

---

# 지하철 터널 형태에 따른 2.4GHz 대역 무선영상 신호의 페이딩 특성

송 기 홍\*

Fading characteristics of 2.4GHz band Wireless image signal for the Various Subway  
Tunnel Structures

Ki-Hong Song\*

## 요 약

본 논문에서는 지하철용 2.4GHz대 무선영상 전송 신호의 신호 성능을 파악하기 위하여 신호 변화 현상이 크게 발생하는 지하철역 플랫폼을 중심으로 신호 레벨을 측정하여 지하철 역 내부 구조에 따른 페이딩 특성을 분석한다.

측정 결과에 대한 분석 결과, 직선역 구간에서 다수의 강한 다중경로파가 생성되어 곡선역 구간에 비해 신호 레벨의 변화가 심하게 나타났다. 경로손실 지수는 직선역 구간인 신흥역에서 2.5, 곡선역 구간인 관암역과 대동역에서는 각각 1.6와 1.9으로 나타났다. 50% 지점의 페이드 깊이와 넓이는 직선역 구간인 신흥역에서 가장 심하였으며, 레벨 교차율은 짧은 페이드가 빈번하게 발생하는 관암역에서 가장 심하게 나타났다. 따라서 신호 성능에 영향을 주는 페이딩 현상은 곡선역에 비해 직선역에서 더욱 심하게 발생하는 것을 알 수 있다.

## ABSTRACT

This paper deals with the measurements of wireless image signal in subway tunnels at 2.45GHz. Measurements have been conducted in 3 subway stations with different types; a straight tunnel and two curved tunnels.

As a analysis result for the measured data, we found that the signal level inside straight tunnel by the strong multipath waves fluctuate deeply compared to the curved tunnel. The path loss exponent for the Shin-hung station with the straight tunnel is 2.5, those for the Pan-am and Dae-dong station with curved tunnels are 1.6 and 1.9, respectively. The fade depth and width at 50% point became relatively serious at Shin-hung station, the level crossing rate inside the Pan-am station is larger than the other stations. Therefore, it can be concluded that the fading phenomena affect to the signal performance generate seriously at straight tunnel compared to the curved tunnel.

## 키워드

2.4GHz 무선영상 신호, 직선형 지하철 터널, 곡선형 지하철 터널, 페이딩 특성

## I. 서 론

도시의 교통난을 해소하기 위한 지하철 건설이 급속하게 증가함에 따라 지하철터널에서 활동하는 인구가 증

가하고 있으며, 지하에서도 지상 구간에서와 같이 양질의 정보통신을 요구하는 욕구가 강해지고 있다. 지하철 터널의 전파전파 환경은 매우 다양하고 복잡하므로 터널 내에서의 전파전파 현상을 정확하게 파악하는 것이

중요하나 터널 내에는 벽과 바닥 및 천정 이외에도 수많은 도체 및 유전체의 반사체가 있을 뿐만 아니라 직선 구조가 아닌 곳이 많아 정확하게 계산하기는 거의 불가능한 일이다.

일반적으로 터널 내에서의 전파전파 특성은 도파관 형태를 가진 구조적 특성 때문에 전파의 전도 효과(guiding effect)에 의해 신호 세기가 증가함으로써 자유 공간 환경에서의 전파 특성에 비해 크게 나타나는 것으로 알려져 있으나 지하철 구간과 같이 플랫폼 등 불규칙적인 구조물이 존재하는 경우에 따른 신호 변화 현상은 단순 터널 내에서의 전파 현상과 다르게 나타난다[1,2].

지하철 무선영상전송 시스템에 이용되는 2.4GHz대 주파수는 짧은 구간에서 심한 페이딩을 일으키는 특성을 가지고 있어 수신 지점에 따라 신호 변화가 매우 크게 일어나 화상 지연 현상의 원인이 될 뿐만 아니라 고속 데이터의 전송 시 수신 성능을 저하시키는 요인이 된다[3,4].

본 논문에서는 지하철용 터널 내에서의 2.45GHz 무선영상 전송 신호의 페이딩 특성을 파악하기 위하여 신호 현상이 급격하게 변하는 플랫폼을 중심으로 신호 변화 상태를 측정하여 분석하였으며, 측정은 대전 지하철 1호선인 신흥역, 판암역 및 대동역 플랫폼 주변에서 수행하였다.

## II. ISM대역 무선영상 전송 신호 측정 시스템 구성

그림 1은 측정을 위해 구성된 2.4GHz 무선영상 전송 신호 측정시스템의 구성도로서 크게 송신부와 수신부로 구성된다[2]. 송신부는 2.4GHz대 영상 신호를 발생하는 무선영상 전송시스템과 신호 발생기의 출력을 보다 크게 증폭하기 위한 증폭기, 그리고 측정대역에서 이용 가능한 송신 안테나로 구성되어 있으며, 무선영상 전송 시스템은 표 1과 같은 사양을 가지고 있다.

수신부는 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정하는 방법과 전계강도 측정기를 이용하여 측정하는 방법 등 두 가지 방법을 이용한 측정 시스템으로 구성되어 있다. 즉, 2.4GHz대 신호를 수신할 수 있는 패치 안테나와 스펙트럼 분석기로 구성되어 있으며, 이를 제어하기 위해 GPIB 인터페이스와 노트북 PC으로 구성되어 있는 수신부와

표 1. 무선영상 전송시스템의 제원  
Table 1. Specification of wireless image transmission system

파라미터	내용	비고
주파수	2.4~2.4835GHz	
최대 RF 출력	100mW eirp	
전송속도	11Mbit/s	
변조	직접 시퀀스 확산 방식	
비디오 압축	JPEG	
안테나	8.5dBi Patch	

수신 신호를 전계강도 측정기를 이용한 다음 RS232C 통신을 이용하여 노트북 PC에 저장하는 수신부로 구분되어 있다. 전계강도 측정기를 이용한 신호 측정은 열차가 운행하는 지하 구간내의 페이딩 특성을 파악하기 위하여 초당 30개 전계강도 데이터를 측정하고 저장하기 위한 것으로서 수신 안테나로의 도래파에 의한 위상 함으로 나타나는 신호 변화인 페이딩 신호의 변화 현상을 파악하기 위한 것이다. 측정 결과의 정확성을 파악하기 위하여 스펙트럼 분석기를 이용한 측정 결과와 전계강도 측정기를 이용한 측정 결과를 서로 비교하여 분석한다. 측정에 이용된 LNA는 20dB 이득을 가진 제품으로서 안테나 케이블 및 콘넥터 손실을 고려하면 입력 신호의 레벨을 약 17dB 증가시키는 효과가 있다.

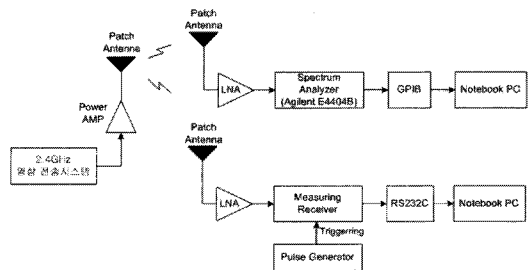


그림 1. 2.4GHz 무선영상 신호 측정 시스템 구성도  
Fig. 1 Block diagram of 2.4GHz wireless image signal measurement system

그림 2는 2.4GHz 무선영상 전송시스템의 전파 신호에 대한 측정환경을 나타낸 사진으로서 지하 터널 벽에

붙어 있는 송신 시스템과 지하철 내 승객 의자에 설치된 수신 시스템, 터널 환경을 나타내고 있다. 지하철이 이동하면서 차량내의 수신 시스템이 송신 시스템으로부터의 전파 신호를 측정하는 형태를 가지고 있으며, 수신 시스템의 안테나는 차량 유리에 부착되어 있다.

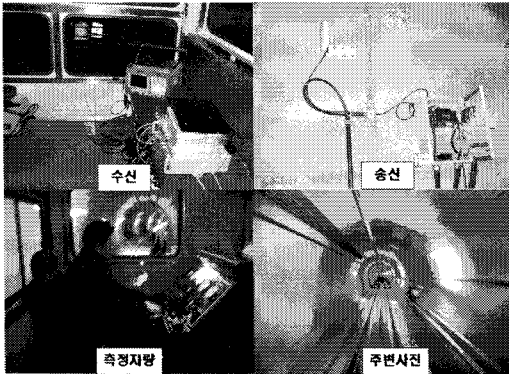


그림 2. 2.4GHz 무선영상 신호 측정 환경  
Fig. 2 Measuring environment of 2.4GHz wireless image signal

### III. 2.4GHz 무선영상 신호 세기 측정

#### 3.1. 역내 잡음 및 혼신 측정

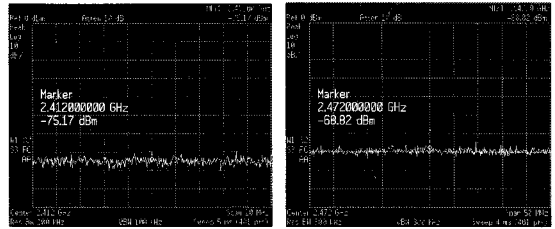
대전지하철 1호선 역내 무선영상 전송시스템 사용 주파수 대역인 2.4GHz 대역의 평균 잡음레벨과 주변에 위치한 열차무선 TRS 시스템 등 타 시스템에 대한 전파혼신 가능성에 대한 측정을 수행하기 위하여 서대전 네거리 및 정부청사역에서 무선영상신호의 출력 여부에 따른 신호 변화를 측정하였다.

표 2. 지하철 역내 잡음 신호 측정

Table 2. Noise level measurement in subway stations

구분	역사번호	주파수 [MHz]	비고	평균 잡음레벨
상선	107 (서대전 네거리)	2412	전파혼신 및 타 시스템 영향없음	-85dBm
하선	112 (정부청사역)	2472	전파혼신 및 타 시스템 영향없음	-87dBm

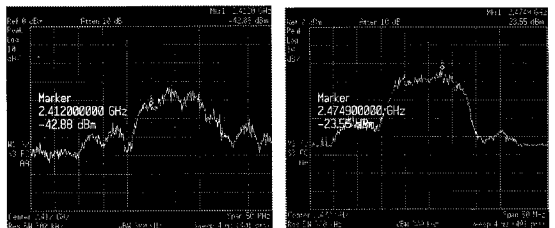
표 2는 정부청사역 및 서대전 네거리 역에서 타 시스템으로부터의 전파 혼신 영향을 측정된 결과이다. 표에서 보는 바와 같이 스패너 50MHz인 창에 나타난 잡음 레벨이 -85dBm 이상으로 타 시스템으로부터의 간섭 신호는 검출되지 않는다.



(a) 107 station (b) 112 station

그림 3. 지하철역별 2.4GHz 대역 잡음 레벨 분포  
Fig. 3 2.4GHz band noise level distribution for each subway station.

그림 4는 운행 중인 열차가 무선영상 신호를 송수신하고 있을 때의 신호를 측정된 스펙트럼으로서, 역내 무선영상 전송시스템은 열차가 운행 중일 때 서로 통신이 이루어지므로 열차가 운행하지 않을 때의 레벨 분포는 잡음 레벨 특성과 거의 같다.



(a) 107 station (b) 112 station

그림 4. 지하철역별 2.4GHz 무선영상 신호 레벨 분포  
Fig. 4 2.4GHz wireless image signal distribution for each subway station.

#### 3.2. 역사별 무선영상 전송시스템 전파 신호 측정

##### 3.2.1 판암역

대전 지하철 1단계 종착역인 판암역은 대전 남동부 끝부분에 위치한 곡선 역으로서 측정은 그림 5와 같이 송신기에서 400m 떨어진 지점에서부터 시작하였으며, 측정 시작점으로부터 100m 떨어진 지점에서 200m 지점까지 약 100m 길이에 플랫폼이 위치해 있다.

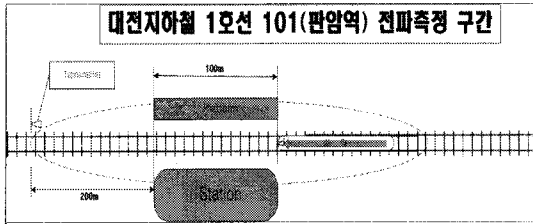
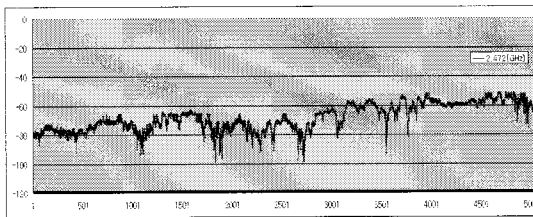
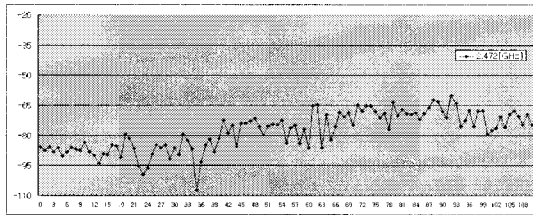


그림 5. 판암역 터널의 측정 환경

Fig. 5 The measuring environment of Pan-am station



(a) Measured data with field strength meter



(b) Measured data with spectrum analyzer

그림 6. 판암역에서의 각 측정기에 따른 측정 결과  
Fig. 6 Measured data to each measuring receiver at the Pan-am station tunnel

완만한 곡선역 구간인 판암역은 직선역 구간에 비해 직접파를 제외한 다중경로 파의 크기가 상대적으로 작기 때문에 수신기에 도래하는 도래파가 우세파와 비교적 작은 크기의 다중경로파가 존재하는 Rician분포를 가지므로 페이딩 신호의 변화가 크지 않다. 즉, 그림 6에서 깊은 페이드의 크기가 최대 30dB가 되나 깊은 페이드 발생 빈도가 낮은 것을 볼 수 있으며, 경로손실 지수는 1.6이며 신호 변화에 대한 표준편차는 5.89로서 비교적 크게 나타난다.

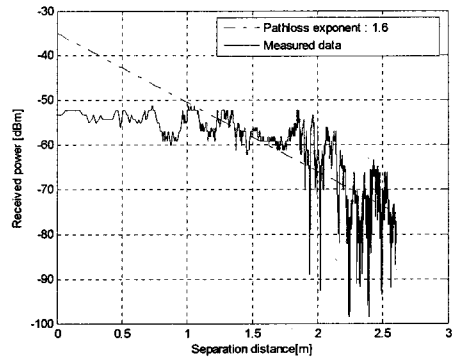


그림 7. 판암역 측정 데이터의 경로손실 지수  
Fig. 7 Path loss exponent for the measured data at the Pan-am station.

### 3.2.2 신흥역

판암역과 대동역 사이에 있는 신흥역은 직선역으로서 철로 양쪽에 플랫폼이 위치해 있기 때문에 불규칙한 전파 장애물이 많아 전파 환경이 좋지 않다. 측정은 송신기에서 400m 떨어진 지점에서부터 시작하였으며, 플랫폼은 측정 시작점으로부터 200m 떨어진 지점에서 300m 지점까지 약 100m 길이에 위치해 있다. 신흥역에서는 플랫폼 주변에 위치한 열차승객을 포함한 다수의 산란체(기둥, 매점 등)가 불규칙적인 수신신호 레벨을 발생시켜 플랫폼에서 신호의 변화가 심하였다. 그림 8은 전계강도 측정기를 이용한 측정 데이터를 나타내며 플랫폼이 위치한 구간에서 신호 변화 현상이 심하게 발생하는 것을 볼 수 있다.

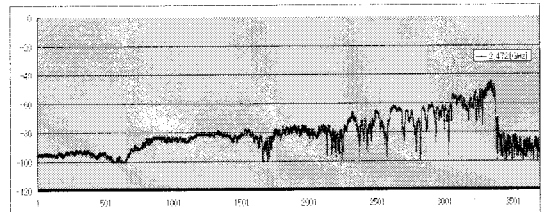


그림 8. 신흥역에서의 각 측정기에 따른 측정 결과  
Fig. 8 Measured data to each measuring receiver at the Sin-hung station tunnel

그림 8에서 신흥역 구간의 측정 데이터는 판암역 측정 데이터인 그림 6(a)에 비해 매우 짧은 구간에서도 신호 레벨의 변화가 심한 것을 볼 수 있다. 이것은 직선 구

간의 특성상 동일한 크기와 위상을 가진 다중경로 반사파가 다수 발생함에 따라 위상 변화에 따른 신호 변화가 매우 크게 발생하기 때문이다. 신호의 변화폭은 최대 40dB 이상 되기 때문에 특정 지점에서 무선영상 신호를 놓치는 원인이 된다.

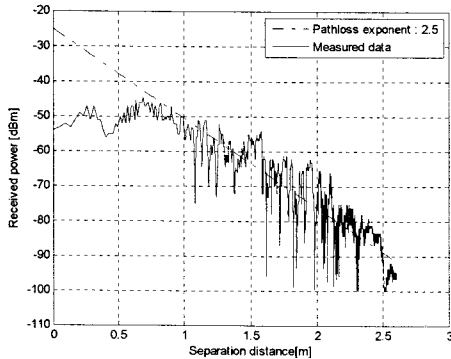


그림 9. 신흥역 측정 데이터의 경로손실 지수  
Fig. 9 Path loss exponent for the measured data at the Sin-hung station.

### 3.2.3 대동역

대전 지하철 1호선 전체 역 가운데 3번째 큰 역이며 이용자가 매우 많은 역으로서 완만한 곡선역 구조를 가지고 있다. 신흥역과 유사하게 측정은 전체 400m 길이의 구간에서 이루어졌으며, 플랫폼으로부터 200m 앞 지점에서 측정을 시작하여 100m 길이의 플랫폼과 이후 100m 까지 측정을 수행하였다.

측정 결과인 그림 10에서 볼 수 있는 바와 같이 신호 변화 현상은 다중경로파가 많이 발생하는 플랫폼 구간에서 신호 변화가 심하게 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 신호 크기가 급격하게 감소하는 지점은 지하철에 탑

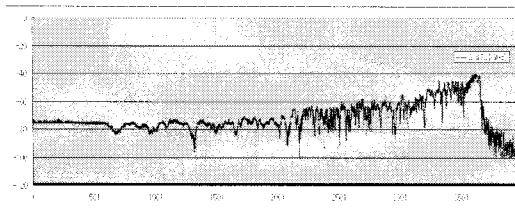


그림 10. 대동역에서의 각 측정기에 따른 측정 결과  
Fig. 10 Measured data to each measuring receiver at the Dae-dong station tunnel

재된 수신 안테나가 송신 안테나를 지나면서 지하철 몸체에 의해 가시거리 경로가 차단되어 회절파가 우세한 환경에서의 전파 현상을 나타낸다.

곡선역인 대동역 측정 구간은 직접파를 제외한 다중 경로 반사파의 크기가 작은 Rician 분포를 가지고 있어 수신기에 도래하는 도래파의 위상차에 의해 나타나는 깊은 페이드 발생 빈도가 적으며 비교적 양호한 신호 형태를 가진다. 즉, 그림 11에서 가장 깊은 페이드의 크기가 25dB 내외로서 판암역에 비해 페이드의 크기가 약 10dB 만큼 작게 나타나며 신호 변화의 표준편차로 4.61dB로서 직선 구간에 비해 작은 값을 가진다.

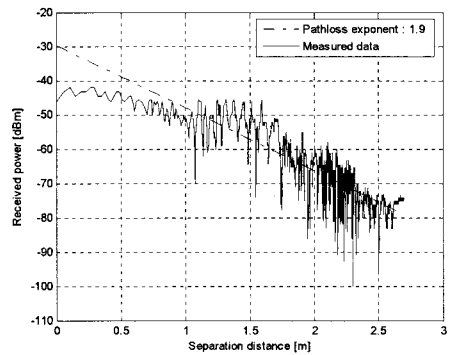


그림 11. 대동역 측정 데이터의 경로손실 지수  
Fig. 11 Path loss exponent for the measured data at the Dae-dong station.

표 3은 각 역에서 측정된 측정 데이터를 이용하여 계산된 경로손실 지수와 신호 변화에 대한 표준편차를 나타낸다. 표에서 직선역으로서 다른 역에 비해 복잡한 내부 구조를 가진 신흥역의 경로손실 지수는 자유공간 경로손실치보다 큰 값인 2.5로 나타났으며, 곡선역인 판암역과 대동역은 자유공간 경로손실 지수보다 작은 1.6과 1.9로 나타나는 것을 볼 수 있다[3,4].

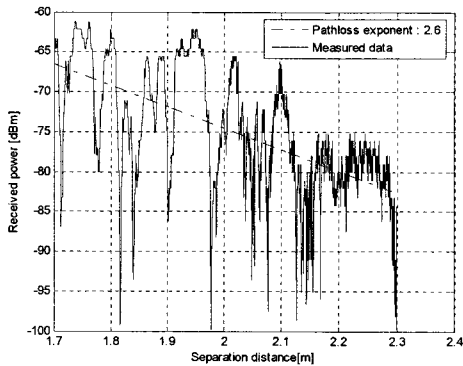
표 3. 지하철역별 경로손실 지수와 표준편차  
Table 3. The path loss exponents and standard deviations for each subway station.

구분	Path loss exponent	standard deviation
판암역	1.6	5.89
신흥역	2.5	5.68
대동역	1.9	4.61

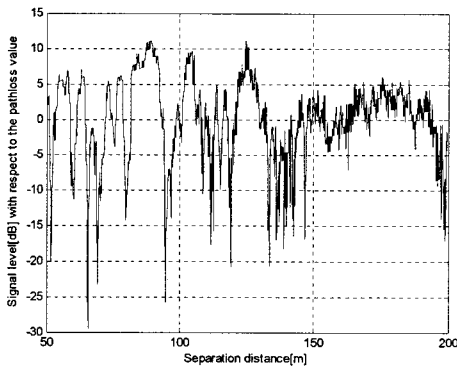
### 3.3. 단구간 페이딩 특성

단구간 페이딩(short term fading)은 인위적 구조물 및 자연적 구조에 의한 다중경로효과 발생요인이 되며, 공간상에서 약 반파장의 주기로 크기가 변동한다. 단구간 페이딩 특성은 레벨 교차율과 페이드 깊이와 넓이 등의 파라미터로 나타낼 수 있으며 이것은 버스트 오류 발생빈도 및 버스트 길이를 추정할 수 있는 중요한 변수가 된다.

각 지하철 역에서의 다중경로파에 의한 단구간 페이딩 현상을 파악하기 위하여 전체 수신 신호 중에서 플랫폼 주변에서의 수신 신호를 이용하여 페이딩 현상을 분석한다. 이를 위하여 플랫폼 주변의 수신 신호(그림 12(a))에서 경로손실치를 제외한 신호(그림 12(b))를 이용하여 레벨 교차율, 페이드 깊이와 페이드 넓이를 계산하여 비교한다.



(a) 플랫폼 주변에서의 수신 신호  
(a) Received signal around the Platform



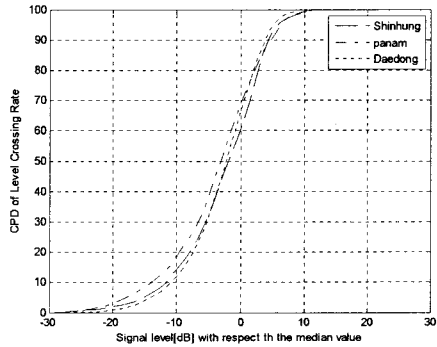
(b) 경로손실 치를 제외한 페이딩 신호  
(b) Fading signal excluding path loss value

그림 12. 플랫폼 주변에서의 2.4GHz 무선영상 신호  
Fig. 12 2.4GHz wireless image signal near the Platform

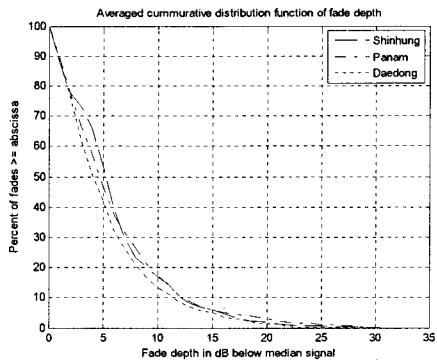
#### 3.3.1 레벨 교차율

페이딩 신호의 포락선은 때때로 페이드의 깊이가 매우 심하게 나타날 수 있으며 페이드의 깊이가 얕으면 알수록 포락선의 변화는 더욱 빈번하게 발생된다. 이러한 특성을 정량적으로 나타낸 것을 레벨 교차율이라 하며 특정 레벨에서 양의 기울기를 가지고 교차하는 페이딩 신호의 교차수로 표현된다.

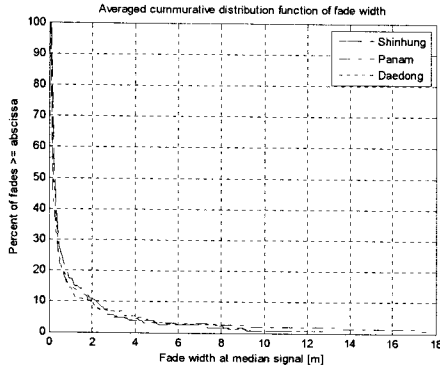
그림 13(a), (b) 및 (c)는 각 구간에서의 페이드 깊이, 페이드 넓이 및 레벨 교차율에 대한 누적 분포를 나타낸다. 그림 13(a)는 레벨 교차율의 누적 확률 분포로서 횡축은 측정된 신호의 중앙치에서 각 순시치를 뺀 신호치를 나타내며 약 -3dB 지점에서 최대 레벨 교차율이 생긴다. 각 지하철 역에 대하여 신흥역과 대동역에서의 측정 결과에 대한 레벨 교차율은 서로 유사하며, 판암역에서의 측정 신호가 낮은 레벨에서 교차 빈도가 높게 발생하는 것을 볼 수 있다.



(a) 레벨 교차율  
(a) Level crossing rate



(b) 페이드 깊이  
(b) Fade depth



(c) 페이드 깊이  
(c) Fade width

그림 13. 지하철역별 2.4GHz 무선영상 신호 레벨 분포  
Fig. 13 2.4GHz space image signal distribution for each subway station.

판암역 구간에서 레벨 교차율의 50%에 해당하는 페이드 레벨은 약 -3dB이나 신홍역 및 대동역 구간은 약 -2dB로서 판암역 구간의 페이드가 심하게 발생하며, 페이드 변화폭은 대동역에서 가장 짧게 나타난다.

### 3.3.2 페이드 깊이와 넓이

페이딩 깊이(fade depth)는 특정레벨이하에 위치한 신호최소치와 특정레벨과의 차를 뜻하고 페이딩 넓이(fade width)는 신호가 특정레벨이하에 머물러 있는 시간(거리)를 나타낸다. 따라서 페이딩 깊이가 깊을수록 서로 다른 위상을 가지고 동일한 크기를 가진 다중경로파가 많이 존재하며, 페이딩 넓이가 넓을수록 전파 음영지역이 커지므로 양호한 신호를 수신하지 못할 가능성이 많아진다.

최대 페이딩 깊이는 전체 역에서 약 31dB로 유사하게 나타났으며, 50%지점에서는 신홍역에서 약간 크게 나타났다. 따라서 다중경로 반사파에 의해 큰 영향을 받는 페이딩 현상은 곡선역보다는 직선역에서 크게 발생하므로 직선역 구간에서 통신 불량 상태가 발생할 빈도가 높다는 것을 알 수 있다. 표 3과 4는 페이딩 깊이와 넓이에 대한 측정 결과를 나타낸다.

표 4. 페이드 깊이[%]  
Table 4. Fade depth[%]

구분	5dB	10dB	15dB
신홍역	53.5	17.0	6.2
대동역	47.0	17.1	6.2
판암역	42.5	13.6	5.1

표 5. 페이드 넓이[%]  
Table 5. Fade width[%]

구분	2m	4m	6m
신홍역	10.5	5.1	1.0
대동역	10.0	5.3	2.3
판암역	10.0	5.3	1.0

## IV. 결론

본 논문에서는 지하철용 터널 내에서의 2.45GHz 무선영상 전송 신호의 전파 특성을 파악하기 위하여 신호 현상이 급격하게 변하는 플랫폼을 중심으로 신호 변화 상태를 측정하여 분석하였다.

분석 결과, 직선역 구간인 신홍역 구간에서 비교적 신호 세기가 큰 다중경로파의 생성으로 인해 곡선역 구간에 비해 페이딩 현상에 따른 신호 변화 폭이 크게 나타났으며, 각 지하철역에서의 경로손실 지수는 직선역인 신홍역에서 2.5, 판암역과 대동역에서는 1.6와 1.9으로 비교적 적었다. 50% 지점의 페이딩 깊이와 넓이는 직선역 구간인 신홍역에서 가장 심하였으며, 레벨 교차율은 짧은 페이딩이 빈번하게 발생하는 판암역에서 가장 심하게 나타났다. 따라서 신호 성능에 영향을 주는 페이딩 현상은 곡선역에 비해 직선역에서 더욱 심하게 발생하는 것을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] Y. P. Zhang and Hwang, "Theory of the Radio-wave Propagation in Railway Tunnels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.47, no. 3, pp. 1027-1036, 1998.
- [2] Y. P. Zhang, Z. R. Jiang, T. S. Ng and J. H. Sheng, "Measurements of the Propagation of UHF Radio Waves on an Underground Railway Train," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.49, no. 4, July. 2000
- [3] 김도윤, 조한신, 육종관, 박한규, "Ray-Launching 법을 이용한 2.6GHz대역의 터널내 경로손실 특성 분석", 한국전자파학회 종합학술발표회, 2003.11
- [4] 조한신, 김도윤, 육종관, "지하철 터널 환경에서 2.65 GHz 대역신호의 경로손실 특성", 한국통신학회논문지 vol.31, no. 10A, pp. 1014-1019, 2006. 10

저자소개

송기홍(Ki-Hong Song)



1988년 2월 경북대학교 전자공학과 (공학사)

1990년 2월 경북대학교 전자공학과 (공학석사)

2000년 2월 경북대학교 전자공학과 (공학박사)

1998년 3월~현재: 동의과학대학 정보통신과 부교수

※관심분야: 전파채널모델, 무선망설계, 이동통신 시스템 설계