

TETRA 기반 고속철도 열차무선의 전파 경로손실 특성

배성호¹, 최규형^{1*}

¹서울과학기술대학교 철도전기신호공학과

Path Loss Characteristics of TETRA-based KTX Train Radio Propagation

Sung-Ho Bae¹, Kyu-Hyoung Choi^{1*}

¹Department of Railway Electrical/Signalling Engineering,
Seoul National University of Science and Technology

요 약 경부고속철도 2단계 구간에 도입된 열차무선시스템은 TETRA 기반으로 851MHz 대의 주파수를 사용하고 있다. 이와 같은 열차무선시스템에서 운행중인 차량과 지상과의 끊임없는 정보송수신을 위하여 전파 경로손실을 감안한 기지국 설계가 필수적이다. 본논문에서는 고속철도 선로에서의 측정데이터를 토대로, 열차무선의 전파 경로손실을 정량적으로 분석하였다. 열차무선 기지국 설계에서는 자유공간 전파 경로손실모델 및 Okumura-Hata모델이 사용되고 있는데, 이 모델들에 의한 예측치는 현장측정치보다 10dB 이상 작거나 20dB 이상 크게 나타남에 따라 고속철도 열차무선의 경로손실 예측에는 적합하지 않은 것으로 나타났다. 측정결과를 log-distance 경로손실모델에 적용하여 회귀분석을 수행한 결과 경로손실지수는 2.8 ~ 3.2의 범위로 나타났으며, 이 결과는 향후 고속철도 열차무선에서의 전파 경로손실 예측에 적용할 수 있다.

Abstract Train radio system has been constructed in the second stage of Kyung-bu high speed railway adopting TETRA(Terrestrial trunk radio) standard at 851MHz frequency band. The base stations of the train radio system should be located along railway track to ensure seamless communication between train and wayside taking the path loss of train radio propagation into consideration. This paper provides a quantitative analysis of the path loss characteristics based on the measurement results of the train radio propagation along the high speed railway. The free space propagation model and Okumura-Hata model are generally used for base station design, but they predicted 10dB lower or 20dB higher than the measured path loss. Linear regression of the field measured data by applying the log-distance model shows path loss exponent is in the 2.8-3.2 range, which can be used to predict the path loss of the train radio propagation.

Key Words : KTX train radio, Path loss exponent, Propagation model, TETRA, Trunked radio system

1. 서론

고속철도에는 열차와 지상 간, 열차와 열차 간 또는 지상 상호 간에 정보를 교환하여 열차운전 및 유지보수업무 수행하기 위한 열차무선시스템(TRS : Train Radio System)이 구축되어 있다. 고속으로 주행 중인 열차에서 지상관제센터 및 역과 기지 등과 통신할 수 있는 유일한

수단으로서, 사고상황 보고 및 대책 지시, 승객대피, 안내 방송 등을 가능하게 하여 열차운행의 안전성을 확보해주는 주요 설비로 활용되고 있다[1].

열차무선시스템은 VHF 대역의 아날로그 방식 무전기가 주로 사용되어 왔으나, 최근에는 주파수 효율이 높고 통화품질이 우수한 주파수 공용통신시스템(Trunked Radio System)이 도입되고 있다[2]. 특히 국가재난통신망

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Kyu-Hyoung Choi(Seoul National Univ. of Science and Technology)

Tel: +82-2-970-6873 email: khchoi@seoultech.ac.kr

Received May 7, 2013

Revised May 22, 2013

Accepted June 7, 2013

이 TETRA 기반의 디지털 TRS로 구축됨에 따라, 경부고속철도 2단계 구간인 열차무선시스템도 TETRA 기반으로 구축되었으며 851MHz 대의 주파수를 할당받아 사용하고 있다[3,4].

이상과 같은 열차무선시스템에서 요구되는 통화신뢰도를 확보하기 위해서는 전파 경로손실 산정 및 기지국 설계가 필수적이다. 전파 경로손실은 전파거리가 길어짐에 따라 증가하며, 사용 주파수 및 전파환경, 지형적 조건 등에 따라 크게 차이가 난다[5,6]. 따라서, 고속철도 열차무선시스템 설계를 위해서는, 레일과 침목으로 구성된 고속철도 선로를 따라 이동하는 차상단말기와 중계기지국 간의 전파 환경 및 지형적 조건에 따른 전파 경로손실을 산정하고 기지국 위치를 결정할 필요가 있다[7,8]. 그러나, 고속철도에서의 TETRA 열차무선시스템의 전파 경로손실에 대해서는 아직까지 충분한 연구가 이루어지지 않고 있으며, 자유공간 전파손실모델 또는 Okumura- Hata 모델을 이용하여 경로손실을 산정하고 있다.

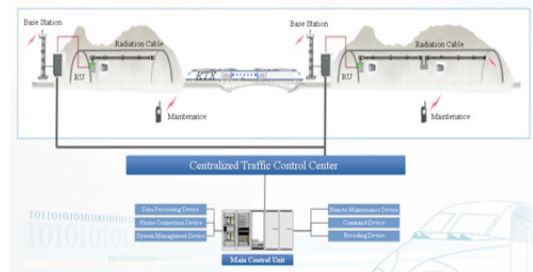
본 논문은 고속철도에 도입되고 있는 TETRA 방식 열차무선시스템의 851MHz 전파에 대한 경로손실 특성을 분석하였다. 이를 위해, 경부고속철도 2단계 구간의 TETRA 방식 열차무선시스템에서 수신신호강도 측정을 통하여 전송거리 증가에 따른 경로손실 변화를 분석하였다. 또한, 실측데이터를 기존의 경로손실 예측모델과 비교하고, log-distance 경로손실모델에서의 경로손실지수를 산정하여 경험식을 제시하였다.

2. 경부고속철도 열차무선 시스템

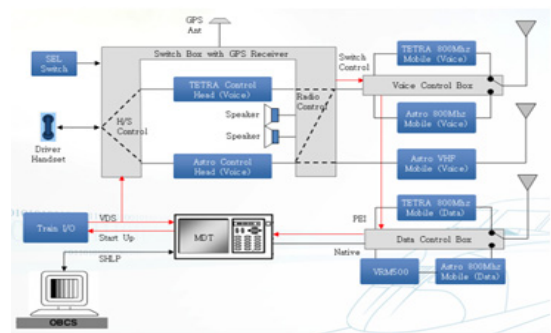
경부고속철도 2단계 구간은 대구에서 부산까지 123.8km 구간으로서 2010년 12월 개통되었다. 이로써 서울-부산 간 450km의 전구간이 고속신선으로 완공되었으며, 최고속도 300km/h로 주행하여 2시간 18분에 주파하게 되었다. 이에 따라, 열차와 지상 간, 열차와 열차 간 또는 지상 상호 간에 음성 및 데이터 정보를 교환하여 열차운전의 관제 및 시설유지보수업무를 효율적으로 수행하기 위하여 열차무선시스템이 도입되었다.

Fig. 1에 TRS의 구성도를 나타내었다. 철도교통제센터에는 열차의 운행 관련 지령을 내리기 위한 주 장비와 원격제어설비 등이 설치되며, 선로 연변에는 15개의 중계기지국이 설치되고, 터널 구간 및 난청지역에는 광 중계기가 설치된다. 차상장치는 KTX 열차 전·후방 동력차의 운전실에 설치되고 Fig. 2와 같이 수신안테나, 제어기로 구성되며 KTX 기관사가 사용하는 차상 무전기가 접속된다.

열차무선시스템의 통신방식은 유럽통신표준기구(ETSI)에서 제정한 디지털 TRS 개방형 표준의 TETRA 방식을 채택하고 있다[9]. 이때 사용되는 송수신 주파수는 기지국에서 851MHz-867MHz이고, 이동국에서 806MHz-822MHz이며, 주요 통신특성은 Table 1과 같다.



[Fig. 1] Configuration of KTX TRS



[Fig. 2] On-board System of KTX TRS

[Table 1] Specifications of KTX TRS

Item	Specifications
Types of call	Emergency Call Group Call Individual Call) Broadcast Call)
Priorities of call	10 Class
Communication mode	Simulcast & Trunked
Receiver	All receiver include commander
Frequency band	806-870 MHz
Channel bandwidth	45 MHz
Modulation	$\pi/4$ DQPSK
Channel access	TDMA
Data transmission rate	28.8 kbps

경부고속철도 2단계구간에서의 열차무선시스템의 목표 커버리지는 선로 중심으로부터 좌, 우로 50m 이내에서 98% 이상의 통화신뢰성 및 DAQ 4.0 이상을 제공하도록

록 설정되었다. 디지털 음성시스템에서의 DAQ 4.0 등급은 잡음과 왜곡이 거의 없고 음성이 쉽게 이해되는 상태를 나타낸다.

3. 열차무선시스템 설계

3.1 수신기 수신임계강도 기준

디지털 음성시스템에서는 오디오 디코더의 입력단에서 측정된 BER(Bit Error Rate)이 음성품질을 판단하는 기준이 된다. 디지털 방식의 TETRA시스템에서는 오디오 디코더에 적용하는 오류 한계로 BER 4%를 적용한다. 따라서, TETRA수신기에서의 수신임계감도는 음성채널에서 복호되지 않는 상태에서 4%의 BER을 확보하기 위해 필요한 신호입력레벨로 정의된다. 이상과 같은 기준에 따라, 고속철도 열차무선시스템에 도입된 TETRA 시스템의 수신기 입력단의 수신임계감도의 참조레벨은 Table 2와 같다[9].

[Table 2] Sensitivity reference level of TRS receiver

Device	Static condition	Dynamic condition	Noise factor
Base Station	-115dBm	-106dBm	6.4dB
Mobile Station	-112dBm	-103dBm	9.4dB

3.2 링크 버짓 계산

무선통신시스템의 링크설계에서 송수신이 완벽하게 이루어지도록 전파경로손실을 포함하여 링크 버짓(Link Budget)을 계산한다. Table 3은 고속철도 열차무선시스템의 링크 버짓 계산사례로서, 최대수용 전파경로손실은 수신입력과 수신기의 동적 수신감도 참조 레벨로부터 산출된다.

3.3 전파전파 모델

무선망 설계에 있어서 전파전파 손실은 다음 식과 같이 경로손실과 회절손실로 구성된다.

$$\text{전파전파손실} = \text{경로손실} + \text{회절손실} \quad (1)$$

TRS 전파 경로손실 분석에서는 주요 서비스 지역의 지형 특성별 분포에 따라 Table 4와 같이 6개 유형으로 구분하여 분석한다. 경로손실모델로서는 주로 Okumura-Hata Model이 이용되고 있고, 건물 및 지형으로 인한 회

절손실모델로서는 Deygout 1994 Model이 이용되고 있다 [10].

[Table 3] Calculation of link budget

Item	Budget	Unit	
TX power	44	dBm	
TX cable and filter loss	6	dB	
TX antenna gain	8	dBi	
Max. Effective Isotropic Radiated Power(ERP)	46	dBi	
Propagation loss	L	dB	
Signal level at RX antenna	46-L	dBm	
RX antenna gain	2	dBi	
RX cable loss	2	dB	
Receiver input power	46-L	dBm	
Minimum sensitivity level	Static	-112	dBm
	Dynamic	-103	dBm

[Table 4] Calculation of propagation loss

	Class	Definition	Recommended model
Path loss model	1	Large city Crowded area	Okumura- Hata model
	2	Medium city Industrial area	
	3	Outskirts area	
	4	Open area	
	5	Mountain area	
	6	Seaside area	
Diffraction model (Buildings, Land type)			Deygout 1994 model

3.4 경로손실 모델

(1) Okumura-Hata모델

측정치로부터 도출한 Okumura의 경험 모델을 토대로 Hata가 수식적으로 발전시킨 모델로서, 도시지역에서의 경로손실을 다음 식과 같이 예측한다[11,12].

$$L_p (dB) = 69.55 + 26.16 \log f - 13.82 \log h - a(h_r) + 44.9 - 6.55 \log h_r \quad (2)$$

여기서, f 는 송신주파수(MHz), r 은 송수신단간의 거리(km), h_r 은 수신안테나 높이(m)이며, $a(h_r)$ 은 dB단위의 이동국 안테나 높이에 대한 보정인자로서 $h_r = 3[m]$ 에 대하여 $a(h_r) = 0dB$ 이다.

교외지와 개방지에 대한 경로손실은 식(2)를 수정하여 식(3) 및 식(4)와 같이 구한다.

$$L_{sub}(dB) = L_p - 2\log(f/28)^2 - 5.4 \quad (3)$$

$$L_{open}(dB) = L_p - 4.78(\log f)^2 + 18.33\log f - 40.94 \quad (4)$$

(2) 자유공간 전파 모델

송수신 경로사이에 아무런 장애물이 없는 가시거리 (LOS:Line-of-Sight) 환경에서 수신 신호의 전력은 다음 식과 같이 주어진다[13].

$$P_r(d) = \frac{|E|^2}{120\pi} A_c \frac{1}{L} = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \cdot \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{1}{L}$$

$$= \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (5)$$

여기서, P_t 와 $P_r(d)$ 는 각각 송신 전력, 송신단과 수신단 사이 거리 d 에서 수신 전력을 나타낸다. 또한, G_t , G_r , λ , L 은 각각 송신 안테나 이득, 수신 안테나 이득, 파장[m] 및 전파 환경과 관련 없는 시스템 손실 계수($L \geq 1$)를 나타낸다.

식 (5)에서 수신 전력은 d 의 자승에 비례하여 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 안테나 이득을 제외한 자유공간 경로손실 계산식을 식(6)과 같이 유도할 수 있다.

$$PL_F(d)[dB] = 10\log\left(\frac{P_t}{P_r}\right) = -10\log\left(\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}\right) \quad (6)$$

(3) Log-distance 경로손실 모델

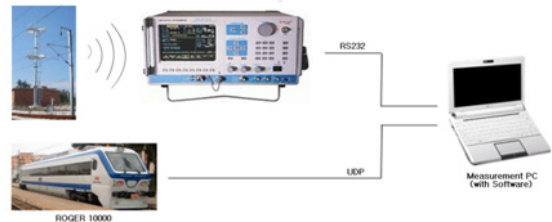
자유 공간 경로 손실 모델뿐만 아니라 대부분의 경로 손실 모델에서는 송수신간 거리에 따라서 대수적으로 (logarithmically) 평균 수신 전력이 감소한다. 이러한 손실 모델을 Log-distance 경로 손실 모델이라 하며, 자유공간 경로손실을 바탕으로 여러 환경에서의 경로손실지수(path loss exponent) n 을 이용하여 식(7)과 같이 정의된다. 경로 손실지수 n 은 송수신간 거리의 증가에 따른 경로손실의 증가량을 의미한다. 즉 n 이 큰 환경일수록 반사 및 산란체가 많이 존재하여 신호가 급격히 감소하게 된다.

$$PL_{LD}(d)[dB] = PL_F(d_0) + 10n\log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (7)$$

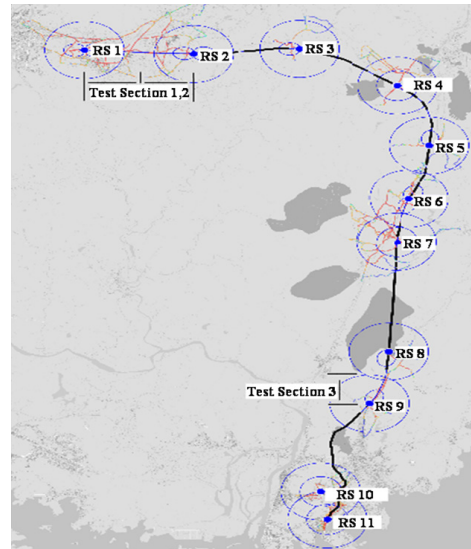
여기서, d_0 : 기준 거리, d : 송수신 거리.

4. 수신신호강도 측정

측정시스템은 Fig.3 에 보이는 것처럼 검측 차량에 설치된 열차무선장치에 계측기를 연결하고 데이터 수집 프로그램이 설치된 컴퓨터를 통하여 수신신호강도(RSSI : Received signal strength indicator)를 측정하였다. 측정 구간은 Fig. 4에 보이는 것처럼, 경부고속철도 2단계 구간 중에서 터널구간이 없고 개활지에 가까운 4개 기지국 구간을 대상으로 하였고, 열차를 운행시키면서 측정하였다.

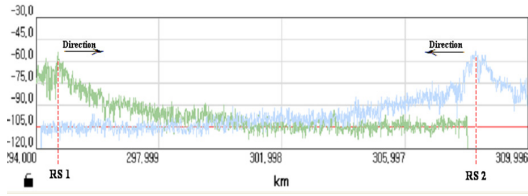


[Fig. 3] On-board measurement system



[Fig. 4] Test sections for measurement

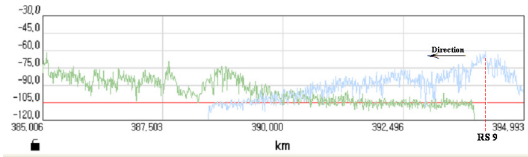
Fig. 4의 기지국 RS1과 RS2 사이의 구간에서 열차를 상행 및 하행시키면서 수신신호강도를 측정한 결과를 Fig. 5에 보인다. 여기서 각 기지국의 안테나 규격을 Table 5와 같다. 또한, 기지국 RS4 구간 및 RS9 구간에서 수신신호강도를 측정한 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 보인다.



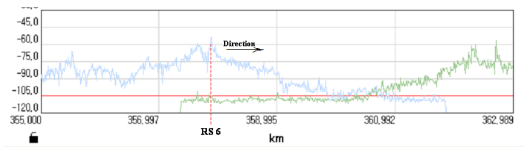
[Fig. 5] Measurement of RSSI from base station RS1 and RS2

[Table 5] Specifications of base station antenna

Base Station	RS1	RS2
Antenna Height [m]	40	20
Nominal Power [W]	25	25
Tx Antenna Gain [dB]	17.65	17.65
Tx losses [dB]	13.87	13.32
ERP [W]	45.61	46.16
Frequency [MHz]	851	851



[Fig. 6] Measurement of RSSI from base station RS4



[Fig. 7] Measurement of RSSI from base station RS9

5. 전파경로손실 분석

기지국과 이동국 사이의 무선링크에서의 전파 경로손실은 수신신호강도 측정치로부터 다음 식과 같이 산출한다.

$$L = P_{BS} - B_{BS} + C_{BS} + G_{MS} - H_{MS} - R_{BS} \quad (8)$$

여기서, P_{BS} : 송신 출력[dBm], B_{BS} : 송신 케이블 및 필터 손실[dB], C_{BS} : 송신 안테나 이득[dB], G_{MS} : 수신 안테나 이득[dB], H_{MS} : 수신 케이블 손실[dB], R_{BS} : 수신 신호강도[dBm]

이상과 같이 현장측정으로부터 산출된 경로손실 값에

선형회귀법을 적용하여 log-distance 모델에서의 경로손실지수를 산정한다. 산정과정은 일차적으로 측정치와 식(7)에 보인 log-distance 모델에 의한 경로손실 예측치와의 오차의 자승을 식(9)와 같이 정의한다.

$$e(n) = \sum_{i=1}^M \{L(d_i) - PL(d_i)\}^2$$

$$= \sum_{i=1}^M \left\{ L(d_i) - PL(d_0) - 10n \log_{10} \frac{d_i}{d_0} \right\}^2 \quad (9)$$

여기서, M : 측정치의 개수, n : 경로손실지수, d_i : 거리, $L(d_i)$: d_i 에서의 경로손실 실측치, $PL(d_i)$: log-distance 모델에서의 경로손실예측치

식(9)로부터, 오차를 최소화하는 경로손실지수 n 을 구하기 위하여 n 에 대하여 미분한 값을 0으로 놓으면 경로손실지수는 다음 식과 같이 산출된다.

$$n = \frac{\sum_{i=1}^M \{L(d_i) - PL(d_0)\}}{\sum_{i=1}^M 10 \log_{10} \left(\frac{d_i}{d_0} \right)} \quad (10)$$

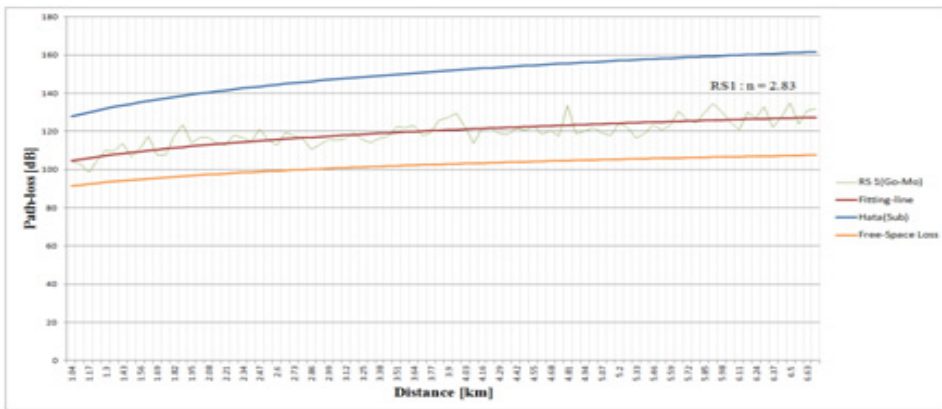
식(10)을 이용하여 고속철도에서의 경로손실 측정 데이터를 분석한 결과, 경로손실지수 n 은 Table 6과 같이 나타났다. 표에서 보는 것처럼, 고속철도 개활지 구간에서의 851MHz 열차무선 전파의 경로손실지수는 2.8~3.2로 분석되었다. Table 7은 여러 가지 환경에서의 전파 경로손실지수의 대표치를 나타낸 것으로, 고속철도 열차무선의 경로손실지수는 도시지역에서의 휴대전화 전파의 경로손실지수와 동일한 것으로 나타났다.

[Table 6] Estimation of path loss exponent

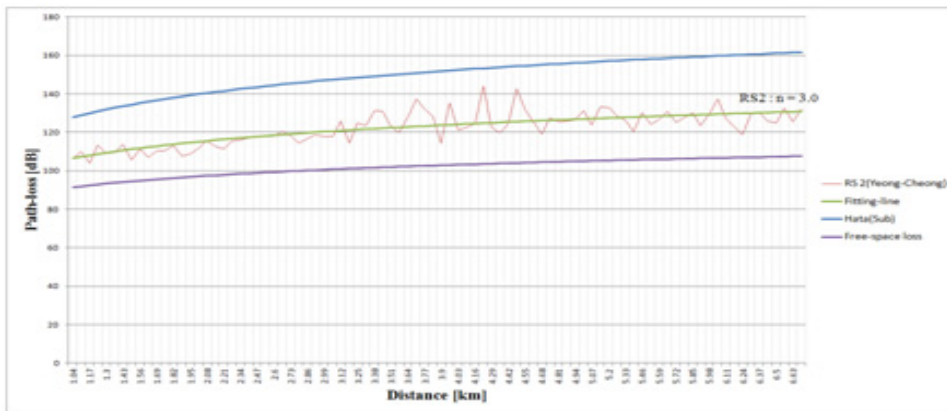
Base Station	RS1	RS2	RS9
Path loss exponent	2.83	3.0	3.23
Path loss at reference distance [dB]	104	106	103

[Table 7] Typical path loss exponents at different environments

Environment	Pathloss exponent
Free space	2.0
Urban area cellular radio	2.7-3.5
In building line-of-sight	1.6-1.8
Obstructed in building	4.0-6.0
Obstructed in factories	2.0-3.0



[Fig. 8] Path loss characteristics of radio propagation from base station RS1



[Fig. 9] Path loss characteristics of radio propagation from base station RS2

Fig. 8 및 Fig. 9는 고속철도 구간에서의 경로손실 측정치와 함께, Table 6의 경로손실지수에 의한 log-distance 모델과 Okumura-Hata모델 및 자유공간 전파 모델에 의한 예측치를 보인다. 열차무선시스템의 무선링크 설계에서는 경로손실 예측을 위하여 Okumura-Hata 모델 또는 자유공간 전파 모델이 주로 사용되고 있다. 그러나 Fig. 8 및 Fig. 9에서 보는 것처럼, Okumura-Hata모델은 모든 전송거리에서 실측치보다 20 dB 이상 높게 경로손실을 예측하고 있으며, 자유공간 전파 모델은 실측치에 비해 10dB 정도 작게 경로손실을 예측하고 있어, 두 모델 전부 고속철도 열차무선시스템의 기지국 설계에 적용하기에는 한계가 있다.

6. 결론

경부고속철도 2단계 구간에 도입된 TETRA 방식 열차

무선시스템의 전파 경로손실 예측 및 기지국 설계에 적용하기 위하여, 전파 경로손실에 대한 측정 및 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

경부고속철도에서 열차에 측정시스템을 구축하고 열차를 운행시키면서 기지국으로부터의 거리별 수신신호강도를 측정하였다. 이 측정치를 열차무선시스템 설계에 일반적으로 사용되고 있는 경로손실 예측 모델과 비교하였다. Okumura-Hata모델에 의한 예측치는 모든 전송거리에서 20dB 이상 높게 경로손실을 예측하고 있으며, 자유공간 전파 경로손실모델은 10dB 정도 작게 경로손실을 예측하고 있어서 고속철도 열차무선시스템의 전파 경로손실 예측 및 기지국 설계에 적용하기에는 한계가 있다.

고속철도에서의 경로손실 측정치에 대하여 log-distance 경로손실 모델을 적용하여 선형회귀분석을 수행한 결과 경로손실지수는 2.8~3.2 범위로서, 도시지역에서의 휴대전화 전파의 경로손실지수와 비슷한 것으로 나타났다.

이상의 측정 및 분석 결과는, 향후 고속철도 열차무선

시스템의 전파 경로손실 산정 및 기지국 설계에 경험식으로 참조 할 수 있다.

References

- [1] S. W. Lee, *Radio System for High Speed Railway*, Dongil Publishers, 2007.
- [2] S. W. Kim, "Introduction of Trunked Radio System Services and Status of Business", *Information Processing*, vol.3, no.1, pp.38-46, 1996.
- [3] W. P. Hong, K. K. Oh, "Ideal Model for Radio Communication System against Disasters", *Trans. on the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol.5, no.3, pp.294-303, 2010.
- [4] U. B. Kim, "Korean Digital TRS(TETRA)", *TTA Journal*, No.99, pp. 87-95, 2005.
- [5] B. H. Koo, C. Y. Kim, J. D. Mok, "Prediction Models for the Path Loss in Mobile Communications", *Electronics and Tele-communications Trends*, vol.11, no.2, pp.17-29, 1996.
- [6] J. F. Aurand, "A Comparison of Prediction Methods for 800MHz Mobile Radio Propagation", *IEEE Trans. on Vehicle Technology*, vol.VT-34, no.4, pp.149-153, 1985.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/T-VT.1985.24054>
- [7] N. E. Rittas, A. G. Asimakopoulou, "Path Loss Model for TETRA Networks in Metropolitan Areas", *Proc. of International Symposium on Computers and Communications*, pp.690-695, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISCC.2004.1358620>
- [8] X. Y. Zhang, Y. H. Wen, Z. H. Tan, "Research on high-speed mobile radio large-scale propagation characteristics and interference", *Proc. on International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, Sydney, Sept 20-24, pp.761-764, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICEAA.2010.5653957>
- [9] European Telecommunications Standard Institute, "Terrestrial trunked radio(TETRA): voice plus data; designer's guide", *ETSI Technical Report ETR 300-1*, 1997.
- [10] I. Deygout, "Multiple Knife-edge Diffraction of Microwaves", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.AP-42, no.2, pp.137-144, 1994.
- [11] P. K. Sharma, et. al., "Comparative Analysis of Propagation Path Loss Models with Field Measured Data", *International Journal of Engineering Science*

and Technology, vol.2, no.6, pp.2008-2013, 2010.

- [12] R. Mardeni, K. F. Kwan, "Optimization of HATA prediction model in suburban area in Malaysia", *Progress in Electromagnetics Research*, vol.13, pp.91-106, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.2528/PIERC10011804>
- [13] D. C. Hogg, "Fun with the Friis Free-Space Transmission Formula", *IEEE Antenna and Propagation Magazine*, vol.35, no.4, pp.33-35, 1993.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/74.229847>

배 성 호(Sung-Ho Bae)

[정회원]



- 1996년 8월 : 울산대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 2010년 8월 : 서울과학기술대 철도전문대학원 전기신호공학과 박사과정 수료
- 2008년 1월 ~ 현재 : (주)LG CNS 책임연구원

<관심분야>
무선통신, 정보통신

최 규 형(Kyu-Hyoung Choi)

[정회원]



- 1989년 3월 : 무로란공업대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1992년 3월 : 훗카이도대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 2005년 2월 : 한국철도기술연구원 수석연구원
- 2005년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 철도전기신호공학과 교수

<관심분야>
철도정보통신, 철도신호제어