고속철도 지면반사파를 고려한 열차무선 전파모델

Modeling of Train Radio Propagation Affected by Ground Reflected Wave in High-speed Railway

배성호 · 송기홍 · 최규형*

Sung-Ho Bae · Ki-Hong Song · Kyu-Hyoung Choi

Abstract Radio propagation in a high-speed railway is affected by ground reflective waves that are due to irregular reflection by the railway track, which consists of rails, sleepers, and gravel. This paper provides a train radio propagation model that simulates an irregular track reflective wave as a random variable. A simulation study using the train radio propagation model shows that the path loss exponent is around 3.0, indicating a reduced path loss compared to the value of 4.0 in the general mobile radio environment. Regressive analysis of the received signal strength indicators measured in the Gyeongbu high-speed railway showed the results identical to those of the simulation. These results confirm the train radio propagation model and can be applied to the coverage estimation and the design of a train radio network.

Keywords : Train radio, Ground reflected wave, Propagation model, Path loss exponent

초 록 고속철도에서의 열차무선전파는 일반적인 이동통신전파와 달리 레일, 침목 및 자갈로 구성된 철로면 반사에 의해 불규칙적으로 수신되는 지면반사파의 영향을 받는다. 본 논문에서는 이와 같이 불규칙적으로 수신되는 철로면 반사파를 랜덤변수로 모의하고, 여기에 송수신간 직접 경로에 의한 직접파를 추가한 열차무선 전파모델을 제안하였다. 제안한 전파모델을 이용한 시뮬레이션 결과 열차무선에서의 경로손실지수는 3.0으로 분석되어, 일반적인 이동통신환경에서의 4.0에 비해 경로손실이 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 고속철도 현장에서의 열차무선 수신전력 측정치에서도 동일하게 경로손실지수가 3.0으로 분석되었다. 이상과 같은 시뮬레이션 및 측정 결과로부터, 열차무선 전파모델을 검증하고 경로손실지수를 도출할 수 있었으며, 이 결과는 고속철도 열차무선 통신망의 커버리지 예측 및 기지국 설계에 응용할 수 있다.

주요어 : 열차무선, 지면반사파, 전파모델, 경로손실지수

1. 서 론

고속철도에는 열차와 지상간, 열차와 열차간 또는 지상 상호 간에 정보를 교환하여 열차운전 및 유지보수업무를 수행하기 위한 열차무선시스템이 구축되어 있다. 고속으로 주행 중인 열차에서 지상관제센터, 역 및 기지 등과 교신할 수 있는 유일한 통신수단으로서, 사고상황 보고 및 대책 지시, 승객대피, 안내방송 등을 가능하게 하여 열차운행의 안전성을 확보해주는 주요 설비로 활용되고 있다[1].

고속철도 열차무선시스템에서 요구되는 통화신뢰도를 확보하기 위해서는, 적절한 기지국 및 무선네트워크 설계가 필수적이다. 이를 위해 고속철도에서의 전파환경에 따른 전파 경로손실 및 수신신호강도를 예측할 수 있는 전파 모델을 개발할 필요가 있다[2]. 일반적으로 전파경로손실은 전파거리가 길어짐에 따라 증가하며, 사용 주파수 및 주변 환경, 지형적 조건 등에 따라 크게 변동하는 특성이 있다[3,4]. 그러

나, 고속철도 열차무선시스템의 전파모델 및 경로손실에 대해서는 아직까지 충분한 연구가 이루어지지 않고 있으며, 자유공간 전파모델 또는 Okumura-Hata 모델을 이용하여 경로손실을 산정하고 있으나 적용 대상 및 조건이 상이하기 때문에 오차가 크게 나타나고 있다[5-8].

이동통신시스템에서는 기지국과 이동국 사이에 무선통신 채널이 형성되며, 이동국과 기지국사이의 통신신호는 직접파와 건물과 지형에 의한 반사, 회절, 투과 및 산란 등에 의한 다중 경로파가 합성되어 다양한 형태로 나타난다. 이와 같은 이동통신신호의 전파특성은 사용하는 신호의 주파수뿐 아니라 해당 지역의 물리적, 지형적 특성에 따라 크게 좌우된다[9]. 고속철도는 고속화를 위하여 선로가 대부분 직선화되어 있으며, 교량 등을 이용한 독립된 선로로 구성되어 있어 주변 장애물이 적은 반면, 열차에 설치되는 이동국은 레일, 침목 및 자갈로 구성된 철로면을 따라 일차원적으로 이동하는 특성을 지니고 있다[10]. 따라서 일반적인 이동통신 환경과 비교하면, 건물과 지형에 의한 다중 경로파의 영향이 작은 반면에 철로면에서의 반사파가 주로 영향을 미치게 된다.

본 논문에서는 고속철도에서의 열차무선 전파모델을 제시

*Corresponding author.

Tel.: +82-2-970-6873, E-mail : khchoi@seoultech.ac.kr

©The Korean Society for Railway 2013

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.6.460>

하고 경로손실을 분석하였다. 고속철도 전파환경분석 결과에 따라, 불규칙하게 수신되는 철로면 반사파가 열차무선에 미치는 영향을 고려한 전파모델을 제시하고 시뮬레이션을 통하여 경로손실을 분석하였다. 또한, 고속철도 현장에서의 열차무선 수신전력 측정을 통하여 경로손실지수를 산출하고 시뮬레이션 결과와 비교함으로써, 제시한 전파모델의 유효성을 검토하였다.

2. 고속철도 열차무선 전파환경

2.1 고속철도 열차무선시스템

열차무선시스템은 열차와 지상간, 열차와 열차간 또는 지상 상호간에 음성 및 데이터 정보를 교환하여, 열차운전 관제 및 시설유지보수업무를 효율적으로 수행하기 위한 이동통신시스템이다. 경부고속철도 2단계구간에서는 유럽통신표준기구에서 제정한 디지털 TRS 개방형 표준의 TETRA (Terrestrial Trunked Radio) 방식으로 열차무선시스템이 구축되어 있다. 열차무선시스템의 목표 커버리지는 선로 중심으로부터 좌, 우로 50m 이내에서 98% 이상의 통화신뢰성 및 DAQ(Delivered Audio Quality) 4.0 이상을 제공하도록

Fig. 1 Configuration of KTX train radio system

Table 1 Specifications of KTX train radio system

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	806~822MHz, 851~867MHz
Duplex spacing	45 MHz
Modulation	$\pi/4$ DQPSK
Channel access	TDMA
Data transmission rate	28.8 kbps

설정되었다[11,12].

열차무선시스템의 구성도를 Fig. 1에 보인다. 열차운행을 감독하는 철도교통관제센터에는 주장치와 원격제어설비 등이 설치되며, 선로 연변에는 15개의 중계 기지국이 설치되고, 터널 및 난청지역에는 광중계기가 설치된다. 열차에 설치되는 이동국은 KTX열차 전후방 동력차에 설치되어 지상과 무선네트워크를 구축한다. 사용 주파수는 기지국에서 851-867MHz, 이동국에서 806-822MHz이며, 열차무선시스템의 주요 통신특성을 Table 1에 보인다.

2.2 열차무선 전파환경

고속철도 열차무선의 전파 환경은 일반적인 이동통신시스템의 전파환경과는 차이가 있다. 열차의 고속화를 위하여 선로가 대부분 직선화되어 있으며, 이동국이 탑재된 열차가 직선상으로 이동하는 특성을 가지고 있다. 특히, 고속철도에서는 고속이동을 확보하기 위하여 곡선구간의 곡선반경을 4000m 이상으로 제한하고 직선구간을 최대한 유지하고 있다. 또한 선로 주변에 인공적 구조물이나 지형, 지물과 같은 장애물들이 많지 않으므로 주변 장애물에 의해 발생하는 다중경로파가 수신신호강도에 미치는 영향은 미미하다고 할 수 있다.

이에 따라 열차무선 신호 수신에 큰 영향을 미치는 전파는 직접파 성분과 함께 지면에 반사되어 수신되는 반사파라고 할 수 있다. 고속철도는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 자갈 또는 콘크리트로 구성된 도상 위에 레일과 침목이 깔려 있는 구조를 가지고 있어, 지면반사파는 주로 레일, 침목 및 자갈로 구성된 철로면 반사에 의해 형성된다고 할 수 있다. 이와 같이 철로면은 바닥면이 고르지 않기 때문에 일부 반사파가 산란되어 수신되지 않는 부분이 있으므로, 철로면 반사파의 크기는 평탄한 지면에서의 반사파에 비해 크기가 감소하게 된다. 일반적으로 지면반사파는 직접파와 위상차를 가지며 수신신호강도를 감소시켜 전파경로손실을 증가시키는 방향으로 작용하므로, 열차무선 전파환경에서는 철로면 반사파가 감소되는 만큼 전파경로손실은 감소한다. 즉, 열차무선환경에서 전파경로손실은 일반적인 이동통신 환경에서의 전파경로손실에 비해 감소한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 2 Track facilities of high-speed railway

3. 열차무선 전파모델

3.1 이동통신 전파모델

일반적인 이동통신 전파환경에서는 직접파와 지면반사파 이외에도 지표파와 주변 장애물로 인한 부차적인 경로의 간섭파들이 존재하기 때문에, 수신되는 신호는 이 모든 파들의 합성으로 나타난다. 이때 부차적인 경로를 통한 간섭파를 제외하면 수신전력과 송신전력의 비는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[13].

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi l_d} \right)^2 |1 + \Gamma e^{j\Delta\psi} + (1 - \Gamma) A e^{j\Delta\psi}| \quad (1)$$

여기서, P_r : 수신전력, P_t : 송신전력, λ : 파장, l_d : 송수신 거리, G_t : 송신안테나이득, G_r : 수신안테나이득, Γ : 반사계수, A : 감쇠계수, $\Delta\psi$: 위상변화량.

식 (1)에서, 우변의 절댓치 내의 첫째 항은 직접파, 둘째 항은 지면반사파, 그리고 셋째 항은 지표파 성분을 나타낸다. 직접파의 수신 전력은 자유공간 수신전력으로 주어지며, 반사파는 여기에다 반사계수 Γ 만큼 크기가 감쇠되고 경로 차에 의한 위상변화 $\Delta\psi$ 를 겪게 된다. 반사계수 Γ 과 감쇠계수 A 는 입사파의 입사각 분극, 지표면의 상태 및 주파수 등의 여러 요인들 영향을 받는다. 이와 같은 변수들을 모두 고려한 계수를 K 라고 할 때, 지면반사계수 Γ 은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다[14].

$$\Gamma = \frac{\sin\phi - K}{\sin\phi + K} \quad (2)$$

여기서, ϕ : 전파의 입사각.

기지국과 이동국간 거리가 안테나 높이에 비해 충분히 큰 경우에는 입사각이 $\phi \approx 0^\circ$ 에 근접하기 때문에, 지면반사계수 $\Gamma \approx -1$ 이 된다. 일반적으로 주파수가 100 MHz 이상이고 입사각이 10도 보다 작을 경우 반사계수 Γ 를 -1로 근사할 수 있다. 또한, 지표파는 지면으로부터 수 파장 이내의 높이에서만 감지되므로, 수신 안테나의 높이가 이보다 높다면 무시할 수 있다. 따라서 식 (1)은 다음과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi l_d} \right)^2 |1 - e^{j\Delta\psi}|^2 \quad (3)$$

여기서, 위상변화량 $\Delta\psi$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\psi = \beta \Delta d = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{(h_b + h_m)^2 + l_d^2} - \sqrt{(h_b - h_m)^2 + l_d^2} \right) \quad (4)$$

여기서, $\beta = 2\pi/\lambda$: 전파 상수(wave number), Δd : 직접파와 반사파의 전송거리 차이, h_b : 송신안테나 높이, h_m : 수신안테나 높이, l_d : 송수신 거리.

송신 및 수신 안테나 이득을 0[dB] 라고 할 경우, 수신전력과 송신전력의 비는 다음과 같이 송수신거리 l_d 의 역 4승에 비례하게 되며, log-distance 경로손실모델에서 경로손실 지수가 4가 된다는 것을 나타낸다[14].

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{h_b h_m}{l_d^2} \right)^2 \quad (5)$$

3.2 열차무선 전파모델

고속철도 열차무선에서는 Fig. 3에 보이는 것처럼, 지면반사파가 레일, 침목 및 자갈로 구성된 철로면에 반사되어 수신된다. 이와 같이 반사파가 반사되는 표면이 고르지 않고 거칠 경우, 반사파가 산란되는 현상이 발생하여 반사파의 일부가 수신안테나에 수신된다. 반사면의 거칠기 정도를 정량적으로 평가하기 위해서, 다음 식과 같은 레일레이 기준(Rayleigh criterion)이 적용된다[13].

$$C = \frac{4\pi d \sin\phi}{\lambda} \approx \frac{4\pi\sigma\phi}{\lambda} \quad (6)$$

여기서, σ : 굴곡면의 높이차, ϕ : 입사파의 입사각.

일반적으로 C 가 0.1보다 작으면 가시적 반사가 가능한 고른 표면이며, C 가 10 이상이면 가시적 반사 없이 발산 반사 현상만 존재하는 거친 표면이라고 할 수 있다. 열차무선에서 사용하는 851MHz대를 적용할 경우, 굴곡면의 높이차가 16cm 이하이면 C 가 0.1보다 작게 되고 가시적 반사가 존재하는 고른 표면이라 할 수 있다. 고속철도 철로면에서 침목의 높이는 지면에서 10cm이고 레일의 높이는 지면에서 20cm 정도로서 완전히 고른 표면이라고 할 수 없으며 가시적 반사와 발산 반사가 혼재된 형태로 나타난다.

이상과 같이 가시적 반사 및 발산 반사가 불규칙적으로 발생하는 철로면의 반사 특성을 나타내기 위하여, 식 (2)에 보이는 일반적인 이동통신환경에서의 반사계수 Γ 에 불규칙하게 발생하는 철로면 반사파의 영향을 나타내기 위한 랜덤변수 α 를 곱하여 철로면 반사파 수신전력을 다음 식과 같이 정의하였다.

$$10\log P_r = 10\log \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \frac{P_t G_b G_m}{l_d^2} |1 + \alpha \Gamma e^{j\beta \Delta d}|^2 \right] \quad (7)$$

여기서, α 는 0과 1사이에서 균일분포(Uniform distribution)를 갖는 랜덤변수이고, G_b 는 기지국 안테나 이득, G_m 는 이동국 안테나 이득, $\beta \Delta d$ 는 직접파와 반사파 사이의 위상차, $\beta = 2\pi/\lambda$ 는 전파 상수이며, Δd 는 직접파와 반사파의 전송거리 차이로서 다음 식과 같다.

$$\Delta d = \sqrt{l_d^2 + (h_b + h_m)^2} - \sqrt{l_d^2 + (h_b - h_m)^2} \quad (8)$$

Fig. 3 Radio propagation modeling of direct and ground reflected waves

Fig. 4는 기지국과 이동국간 전송거리를 10m에서 15,000m 까지 변화시키면서 직접파와 반사파 성분의 합성에 의한 수신전력을 시뮬레이션을 통해 계산한 결과를 보인다. 여기서, 기지국 안테나 높이는 30m이고 이동국 안테나 높이는 4m이며, 주파수 851MHz에서 송신출력은 25W이고, 송수신안테나 이득은 0dB로 설정하였다. 일반적인 이동통신환경에서의 지면반사파와 직접파에 의한 수신전력은 실선으로 나타내었으며, 열차무선환경에서의 철로면 반사파와 직접파에 의한 수신전력은 점선으로 표시하여 서로 비교하였다.

Fig. 4의 시뮬레이션 결과에서, 이동통신 전파특성에서는 경로손실지수가 4로서 거리에 따른 손실이 급격하게 증가하나, 열차무선 전파특성에서는 수신전력의 변동폭은 크지만 경로손실지수는 약 3으로 거리에 따른 경로손실이 완만하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 일반적인 이동통신환경에서는 반사면이 고르기 때문에 지면 반사파에 의해 경로손실이 크게 증가하는 데 비해, 열차무선환경에서는 레일 및 침목으로 구성된 철로면의 특성상 반사파의 일부가 산란되기 때문에 지면반사파로 인한 경로손실이 감소한다는 것을 나타낸다.

Fig. 4 Simulation results of mobile and railway propagations

4. 열차무선 측정 및 전파경로손실 분석

4.1 측정시스템

고속철도 현장에서 거리에 따른 열차무선 수신전력 변화를 측정하기 위하여 Fig. 5와 같이 측정시스템을 구축하였다. 측정시스템은 고속열차에 설치된 열차무선장치에 계측

Fig. 5 A measuring system for train radio propagation

기를 연결하고 데이터 수집 프로그램이 설치된 컴퓨터를 통하여 수신신호강도(RSSI: Received signal strength indicator)를 측정 및 분석할 수 있도록 구성하였다. 측정구간은 경부고속철도 2단계구간중에서 터널이 없고 개활지에 가까운 2개 기지국 구간(고모, 영청)을 대상으로 하여, 측정시스템을 탑재한 열차를 상행 및 하행 운전시키면서 측정하였다.

4.2 변곡점 산출

이동통신 신호의 수신전력은 가시거리 및 근접한 거리에서는 직접파 또는 우세파가 존재하여 경로손실지수가 2이하로 나타나며, 먼 거리에서는 이보다 큰 기울기를 가지게 되어 지면이 평탄한 이동통신환경에서는 경로손실지수가 약 4가 된다. 이와 같이 경로손실지수의 불연속이 생기는 지점을 변곡점(Break point)이라 하고, 해당 지점까지의 거리를 변곡점 거리(Break distance)라 하며 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다[15].

$$D = \frac{1}{\lambda} \sqrt{(\Sigma^2 - \Delta^2)^2 - 2(\Sigma^2 + \Delta^2) \left(\frac{2}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{2}{\lambda}\right)^4} \quad (9)$$

여기서, $\Sigma = h_b + h_m$, $\Delta = h_b - h_m$, h_b : 송신안테나 높이, h_m : 수신안테나 높이, λ : 파장.

Fig. 6 Measurement of received power in Yungcheong section

Fig. 7 Measurement of received power in Gomo section

Fig. 6과 Fig. 7은 영청구간과 고모구간에서의 전파수신강도 측정치 및 변곡점 산출결과를 보인다. 여기서, 영청 및 고모 기지국 안테나 높이는 각각 20m 및 30m이며, 차량 안테나 높이는 4m이고 주파수는 851MHz이다. 영청 구간 및 고모 구간 측정결과에서, 변곡점 거리는 각각 971m 및 1,361m이며, 변곡점 이후 구간에서의 경로손실지수는 각각 2.99 및 3.04로서 3.0에 근접한다.

4.3 경로손실지수 분석

정확한 경로손실지수의 산출을 위해, 변곡점 이후 구간에서의 수신전력 측정 데이터를 추출하여 경로손실지수를 분석하였다. 또한, 식 (10)에 보인 전파모델을 이용하여 수신전력을 시뮬레이션하고, 이로부터 경로손실지수를 분석하여 측정 데이터로부터의 분석결과와 비교하였다.

Fig. 8은 고모 기지국으로부터 부산 방면 하행 구간에서의 수신전력 측정치와 해당 구간에 대한 시뮬레이션 결과를 보인다. 수신전력 측정치는 거리에 따른 변동폭이 크게 나타났으나, 전체적인 감쇠 기울기는 시뮬레이션 결과와 일치하는 것을 알 수 있다. 회귀분석을 이용하여 경로손실지수를 분석한 결과, 측정치로부터는 2.96이 되었으며 시뮬레이션 결과로부터는 2.99로 나타남에 따라 서로 일치하였으며, 전파 경로손실모델이 적합하다는 것을 나타내고 있다.

고모 기지국과 영청 기지국을 중심으로 각각 상행 및 하

Fig. 8 Measurements and simulation results of received power Gomo section

Fig. 9 Estimation of path loss exponents in Gomo and Yungcheong sections

행 구간에서 측정된 수신전력 측정데이터를 이용하여 경로손실지수를 도출한 결과를 Fig. 9에 보인다. 경로손실지수가 대부분 3.0에 근접하고 있어서, 제안한 전파모델에 의한 시뮬레이션 결과와 일치하는 것으로 나타났다. 그러나, 영청 기지국으로부터 상행 구간에서는 경로손실지수가 3.21로 높게 나타나고 있는데, 이 구간에는 야산이 인접하고 있으며 이로 인해 다중경로 반사파가 발생하여 수신전력을 감소시키는 것으로 판단된다. 식(7)에서 제시한 열차무선 전파모델은 선로 주변 장애물로 인한 부가적인 경로파 간섭을 고려하지 않고 있으므로, 철도 선로에 인접하여 장애물이 있는 경우에는 그로 인한 간섭 효과를 추가적으로 고려할 필요가 있다.

5. 결 론

경부고속철도 2단계 구간에 설치되어 있는 디지털 TRS방식 열차무선의 전파환경을 분석하고 전파모델을 제시하였으며, 시뮬레이션 및 고속철도 현장에서의 측정 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

고속철도 열차무선의 전파 환경은 일반적인 이동통신시스템의 전파환경과는 차이가 있으며, 주변 장애물에 의해 발생하는 다중 경로파의 영향이 작고, 철로면 반사에 의해 수신되는 지면반사파가 영향을 미친다. 즉, 고속철도 철로면은 레일, 침목 및 자갈로 구성되어 표면이 고르지 않기 때문에 일부 반사파가 산란되어 수신되지 않게 되며, 철로면 반사파가 감소하는 만큼 전파경로손실도 감소하게 된다. 이상과 같이 열차무선에서 직접파와 함께 불규칙하게 반사되어 수신되는 철로면 반사파로 구성되는 전파모델을 제안하였다.

제안한 전파모델을 이용하여 열차무선환경에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과, 일반적인 이동통신환경에서 경로손실지수가 4.0수준인데 반하여, 열차무선 환경에서는 경로손실지수가 3.0수준으로 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 경부고속철도 2단계 구간에서의 측정 결과에서도 경로손실지수는 대부분 3.0수준으로 분석되어 시뮬레이션 결과와 일치하고 있다.

이상과 같은 시뮬레이션 및 측정 결과에 따라, 제안한 열차무선 전파모델이 적합하다는 것을 알 수 있다. 또한 고속철도 열차무선에서 거리에 따른 경로손실지수는 약 3.0으로 산정할 수 있으며, 850MHz 대역을 사용하는 디지털 TRS 방식 열차무선통신망의 커버리지 예측 및 기지국 설계에 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] S.W. Kim (1996) Introduction of Trunked Radio System Services and Status of Business, *Information Processing*, 3(1), pp. 38-46.

- [2] A. Lehner, C.R. García, T. Strang, O. Heirich (2011) Measurement and Analysis of the Direct Train to Train Propagation Channel in the 70 cm UHF-Band, *ets4Cars/Nets4Trains, volume 6596 of Lecture Notes in Computer Science*, pp. 45-57.
- [3] H.H. Xia, H.L. Bertoni, L.R. Maciel, A.L. Stewart, *et al.* (1993) Radio Paragation Characteristics for Line-of-Sight Microcellular and Personal Communications, *IEEE Trans. On Antennas and Propagation*, 41(10), pp. 1439-1447.
- [4] K.H. Choi, M.S. Seo (2012) Measurement of 18GHz Radio Propagation Characteristics in Subway Tunnel for Train-Way-side Multimedia Transmission, *Journal of the Korea Society for Railway*, 15(4), pp. 364-369.
- [5] N. Rakesh, S.K. Srivatsa (2012) An investigation on propagation path loss in urban environments for various models at transmitter antenna height of 50m and receiver antenna heights of 10m, 15m and 20m respectively, *International Journal of Research and Reviews in Computer Science(IJRRCS)*, 3(4), pp. 1761-1767.
- [6] J.F. Aurand (1985) A Comparison of prediction methods for 800MHz mobile radio propagation, *IEEE Trans. On Vehicular Technology*, VT-34(4), pp. 149-153.
- [7] M. Hata (1980) Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services, *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, VT-29(3), pp. 317-325.
- [8] S.H. Bae, K.H. Choi (2013) Path loss characteristics of TETRA-based KTX train radio propagation, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 14(6), pp. 2985-2991.
- [9] T.S. Rappaport (2001) *Wireless Communications: Principles and Practice(2nd edition)*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, pp. 113-138.
- [10] X.Y. Zhang, Y.H. Wen (2010) Research on high-speed mobile radio large-scale propagation characteristics and interferences, *Proceedings of the International Conferences on Electromagnetics in Advanced Applications*, Sydney, Sept. 20-24, pp. 761-764.
- [11] U.B. Kim (2005) Korean digital TRS(TETRA), *TTA Journal*, 99, pp. 87-95.
- [12] European Telecommunications Standard Institute (1997) Terrestrial trunked radio(TETRA): voice plus data; designer's guide, ETSI Technical Report ETR 300-1.
- [13] J.D. Parsons (2000) *The Mobile Radio Propagation Channel(2nd edition)*, Wiley-Blackwell.
- [14] W.C. Jakes (1974) *Microwave Mobile Communications*, John Wiley & Sons Inc.
- [15] H.H. Xia, H.L. Bertoni, L.R. Maciel, A. Lindsey-Stewart, R. Rowe (1994) Microcellular Propagation Characteristics for Personal Communications in Urban/Suburban Environments, *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, VT-43(3), pp. 743-752
- 접수일(2013년 8월 7일), 수정일(2013년 10월 1일),
게재확정일(2013년 10월 17일)
-
- Sung-ho Bae:**baesh615@hanmail.net
Department of Railway Electrical and Signalling Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-800, Korea
- Ki-hong Song:** skh@ dit.ac.kr
Dong-Eui Institute of Technology, 54, Yangji-ro, Busanjin-gu, Busan 614-715, Korea
- Kyu-hyoung Choi:** khchoi@seoultech.ac.kr
Department of Railway Electrical and Signalling Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-800, Korea