의 폭 방향으로 이동하기 때문에 (f)와 (h)의 맨 왼쪽 값은 같다. 결국 (h)는 (f)에 나타나 있는 깊은 페이딩의 골짜기를 따라 측정한다고 추측할 수 있다. (g)는 수신전계가 직접파, 지면 반사파, 벽면 1회 반사파 그리고 벽면 1회 반사 후 지면 1회 반사파로 이루어져 있으며, 수신 안테나가 도로의 폭 방향으로 움직이므로 수신되는 4개의 전파 성분 중 벽면 반사 성분이 페이딩을 많이 발생시키는 데 주된 역할을 하고 있다. 측정 결과의 곡선은 시뮬레이션과 정확하게 일치하지는 않지만 대체적으로 페이딩의 모양과 수가 비슷하며, 이 결과는 다중반사에 의한 전파성분이 다른 원인에 의한 전파성분(예로서 회절과 산란으로 추측되는)보다 페이딩의 발생에 크게 기여한다는 것을 알려주고 있다.

4-2 공간 주파수 분포 비교

전절의 수신전계분포 곡선은 시뮬레이션과 측정 결과가 일치하지 않을 뿐만 아니라, 곡선의 형태만으로 페이딩의 수를 예측하기가 매우 어렵다. 따라서 푸리에변환에 의한 공간 주파수 분포를 통해 페이딩의 주기 특성을 분석한다.

그림 8은 시뮬레이션(실선)과 측정 결과(점선)의 공간 주파수 분포 곡선을 나타내는데, 벽면에 공간이 있는 경우가 공간이 없는 경우보다 대체적으로 공간 주파수 밀도가 작기 때문에 (a)~(d)의 세로축 범위는 0.07까지, (e)~(h)는 0.03까지 나누어 도시하였다.

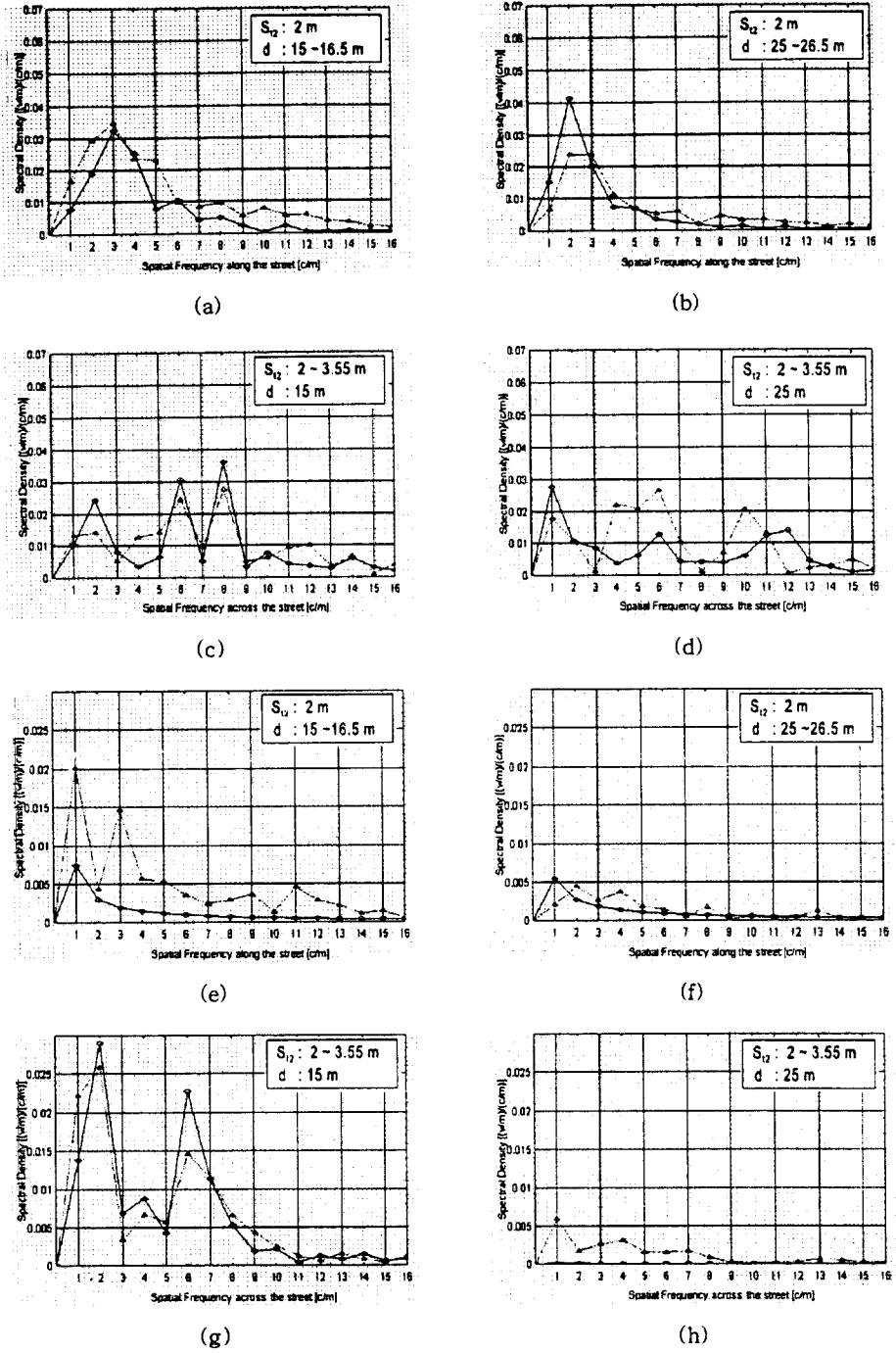
그림 8에서 (d)와 (f)만 제외하면 시뮬레이션과 측정 결과의 공간 주파수 분포가 거의 정확하게 일치한다는 것을 쉽게 알 수 있다. (d)는 도미넌트 주파수가 1 [c/m]이지만, 다른 공간 주파수 성분의 크기도 작지 않기 때문에 다중경로의 단주기 페이딩(short-term fading)이라고는 볼 수 없다. 그러므로 단주기 페이딩의 주파수 성분은 6 [c/m]이나 12 [c/m]에서 함께 분포한다고 생각되며, 시뮬레이션과 측정 결과는 거의 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. (f)는 시뮬레이션과 측정 곡선의 도미넌트 주

파수가 일치하지 않는데, 2 [c/m]에서 측정 결과의 주파수 밀도는 약 0.005 [(v/m)/(c/m)] 정도로 매우 낮은 값을 가지기 때문에 다중경로 페이딩의 주기로서 큰 의미를 가지지 못한다. (g)에서는 시뮬레이션과 측정 결과가 2 [c/m]에서 동일하게 도미넌트 주파수를 나타내고, 6 [c/m]에서도 같은 공간 주파수를 가진다. 그리고 전계분포 곡선보다 더 확실하게 페이딩에 포함된 주파수 성분의 구별이 가능하다. 결과적으로 연속 벽면이나 빈 공간이 있는 불연속 벽면의 경우 모두 시뮬레이션과 측정 결과에 포함된 공간 주파수 분포는 일치하거나 또는 크게 벗어나지 않았으므로 축소 실험 모형의 타당성이 입증된다고 할 수 있다.

V. 결 론

다중경로 페이딩의 공간분포 특성을 분석하기 위해 축소 실험 모형을 사용하여 수신전계를 측정하는 방법을 사용하였다. 페이딩의 특성 분석을 위한 안테나 자동이송 장치를 사용하여 각 경우마다 5번씩 반복 측정하였다. 반복 측정된 수신전계분포 곡선은 매우 일관된 결과를 나타내므로 안테나 자동이송 장치와 측정 소프트웨어 같은 측정시스템의 신뢰성을 확증해 주었으며, 매우 정밀한 자동 수행 측정이 가능하므로 정확성을 요구하는 소규모 셀이나 실내 환경에서 특히 유리하다. 그리고 이론에 근거한 시뮬레이션과 축소 모형에서 측정된 각 결과들의 평균에 대하여 페이딩의 주기성을 비교·분석하기 위해 푸리에변환에 의한 공간 주파수 밀도분포 곡선을 사용하였다. 공간 주파수 밀도분포 곡선은 전계분포 곡선에서는 알아내기 어려운 페이딩의 주기성과 유사성을 쉽게 얻을 수 있었다. 이처럼 페이딩의 주기성 분석을 간단하면서도 정확하게 수행하기 위해서는 공간 주파수 밀도분포에 의한 분석이 적합하다.

축소 실험 모형은 작은 영역에 대해서 간단하게 제작이 되므로, 페이딩 특성 측정시스템과 함께 소규모 셀이나 실내 환경의 전파전파 분석에 매우 유용할 것으로 전망된다. 앞으로는 임의의 유전율과 도전율을 가진 재질에 대해서도 많은 실험을 수행하여 다양하고도 실제적인 전파모델에서의 축소 실



—◇— : Simulated --△-- : Measured

그림 8. 공간 주파수 밀도분포 곡선 (a)-(d) 연속 벽면 구조 (e)-(h) 불연속 벽면 구조
 Fig. 8. Spatial frequency density distribution curves. (a)-(d) Wall without empty space.
 (e)-(h) Wall with empty space.

험 모형을 이용한 전파예측이 가능하도록 많은 데이터를 분석하고 확보하는 작업이 필요하리라 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] R. M. Narayanan, D. D. Cox, J. M. Ralston and M. R. Christian, "Millimeter-wave specular and diffuse multipath components of terrain," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 44, pp. 627-651, May 1996.
- [2] Joseph E. Ossanna, Jr., "A model for mobile radio fading due to building reflections : theoretical and experimental fading waveform power spectra," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 43, pp. 2935-2971, Nov. 1964.
- [3] Jung Hur and Jay Kyoong Lee, "A modified image theory with imaginary screens and its application to analysis of wave propagation in urban microcellular environment," *Syracuse University, Technical Report 96-1*, June 30, 1996.
- [4] J. W. Mckown and R. L. Hamilton, Jr., "Ray tracing as a design tool for radio networks," *IEEE Network Mag.*, vol. 5, no. 6, pp. 27-30, Nov. 1991.
- [5] K. R. Schaubach, N. J. Davis IV and T. S. Rappaport, "A ray tracing method for predicting path loss and delay spread in microcellular environments", *Proc. of 42th IEEE Veh. Technol Conf.*, Stockholm, Sweden, pp. 220-224, June 7-10.
- [6] J. Vandamme, S. Baranowski and P. Degauque, "Three dimensional modeling of double diffraction phenomena by a high building," in *Proc. of 46th IEEE Veh. Technol. Conf.*, Atlanta, USA, pp. 1283-1287, April 28-May 1, 1996.

허 정



1981년 : 서울대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
 1983년 : 서울대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
 1991년 : 서울대학교 대학원 전자공학과 박사과정 졸업(공학박사)
 현재 건국대학교 전자공학과 부교수

[주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 마이크로파 회로 설계, 마이크로파 소자 등

한 명 우



1997년 2월 : 건국대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 현재 건국대학교 대학원 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 전파전파, 마이크로파 회로 설계 등

신 성 현



1996년 : 건국대학교 전기공학과 졸업 (공학사)
 1998년 : 건국대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
 현재 삼성전자(주) 재직중
 [주관심분야] 전파전파, 마이크로파 회로 설계 등

이 창 은



1993년 : 건국대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
 1995년 : 건국대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
 현재 건국대학교 대학원 전자공학과 박사과정
 [주관심분야] 안테나 및 전파전파, 마이크로파 회로 설계 등

최 홍 주



1993년 : 건국대학교 전자공학과 졸업
(공학사)

1995년 : 건국대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

현재 건국대학교 대학원 전자공학과 박사과정

[주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 이

동통신, 마이크로파 회로 설계 등