

비접촉식 광 점퍼 코드 개발 및 광 전송 성능 평가

Development of Non-Contact Fiber Jumper Cord and Evaluation of Light Transmission Performance

김헌영***, 강동훈*†

Heonyoung Kim*** and Donghoon Kang*†

초 록 최근 많은 장점으로 기존 전기식 센서를 대체하여 그 적용 영역을 빠르게 넓혀가고 있는 광섬유 센서는 센서부에서 계측기 사이의 신호 전달을 위해 광 어댑터와 광 점퍼 코드와 같은 광소자를 사용하게 된다. 광 어댑터를 이용하여 신호 전달을 하는 경우 단면이 서로 맞닿게 되어 이물질에 의해 코어 부분에 손상이 발생할 수 있으며, 이는 광 손실 및 광 접속 불능을 유발할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 지속적인 유지보수를 필요로 하는 문제들을 근원적으로 해결할 수 있는 대안으로 비접촉식 광섬유 점퍼 코드를 개발하였으며 그 전송 성능을 평가하였다. 시험 결과, 기존의 접촉식 광 점퍼 코드는 2 mm의 간극에서 광 신호 전송이 불가능한데 반해 비접촉식 광 점퍼 코드의 경우 초기 광 손실은 상대적으로 크지만 간극이 증가하더라도 약 7 mm 정도까지 안정적으로 신호 전송이 가능하였다. 따라서, 패치 코드가 광센서 간 신호 전송을 위한 케이블임을 고려할 때 외부의 환경적 요인에 대해 더 우수한 신호 안정성을 가진 비접촉식 패치 코드가 접촉식 패치 코드에 비해 현장 적용성이 더 뛰어남을 확인하였다.

주요용어: 비접촉식 광 점퍼 코드, 광 전송 성능, 광섬유 센서, 광 소자

Abstract Recently, fiber optic sensors, which have many advantages are being applied in various fields by replacing conventional electric sensors. To transmit the light signals between an interrogator and a sensor head, optical components such as an optical adaptor and optical jumper cords are generally used. When signals are transmitted using an adaptor, the end surface of each jumper cord is faced together. If alien substances exist on the core surface of an optical fiber, those can cause light transmission loss and signal disappearance. For this reason, non-contact fiber jumper cords are developed to overcome the problems that require continual attention. The light transmission performance of non-contact fiber jumper cords are also evaluated. From the test results, conventional fiber jumper cords are unable to transmit the signals over 2 mm cavity between the ends of both cords. Otherwise, non-contact fiber jumper cords can transmit the signals with stability up to the cavity of 7 mm though they have more transmission loss than the conventional ones. Consequently, non-contact fiber jumper cords that have better signal stability than conventional ones in environments are highly recommended in field applications, especially if they play a role as a cable for signal transmission between fiber optic sensors.

Keywords: Structural Non-Contact Fiber Jumper Cord, Light Transmission Performance, Fiber Optic Sensor, Optical Component

1. 서 론

최초 광섬유가 개발된 이래 광섬유를 통신에 활용하기 위하여 원거리 통신 시 발생하는 굽힘

손실에 의한 신호 왜곡 및 미전송 문제 등을 해결하기 위한 다양한 연구가 진행되었다. 예로, 단일 모드 광섬유의 굽힘 각도에 따른 광 손실 평가[1], 광섬유 곡률에 따른 광 전파 특성에 대한

[Received: September 24, 2016, Revised: October 13, 2016, Accepted: October 13, 2016] *한국철도기술연구원 첨단소재연구팀, **연세대학교 기계공학과, † Corresponding Author: Advanced Materials Research Team, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 16105, Republic of Korea (E-mail: dhkang@krri.re.kr)

연구[2]나 다중 모드 광섬유의 굽힘에 따른 광 손실 및 전파 특성에 대한 연구[3] 등이 수행된 바 있다. 한편, 광섬유를 통신 용도가 아닌 굽힘 손실 등과 같은 빛의 고유한 특성을 이용해 센서로 활용하기 위한 연구[4,5]가 진행되었다. 이를 통해 다양한 형태의 광섬유 센서(fiber optic sensor)가 개발[6,7]되었으며 최근 기존 전기식 센서를 대체하여 그 적용 영역을 빠르게 넓혀가고 있다. 광섬유 센서는 센싱을 위한 신호의 전달 시 빛을 매개로 하므로 원거리 전송이 가능하고, 외부 환경에 의한 전자기 간섭(electromagnetic interference, EMI)에 대해 독립적이며, 실리카(SiO₂) 계열의 재질로 구성되어 부식(corrosion)으로부터 자유롭다. 또한, 수백 마이크로미터(μm) 정도의 크기로 구조물에 삽입(embedding)이 용이해 항공우주분야에서 주로 사용되는 복합재료(composites)와 함께 동체 거동을 모니터링 하는 용도[8] 등으로 많이 사용되고 있으며, 기타 다양한 분야에서 구조 건전성 모니터링(structural health monitoring, SHM)을 비롯하여 비파괴검사 기술 개발을 위한 연구가 진행되고 있다[9-13]. 이렇듯 다양한 분야에 적용성을 넓혀 가고 있는 광섬유 센서는 센서와 계측기(interrogator) 사이의 신호 전달을 위해 필연적으로 광케이블(optical cable) 및 광 어댑터(optical adaptor)와 같은 광소자(optical component)를 사용하게 되며 이 때 사용되는 연결선을 광 점퍼 코드(fiber jumper cord), 일명 패치 코드(patch cord)라고 부른다. 패치 코드는 접속부 커넥터의 형태에 따라 SC, LC, FC, MU 등 다양한 종류가 있으며 광섬유 센서 분야에서는 주로 FC 방식이 사용되고 있다. 이러한 패치 코드는 높은 인장력에도 사용이 가능하며, 결합 효율이 우수하고, 작은 곡률 반경에서도 사용이 가능해 광섬유 센서 적용 현장에서 폭넓게 활용되고 있다.

하지만, 일반적으로 패치 코드 사이의 접속을 위해서는 Fig. 1에서와 같이 단부 사이의 물리적 접촉에 의해 필연적으로 약 5% 내외의 접속 손실이 발생하게 된다. 따라서, 패치 코드 사이의 접속 시 사용되는 광 어댑터의 사용은 통상 수 개 이내로 하는 것이 일반적이며 더 많은 수의 연결이 필요할 경우 광섬유를 전기아크로 녹여 접속하는 용착(splicing) 접속법을 많이 사용한다. 뿐만 아니라, 단면이 서로 맞닿는 부위에 이물질

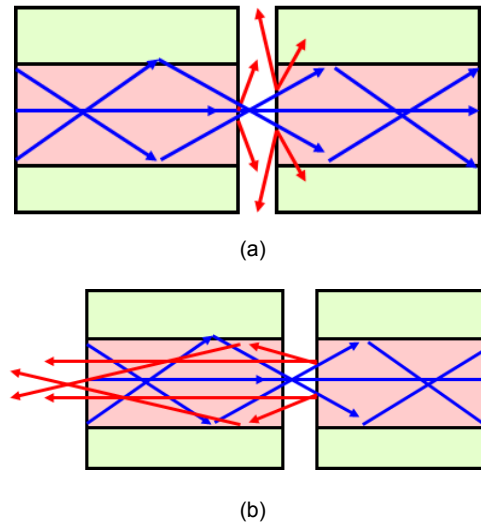


Fig. 1 Causes of transmission loss in patch cord connection, (a) insertion loss, (b) return loss

이 있을 경우 빛이 통과하는 광섬유 코어(core) 부분에 손상이 발생함으로써 광 손실을 유발하며 심할 경우 접속 불능이 발생하므로 지속적인 관리 및 보수가 필요하다.

실례로, 철도차량간의 통신용으로 결속의 용이성이 높은 SC 타입의 광 커넥터를 많이 사용하고 있으며, 잦은 탈부착에 의한 손상으로 커넥터 및 어댑터 교체가 이루어지고 있다. 특히, 최근 철도차량 내부 객실 모니터의 신호 전송 시 광섬유 케이블이 본격적으로 활용되면서 미세한 쇳가루가 지속적으로 발생하는 철도현장의 특성과 맞물려 패치 코드의 단면 깨짐 현상이 빈번하게 보고되고 있으며, 또한 이를 해결하기 위한 현장의 요구도 높은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 접촉식 패치 코드가 갖는 필연적 한계인 단면 깨짐 문제 등을 근원적으로 해결할 수 있는 대안으로 비접촉식(non-contact) 광섬유 패치 코드를 개발하였으며 그 성능을 평가하였다.

2. 비접촉식 광섬유 패치 코드 제작

일반적으로 접촉식 패치 코드 간의 연결은 Fig. 2(a)와 같이 페룰(ferrule)이라고 불리는 패치 코드 단부의 커넥터 간 접속을 통해 연결된다. 따라서, 앞서 언급했듯이 단부 커넥터에 이물질

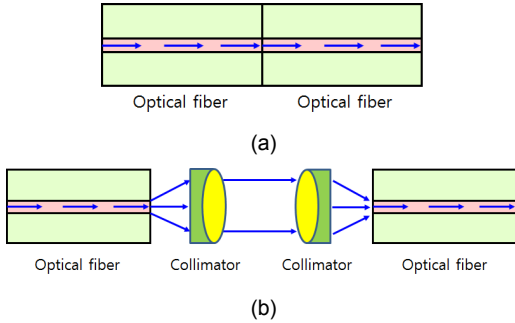


Fig. 2 Principle of light transmission in conventional patch cord and non-contact patch cord, (a) conventional patch cord, (b) non-contact patch cord

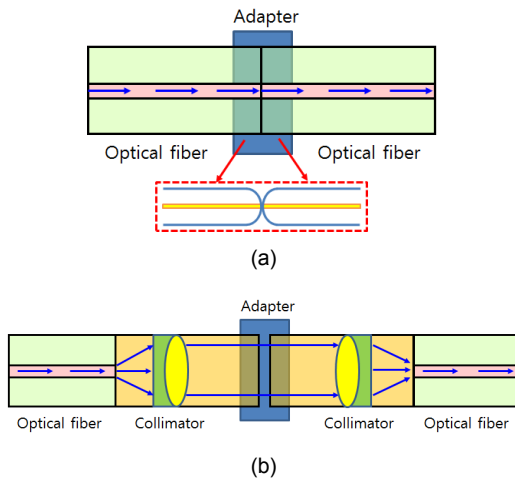


Fig. 3 Schematic of patch cord connection with adapter, (a) conventional patch cord, (b) non-contact patch cord

이 존재하는 경우 완전 접촉이 이루어지지 못하게 되어 산란에 의한 광 손실이 발생하고, 이물질이 유발한 단면 손상은 지속적으로 광 손실을 일으키게 되므로 패치 코드 자체를 교체하는 방법으로 보수를 진행하게 된다. 반면, 본 연구에서 개발한 비접촉식 패치 코드의 경우 Fig. 2(b)와 같이 패치 코드 단부가 콜리메이터(collimator)로 되어 있어 광 어댑터를 통한 패치 코드 간 연결시 두 패치 코드의 단부가 일정한 거리로 이격되게 되는, 즉 물리적으로 비접촉 상태가 된다. 따라서, 접촉식 패치 코드가 갖는 단면 깨짐 현상을 근원적으로 해결할 수 있게 된다.

그 원리를 자세히 살펴보면, Fig. 3(a)와 같은 기존 접촉식 패치 코드의 경우 광섬유 코어에서 진

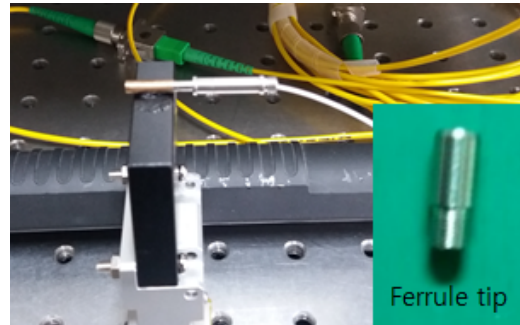


Fig. 4 Assembly of a ferrule tip with collimator

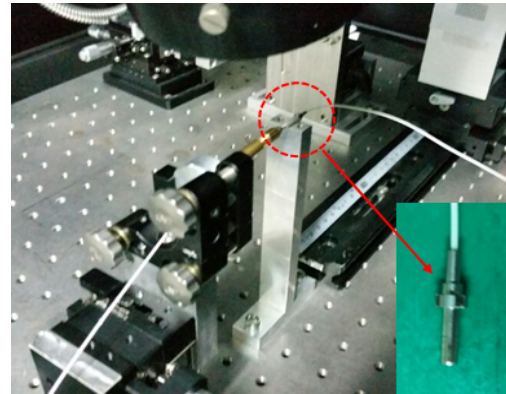


Fig. 5 Assembly of a ferrule tip with ferrule

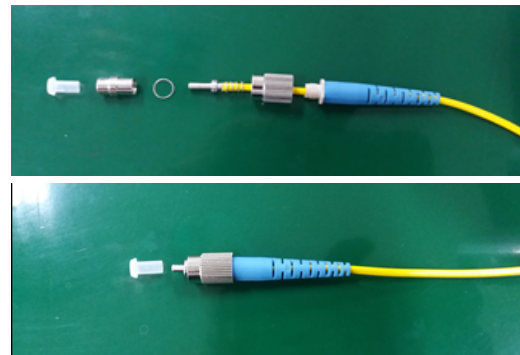


Fig. 6 Assembly of a ferrule with the other components for a patch cord

행된 빛이 물리적 접촉을 통한 약간의 광 손실을 겪은 후 곧바로 연결된 광섬유 코어로 진행하게 된다. 반면, Fig. 3(b)의 비접촉식 패치 코드는 광섬유 코어에서 진행된 빛이 단부 커넥터에서 외부로 일정거리만큼 퍼져 나온 후 다시 수평광으로 바뀌게 되며 반대쪽 패치 코드에서는 반대 과정을 통해 다시 광섬유 코어로 빛이 집속되어 전송되는 원리이다. 다시 말해, 광섬유 단부 커넥터에 위치하고 있는 소형 렌즈인 콜리메이터가 광

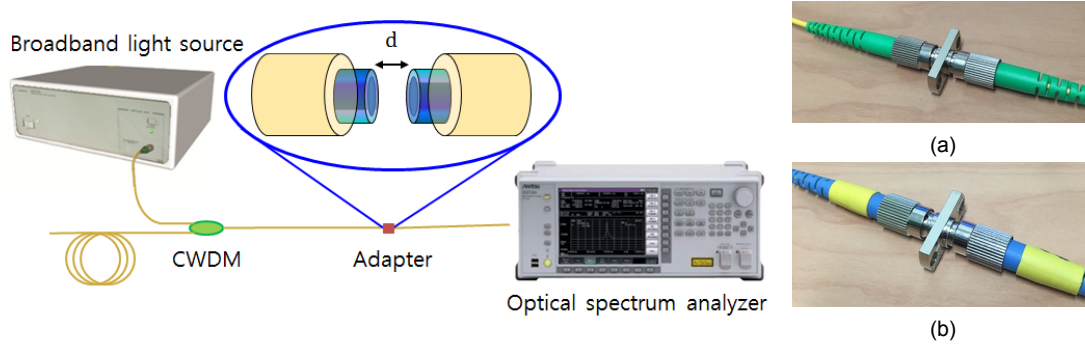


Fig. 7 Experimental setup for evaluating light transmission loss, (a) conventional patch cord, (b) non-contact patch cord

섬유 케이블 내에서 도파된 광이 광섬유 단부를 통과할 때 구면파(spherical wave) 형태로 진행되는 것을 평면파(plane wave)로 만들어주는 것이다. 이후 일정 거리만큼 진행된 평면파가 콜리메이터를 만나면 광이 집속(focusing)되는 효과가 발생하며 이를 통해 광섬유 코어에 집속할 수 있게 된다.

따라서, 본 연구에서는 Fig. 3(b)와 같은 비접촉식 패치 코드 제작을 위해 페룰 팁에 콜리메이터를 Fig. 4와 같이 연결하여 광 도파로를 만들고, 보호 및 내구성 향상을 위해 슬리브에 삽입한다. Fig. 5와 같이 콜리메이터와 페룰 팁을 결합하고 페룰에 조립한 후, 다시 FC 형태의 접속부 커넥터의 각 구성품들과 조립을 하면 최종적으로 Fig. 6과 같은 비접촉식 광섬유 패치 코드가 완성된다.

3. 광 전송 성능 평가

본 연구에서 개발한 비접촉식 광섬유 패치 코드의 광 전송 성능을 알아보기 위해 Fig. 7(a), (b)과 같이 두 가닥의 패치 코드를 어댑터를 이용해 연결한 후 입력광(83437A, Agilent Co.)과 출력광의 차이를 광 스펙트럼 분석기(MS9710C, Anritsu Co.)를 이용해 비교하는 방법으로 실험을 진행하였다. Fig. 7에서와 같이 입력광은 광대역 광원에서 CWDM (coarse wavelength division multiplexing)을 이용하여 광섬유 케이블 내에서 흡수율이 낮아 손실이 적은 중심파장 1550nm (1540~1560nm) 주파수 영역의 광을 분할하여 사용하였다. 또한, 기존 접촉식 패치 코드와의 전송 성능 비교를 위해 같은 방법으로 기존 접촉식 패치 코드도 실험을 진행하였다.

한편, 각 패치 코드의 광 전송 성능 평가는 어댑터 내부의 광 도파로에서 양 패치 코드간의 간극(d)을 변화시켜가며 전송되는 광량의 정량적인 변화를 관찰하는 방법을 통해 각 패치 코드의 광 전송 성능을 평가하였다.

4. 성능 평가 결과 및 고찰

비접촉식 광섬유 패치 코드의 광 전송 성능 평가를 위해 성능 비교를 위한 기준이 될 기존의 접촉식 패치 코드에 대한 성능 평가 시험을 수행하였다. 시험은 광원의 주파수에 따른 영향을 함께 고려하기 위하여 시험에 사용된 광원이 갖는 20 nm(1540~1560 nm)의 주파수 폭을 3등분 (1545 nm, 1550 nm, 1555 nm) 하여 각 주파수에서의 광 전송 성능을 측정하여 평균화하였다. 시험 결과, Fig. 8과 같이 기존의 접촉식 패치 코드의 경우 간극이 없는 경우, 즉 원래의 사용 환경인 완전 접촉되어 연결되면 입력광에 비해 출력광이 약 2.9%의 손실로 광이 전송되는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 인위적으로 간격을 증가시키자 1 mm 간격에서는 약 10%로 손실이 증가하지만 광이 전송되었으나, 간격이 2 mm가 될 경우 출력광이 입력광의 0.2% 수준으로 거의 광이 전송되지 못하였다. 이는 앞서 언급했듯이 출력광이 단부에서 구면파 형태로 퍼져 나가기 때문에 일정 거리 이상에서는 반대쪽 광섬유의 코어부로 광을 집속할 수 없기 때문이다. 입력광의 주파수 영역에 따른 광 강도 손실에 대한 표준편차는 Table 1과 같이 주파수 변화가 손실률에 미치는 영향은 거의 없음을 확인하였다. 따라서, 기존 접촉식 패치코드의 경우 접촉부 사이의 간극

에 지배적으로 영향을 받으므로 이물질이나 코어부 정렬과 같은 문제에 대해 광 전송능력이 민감하게 반응할 수밖에 없음을 확인하였다.

반면, 비접촉식 광섬유 패치코드의 경우 Fig. 10에서와 같이 입력광 대비 간극이 0인 경우, 즉 두 패일이 서로 맞닿아 있는 경우에도 약 42.5%의 손실이 발생하였다. 이 경우 실제 폴리메터는 패일의 단부로부터 약 1 mm 안쪽에 위치하고 있어 실제 두 패치 코드는 약 2 mm 정도 이격된 상태가 된다. 따라서, 이물질이나 코어부 정렬과 같은 문제에 상대적으로 더 안정적인 광 전송이 가능하다. 뿐만 아니라, 간극을 0~7 mm까

지 증가시키더라도 출력광에서 추가적인 감소가 거의 발생하지 않아 다양한 비접촉 환경에서 사용성이 우수함을 확인할 수 있다. 한편, 간극이 더 증가하여 8 mm가 되면 다시 출력광의 추가적인 감소가 발생해 입력광의 약 57.2%가 감소하였고, 간극이 9 mm일 때는 다소 크게 감소하여 입력광의 약 87.9%가 손실되었다. 본 연구에서 개발된 비접촉식 패치 코드의 한계 간극을 실험 셋업의 제한으로 확인하지 못하였으나 추세적

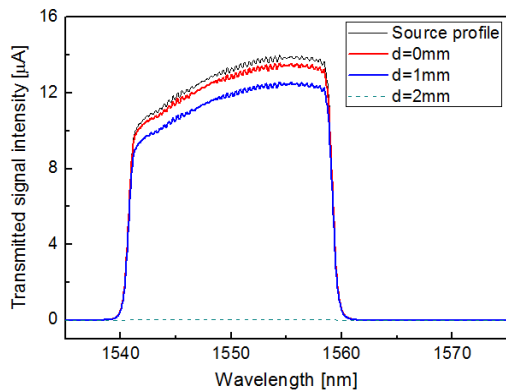


Fig. 8 Transmitted spectra of conventional patch cord with cavity change

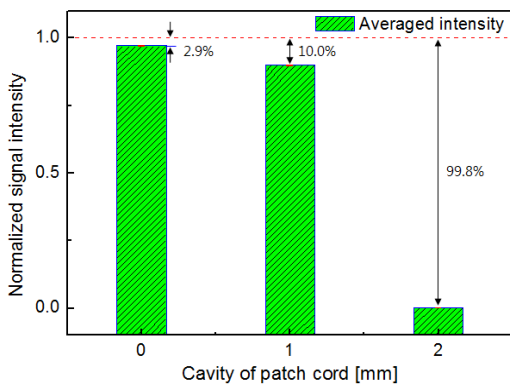


Fig. 9 Normalized signal intensity of conventional patch cord with cavity change

Table 1 Standard deviations of conventional patch cord with cavity change

Cavity [mm]	0	1	2
Standard deviation	0.0011	0.0012	0.0002

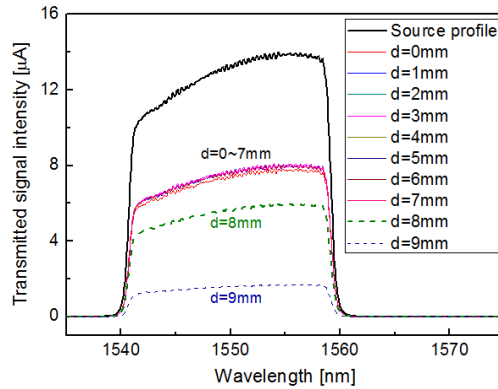


Fig. 10 Transmitted spectra of non-contact patch cord with cavity change

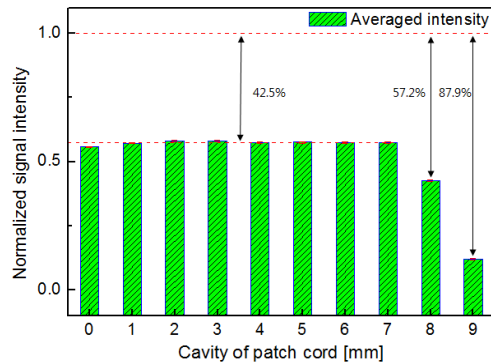


Fig. 11 Normalized signal intensity of non-contact patch cord with cavity change

Table 2 Standard deviations of non-contact patch cord with cavity change

Cavity [mm]	0	1	2	3	4
Standard deviation	0.0011	0.0027	0.0026	0.0026	0.0027
Cavity [mm]	5	6	7	8	9
Standard deviation	0.0031	0.0029	0.0034	0.0026	0.0022

으로 판단할 때 대략 11~12 mm 정도로 추측된다. 또한, Table 1과 마찬가지로 비접촉식 광섬유 패치 코드에 대해서도 주파수 변화에 따른 손실률 영향을 확인한 결과 Table 2와 같이 주파수 변화가 손실률에 미치는 영향은 거의 없음을 확인하였다. 이를 통해, 기존의 접촉식 패치코드에 비해 초기 손실률은 상대적으로 크지만 긴 간극에 대해서도 신호 전송이 가능해 광 센서에 적용되는 케이블의 측면에서 볼 때, 각종 외부의 환경적 요인에 대한 신호 안정성 부분에서의 케이블 내구성은 오히려 우수할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 비접촉식 광섬유 패치 코드를 개발하였으며, 개발된 패치 코드에 대한 광 전송 성능 평가를 실시하였다. 시험 결과, 기존의 접촉식 패치 코드에 비해 초기 광 손실은 상대적으로 크지만, 간극이 증가하더라도 약 7 mm 정도까지는 안정적으로 신호 전송이 가능하였다. 또한, 최대 10 mm 정도까지는 신호 측정이 가능할 것으로 판단되며, 이는 기존의 접촉식 패치 코드의 2 mm 수준임을 감안할 때 매우 우수함을 알 수 있다. 따라서, 패치 코드가 광센서 간 신호 전송을 위한 케이블임을 고려할 때 외부의 환경적 요인에 대해 더 우수한 신호 안정성을 가진 비접촉식 패치 코드가 접촉식 패치 코드에 비해 현장 적용성이 더 뛰어남을 확인하였다.

본 연구 결과는 광케이블 적용이 확대되고 있는 철도분야를 비롯한 여러 분야에 적용이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] W. A. Gambling, H. Matsumura, C. M. Ragdale and R. A. Sammut, "Measurement of radiation loss in curved single-mode fibres," *Microwaves, Optics and Acoustics, IEE Journal*, Vol. 2, No. 4, pp. 134-140 (1978)
- [2] W. A. Gambling and H. Matsumura, "Propagation characteristics of curved optical fibers," *IEICE Transactions (1976-1990)*, Vol. 61, No. 3, pp. 196-201 (1978)
- [3] J. C. Baggett, T. M. Monro, K. Furusawa, V. Finazzi and D. J. Richardson, "Understanding bending losses in holey optical fibers," *Optics Communications*, Vol. 227, No. 4, pp. 317-335 (2003)
- [4] K. H. Lee, B. J. Ahn and D. H. Kim, "Fiber optic displacement sensor system for structural health monitoring," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 31, No. 4, pp. 374-381 (2011)
- [5] H. Y. Kim and D. H. Kim, "Sensor system for multi-point monitoring using bending loss of single mode optical fiber," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 35, No. 1, pp. 39-45 (2015)
- [6] J. H. Lee, D. H. Kim and I. K. Park, "Application of a fiber Fabry-Perot interferometer sensor for receiving SH-EMAT signals," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 34, No. 2, pp. 165-170 (2014)
- [7] H. Y. Kim, J. H. Lee and D. H. Kim, "Muscular condition monitoring system using fiber Bragg grating sensors," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 34, No. 5, pp. 362-368 (2014)
- [8] J. B. Ihn and F. K. Chang, "Pitch-catch active sensing methods in structural health monitoring for aircraft structures," *Structural Health Monitoring*, Vol. 7, No. 1, pp. 5-19 (2008)
- [9] Y. J. Rao, D. J. Webb, D. A. Jackson, L. Zhang and I. Bennion, "In-fiber Bragg-grating temperature sensor system for medical applications," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 5, pp. 779-785 (1997)
- [10] D. H. Kang, C. U. Kim and C. G. Kim, "The embedment of fiber Bragg grating sensors into filament wound pressure tanks considering multiplexing," *NDT&E International*,

- Vol. 39, pp. 109-116 (2006)
- [11] A. Grillet, D. Kinet, J. Witt, M. Schukar, K. Krebber, F. Pirotte and A. Depré, "Optical fiber sensors embedded into medical textiles for healthcare monitoring," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 8, No. 7, pp. 1215-1222 (2008)
- [12] W. Chung and D. Kang, "Full-scale test of a concrete box girder using FBG sensing system," *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 3, pp. 643-652 (2008)
- [13] D. Kang, D. H. Kim and S. Jang, "Design and development of structural health monitoring system for smart railroad-gauge-facility using FBG sensors," *Experimental Techniques*, Vol. 38, No. 5, pp. 39-47 (2014)