

경전철시험선에서 송신전력 10mW/MHz에 대한 열차제어용 무선시스템의 전파도달범위 예측

Radio coverage prediction of RF-CBTC system under transmission power 10mW/MHz at K-AGT test line

조봉관[†] · 정재일^{*}

Bong-Kwan Cho · Jae-Il Jung

Abstract Korea Railroad Research Institute has developed the driverless rubber-tired K-AGT (Korean-Automated Guideway Transit) system from 1999 to 2005 and has done its performance and reliability tests on the test line at Gyeongsan-city. Radio Frequency Communication-Based Train Control system of K-AGT, which employed Advanced Automated Train Control scheme, detects train position using the radio propagation delay between wayside and vehicle radio equipment. In this paper, we investigate whether the transmission power of radio system can be reduced to the permitted level announced by the Ministry of Information and Communication for license-free ISM(Industrial Scientific Medical) frequency bands. We first determine radio propagation model, using the measured data at test line, and perform simulation for radio coverage prediction. From the simulation results, we identify that the radio system operated with reduced power can provide good link quality in total test line.

Keywords : K-AGT test line, radio coverage prediction, Modified Okumura-Hata model, RF-CBTC

요 지 한국형 경전철의 무선통신기반 열차제어시스템은 지상과 차상 무선기 사이의 전파지연을 이용하여 열차의 위치를 검지하고 있다. 본 논문에서는 허가없이 사용할 수 있는 무선기기에 대한 정보통신부 고시기준에 적합하도록 경전철시험선 무선시스템의 송신전력을 줄여 사용할 수 있는지를 전파모의실험을 통해 검토하였다. 우선, 시험선에서 스펙트럼분석기로 측정된 데이터를 분석하여 무선전파(傳播)모델을 결정하고, 경전철시험선의 지형데이터와 감소된 송신전력을 전파전파(電波傳播)예측 프로그램에 적용하여 전파도달거리를 예측하고, 예측데이터를 바탕으로 송신전력을 줄였을 경우의 실효성을 제시한다.

주 요 어 : 경전철시험선, 전파도달범위예측, 오투무라-하타 모델, 무선통신기반열차제어시스템

1. 서 론

국내의 경전철기술은 한국형 경전철시스템(K-AGT)기술 개발과 시험선 운영을 통하여 급속한 성장을 이룩하였다. 특히, 신호제어시스템 기술은 종래의 궤도회로방식을 완전히 탈피한 AATC(Advanced Automatic Train Control)기술 기반의 무선통신기반열차제어(RF-CBTC : Radio Frequency

Communication-Based Train Control)시스템을 구축하였으며 시험선에서 다중편성열차에 의한 열차간격제어시험을 추진하고 있다[1,2,3]. 이러한 RF-CBTC기술은 철도신호분야의 선진기업인 알카텔, 봄바르디에 등이 라스베가스, 홍콩의 경전철노선에 구축하여 성공적인 성과를 얻었으며 주파수 허가가 필요없는 ISM(Industrial Scientific Medical)대역을 사용하고 있다[4].

그러나, 여기에 사용되는 무선시스템은 IEEE 802.11b에 의한 무선통신 기술을 사용하는 시스템으로 Radio Ranging 기술을 사용하는 K-AGT시스템과 크게 상이하다[5]. 또한, 국가별 전파사용환경이 상이하기 때문에 K-AGT의 무선제

[†] 책임저자 : 정회원, 한양대학교, 전자통신전파공학과, 박사수료,
한국철도기술연구원, 경량전철시스템연구단, 선임연구원
E-mail : bkcho@krii.re.kr
TEL : (031)460-5439 FAX : (031)460-5749

^{*} 한양대학교, 전자통신전파공학과, 교수

어시시스템은 국내 전파환경에서 전파도달범위를 검증할 필요가 있다.

현재 경산시험선에서 열차제어를 위한 무선시스템은 정보통신부로부터 실험국으로 허가받아 2.45GHz대역에서 500mW의 송신전력을 사용하고 있다. 2.45GHz대역은 “무선데이터통신 시스템용 특정소출력무선기기”용으로 주파수 지정되어 있으며 송신전력밀도 상한기준 10mW/MHz를 만족하면 정보통신부로부터 허가없이 사용할 수 있는 대역이다[6]. 따라서 무선 제어시스템을 실용화하기 위해서는 송신전력밀도를 10mW/MHz로 낮추는 것이 필요하다. 송신전력을 낮출 경우 전파도달거리가 짧아지기 때문에 무선장치의 설치간격을 좁혀야 하며 이것은 빈번한 핸드오프에 의한 통신링크 품질악화, 무선시스템 설치비용 상승을 가져올 수 있다.

본 논문에서는 경전철시험선의 지형데이터와 감소된 송신전력을 전파전파(電波傳播)예측 프로그램에 적용하여 전파도달거리를 예측하고 예측데이터를 바탕으로 송신전력을 줄였을 경우의 실효성을 제시하고자 한다.

2. 경전철 시험선의 신호제어시스템

2.1 시스템 개요

경산시험선의 무선시스템은 미국에서 군사목적으로 사용한 EPLRS(Enhanced Position Location Reporting System)의 위치검지기술을 철도분야에 응용하여 개발한 AATC기술 기반의 RF-CBTC시스템이다[7,8]. 이는 종래 고정폐색단위의 열차위치 검지·제어방식에서 벗어나 연속검지·제어의 이동폐색방식을 구현 가능하게 하는 차세대 자동열차제어시스템이다. AATC시스템은 무선통신의 전파(propagation) 지연을 이용하여 거리계측(무선거리측정)을 토대로 열차위치를 검지하며 다음과 같은 장점이 있다.

- 0.5초 마다 연속적으로 열차위치검지, 한 제어지역에서 최대 20편성 열차검지
- SC(Station computer) 한 대로 하나의 제어지역 내에서 최대 20편성의 열차위치검지와 제어를 할 수 있으므로, 종래의 궤도회로방식에 비해 기기실의 공간을 대폭 줄일 수 있다.
- 지상, 차상 간 및 지상 각 무선기간 통신을 모두 무선으로 송수신하기 때문에, 연선에 설치하는 신호 케이블을 크게 줄일 수 있다.

AATC시스템의 구성도는 Fig. 1과 같다. 제어국인 SC와 역무선기(SRS : Station Radio Set), 선로변의 연선무선기(WRS :

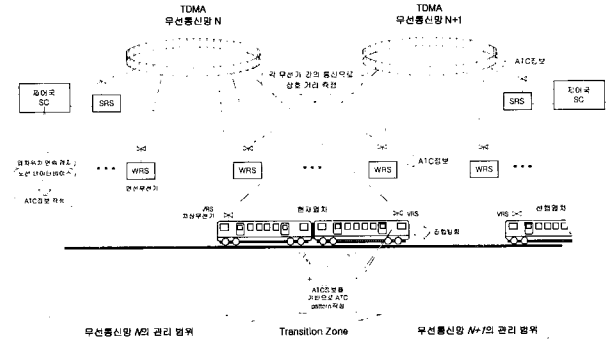


Fig. 1. AATC system configuration

Wayside Radio Set), 차량의 차상무선기(VRS : Vehicle Radio Set)로 구성되며 무선통신망은 TDMA통신방식에 의해 제어된다.

각 무선기의 역할은 다음과 같다.

- WRS : 선로변에 설치되어 인접한 무선기와 상호 통신을 하여 제어국의 정보전달 및 단말장치쪽에서 제어국으로 정보전달 등을 수행한다. 1개의 무선기에서 다음 무선기까지 통신이 가능하도록 통신설계가 이루어진다.
- SRS : 제어국에 설치되어 제어국 CPU에 정보 전송 및 선로변 무선기에 정보를 발신한다.
- VRS : 차량의 선두 및 후미차량에 취부되어 가까이 위치하는 WRS 및 SRS와 통신하여 네트워크를 형성한다.

여러 제어지역들은 사이에 천이지역을 두어 연결함으로써 서비스영역 확장에도 시스템 변경이 용이한 구조이다. SC는 WRS와 VRS 간의 거리를 수집하며 이를 토대로 제어지역 내의 모든 열차위치를 검지하고 추적한다. 제어 대상 열차의 전방 안전거리(safety distance) 및 이동권한은 선행열차의 위치, 전방진로 개통정보, 제한속도, 구배정보, 비상제동패턴 등을 활용하여 계산되며 무선통신망을 통해 차량에 전송된다. 차상장치는 수신한 정보를 토대로 이동권한지점까지 정지할 수 있는 안전제동패턴(safe brake pattern)을 작성한다. 안전제동패턴과 속도 센서의 속도정보를 비교하여, 안전속도를 초과하면 제동명령을 출력한다.

무선통신망은 통신 신뢰성 향상을 위해 TDMA, CDMA와 FDMA의 다중통신방식을 사용하고 있다. 모든 무선기는 GPS위성을 활용하여 동기되며, 무선기의 송신 타이밍 및 사용주파수는 SC에서 관리한다.

SC는 인접 제어지역에서 해당 제어지역으로 진입하는 열차 및 해당 제어지역에서 인접 제어지역으로 진출하는 열차에 대해서 무선통신망 자원의 제공 및 사용 권한의 차단을 지시한다. 무선통신망은 연선을 따라 총 4개의 데이터버스상에

서 A버스와 B버스 2개씩 구성하여, SC에서 열차로는 안전거리 및 이동권한, 열차에서 SC로는 열차상태를 전송한다. 이러한 구성 및 절차는 Fig. 2와 같다.

무선통신망은 여러 개의 무선기가 동시에 수신할 수 있도록 용장(冗長)구성 되어 있으며, 하나의 무선기가 고장일 경우, 다른 무선기가 대신할 수 있기 때문에 전체 시스템은 정상적으로 동작된다. 또한 매번 다른 PN코드부호에 의해 스펙트럼확산 변조되며 리드솔로몬부호(Reed-Solomon code)의 오류정정기능이 있기 때문에 높은 신뢰성으로 구현된다. Fig. 3은 버스트 메시지의 형식을 보여준다.

2.2 무선기(역, 연선, 차량) 설치 현황

경전철시험선은 경상북도 경산시 남천면 삼성~남성현역(철도폐선 부지내)의 연장 약 2.4km(본선 : 1.87km, 측선 : 387.5m, 대피선 : 120.92m)구간이며, Fig. 4와 같이 무선기가

Table 1. Specification of SRS, WRS and VRS

Item	Specification
multiple access	TDMA/CDMA/FDMA
frequency	2.45GHz band (2424.75 MHz ~ 2455.75 MHz)
Tx power	500 mW
antenna	bidirectional horn antenna (gain : 6dBi)
receive sensitivity	-105 dBm
modulation	DSSS+MSK
modulation speed	<ul style="list-style-type: none"> digital data rate : 238kbps Direct sequence chip rate : 5Mcps (21chip/1bit) MSK frequency shift (Δf) : 1.25MHz
TDMA	256 time slots / 0.5 sec (1 burst message / 1 time slot)
Tx interval	1 burst message / 4 time slots / 1 radio

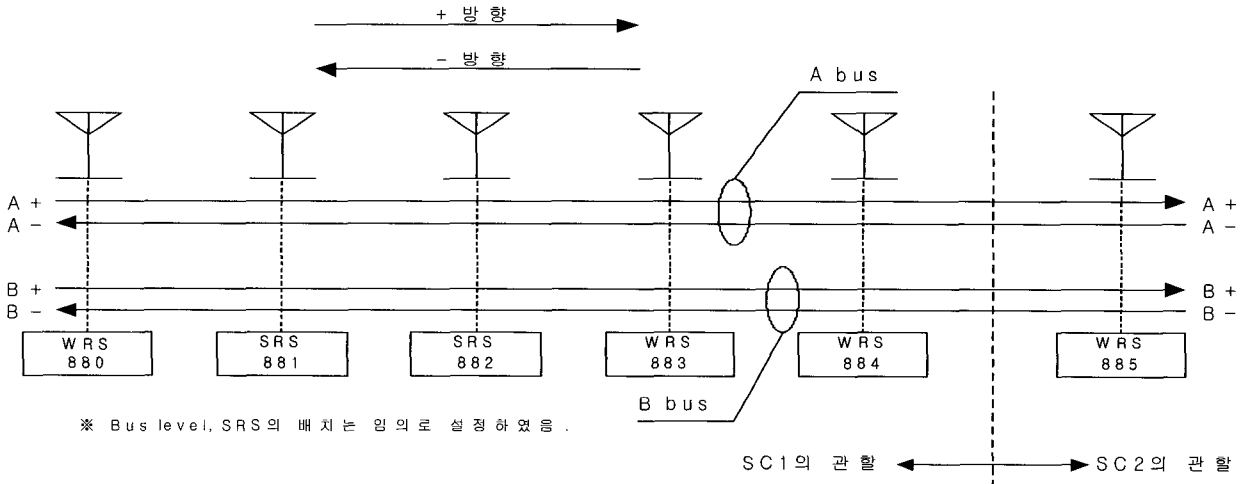


Fig. 2. Data bus architecture

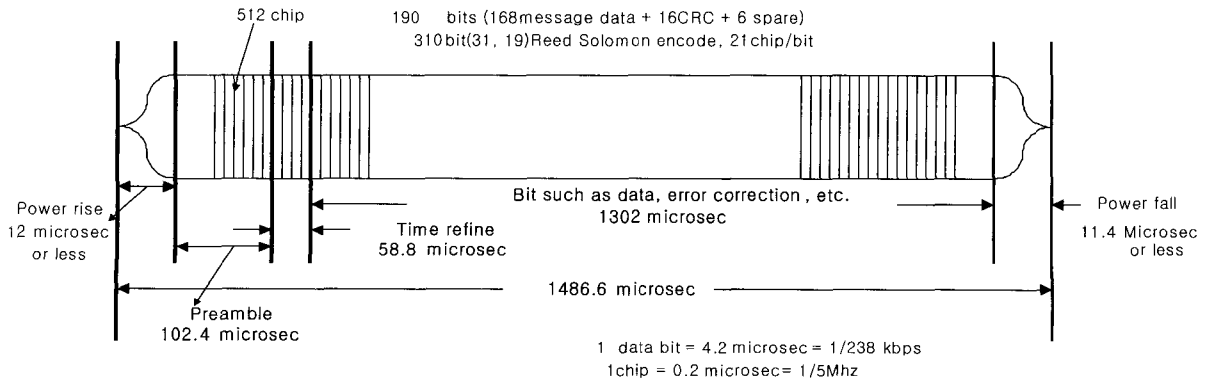


Fig. 3. AATC burst message format

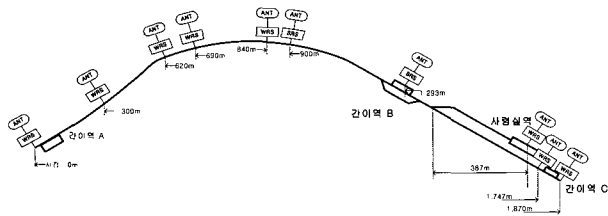


Fig. 4. Location of radio stations in K-AGT test line

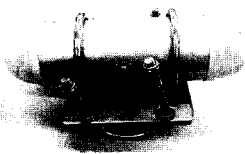


Fig. 5. Antenna

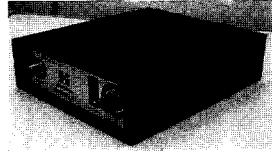


Fig. 6. Modem

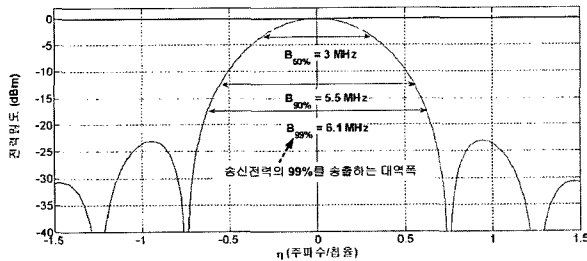


Fig. 7. Power spectral density vs. normalized frequency

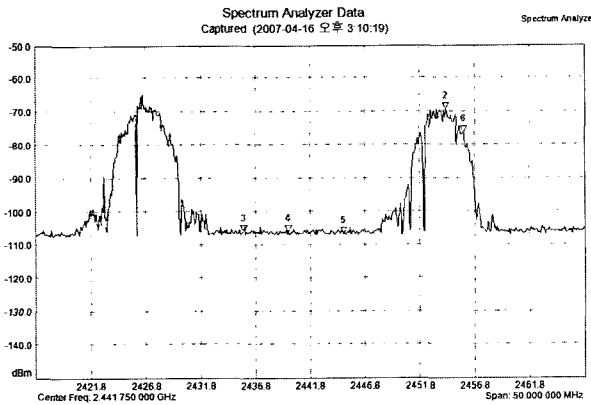


Fig. 8. Measured spectrum of the point, 240m from WRS884 in the direction of A station

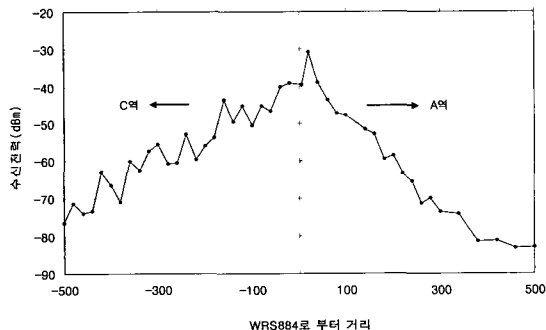


Fig. 9. Received power at various distance from WRS884

설치되어 있다.

무선기의 명칭은 A역쪽에서부터 C역방향으로 WRS880, WRS881, WRS882, WRS883, WRS884, SRS885, SRS886, WRS887, WRS888이다. 시험실역에 설치된 WRS887은 수신 다이버시티를 적용하여 이격거리가 6m인 두 개의 안테나(WRS 887-1, WRS887-2)로 구성된다. WRS884는 GPS수신기가 설치되어 있으며 모든 무선기는 WRS884의 시간에 동기화되어 TDMA망을 구성한다.

2.3 무선기 사양

역, 연선, 차량 무선기는 Table 1의 사양으로 동작한다. 각 데이터비트들은 21개의 칩들로 확산되며 주파수 효율이 높은 MSK방식으로 변조된다. Fig. 5와 6은 각각 안테나와 무선모뎀이며 Fig. 7은 전력스펙트럼밀도(PSD : Power Spectral Density)를 나타낸다. 현재 무선기들은 2.45GHz 대역에서 실험국 무선의 500mW 송신전력으로 동작하고 있으나, 상용단계에서는 전파법 허용기준인 10mW/MHz를 만족하기 위해 송신전력을 낮추는 노력이 필요하다.

3. 전파전파(電波傳播) 예측

전파도달범위의 예측은 경전철시험선 전파환경과 유사한 전파모델(propagation model)을 먼저 선정해야 한다. 따라서 시험선에서 수신전력을 스펙트럼분석기를 사용하여 측정하고 수집한 수신전력 데이터와 상관성이 가장 높은 전파모델을 선정한다. 결정된 전파모델과 시험선의 지형데이터와 무선기의 사양을 전파예측 프로그램에 입력하여 전파도달범위를 예측한다.

3.1 수신전력 예측

WRS884만 동작(power on)하도록 켜고 다른 모든 무선기는 끈 상태(power off)에서 차상의 안테나에 스펙트럼 분석기를 연결하여 수신전력을 측정한다. 측정 위치를 기록하기 위해 GPS 수신기를 차상 안테나의 옆에 설치하고 노트북에 연결하여 위치좌표를 저장한다. 측정 범위는 시험선 선로를 따라 WRS884의 좌우로 500m까지 20m 간격으로 측정하여 총 50개의 수신전력레벨을 측정하였다. 일례로 A역 방향 240m 지점에서의 스펙트럼 분석기 측정파형은 Fig. 8과 같다.

Fig. 9는 WRS884로 부터의 거리에 따라 변화하는 수신전력을 나타낸다. 거리가 양의 값이면 A역 방향을, 음의 값이면 C역 방향을 의미한다. A역 방향의 좌측은 언덕이 있는 곡선 부로서 가시거리(Line Of Sight)를 확보할 수 없기 때문에 전파감쇠가 C역 방향에 비해 심한 것을 볼 수 있다.

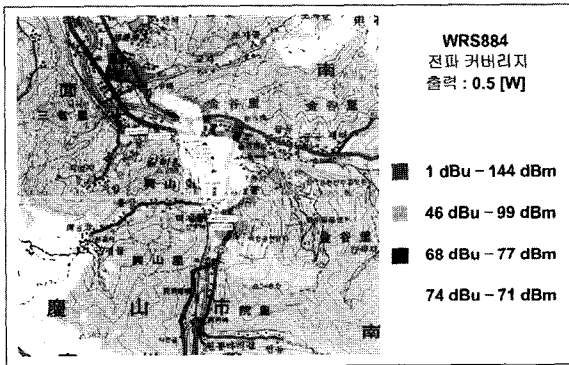
3.2 전파전파 모델 선정

전파 모의실험 도구인 ICS Telecom의 전파모델들 중에서 시험선의 무선전파환경을 잘 반영할 수 있는 모델을 선정하였다. 50개의 측정 데이터와 전파모델의 파라미터를 조절하여 얻은 모의실험 결과를 상관을 취하여 상관도가 높은 전파 모델을 선택하였다. Modified Okumura-Hata 모델에서 가장 좋은 상관도를 보였으며, Table 2는 ITU-R 525모델과 Modified Okumura-Hata 모델을 적용하였을 때 결과 값을 나타낸다[9].

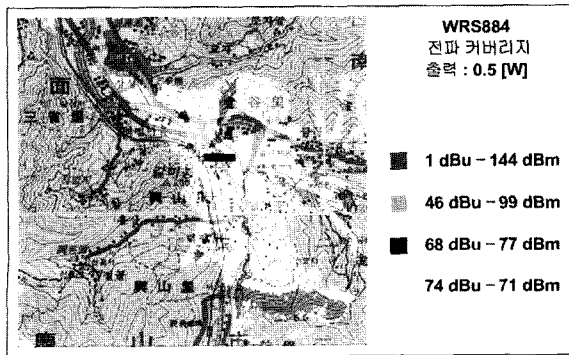
Fig. 10은 ITU-R 525와 Modified Okumura-Hata 모델을 시험선 지형에 적용하였을 때 예측된 전파도달범위를 나타낸다.

Table 2. Analysis of radio propagation model

radio propagation model	diffraction model	Correlation 2 pixels±2dB	Correlation 1 pixels±4dB
		correlation coefficient(%)	correlation coefficient(%)
ITU-R 525	Bullington	64.71	64.71
ITU-R 525	Deygout	55.88	67.65
ITU-R 525	RoundMank	64.71	70.59
Modified Okumura-Hata	Deygout	76.47	82.35



(a) Modified Okumura-Hata (Deygout94) model



(b) ITU-R 525 (Deygout94) model

Fig. 10. Radio coverage by WRS884 (Tx power = 500mW)

두 모델의 전파도달범위가 확실히 다르게 나타나므로 정확한 전파도달범위예측은 대상지역과 유사한 전파모델선정이 필요함을 알 수 있다.

4. 연구 결과

4.1 전파전파(電波傳播) 모의실험

4.1.1 전파법에 적합한 최대송신전력 산출

전파법에서 허용하는 무선기기의 기준인 10mW/MHz를 만족하기 위해 무선시스템이 송출할 수 있는 최대전력을 구한다. MSK변조된 신호의 기저대역 스펙트럼은 다음 수식과 같이 주어진다.

$$G_{MSK}(\eta) = \frac{A^2 \cos^2(2\pi\eta)}{\pi^2(1-16\eta^2)^2} \quad (1)$$

여기에서, η =주파수/직접확산속도로서 정규화된 주파수이다. 직접확산속도는 Table 1에 나타난 바와 같이 5 Mcps값이다. 먼저, 1MHz내의 최대송신전력 대비 총송신전력의 비율을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{P_{\max \text{ power within 1MHz}}}{P_{\text{total}}} = \frac{\int_{-0.1}^{0.1} G_{MSK}(\eta) d\eta}{\int_{-\infty}^{\infty} G_{MSK}(\eta) d\eta} = 0.3163 \quad (2)$$

식(2)에서 $P_{\max \text{ power within 1MHz}}=10mW$ 이면 $P_{\text{total}}=31.63mW$ 로 구해진다. 본 논문에서는 전파예측을 위해 31.63mW보다 작은 30mW를 사용하였다.

4.1.2 WRS884에 의한 전파도달범위 예측

Modified Okumura-Hata (Deygout94) 모델을 이용하여 송신전력을 30mW로 낮추었을 때 WRS884의 전파도달범위는 Fig. 11과 같다.

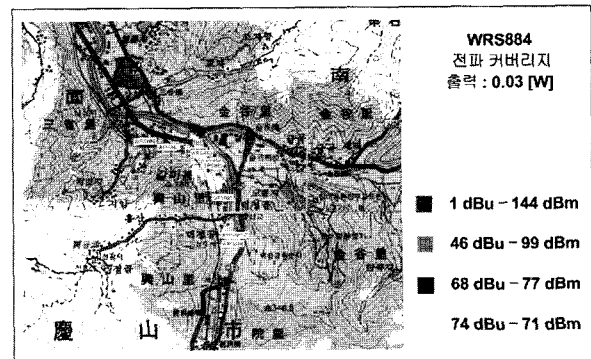


Fig. 11. Radio coverage by WRS884 (Tx power = 30mW)

송신전력 500mW를 사용할 경우의 전파도달범위를 보여주는 Fig. 10의 (a)와 비교하면 도달범위가 상당히 줄어든 것을 확인할 수 있다. Table 3은 WRS884가 500mW와 30mW 송신전력으로 송출할 때 다른 무선국들에서의 수신전력을 보여준다.

수신다이버시티의 효과를 고려하여 WRS887에 설치된 안테나중 WRS887-1의 위치를 기준으로 수신전력을 예측하였다. 무선기가 다른 무선기로부터 전송되는 신호를 오류없이 검출하기 위해서는 수신감도에 페이딩 마진, 간섭량, 케이블 손실 등을 고려하여야 한다.

따라서, 수신하는 무선기의 모뎀 입력의 최소신호세기는

Table 3. Received Power at radio stations when WRS884 transmits

radio station	Tx power = 500mW	Tx power = 30mW
WRS880	-105.7 dBm	-117.9 dBm
WRS881	-100.3 dBm	-112.5 dBm
WRS882	-80.8 dBm	-93.1 dBm
WRS883	-61.2 dBm	-73.5 dBm
SRS885	-21.9 dBm	-34.1 dBm
SRS886	-55.1 dBm	-67.3 dBm
WRS887-1	-66.3 dBm	-78.5 dBm
WRS888	-68 dBm	-80.2 dBm

수신감도+페이딩마진+케이블손실+간섭량이다. 페이딩마진을 17 dB, 케이블 손실 및 기타 손실을 3 dB, 간섭량을 10 dB라고 하면 무선기 모뎀의 입력에서 필요한 최소신호세기는 $-105 \text{ dBm} + 17 \text{ dB} + 3 \text{ dB} + 10 \text{ dB} = -75 \text{ dBm}$ 이다.

Table 3으로부터 500mW일 경우 A역 방향으로 WRS883까지, C역 방향으로 WRS888까지, 30mW일 경우 A역 방향으로 WRS883까지, C역 방향으로 SRS886까지 수신가능하다.

송신전력이 500mW이면 C역 방향으로 3개의 무선기가 동시에 WRS884의 신호를 받을 수 있어 망은 3중화되며 30mW로 송신전력을 줄이면 2개의 무선기만이 수신할 수 있어 무선망의 신뢰도는 다소 떨어질 것으로 예상되지만 송신전력을 줄이더라도 시험선의 운영과 실용화에는 무리가 없을 것으로 보인다.

4.1.3 전체 무선시스템에 의한 전파도달범위 예측

Fig. 12는 모든 연선 무선기(WRS880~888)가 송신전력 500mW와 30mW로 동작할 때 전체 무선시스템의 전파도달범위를 나타낸다. 30mW로 송신전력을 줄일 경우 전체 도달범위는 줄어든다. 하지만 선로의 모든 범위에서 수신전력이 $-74 \sim -70 \text{ dBm}$ 으로 나타나고 있기 때문에 4.1.2에서 예측한 대로 30mW로 송신전력을 줄여도 시험선의 운영에는 문제가 없을 것이다.

5. 결론

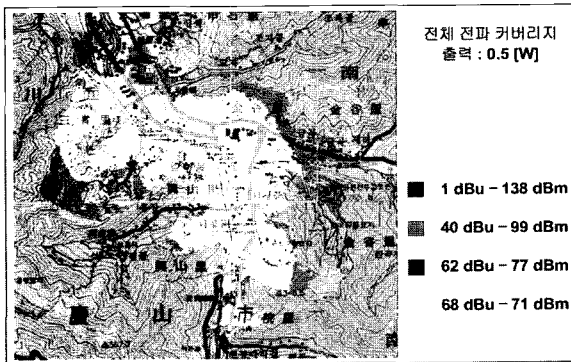
본 연구에서는 허가없이 사용할 수 있는 무선기에 대한 정보통신부 고시기준에 적합하도록 경전철시험선 무선시스템의 송신전력을 줄여 사용할 수 있는지를 전파모의실험을 통해 검토하였다.

500mW에서 30mW로 송신전력을 줄여도 한 연선 무선기 전송신호를 이웃한 두 개의 연선 무선기에서 동시에 받아 신호를 복원하기에 충분함을 확인하였다. 따라서, 송신전력밀도 상한기준 10mW/MHz를 충족시키므로, 정통부의 주파수 허가 추가 연선 무선기의 설치없이 송신전력을 줄인 무선시스템을 적용할 수 있을 것으로 평가된다.

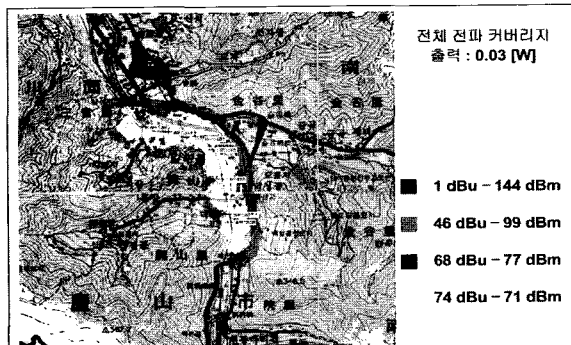
향후 경산시험선에서 본 논문에서 예측한 시뮬레이션 값을 근거로 무선시스템의 무선거리측정의 성능을 검증할 계획이다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원(2004), “경량전철 신호제어시스템 기술개발 연구개발보고서”.



(a) Tx power = 500mW



(b) Tx power = 30mW

Fig. 12. Radio coverage by whole radio stations

2. 한국철도기술연구원(2005), “경량전철시스템 기술개발사업 운영 안정화 연구결과보고서-신호제어시스템기술개발분야”.
 3. RTRI & JR동일본문화재단(2003), “Japanese Railway Technology Today”, Ch.7.
 4. Michael Fitzmaurice (2006), “Use of 2.4GHz frequency band for communications based train control data communications systems”, Proceedings of JRC2006, April 4~6, pp.263~267.
 5. Web site, “<http://www.tsd.org>”.
 6. 전파연구소고시 제2005-127호(2005), “방송·해상·항공·전기통신사업용 외의 기타업무용 무선설비의 기술기준”.
 7. G. L. Mayhew, Kivett, J. A. Kivett, J. G. Himes, J. A. Evans (1994), “Application of radio navigation technology to advanced automatic train control”, IEEE Position Location and Navigation Symposium, pp.217~224.
 8. 조봉관(2002), “무선에 의한 열차위치검지 기술개발 동향”, 한국철도기술연구원 해외철도기술동향, 7회, pp.21~26.
 9. ITU (1994), “Calculation of free-space attenuation”, Rec. ITU-R PN.525-2.
- (2007년 8월 27일 논문접수, 2007년 10월 8일 심사완료)