

방진패드를 이용한 VHF 열차무선 송신기 특성 개선

Performance Improvement of VHF Train Radio Transmitter by Using Vibration-Proof Pads

김성동*, 구경현*

Sung-Dong Kim*, Kyung-Heon Koo*

요 약

본 논문에서는 안전하고 정확한 운용을 지원하기 위한 열차무선 시스템의 특성 개선에 초점을 맞추었다. 열차무선 시스템의 고장 및 특성 변화의 원인을 분석하고 측정 지표를 선택하였다. 열차의 진동에 의한 송신기의 주파수 변화를 보이고, 방진패드를 이용하여 주파수 안정도가 향상되는 것을 확인하였다.

Abstract

This paper focuses the performance improvement of the train radio system (TRS) supporting the safe and accurate operations. The causes of troubles and the performance drift in TRS have been analyzed and measurement indexes have been selected. Frequency shifts of transmitters causing from train vibrations have been shown, and the improvement of frequency stability has been confirmed by use of vibration-proof pads.

Key words : Vibration-Proof Pads, VHF Train Radio Transmitter

I. 서 론

도시철도는 1863년 영국 런던에서 개통된 후 44개 국가의 100여개 도시에서 운영되고 있다. 서울 지하철의 경우 연간 수송인원은 연인원으로 22억명으로 세계3위이고, 부산 등 광역시를 포함하면 전국적으로 30억명 정도이다.

시스템기술 측면에서 본 도시철도시스템은 기계, 전기, 전자 및 제어, 정보통신, 재료, 토목 등이 유기적으로 결합되어 차량, 급전, 신호, 통신, 선로시스템, 운영시스템을 구성하고 있는 복합시스템 기술이다. 도시철도 정보통신시스템은 도시철도 운행의 안전과 정확성 확보, 원활한 운영체계구축의 밑바탕을

제공한다. 운영 요원 간 의사소통과 각 시스템 간 데이터 전송, 감시, 대 승객 통신서비스 등의 신속하고 정확한 운영을 하기위한 제반 설비이다.[1]

특히 열차무선시스템은 열차의 안전운행을 지원하는 시스템으로 성능열화에 의한 장애발생시 안전에 치명적인 영향을 주는 설비로 열차지연 등으로 공공기관의 불신을 초래할 수 있다.

우리나라 열차무선 시스템은 주파수 전용방식과 주파수 공용 방식으로 나눌 수 있다. 주파수 공용방식은 주로 디지털 TRS이고 고속철도와 공항철도, 그리고 일부 광역시 도시철도의 특정 호선에서 사용되고 있다. 주파수 전용방식은 주로 VHF FM 방식이며 대부분의 도시철도 열차무선에서 사용하고 있다. 열

* 인천대학교 전자공학과(Dept. of Electronics Engineering, University of Incheon.)

- 제1저자 (First Author) : 김성동
- 투고일자 : 2009년 5월 21일
- 심사(수정)일자 : 2009년 5월 22일 (수정일자 : 2009년 7월 3일)
- 게재일자 : 2009년 8월 30일

차무선시스템은 도시교통시스템의 중요한 시스템 중 하나의 서브시스템이다. 본 논문은 제조사나 연구실의 모의실험이 아닌 실제 영업 운행 중인 열차에서 송신기 특성을 분석하여 실용적 의미의 성능 열화 및 시스템 분석의 실체에 접근하고자 하였다.

II. 시스템 개요

2-1. 도시철도시스템

도시철도시스템은 차량, 급전, 신호·통신, 선로 구축물, 역사 설비, 운영시스템, 기타 부대설비 등으로 구성되어 있다. '도시철도법'에서는 '도시교통의 원활한 소통을 위해 도시교통 권역에서 건설·운영하는 철도·모노레일 등 궤도에 의한 교통시설 및 교통수단'으로 정의하고 있다. 수도권 전철 역시 '대도시권 광역 교통관리 특별법'에 "2개 이상의 시도에 걸쳐 운행되는 것으로 대통령령이 정하는 요건에 해당하는 도시철도 또는 철도"로 정의하고 있다. 도시철도 시스템에서 중요한 것은 사전에 정해진 시스템 기능 유지, 자연재해 및 설비고장 등에 의한 시스템 기능의 혼란, 시스템 기능에 영향을 주는 인간의 행위 등 3개 요소가 균형을 이루는 것이다.[1]

2-2. 정보통신시스템

표 1. 정보통신설비 분류
Table 1. Classification of IT facilities.

설비구분	종류
운영관리용 설비	교환설비, 전송설비
열차운전용 설비	열차무선설비, 사령전화설비, 화상전송설비
여객서비스용 설비	방송설비, 행선안내게시기, 복합통신설비, 전기시계설비
설비보전용 설비	토크백, 보안설비, 접지설비, 써지프로텍터, 전원설비,

정보통신시스템은 음성위주 통신에서 데이터 통신을 거쳐 다양한 멀티미디어 통신으로 진화되고 있

다. 철도의 안전성, 신속성, 편의성을 고객에게 제공하기 위한 영업, 운전, 차량, 시설, 전기, 신호 등 각종 설비의 데이터들은 정보통신시스템을 이용하여 전송되어 신속하고 안정적인 서비스를 제공한다. 정보통신시스템은 열차의 운전관리를 위한 설비와 승객의 편의·안전을 위한 설비 등으로 나눌 수 있다.

2-3. VHF 방식의 열차무선시스템

열차무선시스템은 열차 안전운행을 위해 종합관제실에서 운행 중인 열차 승무원·승객과 안전운행에 관한 무선 통화, 구내전화 가입자와 휴대용 무선국 간의 통화를 지원하며 비상시 모든 열차에 일체 지령을 할 수 있는 설비이다.

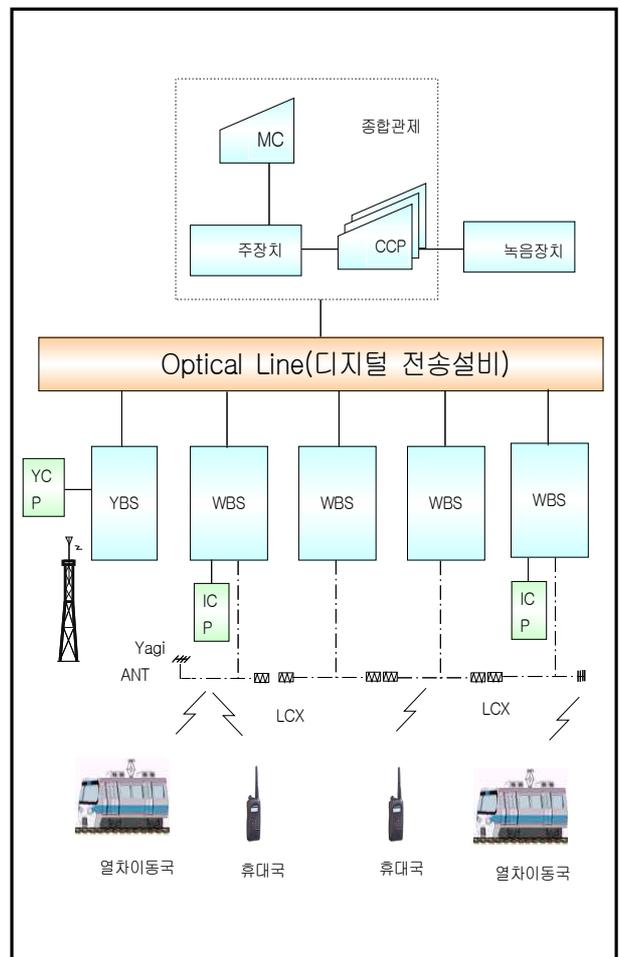


그림 1. 열차무선시스템 계통도(출처: 서울도시철도공사 내부자료)

Fig. 1. Block diagram of train radio system.

이 시스템은 전파 전달 방식에 따라 SR (Space Radio) 방식과 IR (Inductive Radio) 방식으로 구분할 수 있다. SR 방식은 안테나에서 방출된 고주파 전력이 연선에 포설한 개방형 전송로를 통하여 전파를 누설시켜 일정한 전계강도를 유지시키는 방식으로 대부분의 도시철도에서 사용되고 있다. IR 방식은 전파유도 형식을 이용한 것으로 연선에 설치된 도선에 고주파 전류를 흘려 이동국의 안테나와 정전유도 결합하는 방식으로 일본의 지하철과 서울 지하철 2호선에 적용되었던 방식이다.[2] 통화 채널은 본선구간에서 관제와 열차 간 통신을 하는 C 채널과 차량기지에서 신호취급실과 열차 간 통신을 하는 Y 채널이 있고, 열차, 휴대국, 구내전화 간 통신을 하는 M 채널이 있다.

III. 시스템 분석

도시철도 열차무선시스템은 초기 도입된 1주파 반이중방식(half duplex)에서 서울지하철 3·4호선 개통과 더불어 2주파 전이중방식(full duplex)으로 개량되었다. 대부분의 도시철도에서 VHF 2주파 전이중방식인 주파수 전용 방식을 사용해 왔으나 서비스 제한, 비상시 대응, 재난을 대비하여 주파수 공유방식으로 전환되고 있으며, 디지털 융합시대에 대비하여 디지털 방식을 채택하고 있다. 특히 VHF 열차무선시스템 중 송신기와 수신기의 기준 주파수 발진 방식으로 수정발진을 이용한 곳은 서울도시철도공사의 5·7·8호선뿐이고 6호선과 다른 도시철도는 위상 동기루프(PLL, phase locked loop) 방식을 사용하고 있다. 이 장에서는 서울도시철도공사 운영 시스템을 중심으로 수정발진방식과 PLL 방식의 특징과 장애 발생 현황 및 원인을 분석하고자 하였다.

3-1. 도시철도 호선별 시스템 특징

열차무선시스템의 호선에 따른 가장 큰 차이는 대역폭 차와 송신기 발진부, 수신기 제1국부 발진부에 있다. 5호선은 광대역 방식이고 나머지 호선은 협대역 방식이다. 5·7·8호선은 수정발진 방식이며 6호선

은 PLL 방식이다. 5호선과 7·8호선 무선시스템간의 차이는 연속톤 제어스quelch(CTCSS, continuous tone controlled squelch system) 사용 여부에 있다. CTCSS는 낮은 주파수의 톤 신호를 음성신호에 포함시켜 송신하고, 톤 신호가 스킨치 회로를 작동시킨다. 이는 특정한 채널에서 통신 비밀을 유지하기 위해 톤 신호가 스킨치 회로를 동작시켜 톤 신호가 포함된 음성신호만이 수신된다.[3]

수정발진기는 LC발진기에 비해 높은 주파수 안정도와 Q값을 가진 발진기이나 온도·습도의 변화, 전원 전압의 변화, 부하의 변동, 외부 기계적 진동 등에 의해 발진 주파수가 변동한다. 이에 반해 PLL 발진방식을 사용한 6호선은 신호의 위상을 강제적으로 유지하여 주파수를 안정적으로 고정하는 방식으로 주파수 안정도가 개선되었으며, 피드백을 이용한 발진기는 보다 정확한 신호파형을 만들 수 있다. PLL은 정확한 발진 및 주파수 조절을 하는 주파수합성기의 일부분으로, 원하지 않은 신호가 발진기에서 출력될 경우 그 신호를 검출해서 다시 입력하여 자체적으로 조절을 하여 발진기의 성능을 향상시킨다. PLL은 주기적인 신호의 위상변화에 관하여 동작하는 피드백 시스템이다. 기본적으로 위상비교기 (Phase Detector), 저역통과필터 (Low Pass Filter), 전압제어 발진기 (Voltage Controlled Oscillator)로 구성된다. 위상 비교기는 피드백 루프에서 오차 증폭기의 역할을 하여 기준 신호의 위상과 피드백 신호의 위상차를 최소화한다.[4,5]

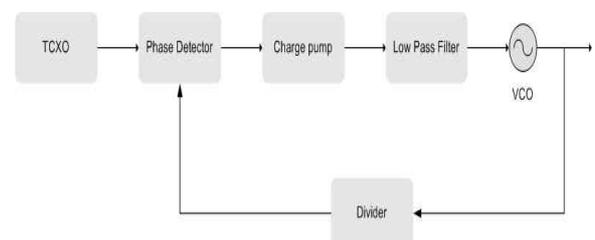


그림 2. Phase Locked Loop 기본 구성
Fig. 2. Block diagram of phase locked loop.

3-2. 장애현황 및 분석

열차무선시스템의 장애 중 94%가 차량 이동국 장애이다. 예로 2007년 6호선의 차량 이동국 장애건수

중 수신보드(RCVR)가 차지하는 비율은 8.8%이고, 발진변조보드(XMTR)의 비율은 2.9%이다. 7호선의 경우 RCVR은 24%이고, XMTR은 12%를 차지하였다. 이는 조작반(TRCP: Train Radio Control Panel)을 포함한 것으로 무선통화장치(TRE:Train Radio Equipment)만 고려시 더 높은 비율로 나타날 것이다.

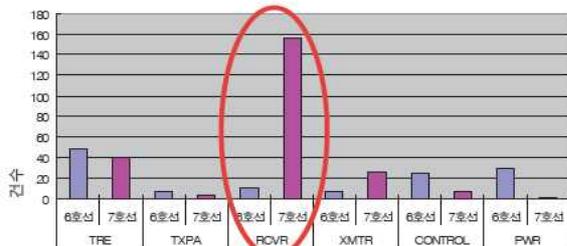


그림 3. 무선통화장치(TRE) 장애 현황(2005)
Fig. 3. TRE trouble status (2005).

XMTR보드의 대부분은 주파수안정도 불량과 RF 출력 불량이다. RCVR보드의 경우 신호 대 잡음및왜곡 비율(SINAD) 감도 불량인 대부분이며 중간주파 트랜스(IFT)와 1차 국부발진회로의 동조조정용 트리머 콘덴서를 조정하여 감도를 조정한다. 7호선과 8호선의 경우 TRE가 열차의 주진동방향과 수직으로 설치되어 있어 RCVR보드 중 핵심적인 역할을 하는 FM 중간주파수 집적회로(IF IC) 및 주변 수동소자들이 진동이나 산화 등에 의한 실장 불량인 경우가 많았다.

고주파 발진회로에서 잔류 FM이 발생되면 발진 주파수가 변동하게 된다. 전원에 포함되어 있는 노이즈 성분의 진폭으로 인하여 발진 트랜지스터의 출력이 변화하고, 이것에 의해 발진주파수가 FM 변조를 받는다. 발진동조회로의 L, C, 가변콘덴서 등이 기계적 진동을 받고 있으면 그 진동 발진 주파수가 FM 변조 된다. 특히 가변콘덴서가 이 영향을 받기 쉬우며 방진 고무로 띄워서 실장하는 경우도 있다.[6] 이와 같은 잔류 FM에 의한 위상잡음은 특히 무선통신에 있어서 심각한 시스템 장애를 일으킨다.

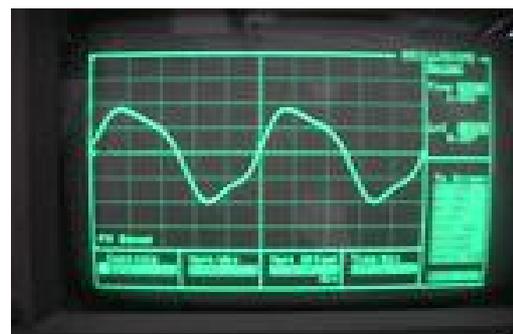
수정발진기의 위상잡음은 고유 위상잡음과 진동에 의한 위상잡음이 있다. 많은 경우 수정발진기의 고유 위상잡음에 못지 않게 자동차, 항공기, 선박 등의 이동체가 운행 중 발생하는 진동에 의한 위상잡음이 심각한 문제이다. 이동체의 진동이 수정발진기

에 가해질 때 FM 측대파(sideband)가 발생하여 위상잡음의 형태로 나타난다. 특히 랜덤진동의 경우 넓은 대역에 걸쳐 위상잡음이 증가한다. 진동에 의한 위상잡음을 줄이기 위해서는 가속도감도(g sensitivity)가 개선된 SC-cut 수정결정체를 사용하거나 적절한 방진장치를 사용해야 한다.[7]

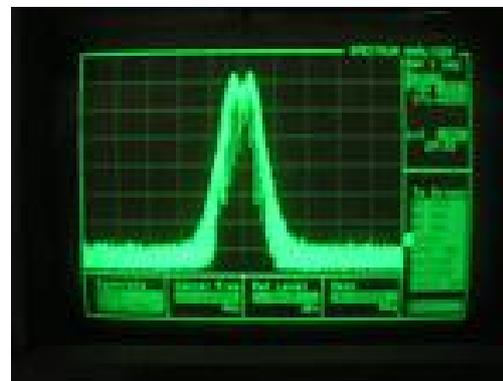
차량 이동국 제조사 운영조건에는 수직 방향으로 600~1200rpm에서 진동을 1mm폭으로 3시간 동안 진동 후 이상이 없어야 한다고 되어 있다. 이는 랜덤진동, 임펄스 진동, 전후좌우 진동에 대한 설계시 고려가 부족함을 알 수 있다. 그 밖에 성능열화 요인으로는 기계적 결합, 부품의 경년변화, 각종 전자적인 간섭, 온도 등이 있다.

IV. 차량이동국 출력 주파수 조정

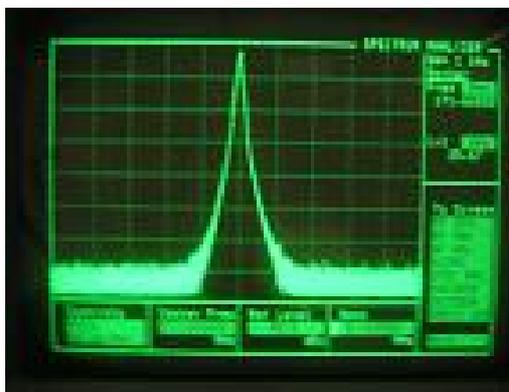
차량 이동국 송신출력의 발진주파수와 오디오 신호를 인가한 주파수 편이를 측정하였다. 이는 열차가 운행 중 측정이 용이하고 출력 스펙트럼 확인이 쉽기 때문이다.



(a)



(b)



(c)

그림 4. 차량 이동국 출력 파라미터 측정
Fig. 4. Output parameter measurements of train station.

그림 4는 차량이동국 출력을 스펙트럼분석기를 이용하여 측정한 결과로 그림(a)는 송신기의 변조 출력된 신호를 측정기의 복조(Demod) 모드에서 측정하여 입력된 오디오신호의 주파수 편이 및 복조 파형을 관측한 것이다. 그림(b)는 변조된 출력신호의 스펙트럼으로 대역폭의 변화를 관측하였다. 그림(c)는 발진출력신호의 스펙트럼으로 중심주파수 편차와 잔류FM 성분을 확인하고자 하였다.

4-1. 측정결과

수정발진방식인 7호선을 중심으로 종점간 열차에서 영업운행 중에 측정을 하였다. 측정 결과 7호선에서 중심주파수편차가 많이 발생하였고 변조된 출력의 주파수 편이가 심하게 변하는 것을 확인 하였다. 6호선은 PLL방식을 이용하였기에 그 특성상 주파수 편차와 편이가 일정하였다. 차량진동에 의한 주파수 편차를 감소하기 위하여 TRE의 무게, 용도, 크기를 고려하여 방진패드를 선정하여 설치 후 측정한 결과 파라미터 특성이 개선됨을 확인하였다. 6호선은 종점이 한군데이므로 녹사평역에서 출발하여 연신내역까지 왕복하여 측정하였다.

5·8호선의 경우 7호선 보다 주파수 변동 폭은 적었으나 6호선에 비해서는 더 큰 변동 폭을 나타내었다. 이는 궤도의 상태와 열차 운행 속도와 관계가 있고, TRE의 진동 방향에 따른 설치위치와 관계가 있다고 판단된다.

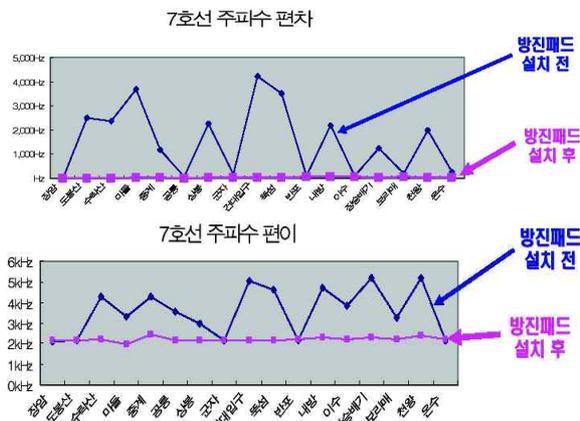


그림 5. 7호선 송신기 출력 측정결과
Fig. 5. Transmitter output measurements for train Line 7.

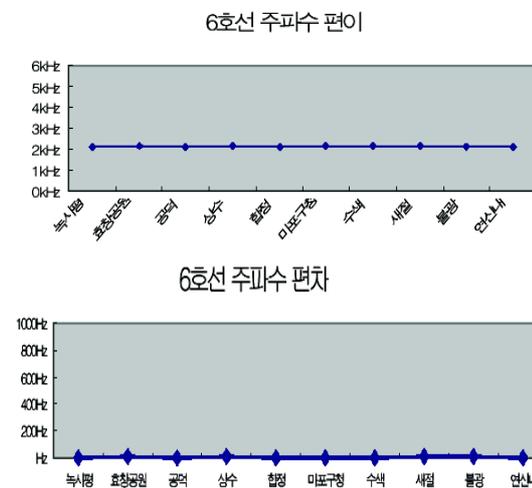


그림 6. 6호선 송신기 출력측정 결과
Fig. 6. Transmitter output measurements for train Line 6.



그림 7. 방진패드 설치 사진
Fig. 7. Installation photo of Vibration proof pad.

5호선의 중심주파수 편차는 상선(강서구간→강동구간)은 0.45KHz가 변동했고, 하선(강동구간→강서구간)의 경우 출발지점에서부터 종점까지의 총 변동 폭은 0.37KHz였다. 5호선 장비를 무진동의 정지 상태에서 측정을 해 보았다. 측정방법은 정지 상태에서 15

개 역사를 주행한다고 가정하고 역간 소요되는 시간을 2분으로 정하였다. 역간 열차가 잠시 정지하는 시간을 10초로 하여 2분간 출력을 측정하고 각 출력 측정 간 휴지시간을 10초로하여 15회 출력을 측정하였다. 이러한 작업을 2회씩 반복하였다. 측정결과 5호선 장비는 27Hz이고, 7호선은 44Hz로 나타났다.

4-2. 측정결과 분석

진동은 지하철의 진입, 출발속도, 차량 및 레일의 유지보수에 따라 각 열차별로 상당한 차이를 갖는다. 진동의 크기는 열차 도착 초기와 열차 출발 끝 부분에서 큰 값을 보이며, 열차 속도와 밀접한 관계를 갖고 도착할 때 보다 출발 할 때에 더욱 큰 값을 갖는다.[8] 또한 정속 주행하는 차량의 바닥에서 전후 방향 진동의 평균값은 0.12 m/s², 좌우 방향 진동은 0.16 m/s, 상하 방향 진동의 평균값은 0.31 m/s² 이다.[9]

일반적으로 전동차의 진동 발생 원인은 구동장치인 엔진의 회전 수, 바퀴와 철로의 마찰, 공기와 차체의 마찰, 전후 차체 연결 부위에 의한 전달 등으로 구분할 수 있다. 외부 인자로는 승객 수, 레일의 노화, 운행 차량, 운전자의 습관 등이 있다.[9]

측정 결과를 바탕으로 주파수 편차가 많이 발생한 구간과 적게 발생한 구간에서 M-채널(차량이동국과 구내전화 간 통화) 시험을 열차영업 운행 중 통화시험을 하였다. 그림 5의 장암~공릉, 건대~반포 구간의 주파수 편차 최고점 지점에서 통화 중 단절, 통화 연결 실패 또는 심한 잡음이 발생하였다.

열차의 진동에 의한 잡음은 랜덤잡음으로 많은 변수의 진동 요인이 있다. 주기적으로 일정한 진동보다 랜덤하고 충격적인 진동은 스펙트럼 위상잡음이 급격하게 증가하고 발진기의 트랜지스터, 각 종 증폭기, 커넥터, 케이블, 케이스 등에 영향을 주어 통화 절단 등 무선 통화장치의 성능 열화를 초래하였다.

V. 결 론

본 논문은 운행 중인 상태에서 열차 진동이 열차 무선시스템의 성능 열화에 미치는 영향을 알아보았

다. 열차운행 중 발생하는 진동은 차량 뿐 아니라 터널 벽, 플랫폼, 역사 건물 및 터널 벽에 설치된 LCX 케이블 등 차량이동국의 다른 열차무선시스템의 구성품도 진동의 영향을 받지만 본 논문은 직접적인 전달을 받는 차량 이동국에 대한 연구로 국한하였다.

도시철도시스템은 거대한 도시교통시스템의 일부분으로 여러 시스템이 유기적으로 결합되어있으며 열차무선시스템이 열차진동 등 다른 시스템에 의해 심각한 성능 열화를 일으켰다. 진동 발생 메커니즘은 선로 시스템, 차량시스템, 운영 시스템 등 여러 요인이 상호 결합되어 발생한다. 만일 대구지하철 참사와 같은 재난이 발생하였을 때 이동국 성능열화가 발생하였을 경우 그 곳에 있는 열차나 진입 예정인 열차와 열차무선 통화가 이루어지지 않아서 능동적, 효율적 대응이 어려워 사회적 손실은 더욱 커질 것이 자명하다. VHF 방식의 열차무선시스템은 재래식의 무선통신시스템이지만 공공재의 한 요소로서 중요한 시스템이므로 방진패드를 이용하여 무선통신송신기 출력주파수 편차를 크게 감소시킨 본 논문이 연구의 의미가 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 한국철도기술연구원, 도시 철도시스템 기술의 이해, *KRRI 철도기술총서*, 제2호, pp.17-39, 2008.
- [2] 서울도시철도공사 내부자료, 2006.
- [3] L. Frenzel, *Communcation Electronics*, McGraw-Hill, pp247-249, 1999.
- [4] C. Weisman, *Essential Guide to RF and Wireless*, Prentice-Hall, pp71-73, 2002.
- [5] Behzad Razavi, *Micro Electronics*, Prentice-Hall, p.252, 1998.
- [6] 고주파회로설계 노하우, 현장기술자 실전 시리즈, 도서출판 세운, pp.87-93, 1996.
- [7] 서종수, "L/Ku/Ka-band 멀티미디어 이동 통신위성의 디지털 전송시스템 설계에서 수정 발진기의 고유 및 진동에 의한 위상잡음이 미치는 영향", *한국과학재단 연구보고서*, 1993.

- [8] 김석홍, 이성춘, 김춘호, “서울 지하철 역사 주변의 진동 전파 특성에 관한 연구,” *한국소음진동학회 추계학술대회논문집*, pp185-187, 1998.
- [9] 정상욱, 이상훈, 박상규, “지하철 전동차에서 진동 특성 연구,” *한국소음진동학회 추계학술대회논문집*, pp354-361, 1997.

김 성 동 (金聖東)



1996년4월 ~ 2008년4월 : 서울도시
철도공사 정보통신1,2팀
2008년 4월 ~ 현재: 서울도시철도공
사 종합기술센터 정보통신 설비
담당
2009년 : 인천대학교 정보통신대학
원 전자공학과 (공학석사)

관심분야: 열차무선시스템(Train Radio System), 차량용 정보통신시스템 발전방향

구 경 헌 (具京憲)



1981년 : 서울대학교 전자공학과
(공학사)
1983년 : 서울대학교 전자공학과
(공학석사)
1991년 : 서울대학교 전자공학 (공
학박사)
1999년~2000년 : UC San Diego

방문학자

2001년 ~ 2008년 : 대한전자공학회 마이크로파 및 전파
연구회 위원장, 통신소사이어티 회장
2003년 ~ 현재 : 한국항행학회 학술 이사, 국제 이사, 차
세대항행 통신연구회 위원장, 부회장
1987년 ~ 현재 : 인천대학교 전자공학과 교수
관심분야: 마이크로파 회로 및 모듈 설계, 전력증폭기 선
형화, 무선통신 시스템, 차세대항행시스템 등