

고속 환경에서의 철도 트랜스폰더 시스템 통신 성능 평가

박 성 수[°], 이 재 호^{*}, 김 성 진^{**}

Performance Evaluation of Railway Transponder System in High-Speed Environment

Sungsoo Park[°], Jae-Ho Lee^{*}, Seong Jin Kim^{**}

요 약

고속철도의 안전한 운행 및 유지보수를 위해서는 궤도, 전차선, 신호 등 검측대상 선로 시설물의 위치를 정확히 파악하기 위한 고정밀 열차 위치검지기술이 필수적이다. 터널 등 위성신호 음영지역이 많은 국내 철도환경에서는 열차 위치검지시스템을 구성하는 차륜센서 및 관성센서의 오차 누적 문제를 해결하기 위하여 철도 트랜스폰더 시스템의 적용이 필수적이다. 300km/h 이상의 고속 주행환경에서 열차의 위치를 정확히 검지하기 위해서는 지상에 설치된 트랜스폰더 태그와 차상에 설치된 트랜스폰더 리더 간에 고신뢰성 및 고가용성을 갖는 통신 성능이 확보되어야 한다. 본 논문에서는 호남고속선에서 HEMU-430X를 활용하여 수행한 실차시험 결과를 바탕으로 고속환경 통신 성능을 개선한 트랜스폰더 시작품을 제작하고, 최대 342.1km/h의 고속 주행환경에서 실차 성능평가를 수행하여 고속환경 통신성능 개선 효과를 확인하였다.

Key Words : Railway, Transponder, Field test, HEMU-430X, High-speed

ABSTRACT

For safe operation and maintenance of high-speed trains, precise train position detection is essential for accurate inspection of wayside facilities, such as track, catenary, and signaling equipment. Since GPS satellite signal is not available in tunnels, a railway transponder system is considered as a solution to solve the problem of error accumulation of wheel sensors and inertial sensors. In order to detect the exact location of the trains in a high-speed environment faster than 300km/h, communication between the transponder tag installed on the track and the transponder reader mounted beneath the train should be secured with high reliability and high availability. Based on the field test results conducted in the Honam high-speed line, we improved the communication performance of the railway transponder system. We then carried out field test in a high-speed condition up to 342.1km/h in order to validate the performance enhancement.

I. 서 론

고속철도의 안전한 운행 및 유지보수를 위해서는

궤도, 전차선, 신호 등 선로 시설물의 상태를 고속 주행환경에서 검측할 수 있는 고속종합검측시스템이 필수적이다^[1]. 고속종합검측시스템은 궤도, 전차선, 신호

* 본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(열차자율주행제어 핵심기술개발)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

[°] First and Corresponding Author Author : Train Control & Communication Research Team, Korea Railroad Research Institute, sspark@krii.re.kr, 정회원

^{*} Train Control & Communication Research Team, Korea Railroad Research Institute, prolee@krii.re.kr, 정회원

^{**} Train Control & Communication Research Team, Korea Railroad Research Institute, sjkim@krii.re.kr

논문번호 : KICS2017-08-218, Received August 17, 2017; Revised September 5, 2017; Accepted September 5, 2017

등 각 분야별 시설물의 상태 점검을 위한 검측시스템과, 300km/h 이상의 고속 주행환경에서 검측 지점을 정확히 파악하기 위한 고정밀 열차 위치검지시스템으로 구성된다^{2,9)}. 고정밀 열차 위치검지시스템은 일반적으로 절대위치 센서와 상대위치 센서 정보를 융합하는 방식으로 구현된다^{3,4,9)}. 철도 환경에서 차륜센서 및 IMU(inertial measurement unit) 등 상대위치 센서의 오차누적 문제를 해결하기 위해서는 트랜스폰더 및 GPS(global positioning system) 등의 절대위치 센서를 활용하는 것이 필수적이며, 터널 등 위성신호 음영지역이 많은 국내 철도환경에서는 GPS 대신 트랜스폰더를 활용하는 것이 적극 고려되고 있다.

철도 트랜스폰더 시스템은 차상에 설치되는 리더, 지상에 설치되는 태그 및 태그에 텔레그램을 다운로드 하기 위한 휴대용 장비인 프로그래머로 구성된다. 300km/h 이상의 고속 주행환경에서 열차의 위치를 정확히 검지하기 위해서는 지상에 설치된 태그와 차상에 설치된 리더 간에 고신뢰성 및 고가용성을 갖는 통신 성능이 확보되어야 한다. 트랜스폰더 시스템의 고속환경 통신 성능은 고속열차 하부에 설치된 리더가 지상에 설치된 태그로부터 얼마나 많은 텔레그램을 오류없이 수신할 수 있는지를 확인함으로써 분석할 수 있다¹⁰⁾. 고속 주행환경에서 텔레그램 수신 성능은 리더와 태그 사이에 형성되는 컨택 존의 길이에 따라 결정되며, 컨택 존의 길이는 열차 속도, 안테나 설치 높이, 리더 및 태그 안테나의 자기장 필드분포, 전력 전송 효율, 태그 구동 전압, 태그의 start-up time 등 다양한 요인에 의해 결정된다⁹⁾. 특히, 본 연구에서 시험열차로 활용하는 HEMU-430X와 같은 동력분산식 고속열차의 경우 열차 하부에 설치된 전장품으로부터 주행 중 발생하는 전자기 간섭의 영향을 고려하여야 하므로, 시작품 단계에서 고속열차를 활용한 실차 성능평가가 필수적으로 요구된다^{7,9)}.

본 연구의 선행 연구를 통해 개발된 트랜스폰더 시스템 1차 시작품을 대상으로 호남고속선에서 HEMU-430X를 활용하여 고속환경 통신 성능을 평가한 결과, 268~334km/h의 속도에서 리더가 태그로부터 텔레그램을 8~10회 오류없이 수신하였으며, 이를 바탕으로 트랜스폰더 리더와 태그 사이에 약 0.430~0.458m 길이의 컨택 존이 형성된 것으로 추정되었다⁹⁾. 지상에 설치되는 태그는 리더로부터 원격으로 전력을 공급받아 구동 전압이 유지되는 동안 순환코드(cyclic code) 기반의 부호화 기법이 적용된 텔레그램을 반복적으로 송신하므로, 컨택 존의 길이를 늘리면 리더가 텔레그램을 수신하지 못하고 태그를 통과하는

확률을 낮춰 고속 환경에서 통신 신뢰성 및 가용성을 개선할 수 있다.

본 논문에서는 고속 환경에서 철도 트랜스폰더 시스템의 통신 신뢰성 및 가용성을 개선하기 위하여, 태그의 start-up time 및 리더의 전력전송 효율을 개선한 2차 시작품을 제작하고, 최대 342.1km/h의 고속 주행 환경에서 실차 성능평가를 수행하여 1차 시작품 대비 고속 환경 통신 성능 개선 효과를 확인하였다. 컨택 존의 길이는 호남고속선에 태그 2차 시작품을 설치한 후 시험열차인 HEMU-430X를 활용하여 열차 속도에 따라 각 태그 통과시 오류없이 수신된 텔레그램 개수를 확인하는 방식으로 분석하였다. 이를 토대로 실제 시험열차의 운행속도보다 높은 속도에서 오류없이 수신 가능한 텔레그램의 개수를 이론적으로 예측하였으며, 리더가 태그로부터 예측된 숫자만큼의 텔레그램을 오류없이 수신 할 수 있는지 여부를 검증하기 위한 고속환경 모사 시험을 수행하였다.

2장에서는 철도 트랜스폰더 시스템의 구성 및 동작 원리를 간략히 소개하고, 고속환경 통신 성능을 개선하기 위해 2차 시작품에 적용된 변경 사항을 설명한다. 3장에서는 HEMU-430X를 활용하여 최대 342.1km/h의 고속 주행환경에서 수행한 트랜스폰더 시스템 2차 시작품의 실차 성능평가 결과를 분석하고, 1차 시작품 대비 고속환경 통신성능 개선 효과를 정량적으로 비교한다. 4장에서는 고속환경 모사 시험을 통해 열차의 속도가 400km/h일 때 트랜스폰더 리더가 태그로부터 텔레그램을 오류없이 수신할 수 있는지 여부를 검증하고, 5장에서 결론을 맺는다.

II. 철도 트랜스폰더 시스템

2.1 구성 및 동작 원리

고정밀 열차 위치검지시스템은 그림 1과 같이 GPS, 트랜스폰더 시스템, IMU, 차륜센서 및 센서정보 융합처리장치로 구성되며, 트랜스폰더 시스템은 차상에 설치되는 리더, 지상에 설치되는 태그 및 태그에 텔레그램을 다운로드하기 위한 휴대용 장비인 프로그래머로 구성된다. 차량 하부에 설치되는 리더는 태그에 무선으로 전력을 공급하고, 태그로부터 수신한 텔레그램을 위치검지정보 융합처리장치에 전달한다. 선로 상에 설치되는 태그는 리더로부터 원격으로 전력을 공급받아 구동 전압이 유지되는 동안 341bits의 텔레그램을 564kbps로 반복적으로 송신한다. 텔레그램은 태그가 설치된 위치에 대한 정보를 포함하고 있으며, 순환코드 기반의 부호화 기법이 적용되어 트랜스

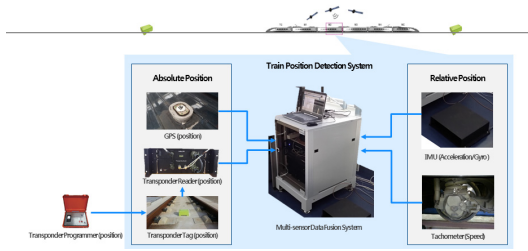


그림 1. 고정밀 열차 위치검지시스템
Fig. 1. High-precision train position detection system

폰더 리더에서 오류 검출이 가능하다^[11].

2.2 트랜스폰더 시스템 2차 시작품 개선사항

고속 환경에서 철도 트랜스폰더 시스템의 통신 신뢰성 및 가용성을 개선하기 위하여, 태그의 start-up time 및 리더의 전력전송 효율을 개선한 트랜스폰더 시스템 2차 시작품을 제작하였다.

2.2.1 트랜스폰더 태그 start-up time 개선

태그 1차 시작품은 그림 2와 같이 안테나(전력수신/데이터전송/프로그래밍), 정류기(rectifier), 정전압 회로(regulator), FRAM(ferroelectric random access memory), CPLD(complex programmable logic device), MPU(micro processor unit), 인디케이터(indicator), 변조기(FSK modulator) 등으로 구성된다. 정류기는 전력수신 안테나를 통해 입력된 RF 신호를 DC로 변환하고, 정전압 회로는 정류기 출력을 구동 전압으로 변환한다. FRAM은 리더로 전송할 텔레그램을 저장하고 있으며, CPLD는 FRAM에 저장되어 있는 텔레그램을 변조하여 데이터 전송 안테나로 전달한다. MPU는 프로그래머로부터 수신된 텔레그램

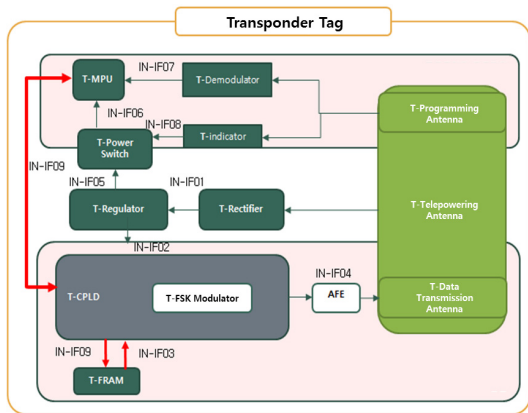


그림 2. 트랜스폰더 태그 1차 시작품 구조
Fig. 2. Architecture of transponder tag (prototype I)

표 1. 태그 start-up time 비교 (1차 및 2차 시작품)

Table 1. Comparison of start-up time of tags (prototype I and II)

| | | Prototype I | Prototype II |
|---------------------------|---------------|-------------|--------------------|
| Programmable Logic Device | Device | CPLD | FPGA |
| | Start-up time | 300 usec | 50 usec |
| Memory | Device | FRAM | Serial CMOS EEPROM |
| | Start-up time | 250 usec | 100 usec |

을 FRAM에 저장하며, 인디케이터는 프로그래밍 모드 진입 여부를 알려주는 역할을 수행한다.

유럽 열차제어시스템에서 열차 제어정보 전송 및 위치검지 용도로 사용되는 유로발리스(Eurobalise)의 start-up time 시험 기준이 150usec이므로^[11], 유로발리스와 동등한 수준의 성능을 확보하기 위하여 태그 구성품 중 start-up time이 150usec을 초과하는 CPLD와 FRAM을 표 1과 같이 각각 FPGA(field programmable gate array)와 Serial CMOS EEPROM

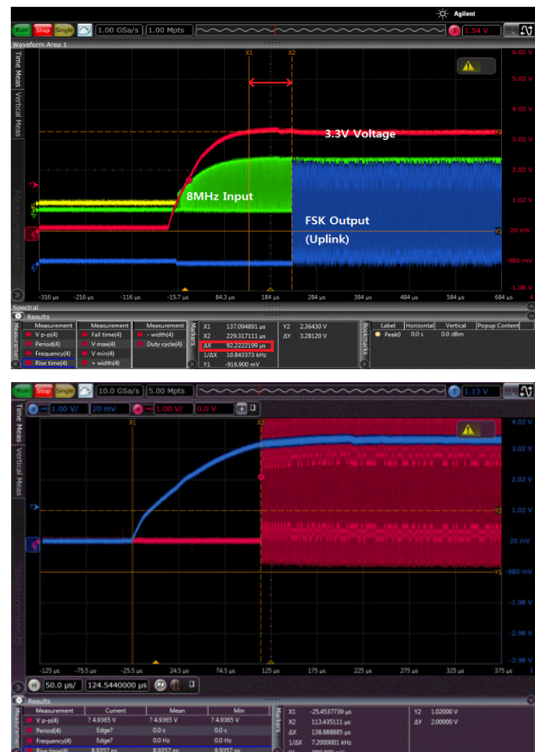


그림 3. 태그 start-up time 측정 (위) 1차 시작품 (아래) 2차 시작품
Fig. 3. Measurement of start-up time of tags (top) prototype I (bottom) prototype II

으로 변경하였다.

부품 변경 후 start-up time 측정 결과 트랜스폰더 태그 1차 시작품의 경우 그림 3의 위 그림과 같이 외부로부터 전력을 공급받은 후 텔레그램 전송을 시작하는데 소요되는 시간이 유로발리스 시험 기준인 150usec을 초과하였으나, 트랜스폰더 태그 2차 시작품의 경우 그림 3의 아래 그림과 같이 외부로부터 전력을 공급받은 후 138usec 이내에 텔레그램을 전송하기 시작하는 것을 확인할 수 있다.

2.2.2 트랜스폰더 리더 안테나 설계 개선

선로와 평행한 방향, 선로와 수직인 방향 및 선로 면과 수직인 방향을 각각 X축, Y축, Z축이라 하면, 리더와 태그 사이의 Z축 거리가 일정하고, Y축 변위가 0일 때, 리더가 태그로부터 일정 수준 이상의 품질로 텔레그램을 수신할 수 있는 X축 방향 변위의 최대값과 최소값의 차이를 컨택 존의 길이로 정의한다. 컨택 존의 길이를 개선하기 위해서는 리더 및 태그 안테나의 자기장 필드분포 및 전력 전송 효율을 개선하여야 한다. 일반적으로 리더와 태그의 안테나를 동일한 크기로 설계함으로써 전력 전송 효율을 최대화시킬 수 있으나¹²⁾, 본 연구에서는 선로에 설치되는 트랜스폰더 태그의 설치 용이성과 유지보수 효율성을 개선하기 위하여 태그의 크기를 1차 시작품과 동일한 수준으로 유지하였다. 전력전송 효율을 개선하기 위하여 트랜스폰더 리더 안테나의 크기를 표 2와 같이 변경하는 한편, 실차 환경에서 내환경성을 개선하기 위하여 IP67 등급을 만족하도록 설계하였다.

새로 제작된 트랜스폰더 리더 안테나 2차 시작품과 설계도면은 그림 4와 같으며, HEMU-430X M2 차량 하부에 설치되어있던 안테나 1차 시작품을 철거하고 안테나 2차 시작품을 그림 5와 같이 설치하였다.

표 2. 트랜스폰더 시스템 사양 비교 (1차 및 2차 시작품)
Table 2. Comparison of specification of transponder system (prototype I and II)

| | | Prototype I | Prototype II |
|---------------------|------------------------|-------------|--------------|
| Reader antenna size | Tele-powering (Tx) | 734×496 mm | 800×400 mm |
| | Data transmission (Rx) | 633×395 mm | 700×300 mm |
| Tag antenna size | Tele-powering (Rx) | 134×260 mm | 134×260 mm |
| | Data transmission (Tx) | 80×180 mm | 80×180 mm |

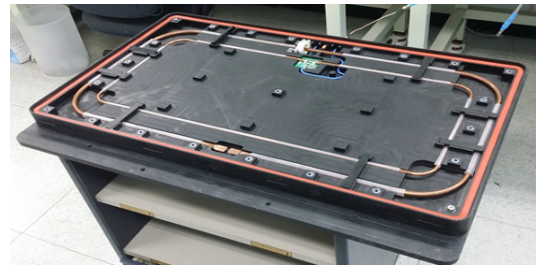
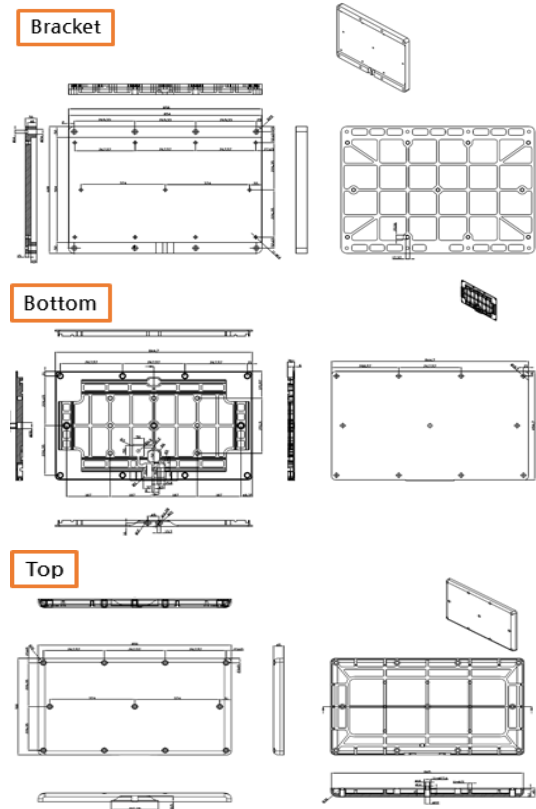


그림 4. 트랜스폰더 리더 안테나 (2차 시작품)
Fig. 4. Transponder reader antenna (prototype II)

III. 트랜스폰더 시스템 실차 성능평가

3.1 테스트베드 구축

실차 환경에서 트랜스폰더 시스템의 통신 성능을 분석하기 위하여 그림 6과 같이 호남고속선 상행선 정읍~익산 구간(오송기점 115k700~125k900)에 트



그림 5. HEMU-430X M2 차량 하부에 설치된 트랜스폰더 리더 안테나 (위) 1차 시작품 (아래) 2차 시작품
 Fig. 5. Transponder reader antenna mounted beneath HEMU-430X M2 (top) prototype I (bottom) prototype II

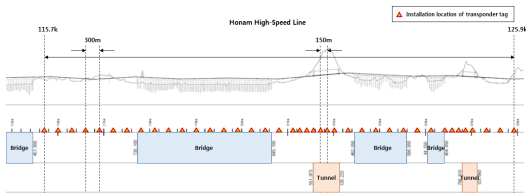


그림 6. 호남고속선에 설치된 트랜스폰더 태그
 Fig. 6. Installation of transponder tag in Honam high-speed line

랜스폰더 태그 40개를 150~300m 간격으로 설치하였다. 400km/h 고속에서 $\pm 1\text{m}$ 의 위치검지 정밀도를 획득할 수 있도록 연합형 칼만 필터(Kalman filter) 기반의 시뮬레이션을 통해 개활지의 경우 300m 간격으로 태그를 설치하였다⁹⁾. 다만, 우산터널(124k796~125k123), 회룡터널(121k551~122k128) 내부 및 출입구 인근의 GPS 위성신호 음영지역에는 위치검지 성능 개선을 위하여 트랜스폰더 태그를 150m 간격으로 설치하였다.

3.2 실차 성능평가 방법

실차 성능평가를 위하여 그림 7과 같이 HEMU-430X M2 차량에 트랜스폰더 리더, GPS, IMU, 차륜 센서 및 센서정보 융합처리장치로 구성된 고정밀 열

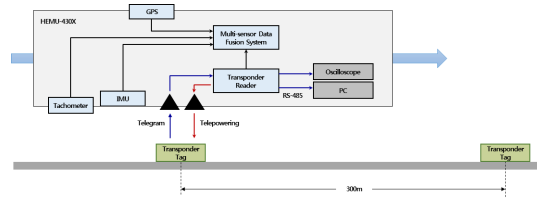


그림 7. 철도 트랜스폰더 고속 환경 통신 성능 평가
 Fig. 7. Performance evaluation of railway transponder system in high-speed environment

차 위치검지시스템을 설치하였다. HEMU-430X가 254.4~342.1km/h의 속도로 태그 설치 구간을 19회 반복 운행하는 동안 오실로스코프, 계측용 PC 등의 계측 장비를 활용하여 각 태그로부터 수신되는 텔레그램의 수를 기록하였으며, 고정밀 열차 위치검지시스템을 활용하여 각 태그 통과시 열차 속도를 측정하였다. 트랜스폰더 태그는 리더로부터 전력을 수신하는 동안 약 0.6msec 주기로 텔레그램을 반복 송신한다. 트랜스폰더 리더는 태그로부터 수신한 텔레그램을 복호화하여 오류 발생 여부를 확인하며, 오류없는 텔레그램이 수신될 때마다 150usec 길이의 펄스와 함께 RS-485 통신으로 수신된 텔레그램을 계측용 PC로 전달한다.

3.3 실차 성능평가 결과

HEMU-430X 속도에 따라 트랜스폰더 태그로부터 오류없이 수신된 텔레그램의 수를 그림 8에 도시하였다. 그림 8에서 X축은 HEMU-430X의 속도, Y축은 오류없이 수신된 텔레그램의 수를 의미하며, 비교를 위하여 동일한 시험 차수에 취득한 결과값은 같은 색

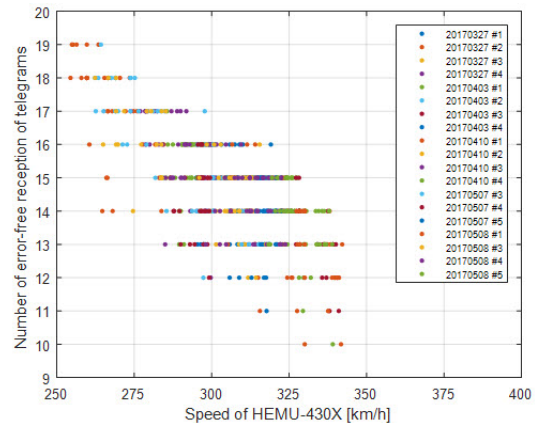


그림 8. HEMU-430X의 속도에 따른 트랜스폰더 태그로부터 오류없이 수신된 텔레그램의 수
 Fig. 8. Number of error-free reception of telegrams w.r.t. speed of HEMU-430X

으로 표시하였다. 범례는 시험을 수행한 날짜와 시험 차수를 의미한다. 실차 성능평가 결과 HEMU-430X가 태그를 254.4km/h의 속도로 통과할 때는 18개의 텔레그램이 오류없이 수신되었으며, 최대속도인 342.1km/h에서는 13개의 텔레그램이 오류없이 수신됨을 확인할 수 있다. 300km/h의 속도에서는 12~16개의 텔레그램이 오류없이 수신되었다.

실차 성능평가 결과로부터, 트랜스폰더 리더와 태그 사이에 형성되는 컨택 존의 길이 $L_i(n)$ 은 열차 속도와 리더가 컨택 존을 통과하는 데 소요되는 시간의 곱으로 계산된다. 리더가 텔레그램을 수신한 횟수와 텔레그램을 1개 수신하는데 소요되는 시간의 곱으로부터 컨택 존을 통과하는데 소요되는 시간을 계산할 수 있으므로, $L_i(n)$ 은 다음과 같이 계산할 수 있다⁹⁾.

$$L_i(n) = V_i(n) \times N_i(n) \times \frac{B}{R} \quad (1)$$

식 (1)에서 $V_i(n)$ 는 HEMU-430X가 n 번째 운행 시 i 번째 태그를 통과한 속도, $N_i(n)$ 는 트랜스폰더 리더가 i 번째 태그로부터 텔레그램을 오류없이 수신한 횟수이며, 각각 그림 8의 X축과 Y축에 해당한다. 또한, $R=564,480\text{bps}$ 와 $B=341\text{bits}$ 는 각각 데이터 전송률과 텔레그램에 포함된 비트 수를 의미한다.

그림 8의 실험 결과를 바탕으로, 고속 환경에서 리더와 태그 사이에 형성된 컨택 존의 길이 $L_i(n)$ 은 그림 9와 같이 0.553~0.856m로 분석되었다. 그림 9에서 X축은 HEMU-430X의 속도, Y축은 컨택 존의 길이를 의미하며, 비교를 위하여 동일한 시험 차수에 취

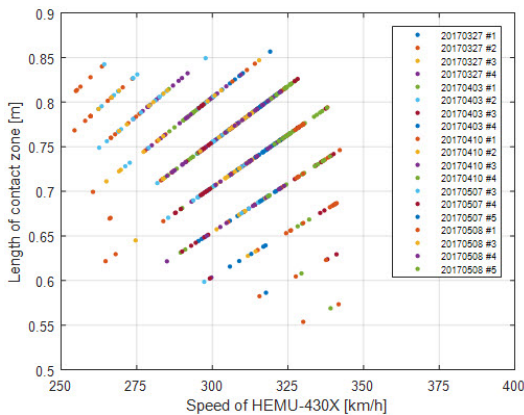


그림 9. HEMU-430X의 속도에 따른 컨택 존의 길이
Fig. 9. Length of contact zone w.r.t. speed of HEMU-430X

득한 결과값은 같은 색으로 표시하였다. 범례는 시험을 수행한 날짜와 시험 차수를 의미한다.

컨택 존의 길이 $L_i(n)$ 이 열차의 속도 $V_i(n)$ 에 따라 변하지 않는다고 가정하면, 열차의 속도가 $V_i(n)$ 일 때 트랜스폰더 리더가 i 번째 태그로부터 수신할 수 있는 최대 텔레그램의 수 $\widehat{N}_i(n)$ 은 다음과 같이 계산할 수 있다⁹⁾.

$$\widehat{N}_i(n) = \left\lfloor \frac{L_i(n)}{V_i(n)} \times \frac{R}{B} \right\rfloor \quad (2)$$

식 (2)에서 $\lfloor X \rfloor$ 는 X 보다 크지 않은 최대 정수를 의미한다. 예를 들어, 열차의 속도 $V_i(n)$ 가 400km/h일 경우 트랜스폰더 리더가 약 0.553~0.856m 길이의 컨택 존을 통과하는 약 4.977~7.704msec 동안 태그로부터 0.6msec 주기로 반복 전송되는 텔레그램을 최소 8회에서 최대 12회 오류없이 수신할 수 있을 것으로 예상된다.

3.4 실차 성능평가 결과 분석

실차 성능평가 결과를 바탕으로, 트랜스폰더 시스템 1차 시작품과 2차 시작품의 컨택 존 및 400km/h에서 수신 가능한 텔레그램의 개수를 표 3에 비교하였다. 트랜스폰더 태그의 start-up time 및 트랜스폰더 리더의 전력전송 효율 개선을 통해 컨택 존의 길이는 1차 시작품의 0.430~0.458m와 비교하여 28~86% 개선되었고, 400km/h에서 오류없이 수신 가능한 최대 텔레그램 개수는 1차 시작품의 6개와 비교하여 33~100% 개선되었음을 확인하였다.

표 3. 트랜스폰더 1차 시작품 및 2차 시작품 실차 성능평가 결과 비교

Table 3. Comparison of field test results of transponder prototype I and II

| | Transponder Reader/Tag Prototype I | Transponder Reader/Tag Prototype II | Improvement |
|--|------------------------------------|-------------------------------------|-------------|
| Length of contact zone (m) | 0.430~0.458 | 0.553~0.856 | 28~86% |
| Estimated number of error-free reception of telegrams at 400km/h | 6 | 8~12 | 33~100% |

IV. 트랜스폰더 시스템 400km/h 고속환경 모사 시험

4.1 고속환경 모사 시험 장비

400km/h의 고속 주행환경에서 트랜스폰더 리더가 태그로부터 텔레그램을 정상적으로 수신할 수 있는지를 여부를 검증하기 위하여, 고속환경 모사 시험을 수행하였다. 400km/h 고속환경을 모사하여 무선 전력전송 신호를 일정시간 동안 인가하기 위하여 그림 10~11과 같이 Function Generator, Signal Generator, RF Power Amp를 활용한 시험 장비를 구축하고, 태그로부터 텔레그램을 오류없이 몇 회 수신하는지 측정하였다. Signal Generator는 Function Generator로부터 일정 길이의 펄스를 입력받아 펄스와 동일한 길이의 무선 전력전송신호(Continuous Wave, 27.095 MHz, 0dBm)를 발생시키며, 해당 출력을 RF Power Amp로 +43dB 증폭하여 리더 전력전송 안테나의 입력으로 사용하였다. 텔레그램 수신 여부를 확인하기 위하여 Function Generator 출력, 리더 수신신호, 리더 펄스 출력을 오실로스코프로 측정하였다.

4.2 고속환경 모사 시험 결과

리더 안테나에 무선 전력전송신호를 인가하는 시간

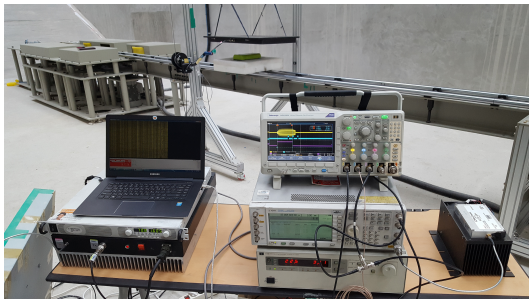


그림 10. 고속환경 모사시험 장비
Fig. 10. Test equipment for virtual experiment

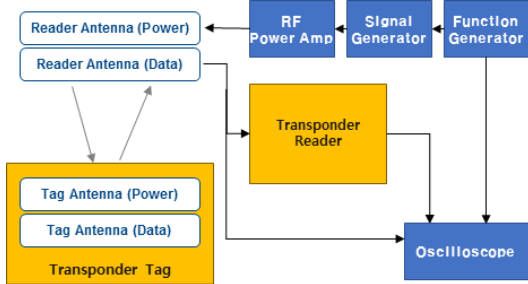


그림 11. 고속환경 모사시험 구성도
Fig. 11. Configuration diagram for virtual experiment

을 0msec부터 11msec까지 변경하면서, 트랜스폰더 태그로부터 오류없이 수신되는 텔레그램의 수를 무선 전력전송신호 인가 시간에 따라 그림 12에 도시하였다. 트랜스폰더 태그로부터 오류없이 수신되는 텔레그램의 수는 무선 전력전송신호 인가 시간이 증가함에 따라 텔레그램의 길이인 약 0.6msec 단위로 계단 형태로 증가한다.

리더 안테나에 무선 전력전송신호를 각각 4.9msec 및 7.7msec동안 인가할 경우, 그림 13~14와 같이 태그로부터 각각 8개 및 12개의 텔레그램이 오류없이 수신되는 것을 확인하였다. 고속환경 모사 시험을 토대로 열차의 속도가 400km/h일 경우 트랜스폰더 리더가 약 0.553~0.856m 길이의 컨택 존을 통과하는 약 4.977~7.704msec 동안 안정적으로 태그에 전력을 전달하고, 태그로부터 텔레그램을 최소 8회에서 최대 12회 오류없이 수신할 수 있음을 검증하였다.

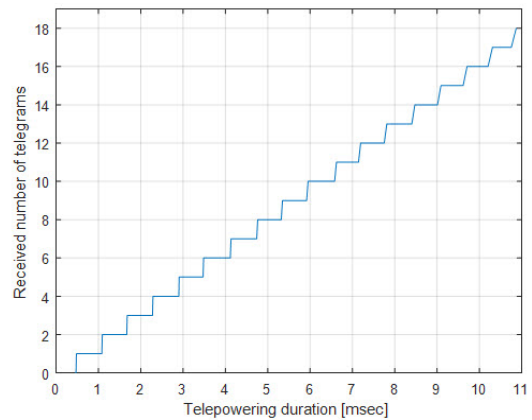


그림 12. 무선 전력전송신호 인가 시간에 따른 트랜스폰더 태그로부터 오류없이 수신된 텔레그램의 수
Fig. 12. Number of error-free reception of telegrams w.r.t. time duration of wireless power transmission

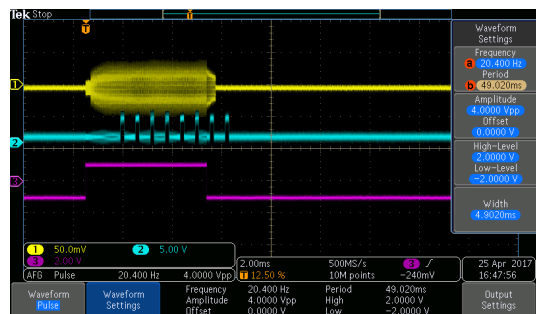


그림 13. 트랜스폰더 태그로부터 오류없이 수신된 텔레그램의 수 (무선 전력전송신호 인가 시간 : 4.9msec)
Fig. 13. Number of error-free reception of telegrams (time duration of tele-powering : 4.9msec)

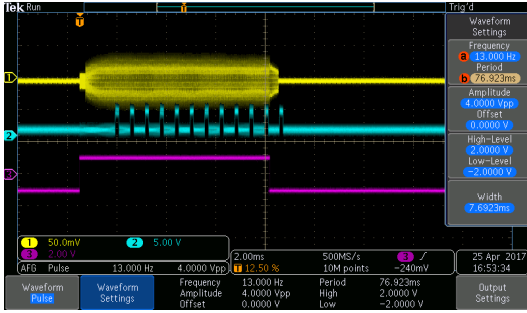


그림 14. 트랜스폰더 태그로부터 오류없이 수신된 텔레그램의 수 (무선 전력전송신호 인가 시간 : 7.7msec)
 Fig. 14. Number of error-free reception of telegrams (time duration of tele-powering : 7.7msec)

V. 결론

본 논문에서는 고속 환경에서 철도 트랜스폰더 시스템의 통신 신뢰성 및 가용성을 개선하기 위하여, 태그의 start-up time 및 리더의 전력전송 효율을 개선하고 호남고속선에서 HEMU-430X를 활용하여 최대 342.1km/h의 고속 주행환경에서 실차 성능평가를 수행하였다. 실차 성능평가 결과, 컨택 존의 길이는 1차 시작점과 비교하여 28~86% 개선되고, 400km/h에서 오류없이 수신 가능한 최대 텔레그램 개수는 33~100% 개선되었음을 확인하였다. 또한, 고속환경 모사 시험을 수행하여 400km/h의 고속 주행환경에서 트랜스폰더 리더가 태그로부터 텔레그램을 정상적으로 수신할 수 있음을 검증하였다.

본 연구를 통해 터널 등 위성신호 음영지역이 많은 국내 철도환경에 철도 트랜스폰더 시스템을 적용하여 고정밀 위치정보 제공이 가능함을 확인하였으며, 향후 열차 위치검지시스템과 고속종합검측시스템을 연계함으로써 안전한 고속철도 운행 및 효율적인 선로 유지보수가 가능할 것으로 기대된다.

References

[1] I. Choi, "Current status and perspective of high-speed railroad inspection system," *Railway J.*, vol. 17, no. 1, pp. 31-35, Feb. 2014.
 [2] Korea Railroad Research Institute, *Research planning for technology development of railway location system*, Korea Institute of Construction & Transportation Technology Evaluation and Planning, 2012.

[3] J. Lee, S. Park, and H. Kim, "Study on high-speed and high-precision train position detection," in *Proc. 2013 Autumn Conf. Korean Soc. Railway*, pp. 1361-1365, Daegu, Korea, Nov. 2013.
 [4] K. Kim, S. Seol, and S. Kong, "High-speed train navigation system based on multi-sensor data fusion and map matching algorithm," *Int. J. Control, Automat., and Syst.*, vol. 13 no.3, pp. 1-10, Jun. 2015.
 [5] S. Park, et al., "Testbed implementation for performance evaluation of train positioning system," in *Proc. 2014 Autumn Conf. Korean Soc. Railway*, pp. 973-977, Jeju, Korea, Oct. 2014.
 [6] H. Kim, et al., "Study on environmental resistance of railway transponder tag for wayside installation," *The Trans. Korean Inst. Electrical Eng.*, vol. 64 no. 6, pp. 948-953, Jun. 2015.
 [7] S. Park, et al., "Test result of railway transponder system with HEMU-430X," in *Proc. Korean Soc. Precision Eng. 2015 Spring Conf.*, pp. 1188-1188, Jeju, Korea, May 2015.
 [8] S. Park, S. Kim, and J. Lee, "Field test of high-speed transponder system for rail transport," *The Trans. Korean Inst. Electrical Eng.*, vol. 65 no. 1, pp. 208-213, Jan. 2016.
 [9] S. Park, J. Lee, and S. Kim, "Performance assessment of high-speed transponder system for rail transport on high-speed line," *J. Korean Soc. Railway*, vol. 19, no. 3, pp. 304-313, Jun. 2016.
 [10] S. Park, S. Kim, and J. Lee, "A study on maximum speed test for railway transponder system," in *Proc. Symp. Korean Inst. Commun. Inf. Sci.*, pp. 108-108, Jeju, Korea, Jun. 2017.
 [11] UNISIG, *The Specification of FFFIS for Eurobalise*, SUBSET-036, Issue 3.0.0, Feb. 2012.
 [12] Texas Instruments, *Wireless power : the Qi standard and bqTESLA™ solutions*, 2011.

박 성 수 (Sungsoo Park)



2006년 2월 : 연세대학교 전기
전자공학과 학사
2008년 2월 : 연세대학교 전기
전자공학과 석사
2010년 8월~2011년 2월 : Pur-
due Univ. 방문연구원
2012년 2월 : 연세대학교 전기
전자공학과 박사

2012년 3월~2013년 2월 : 연세대학교 박사후연구원
2013년 3월~현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원
<관심분야> 철도 위치검지, LTE, LTE-R, 재난망,
열차 자율주행, V2X

김 성 진 (Seong Jin Kim)



2001년 : 연세대학교 전자공학
과 학사
2003년 : 한국과학기술원 전기
및전자공학과 석사
2011년 : 한국과학기술원 전기
및전자공학과 박사
2011~2013년 : 포항산업과학연
구원 시스템솔루션연구그룹 선임연구원

2013년~현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원
<관심분야> 철도 위치검지, 로봇 제어, 칼만 필터

이 재 호 (Jae-Ho Lee)



1989년 : 광운대학교 대학원 전
자공학과 석사
2005년 : 고려대학교 대학원 메
카트로닉스학과 박사
1995년~현재 : 한국철도기술연
구원 책임연구원
<관심분야> 열차 신호, 제어
이론