

광섬유 ROTDR 센서를 이용한 사회기반시설물의 보안에 관한 연구

Research on the Security of Infrastructures Using Fiber Optic ROTDR Sensor

박형준*[†], 고흥락**[†], 권일범***

Hyung-Jun Park*[†], Kwang-Nak Koh** and Il-Bum Kwon***

초 록 광섬유 ROTDR (Rayleigh optical time domain reflectometry) 센서를 이용하여 중요 보안 대상체인 사회기반시설물에 침투하는 침입자의 위치와 무게 정도를 탐지할 수 있는 기초 연구를 수행하였다. 넓은 면적을 감지할 수 있는 매설형 광섬유 센서탐지판을 제작하고, 인가된 침입물체의 위치와 무게에 따른 신호특성을 고찰하였다. ROTDR 센서는 펄스 폭이 30 ns이고, 광섬유의 길이는 10 km 이상이다. 위치탐지오차는 약 3 m 이내였으며, 무게에 따른 탐지능력은 20 kgf, 40 kgf, 60 kgf의 세단계로 구분할 수 있음을 알 수 있었다.

주요용어: 사회기반시설물, 침입탐지, 매설형 광섬유 센서탐지판, 광섬유센서

Abstract A detection technique is studied to determine the location and the weight of an intruder into infrastructure using fiber optic ROTDR (Rayleigh optical time domain reflectometry) sensor. Fiber optic sensing plates buried in sand are prepared to measure the intruder effects. The signal of ROTDR was analyzed to confirm the detection performance. The constructed ROTDR system could be used up to 12 km at the pulse width of 30 ns. The location error was less than 3 m and the weight could be detected into three levels of grade, such as 20 kgf, 40 kgf and 60 kgf.

Keywords: infrastructure, intrusion detection, buried sensing plates, optical fiber sensor

1. 서 론

광섬유와 반도체 레이저를 이용한 광섬유형 센서는 기존의 전자소자 대신에 빛을 이용하여 물체의 변화를 측정하고, 정보의 전달 또한 빛에 의하므로 외란에 의한 전자기적 잡음에 영향을 받지 않는 장점이 있다. 또한 광섬유 자체가 센서로서 넓은 영역의 물리량을 측정할 수 있는 장점을 가진다[1].

광섬유 내부에 빛이 진행할 때 광섬유내의 밀도변화에 따라 미소한 광산란 현상이 발생하는데 이러한 현상을 레일레이(Rayleigh) 산란이라고 한다. 여기서, RODTR(Rayleigh-optical time domain reflectometry) 센서는 펄스 광을 광섬유에 입사한 후 되돌아오는 레일레이 산란 광을 측정한다. 그러므로 침입자탐지를 위하여 땅속에 매설하여 놓은 광섬유의 임의의 위치에서 되돌아오는 빛에 광손실

이 발생하였다면 그 위치에서 침입자가 있음을 알 수 있게 되는 것이다[2]. 광섬유 ROTDR 센서에 관한 연구는 1976년 Barnoski와 Jensen[3]이 광섬유의 후방 레일레이 산란을 시간영역에서 해석함으로써 비파괴적인 방법으로 광섬유의 손실을 측정할 수 있는 방법을 발명하였다[4]. Bush 등[5,6]은 편광이 제거된 Sagnac 광섬유 간섭계를 이용하여 매질에 삽입된 침입자 감시 센서를 개발하였다. Makarov 등[7]은 빛의 급격한 변화를 이미지로 검출함에 의하여 침입자를 감시하였다. 박재희 등[8]은 단일모드 광섬유에서 레일레이 후방 산란되는 광의 가간섭성을 이용하여 OTDR로 광섬유 침입 센서를 구성하였으며, 변조 펄스의 폭은 4 μ s, 공간분해능은 400 m이고, S/N 비는 3.3, 대역폭은 30.5 Hz이었다. 또한 박재희 등[9]은 고감도 삽입형 광섬유 침입자 센서의 생산가능성을 타진하면서, 마이켈슨 간섭계를 사용하여 모래에 삽입하여 실험을 수행하였다. 약 1.6 m의 검출부를 20 cm 깊이의 모래에 삽입하였으며, 출력 간섭무늬가 이동 되는데 22 N이 필요하며 감지도는 10 $^{\circ}$ /pound로 인가된 하중과 위상변화는 선형적임을 보였다. 실험 결과 광섬유 센서의 감지도는 인간이나 차량을 검출하기에 충분하다고 하였다. Guttinger와 Pfister 등[10]은 광섬유 센서를 사용한 침입자감시에 대하여 전반적인 내용을 다루고 있다. 따라서 기존의 연구결과에서 보면 공간분해능을 수 m이하로 하면서 10 km 이상의 긴거리에 대해서는 보고된 바가 없다.

본 논문에서는 광섬유 RODTR 센서가 수 m의 공간분해능을 가지면서 12 km의 광섬유를 사용할 수 있도록 구성하여 중요 보안 대상인 사회기반시설물에 침투하는 침입자탐지 분야에 있어서 고감도

및 넓은 영역에서 탐지할 수 있는 Fig. 1과 같이 시설물 주위의 모래속에 설치하는 매설형 침입자탐지 방법에 관한 연구를 수행하였다. Fig. 1에서는 사회기반시설물의 주위에 설치된 광섬유 ROTDR 센서의 개념도를 보여준다. 넓은 면적을 감지할 수 있는 매설형 광섬유 감지부를 설계 제작하고, 인가된 침입물체의 위치와 무게에 따른 신호특성을 고찰하였다.

2. 센서의 측정원리

2.1. 광섬유의 굽힘 광손실

임의의 굴절률 분포를 가지는 굽힘이 없는 광섬유에서, 광섬유 단면 모든 지점에서의 모드 전계는 같은 위상 속도를 가지고 광섬유 축에 평행하게 진행한다[11]. 따라서 일정한 위상면은 광섬유 축에 직교하게 된다. 하지만, 광섬유가 Fig. 2와 같이 일정한 반경을 가지고 굽어진다면, 전계와 위상면은 일정한 각속도를 가지고 굽힘 곡률 중심에 대하여 회전하게 된다. 그 결과로, 광섬유 축에 평행한 위상속도는 곡률 중심 C로부터의 거리와 함께 선형적으로 증가하여야 한다. 광섬유는 균일한 클래딩으로 이루어졌고 위상속도는 빛의 속도보다 클 수 없기 때문에, 위상속도가 일정하게 유지될 수 없는 굽힘 면에서의 어떤 반경, R_{rad} 가 존재하게 된다. 그리고 이 영역에서의 전계는 Fig. 2에서처럼 방사되어야 한다. 코어 내에 근처의 전계는 모드로서 정확하게 표현된다. 광섬유내의 파워는 광섬유 굽힘에 의하여 광섬유 외부로 방사되기 때문에, z축을 진행하면서 감소하게 된다.

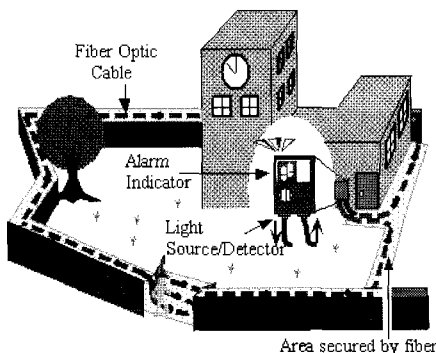


Fig. 1 Fiber optic ROTDR sensor installed in an infrastructure

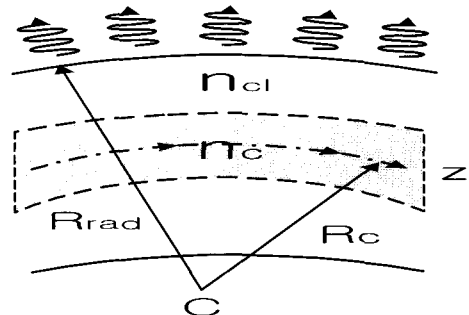


Fig. 2 The light loss of an optical fiber due to bending

2.2. 광섬유 RODTR 센서

2.2.1. 레일레이 후방산란의 원리

후방 산란된 레일레이 신호는 다음과 같은 수식으로 표현이 가능하다. 광섬유를 따라 진행하는 빛은 거리가 멀어짐에 따라 감쇠 효과로 인하여 지수함수적으로 광출력이 줄어들게 된다. 거리에 따른 입사광과 투과광 사이의 광출력 전송 관계는 다음과 같다[12].

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

여기서, P_0 는 입사광의 광출력, P_z 는 투과광의 광출력, z 는 거리, α 는 감쇠계수(km^{-1})이다. 시스템 손실은 대부분 dB단위로 계산하기 때문에 감쇠계수 역시 dB로 환산하는 것이 편리하다.

$$P(z) = P_0 \cdot 10^{-\frac{\alpha_{\text{dB}}}{10} z} \quad (2)$$

$$\alpha_{\text{dB}} = \frac{10}{\ln 10} \cdot \alpha \approx 4.34\alpha \quad (3)$$

문제를 간단히 하기 위하여, 통상적으로 흡수계수 α_a 와 산란계수 α_s 가 조합된 전체 감쇠계수 α 를 사용한다.

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_s \quad (4)$$

감쇠계수는 다음과 같은 제약을 갖는다.

$$0 \leq \alpha_a \ll \alpha_s$$

다음은 산란에 중점을 두고 시간 주기 τ 를 갖는 광섬유 내의 레이저 펄스 광에 대해 고려해 보면, 펄스 광이 진행하면서 펄스광은 광섬유 길이 W 를 진행하는 동안 산란하게 된다.

$$W = \tau \cdot v_{gr} = \tau \frac{c}{n_{gr}} \quad (5)$$

여기서 v_{gr} 는 군속도, c 는 진공에서의 빛의 속도, n_{gr} 는 유리의 굴절률이다. 미소구간 dz 내에서 위치 z 에서의 산란광출력 dp_s 는 펄스광출력 $P(z)$ 에

비례한다.

$$dp_s = k \cdot P(z) dz \quad (6)$$

여기서, $k = S \cdot \alpha_s$ 이다.

$$\alpha_s = \text{scattering coefficient} \sim \frac{1}{\lambda^4} \quad (7)$$

위에서 S 는 광섬유 내에서 모든 방향으로 산란된 빛 중 광섬유 코어로 계속 진행하는 것 중 후방으로 전파되는 부분으로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$S = \left(\frac{NA}{n_0} \right)^2 \frac{1}{m} \quad (8)$$

여기서 NA 는 광섬유의 개구수, n_0 는 광섬유 코어의 굴절률, m 은 굴절률 분포에 따른 값 (일반적인 단일모드 광섬유의 m 값 : 4.55)이다. 후방산란 응답은 구형 펄스에 의하여 설명된다. 펄스의 리딩 에지가 위치 $L = T \cdot v_{gr}$ 에 존재한다고 가정하자. 정확히 이 거리에서 후방 산란된 빛은 OTDR 단자에 $t = 2T$ (왕복 전파하기 때문)에 도달하게 될 것이다. $t = T + \tau/2$ 시간에 트레일링 에지는 거리 $L - W/2$ 점을 지나게 된다. 이 위치에서 산란된 빛은 시작점으로 되돌아가기 위해서는 $t = T - \tau/2$ 의 시간을 필요로 한다. 이 빛이 진행한 시간 $t = 2T$ 이 된다. 짧은 간격 ΔW 에 대해서 고려해보자. 이것은 $t = T + \Delta t$ 에서 펄스의 리딩 에지의 $2\Delta z$ 후방에 해당한다. 이 부분으로부터 후방으로 진행하는 빛은 $t = T - \Delta t$ 시간 후에 즉 전체 경과시간 $t = 2T$ 가 되면 OTDR 단자에 도달하게 된다. 위 내용을 정리하면 시간 $t = 2T$ 에 OTDR에 도착한 빛은 위치 $z = L - W/2$ 에서 $z = L$ 사이에서 후방 산란된 빛이 합한 형태가 된다. 전체 펄스 중에서 미세 구간 dz 로부터 후방 산란된 광을 합하고 여기에 감쇠 계수를 부여하면 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} P_s(L) &= \int_0^W S \cdot \alpha_s \cdot P_0 \exp\left(-2\alpha\left(L + \frac{z}{2}\right)\right) dz \\ &= S \cdot \frac{\alpha_s}{\alpha} \cdot P_0 e^{-2\alpha L} (1 - e^{-\alpha W}) \quad L \geq \frac{W}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

2.2.2. 광섬유 ROTDR 센서의 구성

Fig. 3은 광섬유 ROTDR 센서의 전체 구성도를 보여준다. 그림에서 광섬유 ROTDR 센서시스템은 크게 펄스신호 발생부, 레이저 다이오드 구동부, 광원부, 광검출부 그리고 신호처리부이다. 펄스발생부는 ROTDR에서 신호를 발생하여 산란신호를 측정하는 광원을 변조하도록 전기신호를 발생한다. 레이저 다이오드 구동부는 전류를 변조하여 신호를 레이저 다이오드에 제공하여 광전력의 변조된 신호를 만든다. 광검출부는 광검출기를 사용하여 산란된 신호를 검출해 낸다. 마지막으로 DAQ보드를 이용하여 광검출기에서 검출된 신호를 받아들여 처리할 수 있는 소프트웨어로 전체 ROTDR 센서가 구성되어 있다.

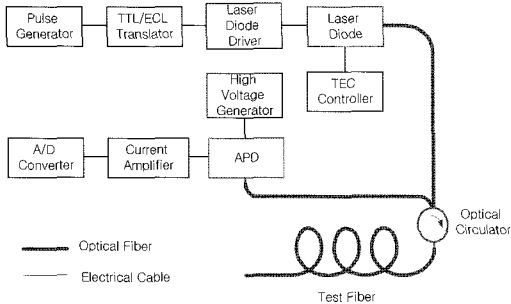


Fig. 3 Configuration of fiber optic ROTDR sensor

또한 Fig. 4에서는 광섬유 ROTDR 센서의 침입자 발생에 따른 ROTDR 신호 변화에 대한 개념도를 보여준다. 그림에서 신호는 크게 두 가지로 나뉜다. 하나는 기준신호(Reference signal) 다른 하나는 실제신호(Signal A, B, C)이다. 우선 침입자 발생 시 그림에서와 같이 위치변화에 따라서 발생된 신호는 그림의 가로축에 대하여 좌우로 변하므로 즉, 실제 신호 A와 B는 위치에 따른 신호의 변화를 보이고 있다. 또한 무게에 따라 발생된 신호는 기준신호와 실제신호의 차로 알 수 있는데 그림에서처럼 세로축에 대하여 상하로 변하므로 기준신호에 대하여 실제신호 B와 C가 따라 변화함을 알 수 있다. 따라서 침입자의 위치와 무게정도를 추출하기 위하여 기준신호와 실제 신호의 차이를 구하여 사용하게 된다. 이 신호는 Fig. 5(a)의 신호와 같다.

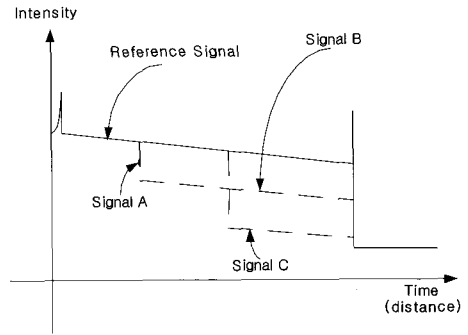


Fig. 4 Signal variation of fiber optic ROTDR sensor according to intrusion effects

2.2.3. 침입탐지 신호처리

광섬유 ROTDR 센서시스템의 측정신호로부터 침입자탐지 신호를 찾아내기 위하여 측정신호처리 시스템을 구성하였다. 측정신호는 잡음감소를 위하여 평균화처리를 하였고 침입자탐지 신호를 보다 명확히 구별해 내기 위하여 필터 처리를 하였다. 신호 처리 평균화 횟수를 30회를 실시하여 3초 이내로

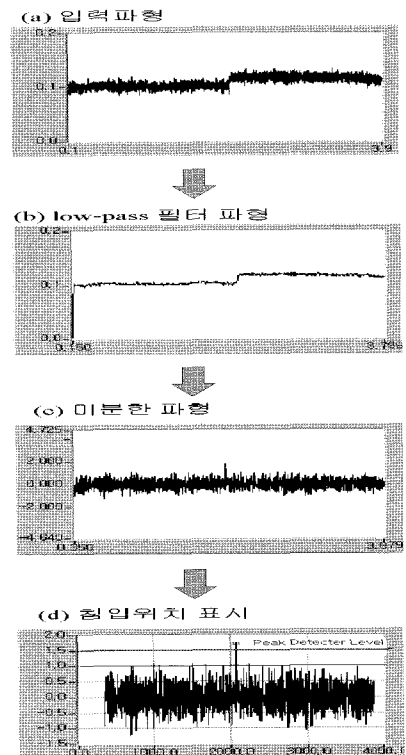


Fig. 5 Signal processing procedure

신호처리가 진행되도록 하였다. 침입감시용 광섬유 ROTDR 센서시스템의 신호처리 흐름도는 Fig. 5와 같다. Fig. 5(a)의 입력 파형은 평균화 처리를 하여서 잡음을 많이 감소시켰지만 여전히 많은 잡음을 가지고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 5(b)는 버터워스 필터를 통해 저역통과시킨 파형을 나타내었다. Fig. 5(a)에 비하여 잡음이 현저하게 감소한 것을 볼 수 있고, 중앙부에 침입자로 인한 신호레벨의 변화가 있는 것을 선명하게 볼 수 있다. Fig. 5(c)는 신호레벨의 변화를 보다 선명하게 보기 위하여 미분처리를 하였다. 침입자 발생시 침입자 발생 위치에서 침입자의 무게와 비례하는 신호 값이 위로 올라온다. Fig. 5(d)에서는 침입탐지 신호의 발생 위치와 값을 정확히 구할 수 있다.

3. 실험방법 및 결과

3.1. 침입자탐지 실험구성

침입자탐지용 광섬유 ROTDR 센서시스템의 성능의 가장 중요한 점은 광섬유의 매설방법의 고안이다. Fig. 6은 모래 속에서 광섬유를 매설한 센서의 실험 구성도를 보여준다.

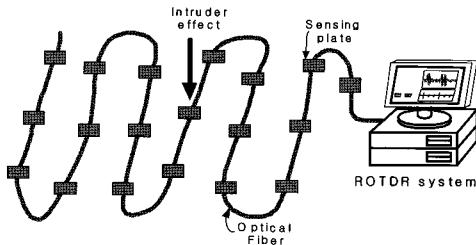


Fig. 6 Experimental setup for intrusion detection using optical fiber buried in sand

침입탐지용 광섬유 ROTDR 센서는 펄스 폭이 30 ns 이고, 10 km이상의 길이에 대하여 신호의 구분이 용이하도록 설계되었다. Fig. 7에서는 광섬유 ROTDR 센서의 길이에 따른 신호의 특성을 보여준다. 센서의 성능 실험을 위해 센서의 위치별 위치 탐지오차 및 무게 등급별 판별능력으로 20 kgf, 40 kgf, 60 kgf 등의 3가지 경우에 대하여 판별능력 실험을 하였다.

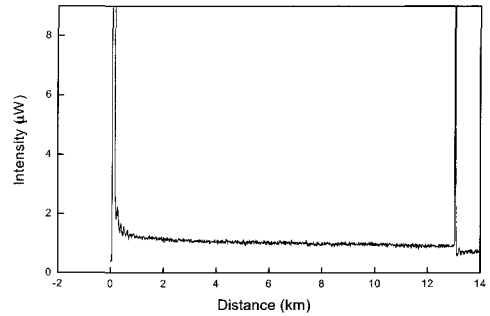
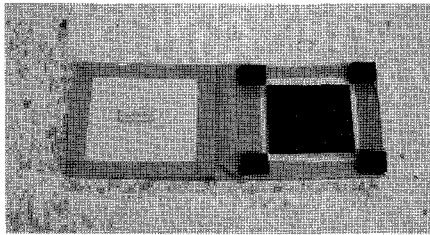


Fig. 7 Scattering signal of optical fiber acquired from the constructed fiber optic ROTDR sensor

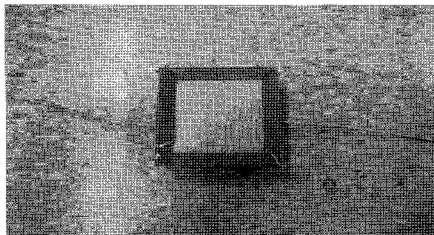
3.2. 침입탐지판의 제작

광섬유 ROTDR 센서의 특성상 가장 중요한 부분은 침입 탐지판의 제작이다. 침입 탐지판은 첫째로 광섬유센서를 보호하기 위한 가장 중요한 기능과 실내 및 실외와 같은 여러 환경 하에서도 외부 침입자에 의한 침입감시 기능을 할 수 있도록 설계되었다. 침입탐지판은 일정 두께를 가지는 나무 바닥판을 이용하였다. 전체크기가 14cm×14cm인 크기로 침입 탐지판을 결정하였다. 우선 침입 탐지판은 두 개의 판으로 나누는데 한쪽 판은 광섬유가 고정되어질 바닥 면과 위쪽에서 광섬유를 눌러 변형시키기 위하여 힘을 주는 덮개면 두 부분으로 제작하였다. 침입 탐지판을 두면 모두 매설시 주변환경(자갈, 모래, 흙), 습기 등에 대비하여 가장자리 부분을 테이프로 보호하였으며, 광섬유 센서가 없혀질 바닥 면에는 광섬유에 변형을 주기 위하여 곡선블럭을 이용하여 약 2 cm정도의 길이로 잘라 바닥 면에 고정하고 그 위에 광섬유 센서를 고정하였다. 또한 덮개면은 외부 침입에 의해 침입자로부터 받는 외력을 감안하여 센서로 일정한 힘이 전달되기 위하여 바닥 면과 최대한 평행하고 또한 전체 침입 탐지판에 골고루 신호가 전달되도록 하였다. 또한 침입 탐지판에 외력이 주어지고, 침입신호가 측정되고 난 후 센서의 기능이 초기상태로 복원되기 위하여 덮개면에 스프링, 고무판 등을 이용하여 덮개면의 원상태 유지 특성을 조사하였다. 그 결과 덮개면의 가장자리에 신축성 있는 고무조각을 이용하여 고정시켰을 때 빠르게 신호복원이 됨을 확인하였다. 침입 탐지판의 최종 완성품을 Fig. 8에서 보

여준다. 광섬유 ROTDR 센서를 모래 속에 매설하여 광섬유 센서를 설치하였다. 제작된 탐지판 사이로 광섬유 센서가 지나가도록 고정하고 모래 속에 약 5 cm에 묻어서 외부 침입자가 광섬유 센서를 밟았을 때 광섬유 센서에 굽힘이 생겨 위험신호가 발생하도록 하였다.



(a) Sensing plate without optical fiber

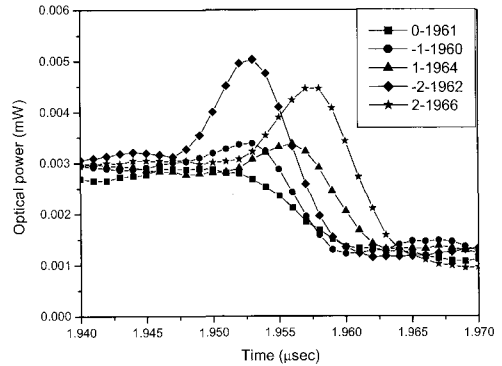


(b) Sensing plate with optical fiber

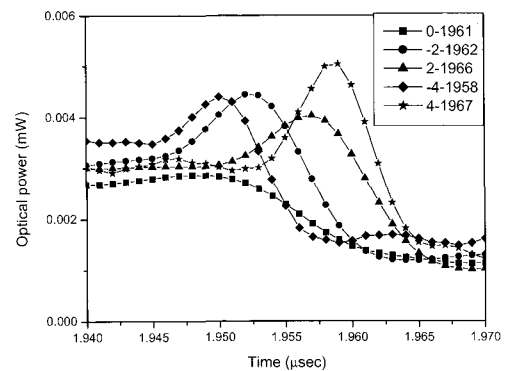
Fig. 8 Manufactured sensing plate for embedding in sand

3.3. 침입자탐지 실험

본 실험에서 광섬유 ROTDR 센서를 구현하고, 센서의 성능을 검토하기 위하여 광신호의 사전 조건 설정과 모래 속에 센서를 매설한 후, 광섬유 ROTDR 센서에 의한 침입탐지 실험을 하였다. 위치별 조건 판별은 광섬유 센서의 한 지점을 기준으로 하여 기준 점을 중심으로 좌우 1m 간격을 두고 모두 5m의 간격 내에 광섬유 센서에 변화를 주어 광섬유 센서의 위치별 탐지오차를 조사하였다. 전체 광섬유 센서의 위치별 신호를 Fig. 9에서 보여준다. 그림에서 기준 점을 중심으로 Fig. 9(a)에서는 1m 간격을 가지고 광섬유 센서에 힘을 가했을 때 발생한 신호를 보여주며, Fig. 9(b)에서는 기준 점을 중심으로 2m 간격을 가지고 광섬유 센서에 힘을 가했을 때 발생한 신호를 보여준다. (a)와 (b) 두 경우 모두 위치 검출 오차는 각각 3 m이었다.



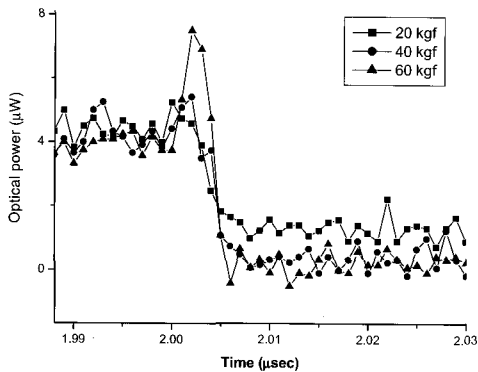
(a) Sensor output at 1 m interval



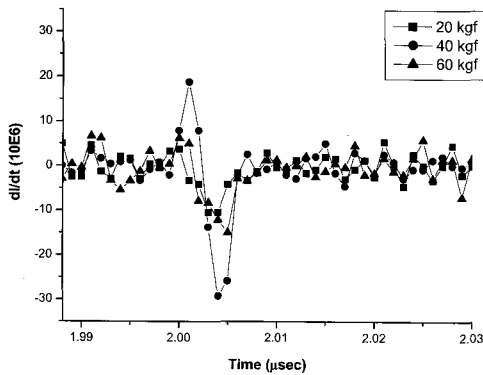
(b) Sensor output at 2 m interval

Fig. 9 Scattering signals due to intrusion location interval

또한 무게 등급별 탐지 실험은 제작된 침입 탐지판 위에 무게 변화를 20 kgf, 40 kgf, 60 kgf 등 3개 등급으로 구분하여 무게 등급별 광섬유 센서의 신호를 조사하였다. 이 결과 20 kgf이하에서는 신호의 변화 분이 크지 않았으며, 40 kgf의 무게에서는 중간정도의 신호 변화를 보였으며, 60 kgf이상의 신호에서는 큰 신호의 변화를 알 수 있었다. 무게등급별 광섬유 센서의 신호 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 10(a)는 평균화 처리를 하여 얻은 무게별 센서의 발생신호이고 10(b)는 신호레벨의 크기를 선명하게 보기 위하여 미분처리를 하였다. Fig. 4에서 설명한 것과 같이 Fig. 10(b)에서는 실제신호(real signal)의 변화량에 대한 원 신호를 미분 처리한 신호를 보여주고 있다. 특히, 20 kgf, 40 kgf, 60 kgf의 세 단계로 무게등급별 신호의 변화량은 명확하게 구분됨을 알 수 있다.



(a) Scattering signals



(b) Differential data of scattering signals

Fig. 10 Sensor output according to the applied weight 20 kgf, 40 kgf and 60 kgf

4. 결론

광섬유 ROTDR 기술을 이용하여 주요 보안 및 침입자 감지 대상체인 사회기반시설물에 침투하는 침입자를 수 m의 분해능과 원거리 영역(12 km)까지 탐지가능한 매설형 광섬유 ROTDR 센서의 개발에 관하여 기초특성 실험을 수행하였고, 단위 길이 당 넓은 면적을 감지 할 수 있는 매설형 광섬유 탐지판을 설계 및 제작하고, 침입 물체의 인가된 하중에 따라 신호특성을 고찰하였다. 광섬유 ROTDR 센서는 파장 $1.55 \mu\text{m}$, 거리범위 12 km, 펄스폭 30 ns 으로 하여 신호처리 평균화 횟수를 30회 실시하고 3초 이내로 신호처리가 진행되도록 하였다. 위치 검출 오차는 3 m로 확인하였고, 무게는 3등급

을 구분할 수 있도록 센서 신호가 각각의 경우에 큰 신호의 변화를 보였다. 이러한 결과를 바탕으로 장거리에 걸쳐 사회기반시설물에 대한 침입자 감지가 가능하여 사회기반 시설물의 안전관리를 위한 모니터링 시스템으로 적용이 가능하다.

후 기

본 논문은 과학기술부 민군겸용기술개발사업의 “침입/구조안전 감시용 광섬유 산란형 센서시스템 개발” 과제 연구로 수행되었음을 밝히며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] 홍창선, 권일범, "광섬유를 이용한 스마트 구조물의 안전진단기술" 대한기계학회지, Vol. 37, No. 6, pp. 42-46, (1997)
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] Duwayne R. Anderson, Florian G. Bell, "Optical Time-Domain Reflectometry," 1st edition pp. 1-10, Tektronix Inc., Wilsonville, Oregon (1997)
- [5] I. J. Bush, Carol A. Davis, Pepe G. Davis, Allen Cekorich and Fred P. McNair, "Buried fiber intrusion detection sensor with minimal false alarm rates," Proc. SPIE, Vol. 3489, pp. 30-40, (1998)
- [6] Erlend Ronnekleiv and Kjell Blotekjar, "Distributed fiber sensor for location of disturbances," 9th Optical Fiber Sensors Conference, (1993)
- [7] Makarov Aleksej, Vesin Jean-Marc, and Reymond Florian, "Intrusion detection robust to slow and abrupt lighting changes," Proc. SPIE, Vol. 2661, pp. 44-54, (1996)

- [8] Park Jaehee, Lee Wanku, and Henry F. Taylor, "Fiber optic intrusion sensor with the configuration of an optical time-domain reflectometer using coherent interference of Rayleigh backscattering," *Proc. SPIE*, Vol. 3555, pp. 49-56, (1998)
- [9] 박재희, 김명규, 손병기, "매설형 광섬유침입자 센서," *센서학회지*, 제5권, 제6호, pp. 1-6, (1996)
- [10] H. Guttinger, G. Pfister, "Fiber optic sensors and technology in security systems," 1st International Conf. On Optical Fiber Sensors pp. 62-66, (1983)
- [11] Allan W. Snyder and John D. Love, "Optical Waveguide Theory," 1st edition, pp. 474-486, Chapman and Hall, New york (1983)
- [12] Dennis Derickson, "Fiber optic test and measurement," Hewlett-Packard Professional books, pp. 449-453, (1998)