

실시간감시를 위한 광섬유 ROTDR 센서의 탐지특성 연구

A Study on Detection Characteristic of Fiber Optic ROTDR Sensor for Real-Time Monitoring

박형준*, 김인수*

Hyung-Jun Park*, In-Soo Kim*

Abstract

We Designed and Conduct a study on the basic intrusion detection research for outside intruder, which can determine the location and the weight of an intruder into infrastructure, by using Fiber-Optic ROTDR(Rayleigh Optical Time Domain Reflectometer) sensor, which are buried in the sand, were prepared to respond the intruder effects. The signal of ROTDR was analyzed to confirm the detection performance. The weight could be detected as 4 grades, such as 20kg, 40kg, 60kg, and 80kg. which used long distance fiber for intruder detection on wide area. This sensor was possible for application of real-time monitoring of infrastructures.

요 약

외부 지역에서 침투하는 외부침입자에 대한 침입탐지를 위한 기초적인 연구 수행을 위하여 광섬유 ROTDR (Rayleigh Optical Time Domain Reflectometer) 센서를 설계 및 기초 연구를 수행하였다. 외부침입자를 탐지하기 위한 센서는 침입 탐지판을 제작하여 모래 속에 매설하여 실내에서 모형을 설치하여 침입탐지 실험을 수행하였다. ROTDR 센서의 신호 분석은 검출정도에 따른 신호의 특성을 분석하였다. 광섬유 ROTDR 센서는 크게 20kg, 40kg, 60kg, 그리고 80kg 등의 무게별로 4등급으로 구분하여 넓은 영역에 걸쳐 외부 침입자를 감시하기 위한 장거리용을 사용하였다. 결과 본 논문에서의 광섬유 센서는 사회중요 기반시설의 외부침입자 감시용 실시간 모니터링의 응용에 가능성을 확인 하였다.

Key words :Fiber-Optic ROTDR sensor, Intrusion detection, Sensing plate, Infrastructure, Rayleigh Scattering

* Dept. of Materials & Energy Engineering College of IT & Energy, Kyungwoon University.

★ Corresponding author
e-mail: iskim@ikw.ac.kr, Tel: +82-54-479-1140

Manuscript received, Nov. 18, 2016; revised, Dec. 8, 2016 ; accepted, Dec. 26, 2016

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.

I. 서론

광의 흡수가 일어나지 않는 영역에서 빛이 지나 가는 경로에 위치한 분자들은 광에 의해 전자 밀도의 변화가 유도되어 분자 자신이 2차적인 광원으로 작용하여 광을 방사 또는 산란을 일으킨다. 이때 방사 또는 산란되는 광의 파장이 변하지 않으면 광의 산란 현상이 탄성적(Elastic)이라 하고, 레일리(Rayleigh) 산란이 그 예이고, 이러한 현상과는 달리 산란현상에 의해 분자나 입자 사이에 에너지 교환을 줄 경우 비탄성적(Inelastic)이라 하며 라만 산란과 브릴루앙 산란이 이 경우에 해당된다.

한편, 1976년 M. K. Barnoski와 S. M. Jensen 이 광섬유의 레일리 후방 산란을 시간영역에서 해석함으로써 비 파괴적 특성을 가지고 광섬유의 손실 측정과 광섬유 산란형 센서로서 응용 가능한 ROTDR (Rayleigh Optical Time Domain Reflectometer) 센서를 발명하였다.[1][2]

이후 광섬유 센서를 비롯하여 광학적인 현상을 이용한 외부 침입감시에 대한 연구 및 기타 응용 연구에 대한 연구를 진행하고 있다.[3][4][5][6]

영국의 광섬유 센서 회사인 York사의 Dakin은 광섬유 Rayleigh 산란에 의한 OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) 기법을 이용하여 침입 탐지에 응용 가능성을 보여 주었다.[7] 따라서 광섬유의 레일리 산란을 이용한 센서는 광섬유의 휘어짐이나 끊어짐에 의한 광 손실을 측정하기 때문에 본 논문에서는 우리사회의 중요 사회 기반시설에 침투하는 침입자 탐지 분야에 있어서 고감도 센서인 광섬유 ROTDR 센서에 대한 기초 연구를 진행하였다. 본 논문에서 제안한 광섬유 ROTDR 센서는 넓은 면적을 감지 할 수 있는 매설형 광섬유 탐지 판을 제작하고, 외부의 침입자 중에서 무게별 특성에 따른 센서의 신호 특성을 조사하였다.

II. 본론

1. 광섬유 ROTDR 센서의 개요

그림 1[a][b]에서는 광섬유 ROTDR 센서의 기본 개념도와 산란신호의 특성을 보여 주고 있다.

광섬유 레일리 산란형 센서는 광섬유의 굽힘(Microbending)으로 인한 반사광의 변화를 이용하는 것으로 광원에서 나온 빛이 광섬유를 따라 전파하다가 광섬유의 굽힘으로 인해 신호가 되돌아오게 되는 레일리 산란광(Rayleigh scattering light)과 프레넬 반사광(Fresnel reflected light)을 이용한다. 레일리 산란 현상은 광섬유의 미세한 굴절률 변화로 인한 산란으로 후방을 포함한 모든 방향으로 산란현상이 이루어진다. 이렇게 되돌아온 산란광을 이용하여 외부침입에 의한 변화량을 측정 할 수 있다.[7][8][9][10]

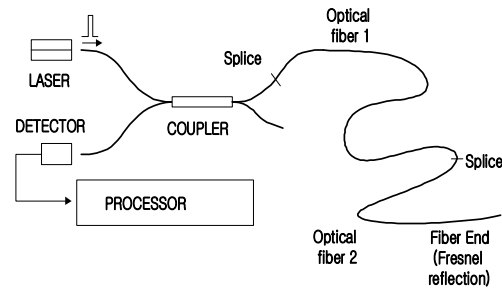


Fig. 1.[a] Basic configuration of the fiber optic scattering sensor

그림 1.[a] 광섬유 산란형 센서의 기본 개념도

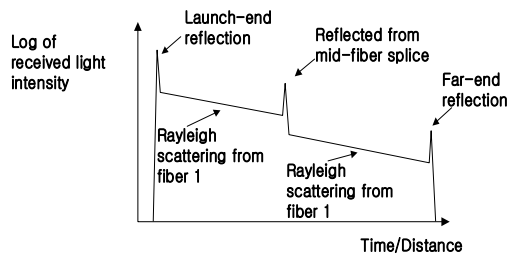


Fig. 1.[b] Scattered signal of fiber optic scattering sensor

그림 1.[b] 광섬유 산란형 센서의 산란신호

2. 레일리 후방 산란의 원리

후방 산란된 레일리 신호는 아래와 같은 수식으로 표현이 가능하다. 광섬유를 따라 진행하는 빛은 거리가 멀어짐에 따라 빛의 감쇠 효과로 인하여 지수 함수적으로 광 출력이 줄어들게 된다. 거리에 따른 입사광과 투과광 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$P(z) = P_0 \cdot e^{-\alpha z} \quad (1)$$

여기서, P_0 는 입사광의 출력, P_z 는 투과광의 출력, z 는 거리, α 는 감쇠계수이다. 문제를 간단히 하기 위해서 일반적으로 흡수계수 α_a 와 산란계수 α_s 가 조합된 전체 감쇠계수 α 를 사용한다.

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_s \quad (2)$$

감쇠계수는 다음과 같은 제약조건을 갖는다.

$$0 \leq \alpha_a \ll \alpha_s \quad (3)$$

3. 광섬유 ROTDR 센서시스템의 구성

그림 2에서는 광섬유 ROTDR 센서시스템의 전체 시스템 구성 도를 보여준다. 본 논문에서 센서시스템의 구성은 크게 광원 부, 레이저다이오드 구동 부, 펄스신호 발생 부, 광 검출 부 그리고 신호처리부로 구성된다. 광원 부는 광섬유의 레일리 산란을 발생시키기 위한 광원으로 사용한다. 본 논문에서 사용된 광원은 선폭이 10[nm], 광 출력은 100[mW]이었다. 광섬유의 위치에 따라 발생된 레일리 산란신호를 검출하기 위해서는 단일 펄스가 광섬유를 통해 진행하면서 발생하는 후방 산란이 검출 된 이후 펄스를 발생시켜야 한다. 즉, 광섬유 내에서 단일 펄스가 왕복하여 진행하는 시간을 계산하여 이때의 단일 주기의 펄스를 계산한다. 광 검출기는 피 측정 광섬유의 산란광을 검출하는 장치로서 포토다이오드를 사용한다. 포토다이오드는 입사한 광의 세기를 전기적인 크기로 변환 시켜주는 역할을 한다. 마지막으로 신호 취득 부는 광원인 레이저 다이오드의 입력 광 신호를 포토다이오드를 통하여 전기신호로 바꾸고 아날로그/디지털 변환 부를 이용하여 디지털 신호로 변환하여 컴퓨터에 그 신호가 저장된다.

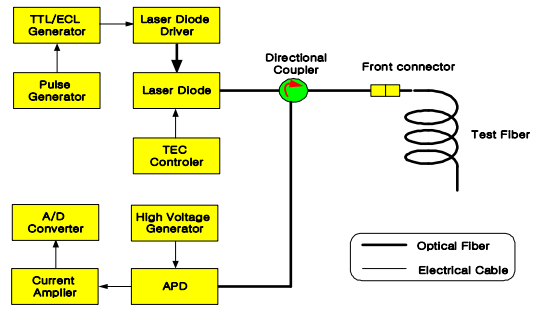


Fig. 2. Conceptual diagram of the ROTDR sensor system

그림 2. ROTDR 센서의 개념도

III. 실험방법

1. 침입탐지 조건

(1) 광섬유의 굽힘 광 손실

임의의 굴절률 분포를 가지는 굽힘이 없는 광섬유에서, 광섬유 단면의 모든 지점에서 모드 전계는 같은 위상 속도를 가지고 광섬유 축에 평행하게 진행한다.[11] 따라서 일정한 위상 면은 광섬유 축에 직교하게 된다. 하지만 광섬유가 그림3과 같이 일정한 반경을 가지고 굽어진다면 전계와 위상 면은 일정한 각속도를 가지고 굽힘 곡률 중심에 대하여 회전하게 된다.

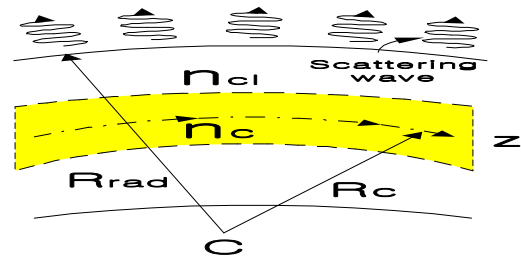


Fig. 3. The light loss of an optical fiber due to microbending

그림 3. 광섬유의 굽힘 광 손실

(2) 침입 발생에 따른 신호구분

그림4는 광섬유 ROTDR 센서의 침입자 발생에 따른 ROTDR 신호 구분에 대한 개념도를 보여준다. 그림에서 신호는 크게 두 가지로 나타낼 수 있다. 하나는 전체기준신호(Reference signal)

이고 다른 하나는 실제신호(Signal A, B, C)이다. 그림에서와 같이 침입자의 위치변화에 따라 발생 신호는 그림의 가로축에 대하여 좌우로 변한다.

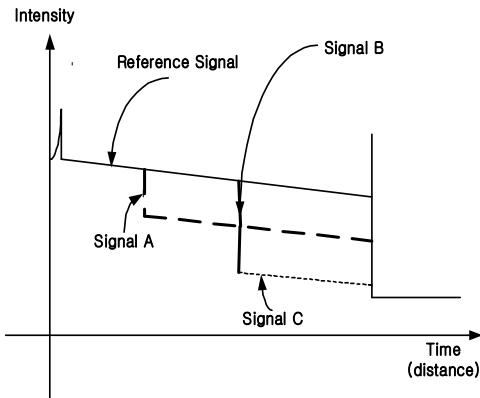


Fig. 4. Signal variation of the fiber optic ROTDR sensor according to the intrusion effects

그림 4. 침입발생에 따른 광섬유 ROTDR 센서의 신호

(3) 광섬유센서 시스템의 구성요소

본 논문의 실험 구성요소는 OTDR용 펄스레이저 광원을 사용하였으며, 사용된 파장은 1550[nm], 레이저다이오드의 선폭은 10[nm]이며, 광 전력은 100[mW]이상의 출력을 나타냈다. 또한 광섬유의 위치에 따라 발생된 레일리 산란 신호를 검출하기 위해서 단일 펄스가 광섬유를 통해 진행하면서 발생하는 단일 펄스를 사용하였다.

광 검출기는 피 측정 광섬유의 산란광을 검출하는 장치로서 포토다이오드를 사용하였다. 마지막으로 신호 취득 부는 레이저다이오드의 입력 광신호를 포토다이오드를 통하여 전기신호로 바꾸고 아날로그/디지털 변환소자를 이용하여 디지털 신호로 변환하여 컴퓨터에 저장하였다.

2. 실험 및 토의

(1) 침입탐지 실험의 구성도

침입자탐지용 광섬유 ROTDR 센서시스템의 성능의 가장 중요한 점은 광섬유의 매설 방법이다. 그림5는 모래 속에 매설된 광섬유를 매설한 센서의 실험 구성 도를 보여준다.

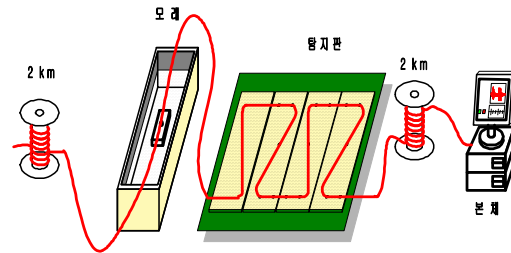


Fig. 5. Experimental setup for intrusion detection using a optical fiber buried in sand

그림 5. 모래 속에 매설된 광섬유 센서의 실험 장치

(2) 침입 탐지 판의 제작

광섬유 ROTDR 센서의 특성상 가장 중요한 부분은 침입 탐지 판의 제작이다. 침입 탐지 판은 첫째로 광섬유센서를 보호하기 위한 가장 중요한 기능과 실내 및 실외와 같은 여러 환경 하에서도 외부 침입자에 의한 침입 감지 기능을 할 수 있도록 설계 되었다. 침입 탐지 판은 일정 두께를 가진 나무판을 이용하였으며, 전체의 크기를 12 [cm] X 12[cm] 인 정사각형 크기로 제작하였으며, 광섬유가 고정 되어지는 한쪽판과 광섬유를 변형시키기 위한 덮개 부분인 두 개의 부분으로 나누어 제작하였다. 그림6은 제작한 침입 탐지 판을 보여주고 있다. 그림6에서 보는 바와 같이 왼쪽의 판은 광섬유가 눌러서 휘어짐이 발생 할 수 있도록 제작된 판의 형태를 보여주고 있고, 오른쪽 탐지 판의 경우 왼쪽 판의 윗부분에 덮여지는 덮개 부분인데 광섬유가 눌러질 때의 압력을 고려해서 검은색 부분인 고무판을 활용하여 신축성을 갖도록 설계하였다.

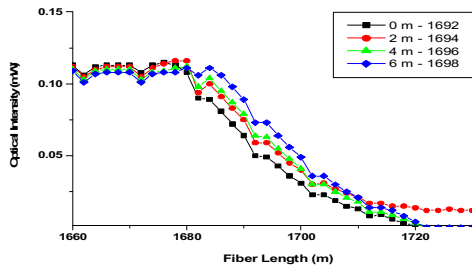


Fig. 6. Manufactured sensing plates for embeded in sand

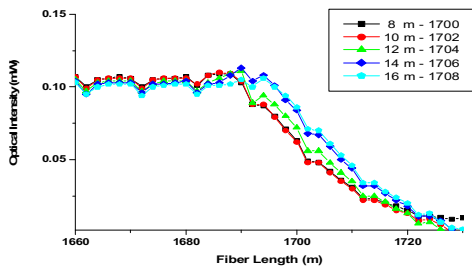
그림 6. 모래 속에 매설을 위한 침입탐지판의 제작

(3) 무게변화에 따른 침입탐지 실험

본 논문에서는 광섬유 ROTDR 센서 시스템을 구현하고, 센서의 성능을 검토하기 위하여 광신호의 사전 조건 설정과 모래 속에 센서를 매설한 후 센서의 침입탐지 실험을 수행하였다. 그림 7에서는 전체 광섬유센서의 침입자 위치별 간격에 따른 산란신호를 보여준다. 그림에서는 기준점을 중심으로 2[m]의 간격을 가지고 광섬유에 힘을 가했을 때 발생한 신호의 변화량을 보여주고 있다. 따라서 본 논문에서 실험한 광섬유센서의 위치 검출 오차는 2[m]임을 확인 하였다.



(a)



(b)

Fig.7[a],[b]. Scattered signals in relation to intrusion location intervals (2m)

그림 7[a],[b]. 침입자의 위치별 간격에 따른 산란 신호(2m)

그림 8에서는 광섬유 ROTDR 센서의 무게등급별 검출 정도를 보여준다. 무게 등급별 탐지능력에 대한 조사는 제작된 침입 탐지판 위에 무게변화를 30[kg], 40[kg], 60[kg], 80[kg]등 4개의 등급으로 구분하여 무게등급별 광섬유센서의 신호

를 조사하였다. 이 결과 30[kg]이하에서는 신호의 변화가 크지 않았으며, 40[kg]에서는 중간정도의 신호의 변화를 보였으며, 60[kg]이상 80[kg]까지는 큰 신호의 변화를 알 수 있었다. 따라서 본 논문에서는 통상 60[kg]이상의 무게를 기준으로 보면 외부침입자에 있어서 사람과 짐승 등과의 구분을 확실하게 할 수 있음을 알 수 있다.

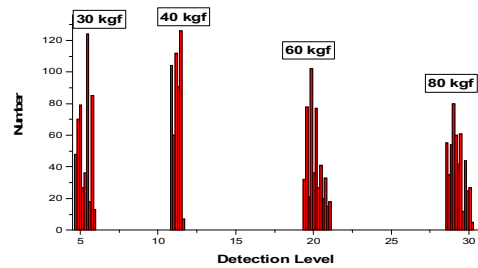


Fig. 8. Detection level of the ROTDR sensor

그림 8. 광섬유 ROTDR 센서의 무게 등급별 검출 정도

IV. 결론

본 논문에서는 광섬유 ROTDR 센서 기술을 이용하여 주요 보안 및 침입자 감시 대상체인 사회의 중요 기반시설물에 침투하는 외부 침입자를 수 m의 분해능을 가지며, 장거리 영역까지 탐지 가능한 매설 형 광섬유 ROTDR 센서에 대한 기초특성을 조사하였고, 단위길이 당 넓은 면적을 감지 할 수 있는 매설 형 광섬유 탐지 판을 제작하였고, 외부에서 침입하는 물체의 무게별 구분에 따라 구분되는 센서 신호의 특성을 조사하였다. 무게를 4등급으로 나누어서 측정 한 결과 60[kg] 이상 80[kg] 사이의 신호에서 큰 신호의 변화를 보였다. 이러한 결과를 바탕으로 장거리에 걸친 측정과 사회의 중요 기반시설물에 대한 외부침입자에 대한 감시가 가능하며, 중요시설물의 안전관리를 위한 모니터링 시스템으로 적용 가능성이 기대된다.

References

[1] Fang Yuwen, Qian Jin, Wang Minming, Li Xuesong, and Li Tianchu, "Distance scale

calibration of optical fiber OTDR", Proc. SPIE, Vol. 3552, pp. 108-113, (1998)

[2] M. K. Barnoski, and S. M. Jensen, "*Fiber waveguide: A novel technique for investigating attenuation characteristics*", Applied Optics, vol. 15, No. 9, pp. 2112-2115, (1976)

[3] Duwayne R. Anderson, Florian G. Bell, "*Optical Time-Domain Reflectometry*", Tektronix Inc. pp. 1-10.

[4] Bush I. J., Davis Carol A., Davis Pepe G., Cekorich Allen, and McNair Fred P., "*Buried fiber intrusion detection sensor with minimal false alarm rates*", Proc. SPIE, Vol. 3489, pp. 30-40, (1998)

[5] Erlend Ronnekleiv and Kjell Blotekjar, "*Distributed fiber sensor for location of disturbances*", 9th Optical Fiber Sensors Conference.

[6] Makarov Aleksej, Vesin Jean-Marc, and Reymond Florian, "*Intrusion detection robust to slow and abrupt lighting changes*", Proc. SPIE, Vol. 2661, p. 44-54, (1996)

[7] Guttinger H., Pfister G. "*Fiber optic sensors and technology in security systems*", 1st International Conf. On Optical Fiber Sensors (1983)

[8] Dennis Derickson, "*Fiber optic test and measurement*", Hewlett-Packard Professional books, pp. 449-453, (1998)

[9] H. J. Park., I. S. Kim., "Fabrication and Characteristics of X-ray Position Detection Sensor", *J. inst. korean. electr. electron. eng.* vol. 19. No. 2, p. 535-540, (2015)

[10] J. H. Lee., S. H. Lee., "A study on Radiation Detection Using CMOS Image Sensor", *J. inst. korean. electr. electron. eng.* vol. 19. No. 2, p. 193-200, (2015)

BIOGRAPHY

Hyung-Jun Park (Member)



1998 : MS degree in Sensor & Display Engineering, Kyungpook National University.

2003 : PhD degree in sensor & Display Engineering, Kyungpook National University.

2003~2008 : Principal Researcher, Samsung Techwin.

2009~2013 : Project Manager, IT Health.

2013~Present : Assistant Professor, Kyungwoon University

In-soo Kim (Member)



1985 : BS degree in Physics Yeungnam University.

1987 : MS degree in Physics Yeungnam University.

1994 : PhD degree in Physics Yeungnam University.

1998~2015 : Professor, Dept. of Material & Energy Engineering in Kyungwoon University.