플라스틱 광섬유를 이용한 All-IP 열차통신네트워크 구현에 관한 연구

A Study on the Implementation of an All-IP Train Communication Network Using Plastic Optical Fiber

김동하 · 이소영 · 최규형*

Dongha Kim · Soyoung Lee · Kyuhyong Choi

Abstract Recent trains have broadband train communication networks to improve train operation safety and to provide passengers with multimedia services. Compared to glass optical fiber, plastic optical fiber (POF) has a large diameter; it also provides the good durability and maintainability necessary to railway applications. This paper suggests an All-IP broadband train communication network that connects all devices in the train through a POF interface. Performance tests according to Korean railroad standards shows that this POF interface is usable in the range of vibration and temperature conditions encountered in trains. A dedicated Layer-2 switch with the POF interface is developed for the construction of the All-IP train communication network. A prototype 1Gbps train communication network was set up in a trial-run of train on a metro line using the developed Layer-2 switch and POF. On-track tests indicated the feasibility of the POF train communication network. POF has an additional advantage of economic feasibility, and it is expected to start a trend toward broadband train communication networks using POF.

Keywords : Train, Broadband Communication network, Plastic optical fiber(POF), All-IP

초 록 최근의 철도차량은 안전성 향상 및 승객에의 멀티미디어 서비스 제공을 위해 광대역 열차통신네트워크를 설치하고 있다. 플라스틱 광섬유(POF)는 일반 광섬유에 비해 직경이 크고 내구성 및 유지보수성이 우수하기 때문에, 진동 및 온도변화가 큰 환경에서 운행하는 철도차량에 적합하다. 이에 따라, 철도차량내 모든 장치를 POF를 이용하여 All-IP 방식으로 접속하는 1Gbps급 열차통신네트워크를 구현하기 위한 연구를 수행하였다. 한국철도규격에 의거한 특성 시험을 통하여 POF가 철도차량의 진동 및 온도변화 환경에 적합하다는 것을 확인하였으며, POF 인터페이스를 갖는 전용의 Layer-2 스위치를 개발하였다. 개발된 Layer-2 스위치와 POF를 이용하여 시운전중인 도시철도차량에 1Gbps급 열차통신네트워크를 구성하고 데이터 전송률과 손실률을 측정하여 성능을 검증하였다. POF는 경제성도 우수하며, 향후 철도차량용 통신네트워크는 POF 기반으로 광대역화될 것으로 기대된다.

주요어 : 철도차량, 광대역 정보통신네트워크, 플라스틱 광케이블(POF), All-IP

1. 서 론

철도차량에는 차량내 각종 장치와 기관사간의 데이터 송수신을 위한 열차통신네트워크가 설치되어 있다[1]. 차량의 운전제어 및 진단을 위한 데이터는 그 전송용량이 비교적 적기 때문에 구리선을 매체로 한 협대역 통신망으로 구성되어 있었으나, 최근 IT 기술 발전에 따라 열차통신네트워크도 TCP/IP 기반의 정보통신망으로 진화하고 있다[2]. 특히, 객실내에 IP카메라를 설치하여 기관사나 지상의 관제센터등에서 모니터링이 가능하도록 하거나, 승객에게 인터넷을 포함한 여행정보, 뉴스 및 광고 등 다양한 멀티미디어 서비스를 제공할 수 있도록 광대역화가 추진되고 있다[3-6]. 이에따라,

기존의 열차제어 및 진단을 위한 통신과 동시에 열차운행의 안전성 및 승객 편의성을 향상시키기 위한 멀티미디어 통신을 수용하기 위해서 대용량의 열차통신네트워크가 필요하게 되었다.

기존에 사용되어 왔던 구리선 매체 및 동축케이블은 데이터 전송용량에 한계가 있기 때문에, GOF (Glass Optical Fiber, 이하 GOF)를 사용하여 광대역 열차통신네트워크를 구성하고 있다. 그러나, GOF는 차량의 진동에 취약하고 유지보수가 어렵다는 단점이 있다. GOF를 이용한 열차통신네트워크는 직경 50 μ m~62.5 μ m인 멀티모드 GOF 매체와 LC Type의 광 커넥터로 구성되어 있어, 열차운행시 발생하는 진동으로 인하여 접속점에서 접속손실이 발생하거나 미세한 균열이 발생하기 쉽고 통신의 신뢰성이 보장되지 않는다.

POF(Plastic Optical Fiber, 이하 POF)는 플라스틱 계열의 PMMA(Polymethyl Methacrylate)를 재료로 하는 광섬유로서, 사물과 사물의 통신, Human interface, 양방향 IPTV 등All-

*Corresponding author.

Tel.: +82-10-9137-7679, E-mail: khchoi@seoultech.ac.kr

©The Korean Society for Railway 2013

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.3.189>

IP 기반의 근거리 광통신 분야에서 다양한 응용이 가능한 정보매체로 주목 받고 있다[7]. POF는 광섬유의 일종으로서 전자와 유도장애가 없으며, 섬유 굵기가 커서 접속이 용이하기 때문에 설치 및 유지보수가 용이하다는 장점이 있다. 650(nm) 파장의 적색 광을 사용하는 멀티모드 경사형(Graded Index) POF에서는 육안을 통한 신호 송수신 확인이 가능하다[8,9]. 또한 POF는 고분자 재료로 구성되기 때문에 가볍고 취급이 용이하며 내진동성이 강하고 구부림에도 강한 내성을 가지고 있다[10]. GOF와 비교한 POF의 특성을 요약하면, (1)절단 및 접속, 취급이 용이하여 유지보수성이 좋으며, (2)직경이 커서 내구성이 강하고, (3)구축비 및 유지보수비가 저렴하여 경제성이 높으며, (4)가시광선영역에서 동작하며 NA(Numerical Aperture) 수치가 높다는 점이다[11,12]. 최근에는 근거리 통신에서의 Gbps급 대용량 데이터 전송에 있어서도 GOF 대신 POF를 이용하려는 시도가 이루어지고 있으며, 수백미터 이내의 근거리통신에서 1Gbps이상의 데이터 전송이 가능하다고 보고되어 있다[13]. 철도차량은 지속적인 진동 및 급격한 온도변화 환경에서 운행되고 있으며 각종 자동화장치의 도입으로 통신 및 제어장치의 고신뢰성이 요구되고 있는 추세를 감안할 때, POF는 GOF를 대체하여 광대역 열차통신네트워크용 전송매체로 적합하다. 특히 철도의 고속화로 전송매체의 내진동성 요구가 증가하고 있는 추세를 감안할 때 POF의 특성은 큰 장점으로 부각될 수 있다[14].

본 논문에서는 POF를 이용하여 철도차량용 광대역 열차통신네트워크를 구현하기 위한 연구를 수행하였다. 2장에서는 POF 케이블의 전송손실특성을 분석하고 구부림 및 온도 특성 시험을 수행하여 철도차량 환경에의 적합성을 검토하였다. 3장에서는, POF를 이용한 All-IP 기반의 광대역 열차통신네트워크의 구성도를 보이고, 네트워크 구성을 위한 핵심장치인 POF 인터페이스를 갖는 Layer-2 스위치를 개발하였다. 4장에서는 개발한 장치를 이용하여 도시철도구간에서 시운전 중인 전동차에 POF 통신네트워크를 구성하여 통신 시험을 수행하였고, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. POF의 철도차량환경 적합성 시험

2.1 철도차량 환경 및 POF 특성

철도차량은 레일 위에서 고속으로 주행하는 특성상 지속적인 진동을 받으며 운행하고, 곡선구간이나 레일 이음매 통과시 또는 궤도/차량 결함, 궤도 틀림에 따라 기계적 충격을 받게 된다. 이러한 기계적 충격 및 진동은 차량내 각종 장치의 파손 및 마모를 유발시킬 수 있기 때문에, 철도차량에 장착되는 모든 장치는 철도규격에 따른 진동시험을 거치도록 규정되어 있다. 또한 레일 및 철도차량은 자연 환경에 노출된 상태로 운영되어 있어 급격한 온도 변화를 겪고 있으며, 우리나라는 특히 사계가 뚜렷하기 때문에 온도변화가 매우 크다. 이에 따라 철도차량에 장착되는 각종 전기/전자 장치의 온도 조건은 $-20^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$ 까지 요구되고 있으며, 온도 시험 방법도 철도표준규격으로 규정되어 있다. 또한 최

근의 철도차량은 25kV 고전압을 동력원으로 사용하고 있으며, 전차선과 철도차량 집전장치간의 이선시 발생하는 아크로 인하여 전자파장애를 유발하는 등 전기환경도 나쁘기 때문에 EMI/EMC 대책이 요구된다.

철도차량의 구조적인 측면에서는, 다수의 차량이 연결되어 열차를 구성하기 때문에 통신네트워크 구성시 차량과 차량 사이를 외부공간에 노출된 상태로 접속하여야 하며, 차량 내부에서도 설치 공간이 협소하여 배선을 자유롭게 구성하지 못하고 굴곡이 많다는 문제가 있다. 한편, 철도차량 10량으로 열차가 편성될 경우 열차길이가 250m에 불과하기 때문에, 열차통신네트워크도 수백미터 범위의 근거리 통신으로 충분하다는 특성이 있다.

이상과 같은 철도차량 운행환경을 고려하면 열차통신네트워크의 전송매체로는 POF가 적합하다. PMMA계열 POF는 직경이 900 μm 정도로서 GOF의 50~65 μm 대비 7배 이상 굵기 때문에 충격과 구부림에도 잘 부러지지 않아 굴곡이 많은 배선구간에서도 자유로운 채단, 접속 및 말단처리가 용이하다[15]. POF는 Fig. 1에 보이는 것처럼 별도의 용착접속이나 광 접속기구 없이 단순한 커팅작업 후 직접적인 고정접속만으로 용이하게 연결할 수 있다. 또한 PMMA계열 POF의 전송손실특성곡선을 보면, 650nm 파장의 광을 이용해서 250m를 전송할 경우 전송손실이 30dB 이하로 나타나고 있어, 열차통신네트워크내에서는 안정적인 통신이 가능하다[16].

Fig. 1 Connection of POF cable

2.2 POF 내환경 특성 시험

POF를 철도차량에 적용하기 위하여 “철도차량부품의 진동시험방법(KS R 9144)”과 “철도차량용 전자기기의 시험통칙(KS R 9156)”의 온도시험 기준을 고려하여, POF의 구부림 특성과 급격한 온도변화 환경에서의 특성 시험을 실시하였다.

2.2.1 상온에서 구부림 시의 광 손실

POF의 구부림 손실 분석은 철도차량내의 원하는 위치에 적합한 배선 환경을 설계하는 데 있어서 매우 중요한 요소이다. POF의 철도차량 적합성 확인을 위한 구부림 조건에서의 광 손실을 분석하기 위하여 다음과 같이 시험을 수행하였다.

반지름이 각각 10mm, 15mm, 20mm, 30mm인 원통형 마운트에 POF를 1회에서 10회까지 감고 상온에서의 광 손실을 측정된 결과 Fig. 2와 같이 나타났다. 반지름이 작을수록 구부림이 커지므로 광손실이 증가하고, 또한 감은 수에 비례해서 광 손실이 증가하게 된다. 최악조건이라고 할 수 있

Fig. 2 Optical loss under bending conditions and normal temperature

Fig. 3 Optical loss of jacketed and bare POFs

는 10mm 반경으로 POF를 10회 감았을 경우에도 광 손실이 0.12dB 정도으로써, POF의 구부림 조건에서의 광손실은 매우 작다는 것을 알 수 있다. Fig. 3은 재킷처리된(Jacketed) POF와 Bare POF에 대한 구부림 조건하에서의 광손실 측정 시험결과로써, 재킷 처리된 POF는 bare POF보다 손실이 크다는 것을 알 수 있다. 재킷 처리된 POF는 재킷과 POF의 물질 차이로 열 팽창률이나 열 수축률이 다르기 때문에 광 손실이 증가한다. 그러나, 이 경우에도 광손실은 0.4dB이하인 것으로 나타났다.

2.2.2 온도변화에 따른 광 투과율 변화

철도차량용 전자기기의 시험통칙(KS R 9156)에 따른 동작보증온도(-20°C ~ +60°C)에 POF의 적합성을 확인하기 위하여, 온도를 변화시키면서 POF의 광투과율을 측정하였다. Fig. 4(a)는 온도를 +25°C에서 +90°C로 변화시켰을 경우의 광 투과율을 측정한 것으로서, 온도가 증가함에 따라 광 투과율이 점차 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 온도를 +20°C에서 -20°C로 변화시켰을 경우의 POF의 광 투과율을 측정한 결과로써, 온도가 영하로 감소함에 따라 광투과율도 감소하게 되는 것을 알 수 있다. 온도변화에 따른 광 투과율 변화 범위는 각각 5%, 2% 이내로 한정되는 것으로 나타났다.

Fig. 4 Optical transmission rate under temperature variation

2.2.3 급격한 온도변화에 따른 광 투과율 변화

-20°C ~ +90°C까지 급격하게 온도를 변화시켰을 때의 POF의 광 투과율을 측정한 결과를 Fig. 5에 보인다. 저온에서 고온으로 급격한 온도변화가 일어날 때 광 투과율 또한 급격하게 감소하였으나 변화범위는 5% 이내였으며, 시간이 지나면서 광 투과율 감소추세도 둔화되는 것으로 나타났다.

Fig. 5 Optical transmission rate under rapid temperature variation

2.2.4 복합 환경에서의 광 투과율 변화

반복적인 구부림과 급격한 온도변화를 일정시간 동안 동시에 가하였을 경우의 광 투과율 변화를 Fig. 6에 보인다. 구부림 상태에서 상온에서 고온(+80°C)으로 급격하게 온도가

Fig. 6 Optical loss rate under temperature variation

변화되었을 경우, 광 투과율은 최대 28%까지 감소하는 것으로 나타났다.

3. POF 기반 열차통신네트워크

3.1 열차통신네트워크 구성

열차내의 모든 장치 및 네트워크를 POF를 이용하여 연결하고 All-IP 방식으로 1Gbps급 광대역 통신을 수행할 수 있는 열차통신네트워크를 Fig. 7에 보인다. 열차통신네트워크는 전체 열차를 연결하는 광대역 백본망과, 각 차량에 설치되어 차량내부에 설치된 모든 장치를 접속하는 차내망, 그리고 운전실에 설치되어 전체네트워크를 관리하고 열차 외부와의 접속기능을 제공하는 서버시스템으로 구성된다.

백본망은 열차를 구성하는 각 차량에 Layer-2 스위치를 설치하고 이들을 POF 케이블로 연결하여 구성한다. 차량과 차량 사이의 연결은 POF 전용 OJB(Optical Junction Box)를 설치하여 차량 분리시에도 원활하게 분리 후 재접속이 용이하도록 구성한다.

Fig. 7 ALL-IP POF train communication network model

운전실에는 네트워크 관리를 위한 서버시스템을 두고, Layer-3 스위치를 설치하여 외부시스템과 접속한다. 운행중인 열차에서 지상과의 연결은 지상-차상간 무선송수신장치를 통하여 이루어진다. 또한 차량모니터링 및 제어장치도 연결하여 전체 차량상태를 감시제어하고 기관사의 운전업무를 지원하도록 한다.

차내망에서는, Layer-2 스위치에 POF 인터페이스를 갖도록 함으로써, CCTV 카메라, 모니터, 방송장치 및 신호장치 등 차량내의 모든 장치를 접속하는 단말장치를 수용하여, POF 만으로 All-IP 열차통신네트워크를 구현할 수 있도록 한다. 이와 같이 구리선이나 UTP케이블을 사용하지 않고 차량내의 모든 단말장치 및 네트워크 장치를 POF로 직접 연

결하는 것은, 철도차량이 고전압/대전력을 사용하고 있어 전자과장에 발생위험이 매우 크다는 점에서 전자과장해를 원천적으로 차단할 수 있는 효과적인 방법이다. 또한, 시리얼 통신이나 고유의 통신프로토콜을 사용하지 않고 All-IP 네트워크를 구성하는 것은 최근의 통신네트워크 발전추세와 일치한다[17].

이상과 같이 구성된 POF 열차통신네트워크를 통하여 열차운행정보표시, 안내방송 등 여행정보서비스를 제공함과 동시에, 인버터 및 신호장치, 출입문 등 차량기기 상태를 감시제어하여 기관사의 열차운전업무를 지원할 수 있다. 또한, 관제실에서 객실내부의 IP카메라 영상을 실시간으로 모니터링하거나 승강장 영상을 운전실 모니터에 표출할 수 있으며, 객실내의 모니터에 광고 등의 멀티미디어 정보를 표출하고 인터넷 서비스 등의 승객서비스를 제공할 수 있다.

3.2 POF 기반 Layer-2 스위치 시제품 제작

철도차량에 사용되는 통신용 스위치는 동선을 이용한 UTP 인터페이스를 갖는 IP Ethernet 기반의 Layer-2 스위치가 사용되고 있다. POF를 이용하여 철도차량내 모든 단말장치를 접속하고 All-IP 네트워크를 구현하기 위해서는 POF 인터페이스를 갖는 Layer-2 스위치가 필요하다. 이에 따라 철도차량통신 전용의 POF 인터페이스를 갖는 Layer-2 스위치를 개발하여 시작품을 제작하였다. Fig. 8은 개발된 Layer-2 스위치의 블록도와 PCB layout으로써, 신뢰도를 높이기 위하여 전원을 이중화하였고 2중 Ring 구성이 가능하도록 하였다. Fig. 9는 제작한 시작품의 기판과 외부 사진을 보인다.

(a) Block diagram

(b) PCB layout

Fig. 8 Layer-2 switch with POF interface

(a) Printed board

(b) Case

Fig. 9 Prototype of Layer-2 switch with POF interface

4. 도시철도 차량에서의 시험평가

4.1 시험용 네트워크 구성

도시철도 본선 터널에서 시운전하고 있는 전동차에 POF 시험용 네트워크를 구성하고 시험장비를 설치하였으며, 패킷 데이터 전송시의 Throughput과 Packet Loss를 측정하여 데이터 전송시험을 수행하였다.

시험시스템 구성은 Fig. 10과 같이 패킷 발생 및 분석 장치, POF 케이블(30m), POF 커플러(2개), 1Gbps POF용 Layer-2 스위치 2대, 노트북(테스트툴 탑재), 측정기용 미디어 컨버터, IP카메라 1대를 사용하였다. 본선터널을 시운전 중인 전동차 인통문 측벽에 1Gbps POF용 Layer-2 스위치

Fig. 10 Key map of packet transmission test

Fig. 11 Test arrangement on metro train

Fig. 12 Installation of Layer-2 switch

A와 B를 각각 매립하여 설치하고, POF 케이블과 POF 커플러로 연결하여 Ring1과 Ring2의 이중네트워크를 구성하였으며, IP카메라를 스위치A에 접속하였다. Fig. 11은 시험시스템을 전동차에 설치한 현장사진이며, Fig. 12는 Layer-2 스위치를 전동차 측벽에 매립하여 설치한 모습을 보이고 있다.

4.2 시험 결과

전동차내에서의 통신네트워크 구축 확인을 위해, POF용 Layer-2 스위치A에 IP 카메라를 설치하고 스위치 B에 모니터링 프로그램이 탑재된 노트북을 연결하여 IP 카메라의 동영상이 실시간으로 모니터링 되는 것을 Fig. 13과 같이 확인하였다. 또한, Ring1과 Ring2로 구성된 이중네트워크에서 Ring1에 장애가 발생하였을 경우 Ring2로 끊임없이 자동절체되는 지를 시험하기 위하여, Ring1 중간에 연결된 POF 커플러를 순간적으로 분리시켰을 때 노트북을 통해 표출되는 IP 카메라의 영상이 실시간으로 끊임없이 모니터링되는 것을 확인하였다.

데이터 전송시험은, POF용 layer-2 스위치 A와 B에서 각

Fig. 13 Monitoring of IP camera

Table 1 Results of throughput test

Frame Size (Byte)	Passed Rate(%)	Switch A to B packets/sec (1GB-1GB)	Switch B to A packets/sec (1GB-1GB)	Total
64	100.00	1488095	1488095	2976190
128	100.00	844595	844595	1689190
256	100.00	452899	452899	905798
512	100.00	234962	234962	469924
1024	100.00	119732	119732	239464
1280	100.00	96154	96154	192308
1518	100.00	81274	81274	162548

Table 2 Results of packet loss test

Frame Size (Byte)	Rate Tested(%)	Switch A to B(%) / 1GB-1GB	Switch B to A(%) / 1GB-1GB	Average
64	100.00	0.000	0.000	0.000
128	100.00	0.000	0.000	0.000
256	100.00	0.000	0.000	0.000
512	100.00	0.000	0.000	0.000
1024	100.00	0.000	0.000	0.000
1280	100.00	0.000	0.000	0.000
1518	100.00	0.000	0.000	0.000

각 양방향으로 프레임 사이즈별 패킷 데이터를 양방향으로 송출한 다음, POF를 통해서 송수신되는 데이터에 대한 Throughput과 Packet loss를 패킷발생기/분석기를 통하여 측정하였다. Table 1, Table 2는 Throughput 및 Packet loss 시험결과로써, 모든 프레임 사이즈에서 Throughput 100%, Packet Loss 0%로 패킷데이터가 안정적으로 전송되는 것을 확인하였다.

5. 결 론

철도차량에서의 데이터 전송량 급증에 따라 열차통신네트워크 광대역화의 필요성이 증대하고 있으며, POF를 이용하

여 철도차량내 모든 단말장치까지 IP 방식으로 통신할 수 있는 광대역 열차통신네트워크를 제안하고 다음과 같이 그 성능을 검증하였다.

(1) 열차통신네트워크는 철도차량내의 좁은 공간에 설치하여야 하며 열차운행에 따른 진동, 온도 변화 등에 노출되므로, 내구성 및 유지보수성이 우수한 POF를 이용하여 네트워크를 구축하는 것이 효과적이다. 한국철도규격에 의거한 내환경 특성시험을 통해서 POF가 철도차량 운영환경에 적합한 기준을 충족하는 것을 확인하였다.

(2) POF를 이용한 열차통신네트워크에서 백본망을 포함하여 차량의 모든 단말장치까지 POF로 직접 접속하고 IP 방식으로 통신하는 것이 바람직하다. 이를 위해 POF 인터페이스를 갖는 철도차량 전용의 Layer-2 스위치를 개발하고, 도시철도 시운전 전동차에 1Gbps급 시험용 네트워크를 구축하여 성능을 확인하였다. 데이터 전송시험과 네트워크 절체시험을 수행한 결과 throughput 100%, packet loss 0%로 패킷데이터가 끊임없이 안정적으로 전송되는 것을 확인하였다.

POF는 비용이 저렴하고 설치 및 유지보수가 용이하여 경제적인 효과까지 기대할 수 있으며, 철도차량의 안전성과 신뢰성 향상, 다양한 멀티미디어 서비스 제공을 통한 승객 편의성 향상을 통하여 철도차량분야의 기술경쟁력을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 POF를 이용한 철도차량용 광통신네트워크와 인터페이스 기술은 아직까지 초보적인 단계이므로, 전송거리 확장을 위한 광 트랜시버 모듈과 광 스위치, 단말용 인터페이스, 광접속장치(OJB)등의 광 커넥터 기술, QoS 향상기법 등의 추가 연구가 필요하다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 일부 지원으로 수행되었습니다. 또한, 한국건설교통평가원 “건설교통기술사업화지원에 관한 연구”의 결과물을 포함하고 있으며, 연구지원에 깊은 감사를 드립니다.

References

- [1] H.C. Shin (2010) A Study for application of train information collection device using RTD system, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(6), pp. 541-545.
- [2] Y.J. Choi, M.H. Seo, J.H. Park (2007) Mastership passing algorithm for train communication network protocol, *Journal of the Korean Society for Railway*, 10(1), pp. 88-95.
- [3] S.C. Yun, J.H. Park, S.C. Kim, S.J. Eum (2010) The analysis on the effects of the failure reduction strategies of the railway facilities, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(6), pp. 608-616.
- [4] Y.S. Jeon, H.S. Lee, J.B. Wang (2011) A study on the train composition requirements for safety operation of urban-transit, *Journal of the Korean Society for Railway*, 14(1), pp. 66-72.
- [5] D.K. Sin (2011) A study on the reliability/safety assessment

- and improvement of USN gateway for train control, *Journal of the Korean Society for Railway*, 14(5), pp. 416-424.
- [6] D.J. Chang, S.H. Kang, D.H. Song (2009) Survey on the adoptability of IT and smart sensor technologies into the next-generation high-speed train, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(5), pp. 649-655.
- [7] C.W. Park (2010) Gradient-index plastic optical fiber for all-optical gigabit internet infrastructure in home/office network, *Proceedings of POF Symposium (OFC 2010)*, San Diego, California.
- [8] B.W. Park, D.Y. Yoon, D.S. Kim (2009) Optical communication and sensing modules for plastic optical fibers, *The Korean Journal of Chemical Engineering*, 47(5), pp. 558-564.
- [9] G. Duggan, D.A. Barrow, T. Calvert, et al. (2008) Red vertical cavity surface emitting lasers(VCSELs) for consumer applications, *Proceedings of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XII*, San Jose, California.
- [10] T. Koonen, H. van den Boom, I.T. Monroy, G.D. Khoe (2001). Broadband data communication techniques in POF-based networks, *Proceedings of the 27th European Conference of Optical Communication (ECOC 2001)*, Amsterdam, Netherlands.
- [11] O. Ziemann, J. Krauser, P.E. Zamzow, W. Daum (2008) POF Handbook: Optical Short Range Transmission Systems, Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg.
- [12] H. Poisel, D. Kalymnios, P. Scully (2007) POF sensors applications in every days life, *Proceedings of the 33rd European Conference of Optical Communication (ECOC 2007)*, Berlin.
- [13] D. Visani, C.M. Okonkwo, S. Loquai, et al. (2010) Record 5.3 Gbit/s transmission over 50m 1mm core diameter graded-index plastic optical fiber, *Proceedings of National Fiber Optic Engineers Conference(NFOEC)*, San Diego, California.
- [14] H.B. Kwon, S.W. Nam, T.H. Ko, et al. (2010) Field measurements to predict the wind gust under train at the speed-up of conventional railway lines, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(3), pp. 376-381.
- [15] Y. Koike, M. Asai (2009) The future of plastic optical fiber, *NPG Asia Materials*, 1(1), pp. 22-28.
- [16] P. Polishuk (2009) Potential applications of plastic optical fibers(POF) for commercial & military aircraft, ARINC Fiber Optics Subcommittee May 2009 Meeting.
- [17] R. Gaudino, A. Nocivelli, H. Kragl, O. Ziemann (2007) Latest results from the POF - all EU project: toward improved capacity over large-core plastic optical fibers, *Proceedings of Broadband Europe Conference*, Antwerp, Belgium.

접수일(2013년 1월 3일), 수정일(2013년 3월 25일),
게재확정일(2013년 5월 1일)

Dongha Kim : itnsea@naver.com

Department of Railroad Electrical/Signaling Engineering, Graduate School of Railway, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongreung-ro Nowon-gu Seoul 139-743, Korea

Soyoung Lee : sylee@shyn.co.kr

Si Hyun Korea Co., 80 Daehak-ro Buk-gu Daegu 702-701, Korea

Kyuhyoung Choi : khchoi@seoultech.ac.kr

Department of Railroad Electrical/Signaling Engineering, Graduate School of Railway, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongreung-ro Nowon-gu Seoul 139-743, Korea