

열차 내 무배선통신시스템 구축을 위한 통신연결장치 개발

김현식¹ · 박수훈² · 강석근^{3*}

Development of Communication Joint Tools for Implementing a Legacy-line Communication System in a Train

Hyun Sik Kim¹ · Soo Hoon Park² · Seog Geun Kang^{3*}

¹Matron Corp., Changwon, Gyeongnam 630-724, Korea

²Gyeongnam TP, Changwon-daero 18, Uichang-gu, Changwon, Gyeongnam 641-465, Korea

^{3*}Department of Semiconductor Engineering, Gyeongsang National University, Gyeongnam 660-701, Korea

요 약

본 논문은 열차 내에 산재한 도체 선로를 활용하여 무배선통신시스템 구축할 수 있는 통신연결장치의 설계 방법을 제시한다. 또한 여기서는 기존 선로에 직접 연결되는 전도성 연결장치와 전자기 유도현상을 이용하는 유도성 연결장치를 개발한다. 개발된 통신연결장치를 전력선에 적용하여 데이터 통신 실험한 결과, 목표 성능인 200 m 거리에서 20 Mbps급 이상의 무배선통신시스템의 구축을 실현할 수 있음을 확인하였다. 또한 내환경 시험 결과 개발된 통신연결장치는 열차의 내외부 발생될 수 있는 극심한 환경 변화에서도 안정적으로 동작하는 것으로 측정되었다. 따라서 개발된 장치는 현재 운행되고 있는 열차의 전도성 매체를 활용한 통신네트워크 구축에 유용할 것으로 판단된다.

ABSTRACT

In this paper, a design of communication joint tools to implement a legacy-line communication (LLC) system, which exploits various conductive lines in a train, is presented. We develop two kinds of joint tools; one is a conductive joint tool (CJT) that is connected directly to the conventional lines and the other is the inductive joint tool (IJT) which connects the conventional lines indirectly using electromagnetic induction. As a result, the practical experiment of data communication confirms that an LLC system with the developed joint tools has a transmission rate more than 20 Mbps in the distance of 200 m away. In addition, an environmental durability test shows that the joint tools operate stably in an extreme environmental variation. It is, therefore, considered that the developed joint tools are very useful to implement a communication network in the train working currently.

키워드 : 무배선통신, 전력선통신, 통신연결장치, 열차 내 통신네트워크, 데이터 통신

Key word : Legacy-line communication, power-line communication, communication joint tool, train communication network, data communication

Received 04 March 2015, Revised 23 March 2015, Accepted 06 April 2015

* Corresponding Author Seog Geun Kang(E-mail:sgkang@gnu.ac.kr,Tel+82-55-7721737)

Department of Semiconductor Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Gyeongnam 660-701, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.4.877>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

전 세계적으로 고속철도 개발 경쟁과 함께 철도망 확충사업이 진행되고 있는 가운데 최근에는 저소음, 무공해 도시 철도의 개발에 대한 관심이 증가하고 있다. 이에 따라 고속화 및 광역화와 온/오프라인 감시체계에 의한 무인화 및 실시간 제어는 차세대 철도시스템의 주요 특징이 되고 있다. 특히, 온라인 감시 및 실시간 제어, 자기 진단, 안전한 철도망 유지/운영 서비스 등은 열차 내 통신 네트워크(train communication network, TCN)에 의존하는 경향이 크다. 이를 위하여 국제전기기술위원회(international electrical committee, IEC)는 객차 내 및 객차 간 데이터 통신을 위한 국제 규격을 제정한 바 있다[1]. 차량 이상에 의한 비상정지 등과 같은 사고와 열차 내에서 발생하는 각종 범죄 등이 빈발하고 있는 상황에서 데이터 통신네트워크 규격이 열차시스템에서 차지하는 비중은 점점 증대되고 있다.

한편, 우리나라는 2014년 7월 도시철도법과 관련 시행령들을 개정하여 발생 가능한 각종 안전사고를 방지하거나 효과적으로 대처할 수 있도록 열차 내에 폐쇄회로텔레비전(closed circuit television, CCTV)을 설치하도록 정한 바 있다. 따라서 철도차량 운행 관련 대부분의 현황정보를 수집/저장/전달할 수 있는 감지장치나 CCTV와 같은 안전 시스템의 구현을 위하여 열차 내 데이터 통신네트워크에 대한 수요가 증대되고 있다.

열차 내 통신시스템에 대한 국제 규격은 「철도+정보통신」융합기술로서 신조 열차의 통신환경을 현저히 개선시키는 효과가 있다[2]. 특히, 신조 열차 내에서 데이터통신 속도를 증가시키기 위한 방법 가운데 하나로 차폐된 꼬임쌍케이블(shielded twisted-pair cable)을 이용하여 100 Mbps 이더넷 통신시스템이 소개된 바 있다[3]. 여기서는 전력선과 통신선을 구분하고, 통신선을 위한 새로운 전용 연결장치를 개발하였다. Kim 등은 [4] 통신 전용선으로 플라스틱 광섬유케이블(plastic optical fiber, POF)을 사용하여 광대역 열차통신네트워크를 구성하는 방법을 제안한 바 있다. 이 기술은 IP가 부여된 모든 통신 객체를 광섬유케이블로 연결하는 통신시스템을 구축함으로써 1 Gbps급 열차 내 데이터통신을 달성할 수 있음을 보였다. 또한 [5]에서는 교환 이더넷(switched ethernet) 기반 열차 내 통신네트워크 구축과 이에 요구되는 프로토콜이 제시되었다. 이와 같은

유선통신 기반 네트워크와는 달리 무선 근거리통신망을 구축 기술을 활용한 통신시스템에 대한 연구결과도 차세대 열차 내 통신네트워크 설계 및 구축을 위한 새로운 방안으로 소개된 바 있다[6].

이와 같은 방법들은 신조 열차의 설계와 제작과정에 적용함으로써 고속 및 고효율 열차 내 통신시스템 또는 통신네트워크 구축을 실현하는 효과적인 방법으로 활용될 수 있다. 하지만 현재 운행 중인 열차의 경우 새로운 통신선로의 설치나 고속 통신용 부품을 추가하는 것이 수월하지 않고, 객차 간 선로연결을 위한 점퍼커플러(jumper coupler)는 이미 설치된 선로들로 인하여 통신네트워크를 위한 추가 공간 확보에 어려움이 있다. 또한 네트워크 구축 시간의 과다한 소요, 누수 및 진동, 전동차 간 접속 문제 등 네트워크 장비의 운용상 애로 사항뿐만 아니라 열차의 안전성을 저해하는 요인이 발생될 수 있다. 이와 같은 문제점들을 해결하기 위한 방법으로 전력선, 스피커선, 비상 인터폰선, 동축 케이블 등 이미 설치된 도체선로를 통신자원으로 활용하는 무배선통신(legacy-line communication, LLC) 기술을 적용할 수 있다[7]. 여기서 무배선은 통신선로가 없는 것이 아니라 데이터 전송을 위한 선로의 추가적인 설치가 요구되지 않음을 의미하는 것으로 전력선통신(power-line communication, PLC) 기술이 대표적인 예가 된다 [8-10]. 그러므로 무배선통신시스템을 이용하면 추가적인 선로 설계와 구축에 필요한 시간, 비용, 구조 변경을 크게 줄일 수 있으며, 이미 운행 중인 열차에 적용이 가능한 장점도 있다.

무배선통신을 이용하여 열차 내에 데이터 통신네트워크를 구축하기 위해서는 기존 선로에 연결되어 변조된 통신신호를 송수신할 수 있는 통신연결장치가 요구된다[10]. 따라서 본 논문에서는 열차 내 무배선통신시스템 구축을 위한 통신연결장치를 설계한다. 여기서는 기존 선로에 직접 연결할 수 있는 전도성 연결장치와 직접 연결 없이 전자기 유도현상을 이용하여 연결하는 유도성 연결장치를 개발한다. 그리고 이들을 위한 자심재료와 커플링 변압기의 설계 방법과 삽입손실 특성도 제시된다. 제작된 통신연결장치를 이용한 성능 시험 결과, 구현된 무배선통신시스템은 목표 성능을 상회하는 통신 속도를 가지는 것으로 측정되었다. 또한 다양한 온습도 환경에서 실시한 내환경 시험 결과, 제작된 연결장치들은 실제 열차의 내외부에 설치/운영할 수 있을

정도의 동작 안정성을 갖춘 것으로 확인되었다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 서론에 이은 II절에서는 무배선통신을 위한 통신연결장치의 설계 방법을 제시한다. III절에서는 전도성 및 유도성 연결장치에 대한 목표 성능을 제시하고 이를 충족하는 연결장치 제작 방법에 대하여 서술한다. IV절에서는 제작된 두 종류의 연결장치에 대한 내환경 시험 및 데이터 통신 실험 결과를 제시하고 분석한다. 그리고 마지막으로 V절에서 결론과 함께 향후 추가적인 연구방향을 제시한다.

II. 무배선통신을 위한 통신연결장치의 설계

서로 다른 목적을 위하여 객차 내부나 객차 간에 포설된 기존 도체선로를 데이터 통신을 위한 선로로 활용하여 무배선통신시스템을 구축하기 위해서는 기존 선로로부터 변조된 정보신호만을 추출할 수 있는 연결장치가 필요하다.

2.1. 전도성 통신연결장치의 설계

전도성 연결장치(conductive joint tool, CJT)는 전력선 등 기존 선로와 전기적으로 직접 연결되어 변조된 신호를 송수신한다. 따라서 이는 기존 선로로부터 전력 역류를 차단하기 위한 전력차단회로와 보호회로를 갖추어야 한다. 또한 기존 선로의 신호와 데이터 통신을 위한 신호 간 간섭이 발생되지 않도록 신호 주파수 대역 분리를 위한 커플링 회로도 포함되어야 한다. 이러한 전도성 통신연결장치의 개념적인 블록도와 내부 구성회로를 그림 1에 나타내었다. 여기서 외부 장치와의 연결을 위한 단자는 동축 케이블과 일반적인 교류 전원 단자로 구성하였으나 접속장치에 따라 변경 가능하다.

전도성 연결장치의 전력차단회로(power cut-off circuit)는 커패시터와 저항으로 구성되어 있다. 여기서 커패시터는 전력선 내의 60 Hz 전기신호와 인터폰이나 전화선을 통한 4 kHz 이하의 음성신호 등 기존 선로의 목적에 따라 전송되는 신호를 차단하고 고주파 대역으로 변조된 데이터 통신신호만을 통과시킨다. 그리고 병렬 연결된 저항은 커패시터에 충전되는 전압을 방전시킨다. 과도전압억제(transient voltage suppressor, TVS) 다이오드로 구성된 보호회로(protection circuit)는 순간

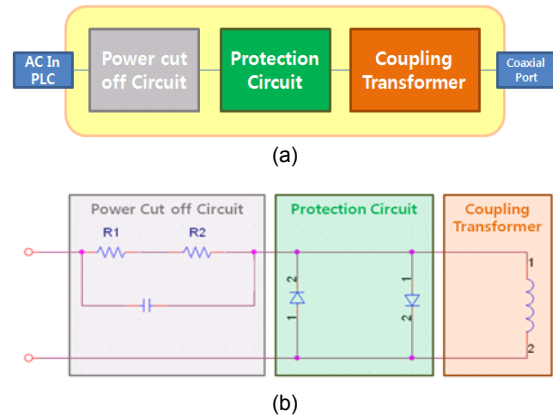


그림 1. 전도성 연결장치 (a) 블록도와 (b) 간단한 구성회로
Fig. 1 The conductive joint tool (a) a block diagram (b) a simple electrical circuit

적인 과전압이나 역전압이 발생될 경우 회로를 차단함으로써 전체 회로를 보호하는 기능을 한다. 그리고 토로이드 자심재료(toroidal magnetic material)를 이용한 커플링 변압기(coupling transformer)는 1차 코일과 2차 코일 간 전기신호를 전달한다.

최종적으로 통신신호를 송수신하는 커플링 변압기는 전도성 연결장치의 특성에 지배적인 영향을 미친다 [10]. 따라서 광대역에서 우수한 신호전송 특성을 보유하는 연결장치를 구현하기 위해서는 가장 적합한 자심재료 선정뿐만 아니라 최적 인덕턴스를 가지도록 형상 설계함으로써 통신신호의 손실을 최소화시켜야 한다.

2.2. 유도성 통신연결장치의 설계

전도성 연결장치는 기 포설 도선과의 직접적인 연결을 위하여 피복의 파괴가 불가피한 경우가 있다. 이 경우 외부에 노출된 선로는 습기로 인하여 도선이 부식될 수 있으며, 이는 통신 성능의 저하나 통신 불능을 초래하는 원인이 될 수 있다. 따라서 기존 도선에 직접적으로 접촉하지 않으면서도 변조된 통신신호를 송수신할 수 있는 통신연결장치가 필요하다.

유도성 연결장치(inductive joint tool, IJT)는 전도성 연결장치와는 달리 기존 도체선로와 직접 접촉하지 않고 전자기 유도현상을 이용하여 비접촉식으로 통신신호를 송수신한다. 따라서 이는 전원 공급, 음성신호 전송 등 기존 선로의 목적을 위한 전기신호와와는 전혀 간섭을 일으키지 않으면서도 데이터 통신을 달성한다. 따

라서 유도성 통신연결장치는 선로와 직접 연결되는 전도성 연결장치에 비하여 성능은 다소 저하될 수 있으나 기존 선로의 고유한 형태를 손상시키지 않으므로 설치와 운용이 용이한 장점도 있다.

유도성 통신연결장치에 사용되는 자심재료는 투자율(permeability) 및 자속밀도(magnetic flux density)가 높고, 공진주파수(resonant frequency)가 수십 MHz 대역에 존재하며, 고주파 대역에서 낮은 전력손실 특성을 유지하여야 한다. 일반적으로 많이 사용되는 자심재료 재료인 페라이트(ferrite)의 경우 전력손실과 공진주파수 측면에서는 우수한 특성을 가지지만 투자율과 자속 밀도가 낮은 단점이 있다. 반면 금속의 경우 높은 투자율과 자속밀도를 가지는 장점이 있지만 전력손실이 크고 공진주파수가 형성되는 대역이 낮은 단점이 있다. 따라서 이와 같이 가장 빈번하게 사용되는 두 재료의 장점들을 동시에 가지며 자심재료로도 활용할 수 있는 것으로는 비정질 재료(amorphous material)가 있다. 이는 금속재료의 높은 투자율과 자속밀도를 가지면서도 비정질 특성으로 인하여 전력손실이 금속재료에 비해 아주 작다. 또한 비정질 재료에 수십 nm의 결정을 생성 시키게 되면 전력손실을 최소화하면서 투자율을 극대화할 수 있는 것으로 알려져 있다[10,11].

자심재료의 투자율은 다음과 같이 결정된다. 여기서 L은 인덕턴스이고, l_e 는 자로의 길이, A_e 는 자심재료의 단면적이다. 그리고 N은 인덕터의 권선 수이다.

$$\mu = \frac{10^9 \times Ll_e}{4\pi N^2 A_e} \quad (1)$$

따라서 그림 2에 나타낸 자심재료의 높이 H와 내경(inner diameter, ID), 외경(outer diameter, OD)은 투자율을 결정하는 주요 변수가 된다.

유도성 통신연결장치는 전력선을 비롯한 기존 선로에 비접촉식으로 연결되므로 다양한 선로의 직경에 적용이 가능한 내경을 가져야 한다. 또한 전력선에 연결되는 경우 자로의 길이와 에어 갭(air gap)의 두께를 적절하게 선정함으로써 자심재료가 포화되지 않는 최대 허용 전류를 결정하여야 한다. 즉, 자로의 길이가 증가됨에 따라 자심재료의 포화전류 특성은 향상되지만 삽입 손실 특성이 저하되는 경향이 있으므로 이를 보상하기 위한 방법으로 자심재료의 높이를 증가시켜 단면적

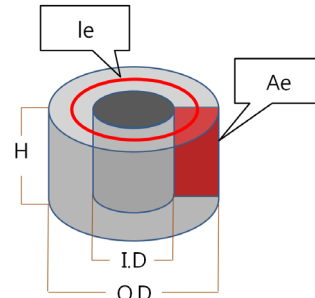


그림 2. 토로이달 자심재료의 설계를 위한 주요 변수
 Fig. 2 The major parameters for design of a toroidal magnetic core materials

을 증가시킨다. 하지만 자심재료의 단면적을 크게 증가시키는 것은 현실적으로 불가능하므로 신호의 주파수 특성, 전류 특성 등을 고려하여 최적화된 형상 변수들의 설계가 필요하다.

III. 통신연결장치의 제작

3.1. 성능 평가 척도 및 목표 성능

열차 내 무배선통신시스템 구축을 위한 통신연결장치의 실제적인 제작을 위해서는 목표 성능과 이를 적절히 평가할 수 있는 기준이 요구된다. 특히, 전력선과 전화선은 열차 내에 포설된 도체선로 가운데 무배선통신의 적용이 가장 용이하다. 두 선로들의 고유한 목적은 각각 전력 공급과 음성신호 전송이므로 이들 신호와의 간섭을 피하기 위하여 4 kHz이하의 주파수 대역에서는 감쇄가 클수록 바람직하다. 또한 다양한 데이터의 효과적인 전송을 위하여 광대역 특성이 요구되므로 무배선통신을 위한 주파수 대역은 0.1 ~ 40 MHz로 정하고, 이 영역에서 감쇄는 -6 ± 2 dB 정도로 정하였다.

표 1. 평가 척도 및 목표 성능
 Table. 1 The measures and target performance

Measure (unit)	Target performance
Attenuation of the CJT (dB)	-6 ± 2 at 0.1~40 MHz
Attenuation of the IJT (dB)	-6 ± 2 at 0.1~40 MHz
Stability to the variation of temperature and humidity (°C/%)	- 15~60 / 85
Transmission distance (m)	200
Transmission rate (Mbps)	20

또한 실제 열차에의 적용을 고려하여 온도와 습도 등 운용환경의 변화에 대한 내성도 평가 척도로 활용하였다. 그리고 실제 성능 시험에서는 200 m 길이의 전력선에 개발된 연결장치를 연결하여 통신 속도를 측정하였다. 이와 같은 평가 척도와 성능 목표를 표 1에 나타내었다.

3.2. 전도성 통신연결장치의 제작

전도성 연결장치의 특성에 가장 큰 영향을 미치는 커플링 변압기를 설계하기 위하여 서로 다른 변수를 가지는 4개의 토로이달 자심재료를 표 2와 같이 선정하였다. 여기서 S₂₁은 삽입손실을 나타낸다.

표 2. 전도성 연결장치를 위한 후보 자심재료의 특성

Table. 2 The characteristics of candidate magnetic materials for the CJT

No.	OD (mm)	ID (mm)	H (mm)	l_e (mm)	A_e (mm ²)	Inductance at 10 kHz	S ₂₁ at 40 MHz
1	12.9	7.2	8.28	31.57	23.60	7.5 μH	-9.22
2	25.4	14.5	10.40	62.67	56.68	36.0 μH	-13.45
3	28.1	18.3	14.70	72.88	72.03	10.2 μH	-12.21
4	13.8	7.4	6.87	33.30	21.00	22.7 μH	-10.19

자심재료의 투자율을 증가시키기 위한 외형적 특성으로는 자료의 길이와 인덕턴스는 비교적 크고 자심재료의 단면적은 작을수록 유리하다. 특히, 성능 평가의 직접적인 척도 가운데 하나인 삽입손실은 목표 성능에 근접한 것이 바람직하다. 이에 따라 8개의 후보 재료 가운데 4개의 삽입손실 특성을 네트워크 분석기로 측정하여 그림 3에 나타내었다.

측정 결과 대부분의 자심재료들이 10 kHz 이하의 대역에서는 매우 낮은 삽입손실을 가지며 0.1 ~ 40 MHz 대역에서는 비교적 높은 특성을 가지는 것으로 나타났다. 이들 가운데 1번 자심재료는 가장 우수한 저주파 삽입손실 특성을 보였으며, 고주파 대역에서도 목표 성능에 비교적 근접하면서도 평탄한 특성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이를 근거로 1번 자심재료를 전도성 통신 연결장치의 제작에 사용하였다.

선정된 자심재료는 목표 삽입손실인 -6 ± 2 dB를 만족시키지 못하므로 특성 향상을 위한 보정이 필요하다. 전도성 통신연결장치의 삽입손실은 커플링 변압기뿐만 아니라 이에 병렬로 연결되는 커패시터의 용량과 토로

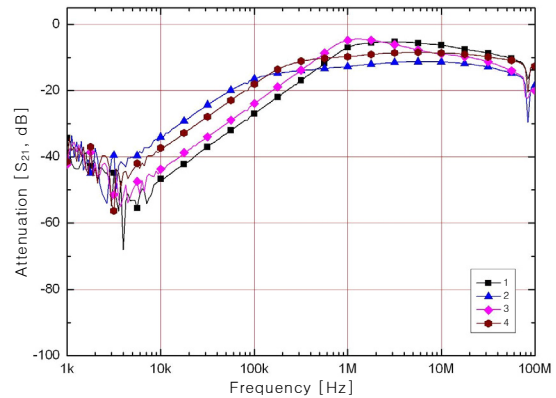


그림 3. 표 2에 나타난 후보 자심재료의 삽입손실
Fig. 3 The attenuation of candidate magnetic core materials represented in the Table 2

이달 자심재료의 권선 수에 따라 삽입손실과 주파수 특성이 변화될 수 있다. 따라서 선정된 자심재료와 함께 커패시터와 권선 수를 조정함으로써 최소의 삽입손실 특성을 가지는 회로 설계가 요구된다. 그림 4와 그림 5에 커패시터 용량과 권선 수에 따라 선정된 자심재료를 이용한 커플링 변압기의 삽입손실 특성을 나타내었다. 커패시터의 용량이 증가함에 따라 저주파 대역의 삽입손실은 커지는 것으로 나타났다. 따라서 커패시터 용량은 작은 것이 바람직한 것으로 추론할 수 있다. 하지만 용량이 지나치게 작으면 100 kHz 인근 대역의 손실 특성이 기대치에 미치지 못하게 됨을 알 수 있다. 따라서 적절한 커패시터의 용량은 68 nF으로 정하였다.

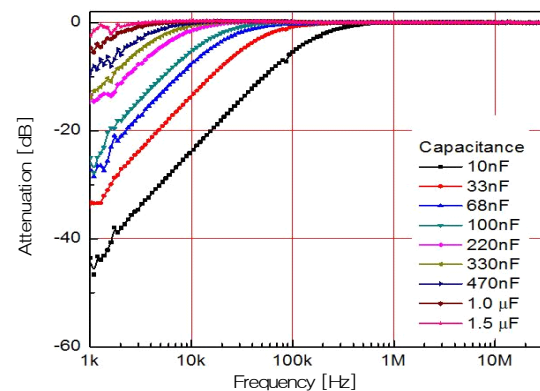


그림 4. 커패시터의 변화에 따른 커플링 변압기의 삽입손실
Fig. 4 The attenuation of coupling transformer for the CJT with respect to the capacitors

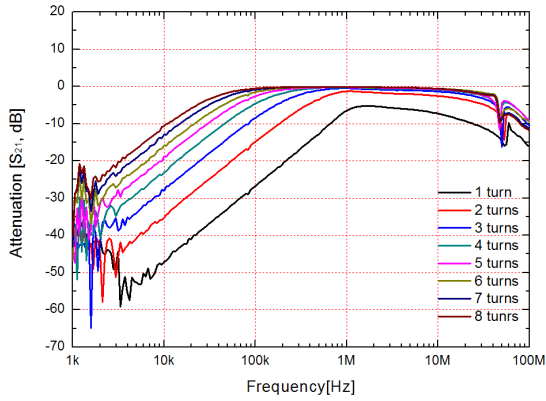
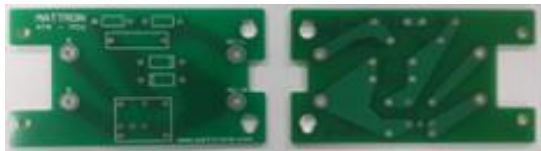


그림 5. 커패시터의 변화에 따른 커플링 변압기의 삽입손실
Fig. 5 The attenuation of coupling transformer for the CJT with respect to the number of turns

권선 수가 증가됨에 따라 커플링 변압기의 광대역 손실특성이 개선되는 것을 그림 5를 통하여 확인할 수 있다. 하지만 권선 수는 자심재료의 투자율을 감소시키는 원인이 된다. 따라서 광대역 특성과 저주파 대역 특성을 동시에 만족시키는 최소 권선 수로는 6회가 가장 적절한 것으로 분석된다.

이와 같은 측정 및 분석 결과에 기반한 파라미터를 이용하여 제작된 전도성 통신연결장치를 그림 6에 나타내었다.



(a)



(b)

그림 6. 열차 내 무배선통신시스템 구현을 위하여 제작된 전도성 연결장치 (a) 인쇄회로기판 (b) 조립된 외관
Fig. 6 The developed CJT for implementation of an LLC in the TCN (a) printed circuit board (PCB) (b) assembled shape

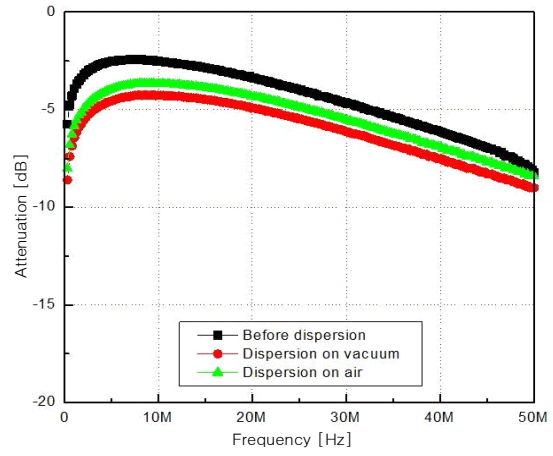


그림 7. 자심재료의 절연함침에 따른 삽입손실
Fig. 7 The attenuation of magnetic core material with respect to the insulation dispersion

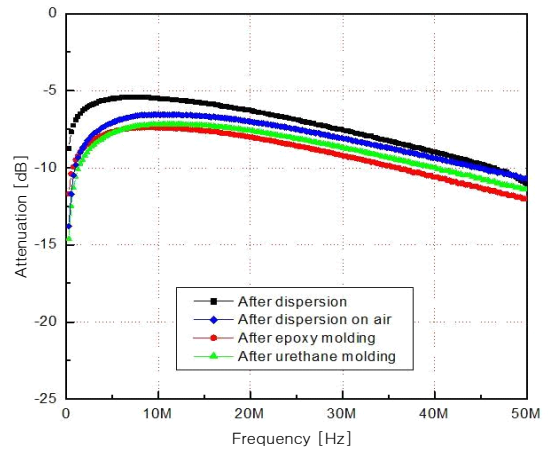


그림 8. 몰딩재료의 변화에 따른 삽입손실
Fig. 8 The attenuation of magnetic core material with respect to the molding materials

3.3. 유도성 통신연결장치의 제작

유도성 연결장치가 안정적으로 통신신호를 송수신하기 위해서는 고성능 자심재료 설계, 임피던스 정합, 잡음제거 회로 설계 등의 기술이 필요하다. 특히, 비정질 자심재료는 고주파 대역에서 전력 손실이 증가될 수 있으므로 투자율과 함께 전력 손실의 저하를 방지하여야 한다.

유도성 연결장치는 기존 선로와 직접 연결되지 않고 전자기 유도현상을 이용한다. 이는 기존 도선과의 연결

을 위하여 자심재료의 절단이 불가피함을 의미한다. 절단면이 접합될 때 절단면 사이의 에어 갭이 최소가 되도록 제작되어야 한다. 따라서 유도성 연결장치의 제작 과정에는 경화제 몰딩 공정이 필연적으로 포함되며, 이로 인한 자심재료 표면의 에폭시 함침은 표면 저항층을 형성하여 삽입손실 특성을 저하시킬 수 있다. 이와 같은 표면 절연함침과 몰딩에 의한 자심재료의 특성 변화를 그림 7과 8에 각각 나타내었다.

일반적인 공기 중에 노출된 상태의 함침과 진공 상태에서의 함침 모두 함침하지 않은 경우에 비하여 삽입손실 특성이 저하되는 것을 그림 7을 통하여 확인할 수 있다. 특히, 진공 중 함침은 대기 중 함침보다 더욱 저하된 손실 특성을 나타내었다. 이는 진공 중에서는 비정질 자심재료 사이에 보다 균일하게 함침액이 분포되기 때문인 것으로 분석된다.

유도성 연결장치는 외부 케이스에 자심재료, 임피던스 정합소자, 출력단자 등이 내장된 상태에서 고분자 경화제로 몰딩된다. 따라서 몰딩재료에 따라 수축률 및 자심재료에 미치는 응력의 크기가 변화되므로 기존의 전력선에 설치되는 것을 고려하여 절연특성이 우수한 재료가 사용되어야 한다. 일반적으로 전자기부품에는 우레탄계 에폭시와 일반 투명 에폭시가 경화제로 사용되므로 그림 8에는 이에 대한 결과를 나타내었다. 자심재료의 삽입손실은 절연함침의 경우보다 몰딩에 의하여 약 0.5 ~ 1 dB 정도 추가적으로 감소되는 것으로 나타났다. 또한 투명 에폭시보다는 우레탄 몰딩된 커플러가 미미하지만 더 우수한 특성을 가지는 것으로 관측된다. 이는 우레탄계 에폭시의 경화 수축률이 투명 에폭시보다 더 작고 탄성력이 높아 자심재료에 미치는 응력이 작기 때문인 것으로 분석된다.

제작된 유도성 통신연결장치를 위한 자심재료는 충격에 의한 변성으로부터의 보호뿐만 아니라 신호의 입출력 선로 간 결합도 향상과 도체 단면적 증가에 의한 전송효율 상승을 목적으로 금속 케이스에 봉인된다. 이 경우 내장된 자심재료, 통신신호 전송을 위한 전류, 금속 케이스에 의하여 새로운 임피던스가 발생된다. 이를 위하여 유도성 연결장치의 내부에는 임피던스 정합회로가 포함되어야 한다. 특히, 무배선통신시스템에서 변조된 통신신호가 고주파 대역을 주로 이용하므로 균일한 고주파 신호전송 특성을 유지하기 위하여 해당 주파수대역에서의 임피던스 정합이 필요하다. 이를 위하여

여기서는 전력선 통신의 최대 주파수인 30 MHz 이상의 주파수에 대한 임피던스 정합회로를 그림 9와 같이 설계하여 내장하였다.

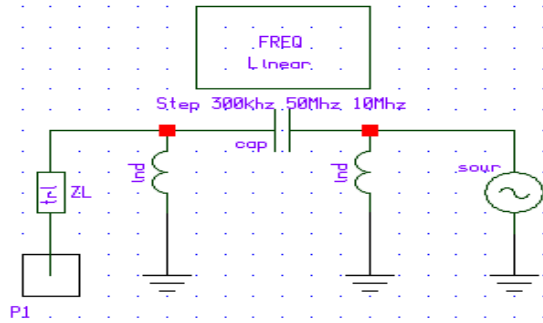


그림 9. 유도성 연결장치에 내장되는 임피던스 정합회로
Fig. 9 An impedance matching circuit embedded in the developed IJT

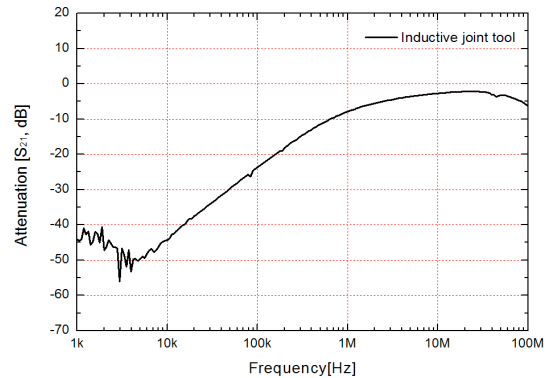


그림 10. 유도성 연결장치의 커플링 변압기 삽입손실
Fig. 10 The attenuation of coupling transformer for the developed IJT



그림 11. 열차 내 무배선통신시스템 구현을 위하여 제작된 유도성 연결장치
Fig. 11 The developed IJT for implementation of an LLC in the TCN

이와 같은 여러 가지 파라미터들에 따른 권선부, 임피던스 정합부, 잡음제거 필터부, 과전압 안전회로부 등으로 구성된 유도성 통신연결장치의 커플링 변압기 삽입손실 특성을 그림 10에 나타내었다. 그리고 실제 제작된 유도성 통신연결장치의 외관은 그림 11에 나타내었다.

IV. 실험 및 성능 분석

4.1. 온·습도 내환경 시험

개발된 무배선통신시스템 구축을 위한 통신연결장치들은 열차 내외부에 설치하여 운용되므로 다양한 온도/습도 환경에서 안정적인 삽입손실 특성을 유지해야 한다. 이를 위하여 항온항습시험기 내에 제작된 연결장치를 두고 그림 12에 나타난 환경 조건에 따라 온습도 내환경 시험(environmental durability test)을 실시하고 네트워크 분석기를 이용하여 삽입손실을 측정하였다.

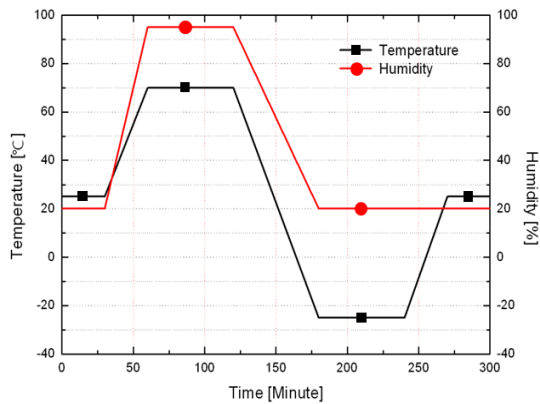


그림 12. 내환경 시험을 위한 온습도 변화 조건
Fig. 12 Temperature and humidity conditions for EDT

온도 변화 조건의 경우 상온에서 30분 동안 장비를 가동시킨 후 30분 동안 70 °C까지 선형적으로 상승시키고 다시 1시간 동안 유지한다. 그리고 1시간에 걸쳐 -25 °C까지 선형적으로 냉각한 다음 1시간 동안 유지하고 30분 동안 상온으로 상승시킨다. 습도 환경의 경우 최고 온도가 유지되는 1시간 동안 95%를 유지하여 고습 환경에서의 특성 변화를 측정하였다.

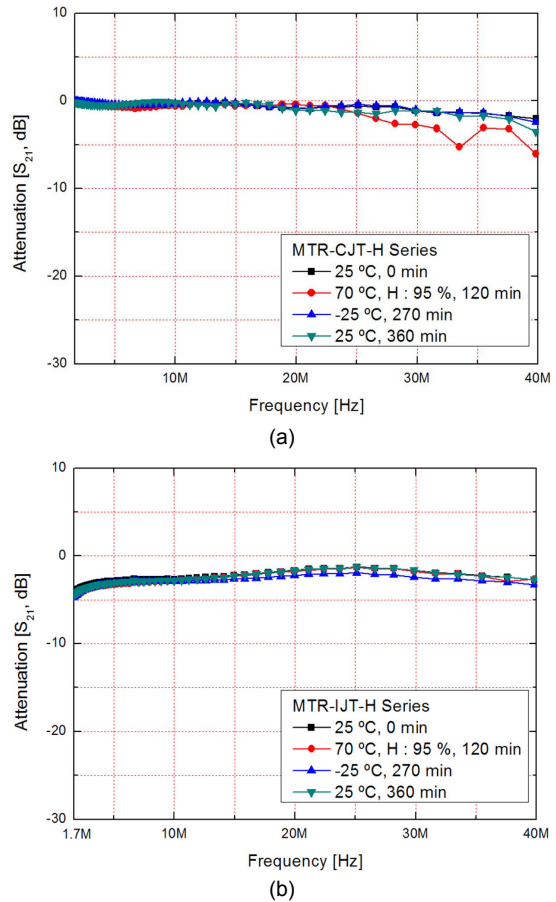


그림 13. 내환경 시험 결과 측정된 삽입손실 (a) 전도성 연결장치 (b) 유도성 연결장치
Fig. 13 The measured attenuation during the EDT (a) CJT (b) IJT

용량성 및 유도성 통신연결장치의 내환경 시험 결과를 그림 13에 나타내었다. 유도성 연결장치의 경우 시험 측정한 모든 주파수 대역에서 온습도 변화에 따라 삽입손실 특성의 변화가 미미하게 관측되었으나 통신에는 영향을 미치지 않는 범위인 것을 그림 13(b)를 통하여 확인할 수 있다. 또한 전도성 연결장치도 대부분의 실험 환경과 주파수 대역에서 삽입손실 특성의 미미한 변화를 그림 13(a)를 통하여 관측할 수 있다. 하지만 여기서는 고온과 습도가 매우 높은 경우 고주파 대역의 일부에서 삽입손실이 목표 성능 이하로 저하될 수 있는 것으로 나타났다. 이에 대한 추가적인 분석 결과 전력선 통신에 사용된 단상 전원 케이블의 열화 현상에 의

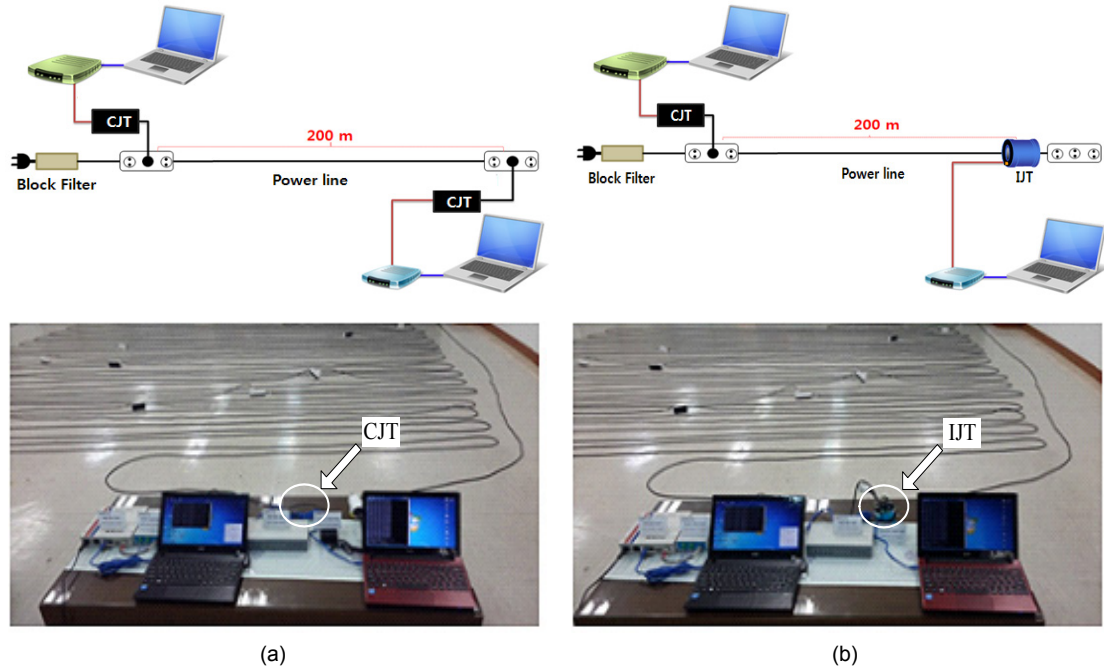


그림 14. 데이터 통신 실험 구성과 실제 시험 현장 (a) 전도성 연결장치 적용 (b) 유도성 연결장치 적용
 Fig. 14 The configurations of data communication and practical experiments using (a) the CJT (b) the IJT

한 인덕턴스의 변화가 원인인 것으로 자체 시험결과 판명되었다. 따라서 제작된 통신연결장치들은 저온, 고온 및 고습 환경에서도 무배선통신시스템을 구현/운영할 수 있는 안정성을 가지는 것으로 판단된다.

4.2. 데이터 통신 시험

최종 개발된 통신연결장치들을 이용한 무배선통신시스템의 데이터 통신 시험도 수행하였다. 개발품의 전문성과 실제 산업 응용성을 위하여 시험은 공인 기관인 한국정보통신기술협회(Telecommunication Technology Association)를 통하여 진행하였다.

200 m 길이의 전력선을 통신선로로 이용하여 데이터 통신 네트워크를 구성하고, 열차 내 통신 네트워크 관련 국제 기술규격에 의한 데이터 포맷에 따라 통신 신호를 전송하여 통신 속도를 측정하였다. 시험의 개념적인 구성도와 실제 실험 현장을 그림 14에 나타내었다. 여기서 blocking filter는 회로보호와 잡음 억제를 위한 차단필터이다.

열차 내부 200 m를 전력선 또는 전화선만으로 네트

워크를 구성하는 것으로 가정하고, 서버 측에는 마스터 모델과 전도성 연결장치를, 클라이언트 측에는 전도성 연결장 또는 유도성 연결장치를 사용한다.

개발된 연결장치들이 적용된 무배선통신시스템을 이용하여 데이터 전송 실험을 수행한 결과, 개발된 두 종류의 통신연결장치 모두 데이터 손실 없이 통신에 성공하였으며 속도는 26 Mbps 이상으로 나타났다. 이러한 결과를 표 3에 자세히 비교하여 나타내었다.

표 3. 200 m 데이터 통신 시험 결과
 Table. 3 The result of practical data communication experiments of 200 m away

Experiments		Measured data rate (Mbps)	Remark
Powerline of 200 m long	CJT	26.9	Tests certified by the TTA
	IJT	26.1	
Phone line of 200 m long	Direct connection of phone line and modem	31.9	
	IJT	32.2	

V. 결 론

본 논문에서는 열차 내에 산재한 도체 선로를 활용하여 무배선통신시스템을 구축할 수 있는 통신연결장치의 설계 방법을 제시하였다. 그리고 기존 선로에 직접 연결되는 전도성 연결장치와 전자기 유도현상을 이용하는 유도성 연결장치를 제작하였다. 개발된 통신연결장치를 전력선에 적용하여 시험한 결과 목표 성능인 200 m 거리에서 20 Mbps급 이상의 무배선통신시스템을 구축할 수 있음을 확인하였다. 또한 내환경 시험 결과 개발된 통신연결장치는 열차의 내외부에서 발생될 수 있는 극심한 온도도 환경 변화 속에서도 안정적으로 동작하는 것으로 확인되었다. 따라서 본 논문에서 개발된 통신연결장치는 특히 현재 운행되고 있는 열차의 내외부에 이미 가설된 전도성 매체를 이용한 통신네트워크 구축에 매우 유용할 것으로 판단된다.

최근 개정된 도시철도법은 신조 열차에 한해서 열차 내 폐쇄회로텔레비전과 같은 예방 및 감시체계 설치를 의무화하고 있다. 이를 고려하면 다수의 감시카메라가 동시에 촬영한 동영상 데이터를 끊김이나 지연 없이 전송할 수 있는 무배선통신시스템과 이를 지원하는 복합 통신연결장치의 개발이 필요하다. 또한 열차 환경에서는 다수의 감지 센서들이 사용되고 있으므로 이중 선로를 기반으로 열차 내 무배선통신시스템을 구축하는 방안에 대한 추가 연구도 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구의 일부는 산업통상자원부, 한국산업기술진흥원 및 동남지역사업평가원의 광역경제권 선도산업 육성사업과 산업통상자원부, 한국산업기술진흥원의 지역특화산업육성사업(No. R000267)으로 수행된 연구의 결과임. 또한 일부는 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(일반연구자지원사업 No. 2013-013013)의 결과임.

REFERENCES

- [1] IEC 61375-2, *Electric Railway Equipment - Train Bus - Part 2: Train Communication Network Conformance Testing*, IEC, Geneva, Switzerland, 2007.
- [2] H. Kirmann and P. A. Zuber, "The IEC/IEEE train communication network," *IEEE Micro*, vol. 21, no. 2, pp. 81-92, Mar.-Apr. 2001.
- [3] J. Kawasaki, M. Sugaya, A. Sobue, K. Hoshino, Y. Sato, K. Nakanishi, T. Miyauchi, and T. Komura, "Development of 100Mbps-ethernet-based train communication network," in *Proceeding of the 9th World Congress on Railway Research*, Lille, France, Presentation D, May 2011.
- [4] D. Kim, S. Lee, and K. Choi, "A study on the implementation of an all-IP train communication network using plastic optical fiber," *Journal of the Korean Society for Railway*, vol. 16, no. 3, pp. 189-195, June 2013.
- [5] L.-C. Ma, C.-C. Zhong, Y. Cao, Z. Xing, and Y.-Z. Zhang, "Research on train communication network based on switched ethernet," in *Computers in Railways XIV*, WIT Press, Shothhampton, UK, pp. 109-121, June 2014.
- [6] P. Hsu, "WLAN: The future for railway communications networks," *Industrial Ethernet Book*, vol. 64/28, <http://www.iebmedia.com>, May 2011.
- [7] M. Gulari, L. Moll, and J. Keller, *Transmitting Data from a Plurality of Virtual Channels via a Multiple Processor Device*, US Patent 10/356348, Jan. 2004.
- [8] K. Dostert, *Powerline Communications*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.
- [9] D. Duche and V. Gogate, "Signal attenuation in power-line communication channel," *International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science*, vol. 3, no. 2, pp. 123-130, Feb. 2014.
- [10] H.-S. Kim, J. R. Kim, H. Y. Lee, K. U. Kim, J. S. Huh, J. H. Lee, Y. W. Oh, W. B. Byun, K. Y. Gwak, and S. H. Ju, "Signal transmission properties of the inductive coupler using the high permeability magnetic materials," *Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineering*, vol. 19, no. 4, pp. 339-343, Apr. 2006.
- [11] Y-W Oh, H-Y Lee, and H-S Kim, "Electromagnetic properties of magnetic core materials and attenuation of blocking filter," *Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineering*, vol. 16, no. 6, pp. 490-495, June 2003.



김현식(HyunSik Kim)

1998년 8월: 경남대학교 대학원 재료공학과 (공학박사)
1995년 3월 ~ 2000년 3월: 한국전기연구원, 선임연구원
2000년 4월 ~ 현재: (주)매트론, 대표이사
※관심분야: 광대역 전력선 통신, 에너지 하베스팅, 나노 자성 재료



박수훈(Soo Hoon Park)

2009년 2월: 한국해양대학교 대학원 전파공학과 (공학석사)
2012년 3월 ~ 현재: 한국해양대학교 대학원 전파공학과 (박사과정)
2011년 3월 ~ 현재: (재)경남테크노파크, 연구원
※관심분야: 전력선 통신, EMC 공인시험, EMC 해석 및 대책부품 개발



강석근(Seog Geun Kang)

1999년 8월: 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
2003년 4월 ~ 현재: 경상대학교 공과대학 반도체공학과, 교수
2003년 4월 ~ 현재: 경상대학교 공학연구원, 책임연구원
※관심분야: 디지털통신, 무선통신, 오류정정부호, 디지털 신호처리