

터널 환경에서의 전파전파 특성 모델링 연구

Study on Wave Propagation Characteristics Modeling in Tunnel

정원정 · 김태홍 · 한일탁* · 최문영** · 류준규*** · 이호진*** · 백정기

Won-Jeong Jeong · Tae-Hong Kim · Il-Tak Han* · Moon-Young Choi** · Joon-Gyu Ryu*** · Ho-Jin Lee*** · Jeong-Ki Pack

요 약

국내 환경의 경우, 산악 지형이 많은 지형적 특성상 수많은 터널이 존재한다. 터널은 무선 채널 환경 중 대표적인 음영지역으로서 실외 및 실내 환경의 무선 채널과는 다른 특성을 갖기 때문에 터널 환경에서의 안정된 서비스 품질을 확보하기 위해서는 전파 채널의 특성 연구가 필요하다. 특히 위성을 이용한 이동 서비스를 위해서는 터널에 의한 음영지역에서의 정상적인 위성 신호 수신에 필요하며, 이를 위해 Gap-Filler라고 하는 지상 중계기를 운영하게 되는데 이를 이용하기 위해서는 터널 환경에서의 전파전파 특성 분석을 바탕으로 한 Gap Filling 방법 연구가 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 음영 지역에서의 정상적인 위성 신호 수신을 위하여 터널 환경에서의 ISM 대역의 전파전파 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 효율적인 Gap Filling 방법에 대한 연구를 수행하였다.

Abstract

In the domestic environments, there are many tunnels since most of terrains have mountains. To ensure the quality of wireless network service in NLOS environment like tunnels which differ from indoor or outdoor wireless channels, researches on wave-propagation characteristics through such channel are necessary. Especially, in such environment the ground repeater called Gap-Fillers are usually used for satellite mobile services. To make sure that mobile service using satellites in tunnels is available, the research about Gap Filling method is essential. This research is focus on the characterising the wave-propagation through tunnels, to find the appropriate frequency, HPBW of the Gap-Filler antennas, the number of Gap-Fillers, etc. In this paper, we present the effective Gap Filling method in tunnels for ISM band, based on analysis of ray tracing and measurement results.

Key words : Wave Propagation, Tunnel, Gap-Filler, Gap Filling, Ray Tracing

I. 서 론

현재 이동 통신 서비스는 방송과 통신, 무선 랜 등 기존의 다양한 통신 매체가 융합될 뿐만 아니라 언제 어디서나 통신이 이루어질 수 있도록 발전을 거듭해 가고 있다. KTX와 같이 고속으로 이동하는

환경에서 승객에게 멀티미디어 서비스 제공에 대한 수요가 증가하고 있으며, 현재 KTX에서는 지상망을 통해 인터넷 서비스를 제공하고 있다. 그러나 지상망으로는 고속으로 이동하는 KTX에서 광대역 멀티미디어 서비스의 제공에 한계가 있기 때문에 위성을 이용한 위성 방송 및 광대역 멀티미디어 제공 시스

「이 연구는 방송통신위원회의 IT R&D 개발 사업의 일환으로 수행하였음.[2009-S-039-01, 고효율 위성 리터링크 접속 핵심기술 개발].」

충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science and Engineering, Chungnam National University)

*국방과학연구소(Agency for Defence Development)

**전파진흥원(Korea Radio Promotion Agency)

***한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute)

· 논문 번호 : 20090730-13S

· 수정완료일자 : 2009년 9월 7일

템의 개발이 요구되고 있다. 위성을 이용한 시스템의 경우는 터널, 빌딩과 같은 도심지역의 NLOS 지역에서는 서비스의 제공이 중단되는 단점이 있다. 이와 같이 위성 신호를 음영지역으로 전송하여 끊김 없이 서비스를 제공하기 위해서는 터널 환경에 적합한 Gap Filling 기법에 대한 연구 개발이 요구된다.

국내 환경의 경우, 산악 지형이 많은 지형적 특성상 KTX 노선의 약 30% 이상이 터널이다. 터널은 무선 채널 환경 중 대표적인 음영 지역으로서 실외 및 실내 환경의 무선 채널과는 다른 특성^{[1]-[3]}을 갖기 때문에 터널 환경에서의 안정된 서비스 품질을 확보하기 위해서는 전파 채널의 특성 연구가 매우 중요하다. 이러한 전파전파 특성 분석을 바탕으로 하여 터널 환경에서의 적합한 Gap Filling 구조^[4], 사용주파수 및 터널에서의 Gap-Filler 간격 등의 설계 변수를 결정하게 된다.

본 논문에서는 음영 지역에서의 정상적인 위성 신호의 수신을 위하여 ray tracing 기법을 이용한 터널 환경에서의 ISM 대역의 전파전파 특성 분석 및 Gap Filling 방법을 분석하고 측정 결과와 비교하였다.

II. Ray Tracing 기법을 이용한 전파 특성 분석

2-1 Ray Tracing 기법

실제 터널 환경에서의 전파전파 특성을 이론적으로 분석하는 것은 터널 모양이 단순하지 않기 때문에 매우 어렵다. 따라서 실제 터널에 대한 전파전파 특성 분석은 ray tracing 기법을 이용하여 분석하였다^{[5]-[9]}. 본 논문에 사용된 ray tracing 기법은 정확한 이론적 바탕을 가지고 있으면서 복잡한 구조물에 대하여도 비교적 간단히 적용할 수 있는 광학적 방법을 이용한 예측 모델로서 터널 내부에서의 다중 반사를 고려하였다.

송신기를 출발한 광선은 터널 내의 벽과 기차와 같은 장애물에 부딪치게 되면 반사, 투과 그리고 모서리에 의한 회절을 일으키게 된다. 이러한 현상에 의하여 광선은 두 개 또는 여러 개의 광선들로 나뉘게 되고, 각 광선의 전파 경로에 또 다른 장애물이 놓여 있으면 이 광선들은 다시 위와 같은 현상에 의해 여러 개의 광선으로 나누어져서 진행하게 된다.

터널 내부의 벽면은 시뮬레이션에서 사용할 ISM 대역 주파수 파장에 비하여 매끄러우므로 표면 거칠기에 의한 불규칙적인 산란을 무시할 수 있다. 모서리에서의 회절 현상은 UTD(Uniform Theory of Diffraction) 방법을 이용하면 고려할 수 있으나, 터널 내부 환경에서는 그 영향이 크지 않아 고려하지 않았다.

수신기에서 수신되는 전파는 다중 경로 반사를 거친 광선이 정의된 수신 반경내로 들어오는 광선만을 수신 안테나에 의해 포착되는 것으로 간주하였다.

2-2 경로 손실 및 지연 분산 특성 계산

먼저 반사파의 경우 입사 전기장의 세기를 1로 가정할 경우, 반사파의 경로에 대한 송·수신점 사이의 거리를 r_m 이라 할 때 m 번째 경로에 의한 수신 전기장 E_m^r 은 다음과 같이 주어진다^[10].

$$E_m^r = \frac{\lambda \Gamma_m}{4\pi r_m} e^{-jkr_m} \quad (1)$$

위 식에서 Γ_m 은 m 번째 경로에 의한 전체 반사계수를 나타낸다. 직접파의 경우 식 (1)에서 Γ_m 이 1일 경우 다음과 같이 수신 전기장이 주어진다.

$$E^i = \frac{\lambda}{4\pi r} e^{-jkr} \quad (2)$$

따라서 m 번째 경로에서 K 번의 반사가 있는 경우 전체 수신 전기장에 대한 일반 표현은 다음과 같다.

$$E = E^i + \sum_m \left(\prod_{k=1}^K E_{mk}^r \right) \quad (3)$$

본 연구에서는 수신 포인트의 수신 반경에 들어오는 모든 광선에 대해 식 (3)을 이용하여 전기장 값을 합하고 이로부터 경로 손실을 계산하였다. 터널 내에서는 회절에 의한 광선 성분이 없기 때문에 경로 손실 계산시 회절 부분은 고려하지 않았다.

지연 분산 특성은 각 광선의 지연 시간에 따른 delay profile로부터 구할 수 있는데 아래의 식 (4)를 이용하여 계산하였다. P_n 은 지연 시간이 τ_n 인 광선의 전력값을 나타낸다^[11].

$$\Delta = \frac{\sqrt{\sum_n P_n \sum_n P_n \tau_n^2 - (\sum_n P_n \tau_n)^2}}{\sum_n P_n} \quad (4)$$

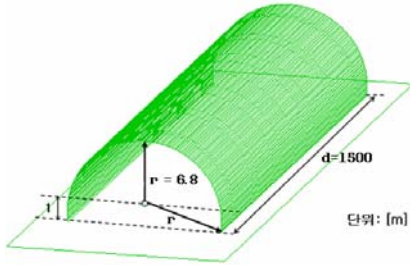


그림 1. 원형 터널 모델링
Fig. 1. Modeling of circular tunnel.

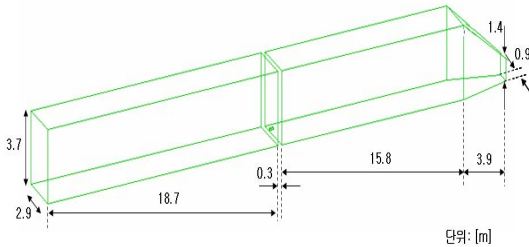


그림 2. 시뮬레이션용 기차 모델링
Fig. 2. Train model for the simulation.

III. 시뮬레이션 및 측정 결과 분석

3-1 모델링

Ray tracing 기법을 이용한 터널 환경에서의 전파전파 특성 분석을 위해서는 터널과 기차에 대한 모델링이 필요하다. 터널은 비유전율과 전도율이 $\epsilon_r = 5.0$, $\sigma = 0.1$ s/m이며, 42 cm 두께의 콘크리트로 이루어진 반지름 6.8 m, 길이 1.5 km의 반구 형태로 모델링하였으며, 3차원 구조로 모델링한 결과는 그림 1에 나타내었다.

또한 기차의 위치에 따른 영향을 분석하기 위하여 비유전율과 전도율이 각각 $\epsilon_r = 1.0$, $\sigma = 10^{-7}$ s/m이며, 두께가 5 cm, 한 량의 길이가 18.7 m, 총 16 량인 기차로 모델링하였다. 모델링한 결과는 그림 2에 나타내었다.

3-2 시뮬레이션 결과 분석

3-2-1 터널 내에 기차가 위치하지 않을 경우

터널 내에 전파 특성 분석을 위하여 터널 내에 기차가 위치하지 않을 경우에 대한 시뮬레이션을 수행

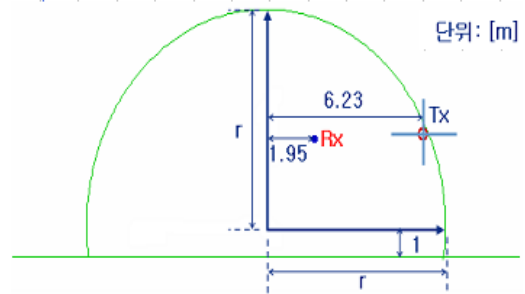


그림 3. 터널 내 송·수신 안테나 배치
Fig. 3. Location of the transmitting and the receiving antenna in the tunnel.

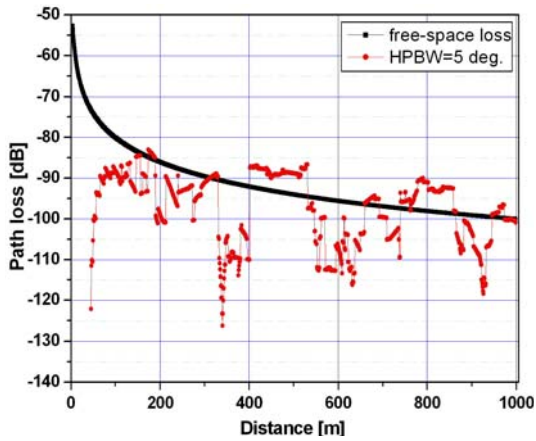
하였다. 터널 안에서의 ISM 대역 주파수 2.4, 5.8 GHz에 대한 전파전파 특성을 분석하기 위하여 터널 안에 실제 기차에 부착될 안테나의 높이 3.7 m에 1 m 간격으로 수신점을 위치시키고 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때 송신점의 위치는 높이 4 m의 터널 벽면으로부터 20 cm 떨어진 곳에 위치시켰으며, 각각 반전력 빔 폭(HPBW: Half Power Beam Width)이 30°, 17°, 5°가 되는 uniform circular aperture 안테나를 사용하였다. 송신점과 수신점은 그림 3에 보인 것과 같이 터널 내에 위치시켰다.

그림 4와 5는 송·수신 안테나가 동일한 반전력 빔 폭을 가질 때의 시뮬레이션 결과로서 2.4와 5.8 GHz에서의 송·수신 안테나의 반전력 빔 폭에 따른 경로 손실 값을 나타낸 것이다.

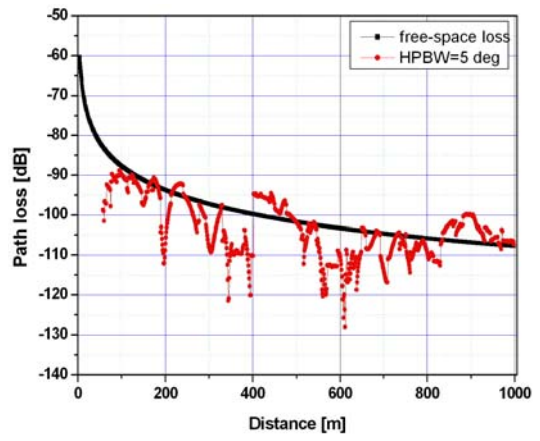
시뮬레이션 결과를 분석해 보면 반전력 빔 폭이 5°인 경우에는 좁은 빔 폭의 영향으로 반전력 빔 폭이 17°, 30°인 경우에 비하여 수신 레벨의 차이가 상대적으로 많이 나는 것을 확인할 수 있다.

길이가 r 인 전파 경로에 대한 electric length는 주파수의 함수이나 경로에 대한 지연 시간은 전파 경로를 전파 속도로 나눈 값이기 때문에 지연 시간은 경로 길이와 전파 경로 상의 매질 특성의 함수로 주파수와는 무관하다. 따라서 송·수신 안테나의 빔 폭에 따른 delay profile을 분석하였다. 그림 6은 송·수신 안테나의 반전력 빔 폭이 30°인 경우에 대한 터널 내 300, 600 m 지점에서 기차가 없을 때의 전형적인 delay profile 특성을 나타낸 것이다.

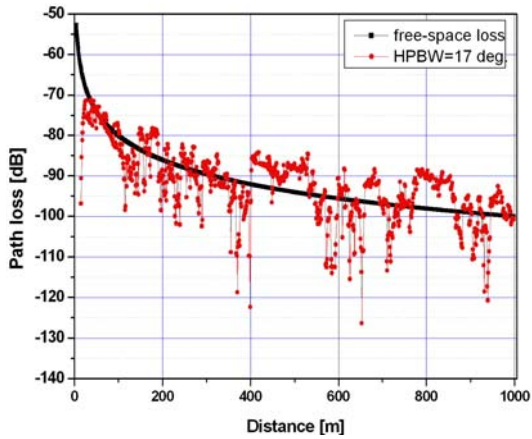
그림 7은 기차가 터널 내에 위치하지 않을 경우에 송신 안테나의 반전력 빔 폭에 따른 지연 분산 특성을 나타낸 것이다.



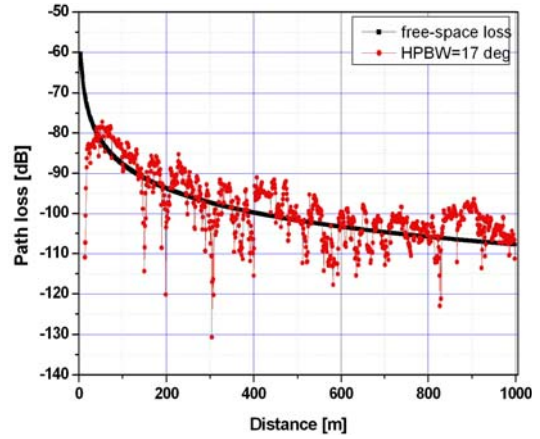
(a) 반전력 빔 폭: 5°
(a) HPBW: 5°



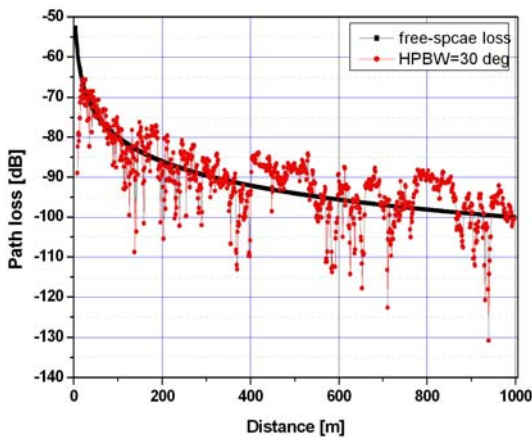
(a) 반전력 빔 폭: 5°
(a) HPBW: 5°



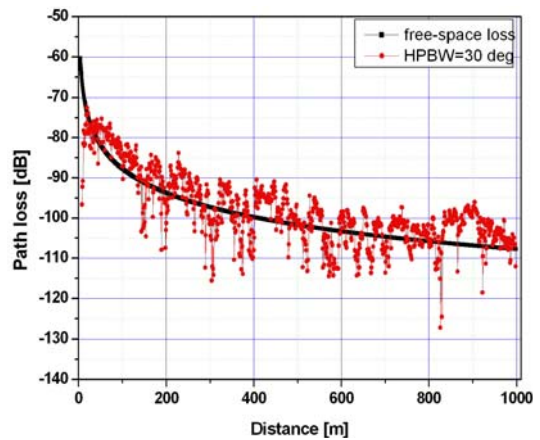
(b) 반전력 빔 폭: 17°
(b) HPBW: 17°



(b) 반전력 빔 폭: 17°
(b) HPBW: 17°



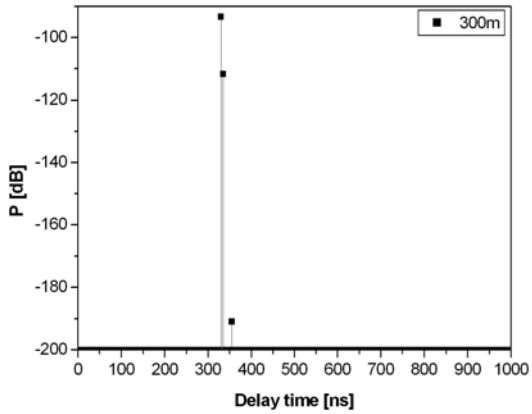
(c) 반전력 빔 폭: 30°
(c) HPBW: 30°



(c) 반전력 빔 폭: 30°
(c) HPBW: 30°

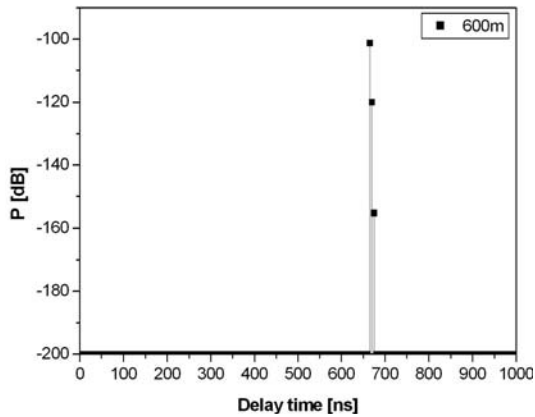
그림 4. 반전력 빔 폭에 따른 경로 손실(2.4 GHz)
Fig. 4. Path loss for different HPBW's(2.4 GHz).

그림 5. 반전력 빔 폭에 따른 경로 손실(5.8 GHz)
Fig. 5. Path loss for different HPBW's(5.8 GHz).



(a) 300 m

(a) 300 m



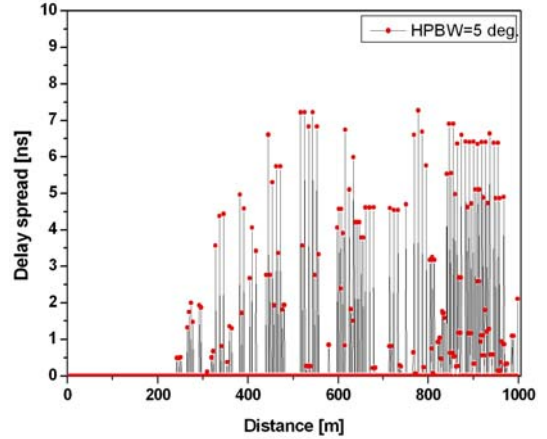
(b) 600 m

(b) 600 m

그림 6. 송신점으로부터의 거리에 따른 delay profile 변화(2.5, 5.8 GHz)

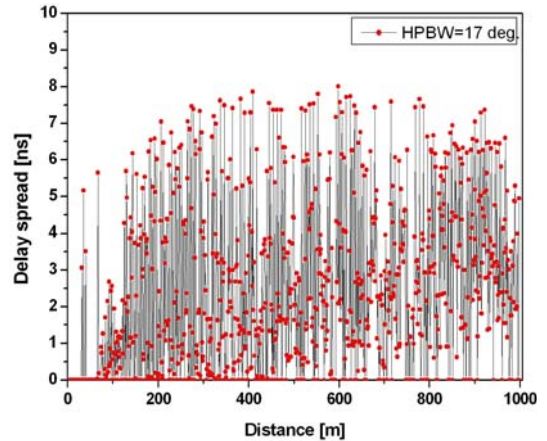
Fig. 6. Delay-profile dependence on the distance from the transmitting antenna(2.5, 5.8 GHz).

앞서 터널 환경에서의 전파전파 특성을 분석하기 위하여 송·수신 안테나가 동일한 반전력 빔 폭을 가질 경우를 고려하였다. 그러나 실제 Gap-Filler와 기차에 부착될 안테나의 반전력 빔 폭은 서로 다를 수가 있으며, 이 경우에 대한 터널 환경에서의 전파전파 특성을 분석하기 위해 송·수신 안테나의 반전력 빔 폭이 서로 다른 경우를 고려하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션은 송신 안테나의 반전력 빔 폭이 30°일 때 수신 안테나의 반전력 빔 폭이 5°와 17°일 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 8 과 9는 각각 주파수 2.4와 5.8 GHz에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.



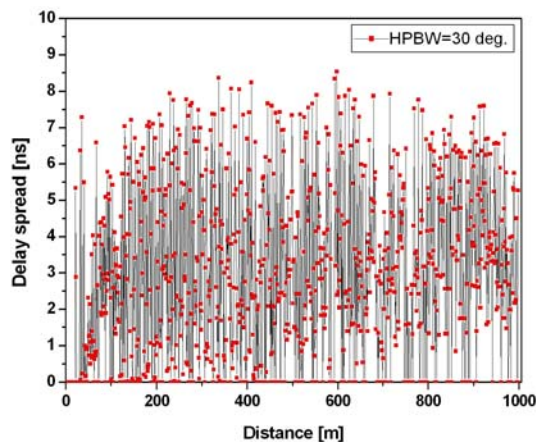
(a) 반전력 빔 폭: 5°

(a) HPBW: 5°



(b) 반전력 빔 폭: 17°

(b) HPBW: 17°

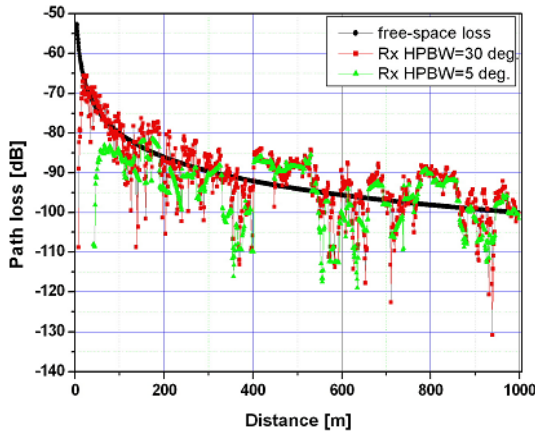


(c) 반전력 빔 폭: 30°

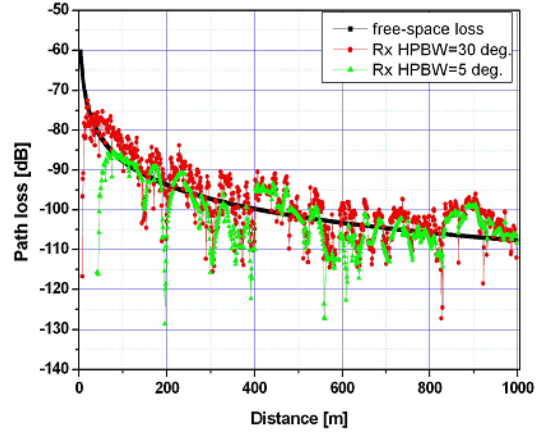
(c) HPBW: 30°

그림 7. 지연 분산 특성(2.4, 5.8 GHz)

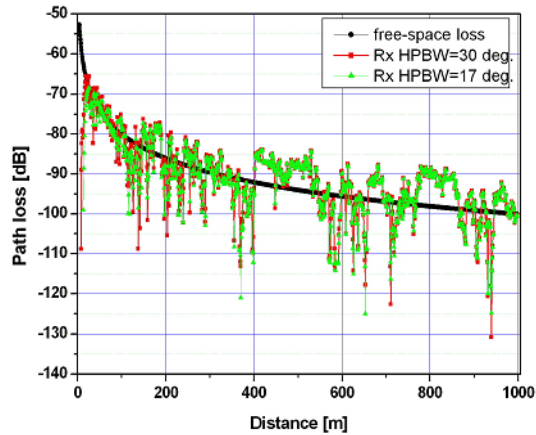
Fig. 7. Delay spread characteristics(2.4, 5.8 GHz).



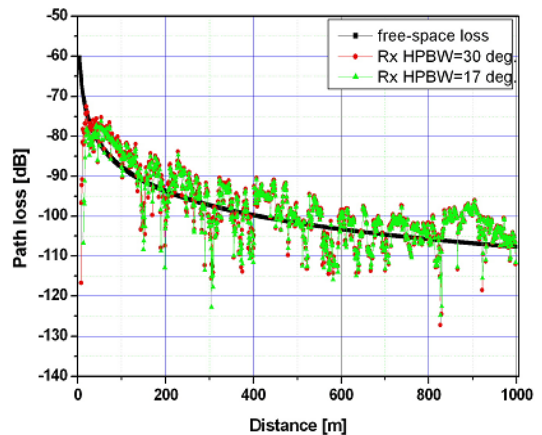
(a) 송신 HPBW: 30°, 수신 HPBW: 5°
(a) Tx HPBW: 30°, Rx HPBW: 5°



(a) 송신 HPBW: 30°, 수신 HPBW: 5°
(a) Tx HPBW: 30°, Rx HPBW: 5°



(b) 송신 HPBW: 30°, 수신 HPBW: 17°
(b) Tx HPBW: 30°, Rx HPBW: 17°



(b) 송신 HPBW: 30°, 수신 HPBW: 17°
(b) Tx HPBW: 30°, Rx HPBW: 17°

그림 8. 송수신 안테나 반전력 빔 폭이 다를 경우의 경로 손실 특성(2.4 GHz)

Fig. 8. Path loss characteristics for different Tx and Rx antenna HPBW's(2.4 GHz).

그림 9. 송수신 안테나 반전력 빔 폭이 다를 경우의 경로 손실 특성(5.8 GHz)

Fig. 9. Path loss characteristics for different Tx and Rx antenna HPBW's(5.8 GHz).

시뮬레이션 결과, 수신 안테나의 반전력 빔 폭이 다를 경우, 거리에 따른 수신 레벨의 경향은 비슷하지만, 송신 안테나의 반전력 빔 폭이 30°이고, 수신 안테나의 반전력 빔 폭이 5°일 경우, 송신 안테나와 동일한 반전력 빔 폭을 가지는 수신 안테나일 경우에 비하여 좁은 안테나 빔 폭의 영향으로 수신 레벨의 차이가 상대적으로 많이 나는 것을 확인할 수 있다.

3.2-2 터널 내에 기차가 위치할 경우

기차가 터널 내에 위치할 경우, 기차의 위치에 따른 수신점의 경로 손실 특성을 분석하기 위하여 그림

10과 같이 터널 내에 기차를 위치시킨 후 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 결과, 수신점이 이동하는 기차의 앞부분 지붕에 위치하기 때문에 기차가 송신점이 위치한 곳으로 이동할 경우 기차 본체가 수신 레벨에 영향을 주지 않음을 확인할 수 있었다.

또한, 터널에서 기차 2대가 양 방향으로 진행하는 경우 수신 레벨의 변화를 분석하기 위하여 그림 11과 같이 기차를 송신 안테나의 반대쪽 차선(300~600 m)에 위치시킨 후 시뮬레이션을 수행하였다.

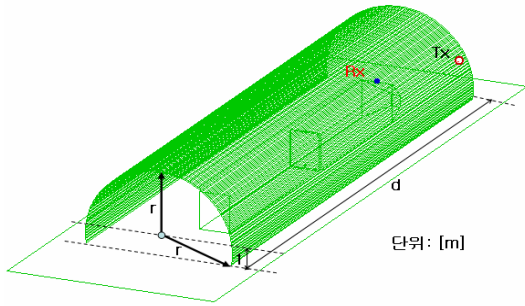


그림 10. 터널 내에 기차가 위치한 구조
Fig. 10. Structure with a train positioned in the tunnel.

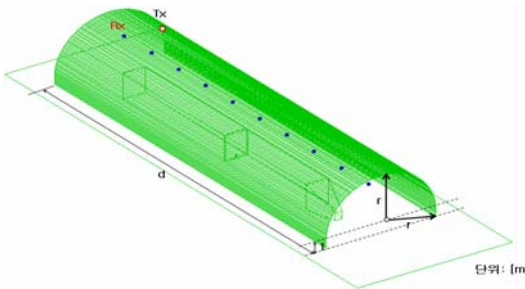
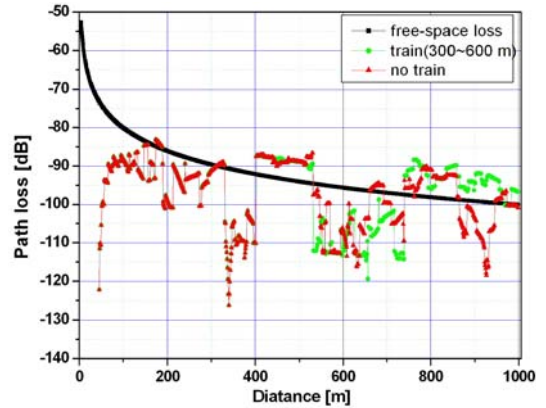


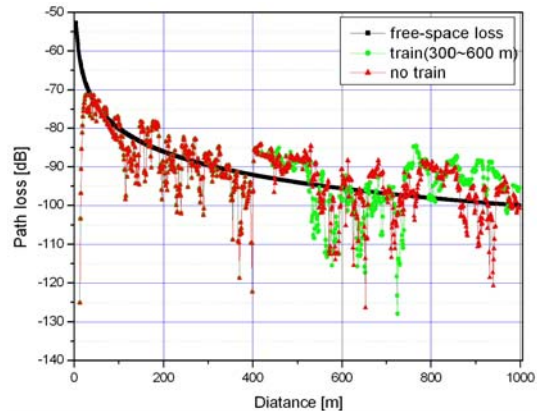
그림 11. 송신 안테나 반대 차선에 기차가 위치한 구조
Fig. 11. Structure with a train positioned in the opposite lane of the transmitting antenna.

그림 12와 13은 주파수와 송신 안테나의 반전력 빔 폭에 따른 경로 손실을 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과, 반대편 차선에 기차가 없을 경우에 대한 경로 손실 특성과 비교해 볼 때, 약 700 m 이상의 거리에서 수신 레벨이 다소 증가하였음을 알 수 있다. 이는 기차에 의한 반사파가 터널 벽면에 의한 반사파의 크기보다 크기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 반대편 차선의 기차에 의해 통신의 끊김이 발생하지 않을 것으로 판단된다.

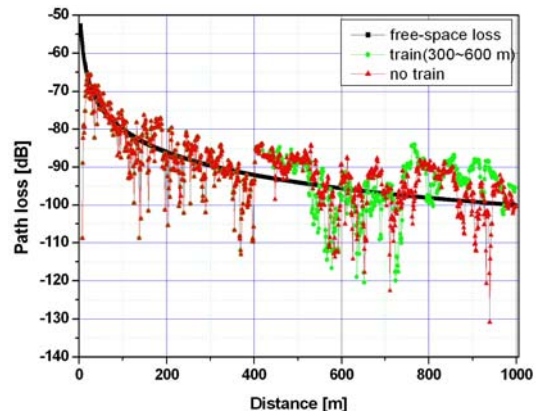
본 논문에서는 주파수, 안테나 반전력 빔 폭 그리고 기차의 유무 등 다양한 파라미터를 고려하여 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과를 종합해 보면 5.8 GHz에서의 경로 손실이 2.4 GHz보다 더 큰 것을 확인하였고, 반전력 빔 폭이 작은 경우(5°)에는 송·수신 안테나간 거리가 가까운 곳에서는 상대적으로 수신이 잘 되지 않음을 확인하였다. 또한 터널 내부에 위치한 기차의 영향으로 인한 수신 레벨의 변화는 그 영향이 크지 않음을 확인하였다.



(a) 반전력 빔 폭: 5°
(a) HPBW: 5°

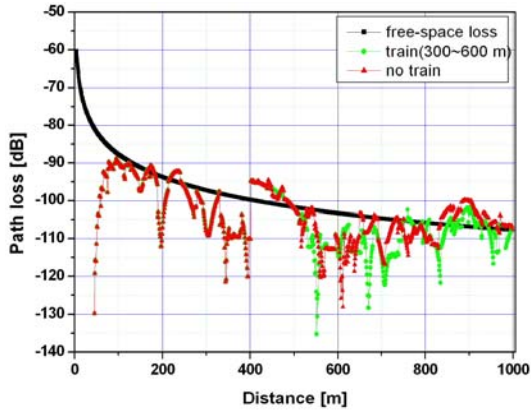


(b) 반전력 빔 폭: 17°
(b) HPBW: 17°

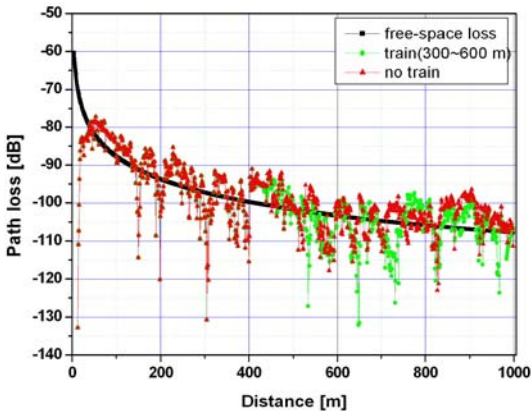


(c) 반전력 빔 폭: 30°
(c) HPBW: 30°

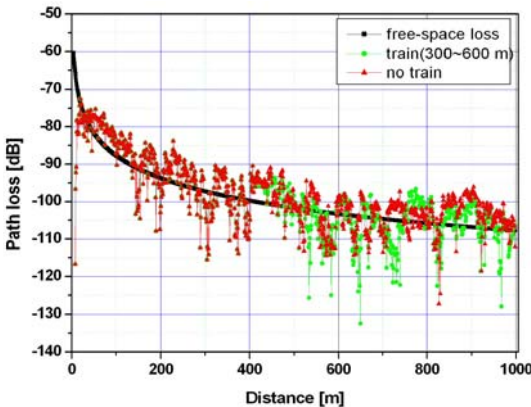
그림 12. 반대편 차선에 기차가 위치할 경우의 경로 손실 변화(2.4 GHz, 기차 위치 300~600 m)
Fig. 12. Variation of the path loss when the train positioned in the opposite lane(2.4 GHz).



(a) 반전력 빔 폭: 5°
(a) HPBW: 5°



(b) 반전력 빔 폭: 17°
(b) HPBW: 17°



(c) 반전력 빔 폭: 30°
(c) HPBW: 30°

그림 13. 반대편 차선에 기차가 위치할 경우의 경로 손실 변화(5.8 GHz, 기차 위치 300~600 m)
Fig. 13. Variation of the path loss when the train positioned in the opposite lane(5.8 GHz).



그림 14. 실제 터널 환경에서의 전파전파 특성 측정
Fig. 14. Measurement of wave-propagation characteristics in the actual tunnel.

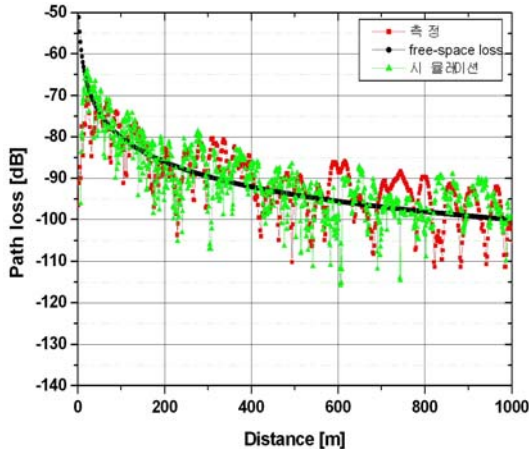
3-3 측정 결과 분석

실제 기차 터널 환경에서의 전파전파 특성 측정은 매우 어렵기 때문에, 그림 14와 같이 반지름 6.8 m인 안성 - 음성간에 있는 고속도로 터널에서 실시하였다. 터널 내부에 송신 안테나와 신호 발생기(Agilent 83640L)를 설치하고, 수신 안테나와 스펙트럼 분석기(Agilent 8564E) 등을 탑재한 차량을 등속으로 이동하면서 VEE 프로그램을 통해 1초 간격으로 수신되는 신호의 세기를 측정하여 터널 내부의 전파전파 특성을 확인하였다. Gap-Filler는 벽면에서 20 cm 떨어진 곳에서 터널 내부를 향하도록 설치하였으며, 차량에서의 수신 안테나는 지면으로부터 3.5 m 높이가 되도록 설치하였다. 2.4 GHz 대역은 standard horn antenna의 크기가 커서 Teletronics사의 yagi antenna를 사용하였고, 이득은 15 dBi, 반전력 빔 폭은 28°이다. 5.8 GHz 대역은 이득이 20 dBi, 반전력 빔 폭은 31°인 Pasternack사의 standard horn antenna(PE9860)를 사용하여 측정하였다.

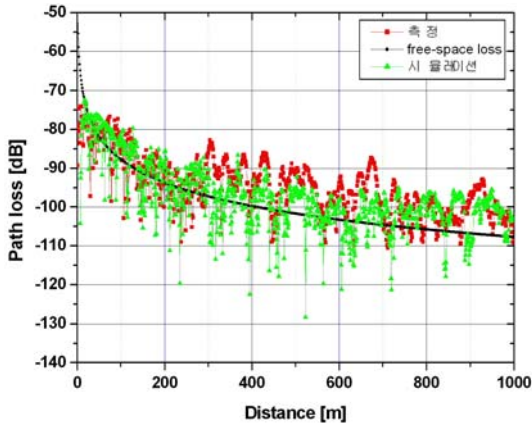
표 1. 측정 결과와 시뮬레이션 결과 비교

Table 1. Comparison of the simulation and measurement results.

주파수	환경	최저 (dB)	최고 (dB)	평균 (dB)	중간값 (dB)	표준편차 (dB)
2.4 GHz	Measurement	-111.3	-70	-91.11	-91.5	8.344
	Simulation	-111.5	-64.64	-91.38	-92.36	8.735
5.8 GHz	Measurement	-110.5	-73.75	-94.84	-94.83	7.409
	Simulation	-128.4	-72.44	-95.72	-98.65	8.353



(a) 2.4 GHz



(b) 5.8 GHz

그림 15. 측정 결과와 시뮬레이션 결과 비교
Fig. 15. Comparison of the simulation and measurement results.

그림 15는 2.4와 5.8 GHz에서의 경로 손실 값에 대한 측정 결과와 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이고, 표 1은 측정 결과와 시뮬레이션 결과의 각 파라미터를 산출하여 비교한 것이다. 비교 분석 결과, 측정 결과와 시뮬레이션 결과가 거의 비슷함을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

터널 환경에서의 전파전파 특성 분석에는 이론 모델을 사용하기가 어렵기 때문에 본 연구에서는 ray tracing 기법을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였고 측정 결과와 비교하였다. 모델링된 터널 환경과

기차 구조를 이용한 시뮬레이션을 통해 ISM 대역 주파수 2.4, 5.8 GHz에 대하여 송신 안테나 빔 폭과 기차의 위치에 따른 경로 손실, delay profile 및 delay spread 특성을 분석하였다. 고려 대상 시스템의 sensitivity를 고려할 경우 전파 특성 분석에 의한 Gap filler의 최적 배치를 고려할 때 주파수 대역은 2.4 GHz 대역이 좋으며, Gap-Filler와 기차에 부착될 안테나의 반전력 빔 폭은 down-link(Gap-Filler에서 기차의 안테나로)와 up-link(기차의 안테나에서 Gap-Filler로)를 고려할 경우 30°가 적당함을 알 수 있었다.

본 논문의 터널 환경에서의 전파전파 특성 연구 결과는 이동형 위성 통신 서비스의 상용화에 따른 신뢰성 있는 장비 개발에 활용되고 있다.

참 고 문 헌

- [1] 최명선, 김도윤, 조한신, 문철, 육종관, 박한규, "지하철 터널 환경에서 2.65 GHz 대역 신호의 전파 전파 특성", 한국전자과학회논문지, 16(5), pp. 541-548, 2005년 5월.
- [2] Y. Kasashima, J. Hirai, "Analysis of propagation characteristics of radio waves in tunnels", *IEEE International Symposium on EMC '03*, vol. 1, pp. 664-667, May 2003.
- [3] Y. P. Zhang, Y. Hwang, "Theory of the radio - wave propagation in railway tunnels", *IEEE Trans. On Vehicular Technology*, vol. 47, no. 3, pp. 1027-1036, Aug. 1998.
- [4] Joon-Gyu Ryu, Min-su Shin, S. M. Han, D. J. Jang, and Ho-Jin Lee, "The gap filler technology for mobile satellite system", *Antennas and Propagation International Symposium*, pp. 3033-3036, 2007.
- [5] D. J. Cichon, T. Zwick, "Ray optical modeling of wireless communications in high-speed railway Tunnels", *IEEE VTC 46th Vehicular Technology Conference*, vol. 1, pp. 546-550, Apr. 1996.
- [6] D. Didascalou, M. Dottling, R. Zwick, and W. Wiesbeck, "A novel ray-optical approach to model wave propagation in curved tunnels", *IEEE VTC 50th Vehicular Technology Conference*, vol. 4, pp. 2314-2317, Sep. 1999.

- [7] D. Didascalou, "Ray-density normalization for ray-optical wave propagation modeling in arbitrarily shaped tunnels", *IEEE Trans. on AP.*, vol. 48, no. 9, pp. 1316-1325, Sep. 2000.
- [8] Shin-hon Chen, Shyh-Kang Jeng, "SBR image approach for radio wave propagation in tunnels with and without traffic", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 45, no. 3, pp. 570-578, Aug. 1996.
- [9] D. J. Cichon, T. Zwick, and W. Wiesbeck, "Radio link simulations in high-speed railway tunnels", *ICAPi - 95. Ninth International Conference on Antenna and Propagation*, vol. 2, no. 407, pp. 216-219, Apr. 1995.
- [10] T. Hattori, T. Kato, "The 3-dimensional modeling technique for calculating radio propagation characteristics along railway", *Wireless Personal Multimedia Communications*, vol. 1, pp. 291-295, Oct. 2002.
- [11] Y. P. Zhang, Y. Hwang, and R. G. Kouyoumjian, "Ray-optical prediction of radio-wave propagation characteristics in tunnel environments-Part 2: Analysis and measurements", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 46, pp. 1337-1345, Sep. 1998.

정 원 정



2009년 2월: 충남대학교 전자전파
정보통신공학부 (공학사)
2009년 3월~현재: 충남대학교 전
파공학과 석사과정
[주 관심분야] 전자파 전파 및 산
란, 전파전파 특성 예측 모델링

한 일 탁



2006년 2월: 충남대학교 전자전파
정보통신공학부 (공학사)
2008년 2월: 충남대학교 전파공학
과 (공학석사)
2008년 3월~현재: 국방과학연구소
연구원
[주 관심분야] 전자파 전파 및 산란,
전파전파 특성 예측 모델링

김 태 홍



1997년 2월: 전남대학교 전자공학
과 (공학사)
1999년 2월: 전남대학교 전자공학
과 (공학석사)
2005년 2월: 전남대학교 전자정보
통신공학과 (공학박사)
2002년 5월~2006년 2월: 전남대학
교 고품질전자전자부품 및 시스템 연구센터 전문연구요
원
2006년 3월~현재: 충남대학교 전자파환경기술연구센터
연구교수
[주 관심분야] 전자파수치해석, 수동소자 설계

최 문 영



2007년 2월: 충남대학교 전자전파
정보통신공학부 (공학사)
2009년 2월: 충남대학교 전파공학
과 (공학석사)
2009년 6월~현재: 전파진흥연구원
연구원
[주 관심분야] 전자파 전파 및 산란,
전파전파 특성 예측 모델링

류 준 규



팀

1999년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
2001년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
2001년 3월~현재: 한국전자통신연구원 선임연구원
[주 관심분야] 위성통신, 방송시스템

백 정 기



연구소

1978년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1985년 9월: Virginia Tech. 전자과전과 (공학석사)
1988년 9월: Virginia Tech. 전자과전과 (공학박사)
1978년 3월~1983년 2월: 국방과학연구소
1988년 10월~1989년 2월: 한국전자통신연구원
1989년 3월~1995년 2월: 동아대학교 전자공학과 부교수
1995년 2월~현재: 충남대학교 전자공학과 교수
2002년 3월~현재: 충남대학교 전자파환경기술연구(EM-ERC) 센터장
2009년 1월~현재: 한국전자파학회 학회장
[주 관심분야] 전자파 전파, 전자파 산란, 전자파 인체 영향

이 호 진



구원 위성무선융합연구부 부장
[주 관심분야] 위성통신, 방송시스템

1981년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1983년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1990년 2월~현재: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
1983년 6월~현재: 한국전자통신연구원