

광섬유 산란형 센서를 이용한 사회기반시설물의 보안에 관한 연구

A Study on the Security of Infrastructure using Fiber Optic Scattering Sensors

권일범*[†], 윤동진*, 이승석*

Il-Bum Kwon*[†], Dong-Jin Yoon* and Seung-Seok Lee*

초 록 광섬유 ROTDR (Rayleigh optical time domain reflectometry) 센서와 보다 긴 광섬유를 감지광섬유로 사용할 수 있는 광섬유 BOTDA (Brillouin optical time domain analysis) 센서를 구성하고, 이들 각각을 이용하여 중요 보안 대상체인 사회기반시설물에 침투하는 침입자를 탐지할 수 있는 기초 연구를 수행하였다. ROTDR 센서의 감지 부로는 넓은 면적을 감지할 수 있는 매설형 광섬유 센서 탐지판을 제작하고, 인가된 침입물체의 위치와 무게에 따른 신호특성을 고찰하였다. ROTDR 센서는 펄스 폭이 30 ns이고, 광섬유의 길이는 10 km 이상이다. 위치탐지오차는 약 2 m 이내였으며, 무게에 따른 탐지능력은 20 kgf, 40 kgf, 60 kgf, 80 kgf의 네 단계를 구분할 수 있음을 알 수 있었다. 넓은 지역에 걸친 침입자의 침투를 감지하기 위하여 수십 km의 광섬유 길이 전체를 감지부로 사용할 수 있는 광섬유 BOTDA 센서를 개발하였다. BOTDA 센서는 한 개의 레이저 다이오드와 두 개의 광전 변조기(electro-optic modulator)를 사용하여 간단하게 구성하였다. 침입자에 의한 광섬유의 변형을 변화를 탐지하는 실험을 수행하기 위하여 광학테이블 위에 광섬유에 변형률을 인가하기 위한 실험 장치를 설치하여 실험을 수행하였다. 이 실험으로부터 시간간격 1.5 초동안 광섬유 약 4.81 km의 길이를 거리분해능 3 m로 침입자를 탐지할 수 있음을 확인하였다.

주요용어: 사회기반시설물, 침입탐지, 매설형 탐지판, 광섬유 ROTDR 센서, 광섬유 BOTDA 센서

Abstract We have studied the detection techniques, which can determine the location and the weight of an intruder into infrastructure, by using fiber-optic ROTDR (Rayleigh optical time domain reflectometry) sensor and fiber-optic BOTDA (Brillouin Optical time domain analysis) sensor, which can use an optical fiber longer than that of ROTDR sensor. Fiber-optic sensing plates of ROTDR sensor, which are buried in sand, were prepared to respond the intruder effects. The signal of ROTDR was analyzed to confirm the detection performance. The constructed ROTDR could be used up to 10 km at the pulse width of 30 ns. The location error was less than 2 m and the weight could be detected as 4 grades, such as 20 kgf, 40 kgf, 60 kgf and 80 kgf. Also, fiber optic BOTDA sensor was developed to be able to detect intrusion effect through an optical fiber of tens of kilometers longer than ROTDR sensor. Fiber-optic BOTDA sensor was constructed with 1 laser diode and 2 electro-optic modulators. The intrusion detection experiment was performed by the strain inducing set-up installed on an optical table to simulate an intrusion effect. In the result of this experiment, the intrusion effect was well detected as the distance resolution of 3 m through the fiber length of about 4.81 km during 1.5 seconds.

Keywords: infrastructure, intrusion detection, buried sensing plates, fiber-optic ROTDR Sensor, fiber-optic BOTDA sensor

1. 서론

광섬유와 반도체 레이저를 이용한 광섬유 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 [1-5]. 광 흡수가 없는 영역에서 빛이 지나는 경로에 위치한 분자들은 빛에 의해 전자밀도의 변화가 유도되어 분자 자신이 광원으로 작용하여 빛을 방사 또는 산란을 일으킨다. 이때 방사 또는 산란되는 빛의 파장이 변하지 않으면 빛의 산란이 탄성적(elastic)이라고 하는데 레일리 산란(Rayleigh scattering)이 이에 해당하고, 이와 달리 산란현상에 의해 분자나 입자 사이에 에너지교환을 줄 경우 비탄성적(Inelastic)이라고 하는데 라만 산란(Raman scattering)과 브릴루앙 산란(Brillouin scattering)이 이에 해당한다. 1976년 Barnoski와 Jensen이 광섬유의 레일리 후방 산란(Rayleigh back scattering)을 시간영역에서 해석함으로써 비파괴적으로 광섬유의 손실을 측정할 수 있는 방법을 발명하였다[6]. 영국의 광섬유 센서 회사인 York사의 Dakin은 광섬유의 Rayleigh 산란에 의한 OTDR(optical time domain reflectometry) 기법을 이용하여 침입탐지에 응용할 수 있음을 제시하였다[7]. 한편 광섬유의 유도 브릴루앙 산란(stimulated Brillouin scattering)을 이용하는 유도 브릴루앙 산란 광섬유 센서는 단일모드 광섬유에 펄스 광원과 CW 프로브 광원을 각각 광섬유의 양단에서 입사시켜 두광원 사이에서 발생하는 유도 브릴루앙 증폭에 의한 후방 산란광을 취득하여 외란을 탐지하는 센서이다[8-10]. 이 방법은 CW 프로브 광의 주파수를 펄스 광의 주파수에 대해 광섬유 고유의 브릴루앙 주파수 천이(Brillouin frequency shift)만큼 어긋나게 함으로써 펄스 광에 의한 브릴루앙 산란 신호가 CW 프로브 신호를 유도 증폭시키는 것이다[11]. 이러한 광섬유의 산란을 이용한 분포형 센서는 Table 1에서와 같이 ROTDR은 광섬유의 휘어짐이나 끊어짐에 의한 광 손실을 측정하기 때문에 장거리 측정에는 불리하다. 그러나 BOTDA는 광섬유 내부에서 후방 산란되는 빛의 주파수 변화를 보게 되므로 장거리 측정이 가능하다.

따라서 본 논문에서는 중요 보안 대상인 사회기반시설물에 침투하는 침입자탐지 분야에 있어서 고감도 및 넓은 영역에서 탐지할 수 있는 ROTDR 센서와 광섬유 사용 길이를 수 십 킬로미터에서 수 백 킬로미터까지 사용할 수 있는 BOTDA 센서에 대한 기초 연구를 수행한다. Fig. 1에서는 사회기반시설물의 주위에 설치된 광섬유 센서의 개념도를 보여준다. ROTDR 센서는 넓은 면적을 감지할 수 있는 매설형 광섬유 감지부를 설계 제작하고, 인가된 침입물체의 위치와 무게에 따른 신호특성을 고찰한다. 한편 광역의 침입자 탐지를 위한 광섬유의 브릴루앙 산란 특성을 이용하는 광섬유 BOTDA 센서는 침입탐지를 모사할 수 있는 실험 장치에 의하여 광섬유에 변형을 가한 후 개발된 센서의 침입탐지 성능을 검토한다.

Table 1 Comparison of fiber optic ROTDR and BOTDA sensors

Item	ROTDR	BOTDA
Principle	Rayleigh scattering	Brillouin scattering
Measurement parameter	Light loss	Light intensity change due to frequency change

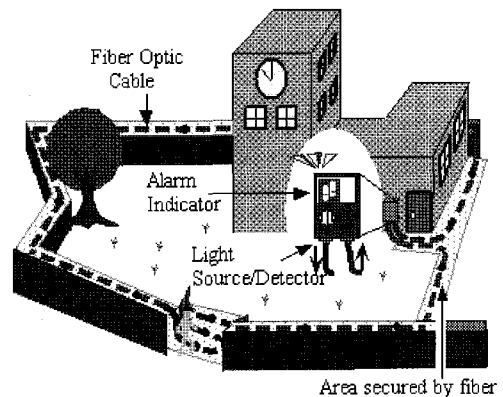


Fig. 1 Fiber optic sensor installed on an infrastructure

2. 센서의 측정원리

2.1. 광섬유 ROTDR 센서의 원리 및 구성

광섬유 ROTDR 센서는 광섬유에 입사된 펄스광이 광섬유 내부를 진행하면서 만들어내는 후방산란

광을 시간 영역에서 취득하여 펄스광이 광섬유의 임의의 위치에서의 산란광의 크기 변화를 알아내어 외부로부터 작용하는 영향을 알아내도록 작동된다. Fig. 2는 광섬유 ROTDR 센서의 전체 구성도를 보여준다. 그림에서 광섬유 ROTDR 센서시스템은 크게 펄스신호 발생부, 레이저 다이오드 구동부, 광원부, 광검출부 그리고 신호처리부이다. 펄스 발생부는 ROTDR에서 신호를 발생하여 산란신호를 측정하는 광원을 변조하도록 전기신호를 발생한다. 레이저 다이오드 구동부는 전류를 변조하여 신호를 레이저 다이오드에 제공하여 광전력의 변조된 신호를 만든다. 광수신부는 광검출기(APD, Avalanche Photo-diode)를 사용하여 산란된 신호를 검출해 낸다. 마지막으로 DAQ보드를 이용하여 광검출기에서 검출된 신호를 받아들여 처리할 수 있는 소프트웨어로 전체 ROTDR 센서가 구성되어 있다.

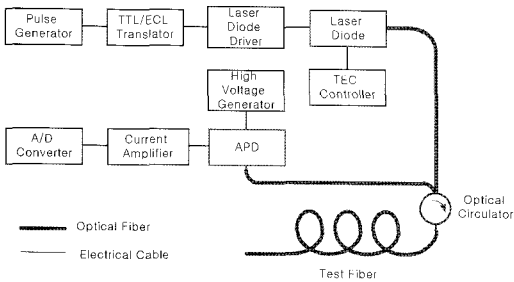


Fig. 2 Configuration of fiber optic ROTDR sensor

또한 Fig. 3에서는 광섬유 ROTDR 센서의 침입자 발생에 따른 ROTDR 신호 변화에 대한 개념도를 보여준다. 그림에서 신호는 크게 두 가지로 나뉜다. 하나는 기준신호(Reference signal)이고, 다른 하나는 실제신호(Signal A, B, C)중의 하나이다. 우선 침입자 발생 시 그림에서와 같이 위치변화에 따라서 발생된 신호는 그림의 가로축에 대하여 좌우로 변하므로 즉, 실제신호 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. 이와 같은 신호처리 과정의 신호 특징은 Fig. 4에 나타내었다.

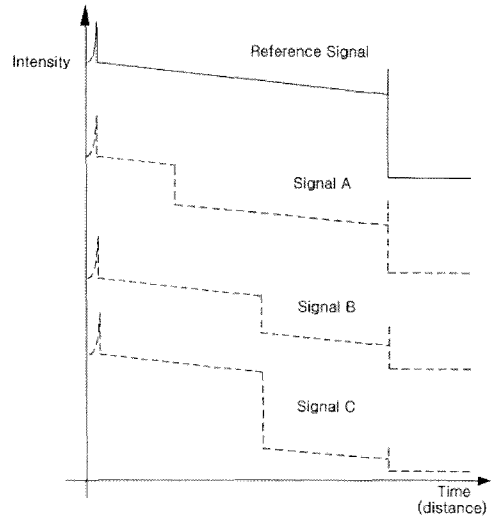
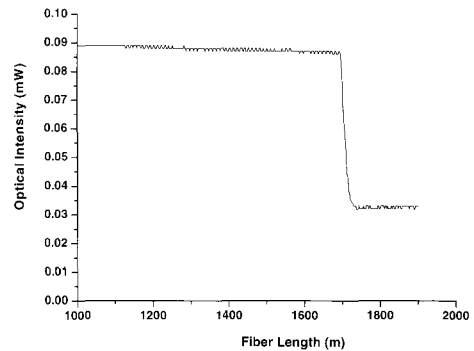
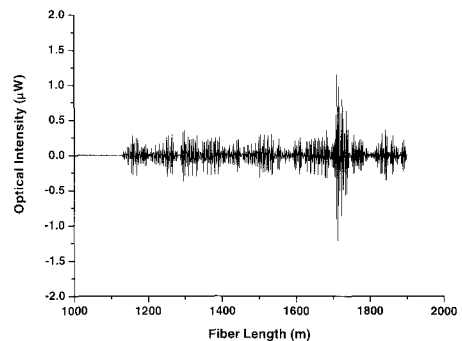


Fig. 3 Signal variation of fiber optic ROTDR sensor according to intrusion effects



(a) Waveform of sensor output signal



(b) Differential waveform of sensor output signal

Fig. 4 Signal processing of sensor output signal

광섬유 RODTR 센서시스템의 측정신호로부터 침입자탐지 신호를 찾아내기 위하여 측정신호처리 시스템을 구성하였다. 측정신호는 잡음감소를 위하여 평균화처리를 하며, 침입자 탐지 신호를 보다 명확히 구별해 내기 위하여 필터 처리를 하게 된다. 신호처리 평균화 횟수를 30회를 실시하여 3초 이내로 신호처리가 진행되도록 하였다. Fig. 4(a)의 센서 출력 신호 파형은 평균화 처리를 하고 저역 통과 필터를 사용하여 잡음을 많이 감소시킨 신호를 보이고 있다. Fig. 4(a)에서 광섬유 길이 약 1700여 미터 부근에서 광강도가 급격히 감소하는 부분이 바로 침입자로 인한 신호레벨의 변화이다. Fig. 4(b)는 침입자 위치 및 무게 정보를 찾아내기 위하여 미분처리를 한 이후의 신호의 특징을 보이고 있다. 침입자 발생시 침입자 발생 위치에서 센서 출력 신호가 크게 변화하므로 그 미분 신호는 해당 위치를 명확하게 지적할 수 있게 된다. 또한 미분 신호 레벨은 침입자의 무게와 비례하는 신호값을 보이고 있었다. 이러한 미분 신호의 레벨이 침입자의 무게와 비례하는 것은 Fig. 11(b)를 설명할 때 자세하게 다룬다.

2.2. 광섬유 BOTDA 센서의 원리 및 구성

광섬유의 브릴루앙 산란은 광이 물질 중에 생긴 음파와 상호 작용하여 입사광의 주파수와 다른 주파수로 산란하는 현상으로 이 주파수의 차를 브릴루앙 주파수 천이라고 하며 이 주파수는 광섬유의 재료에 크게 의존할 뿐 아니라 광섬유에 인가되는 변형률과 주위온도에 따라라도 변화한다. Fig. 5와 같이 피측정 광섬유의 양단에서 펌핑 펄스 광과 CW 프로브 광을 배치하여 광섬유에 광을 입사시킬 때, 펌핑 펄스 광의 광주파수를 ν_p , CW 프로브 광의 광주파수를 ν_{cw} 라 하면 두 광원의 주파수차는 $\Delta\nu = \nu_p - \nu_{cw}$ 가 된다. 두 광원의 광주파수차 $\Delta\nu$ 를 피측정 광섬유의 브릴루앙 주파수 시프트 ν_b 와 일치하도록 광원의 광주파수를 조정하면 펌핑 펄스 광은 유도 브릴루앙 산란에 의해 CW 프로브 광으로 광에너지 변환을 하며, 이에 따라 CW 프로브 광은 피측정 광섬유 내에서 브릴루앙 광증폭을 하게 된다. 이렇게 함으로써 브릴루앙 신호의 해석이 용이하게 된다. 증폭된 CW 프로브 광신호는 광검출기에 의해서 전기신호로 변환되며 이 전기신호는

두 광원의 주파수 차 및 시간에 따라서 Fig. 6과 같은 특성을 갖는다. Fig. 6은 일반적인 단일모드 광섬유에 대하여 펌핑 펄스 광의 펄스폭은 30 ns에 대하여 이론적인 수식에 의하여 얻어진 브릴루앙 스펙트럼 그래프이다. 펌핑 펄스 광과 CW 프로브 광사이의 주파수차 $\Delta\nu = \nu_b$ 일 때 수신 신호는 최대가 되므로 Fig. 6에서 주파수 축에서 최대 출력을 얻는 곳이 브릴루앙 고유 주파수 천이를 가질 때의 신호출력임을 보이고 있다.

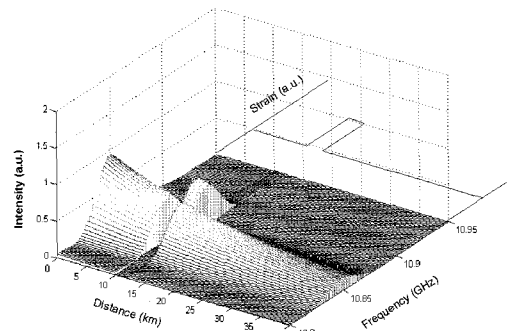


Fig. 5 Relation between strain and Brillouin frequency shift

Fig. 5와 같이 구성된 광섬유 BOTDA 센서는 광원부와 광검출부 및 광 변조부로 이루어진다. 이와 같이 구성된 브릴루앙 센서를 펌핑 광을 펄스 변조하지 않고 연속 광으로 광섬유에 입사하는 상태에서 CW 프로브 광의 주파수만을 스윕하면서 신호 취득을 하게 되면 Fig. 6과 같은 브릴루앙 이득 스펙트럼을 얻게 된다. 이 그림으로부터 광섬유의 브릴루앙 고유 주파수 천이값이 약 10.823 GHz임을 알 수 있었다. 또한 스펙트럼의 대역폭을 FWHM (full width at half maximum)으로 측정할 결과 약 13.4 MHz임을 알 수 있었다. 일반적인 BOTDA 센서의 작동은 CW 프로브 광의 주파수를 스윕하면서 펌핑 펄스광을 광섬유에 입사하면서 후방 산란광 신호를 보면 Fig. 7과 같은 그래프를 얻게 된다. 여기서 10 km 근방에서 침입자의 효과와 같은 변형률이 광섬유에 주어질 광강도가 최대가 되는 주파수가 변화되었음을 볼 수 있다. 따라서, 침입탐지를 위한 광섬유 BOTDA 센서시스템의 작동은 펌핑 펄스 광을 발생시키면서, CW 프로브 광의 주파수를 브릴루앙 고유 주파수 10.823 GHz로 고정시킨 후 후방 산란광 신호를 펌핑 펄스광

을 트리거소스로 하여 고속 A/D 변환기로 취득하여 평균화 처리하면 구하고자 하는 후방 산란광 신호를 Fig. 8과 같은 유형으로 얻게 된다. 이 신호에서 임의의 일부 구간에 침입자가 있는 경우로 신호의 일부가 감소된 구간이 외부 침입자에 의한 영향이 나타난 것이다.

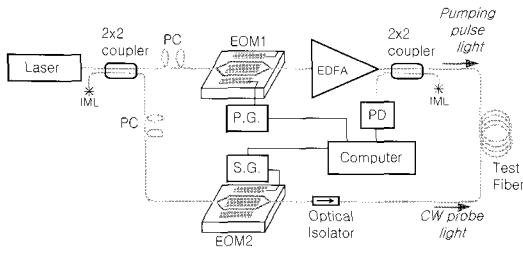


Fig. 6 Construction of fiber optic BOTDA sensor

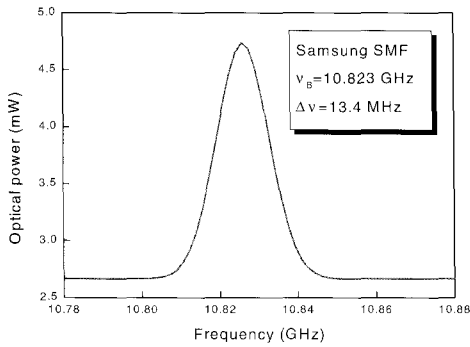


Fig. 7 Brillouin gain spectrum of single mode optical fiber

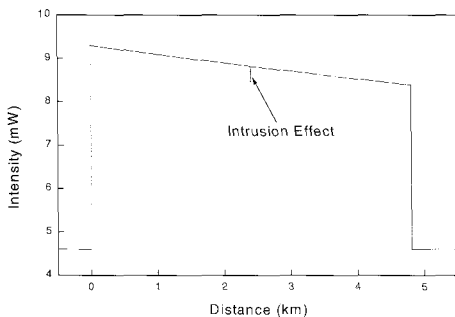


Fig. 8 Change of fiber optic signal according to intrusion effect

3. 실험방법 및 결과

3.1. 광섬유 ROTDR 센서에 의한 침입자탐지 실험

침입자탐지용 광섬유 ROTDR 센서시스템의 성능의 가장 중요한 점은 광섬유의 매설방법의 고안이다. Fig. 9는 모래 속에서 광섬유를 매설한 센서의 실험 구성도를 보여준다.

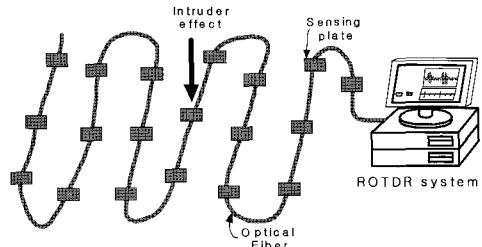
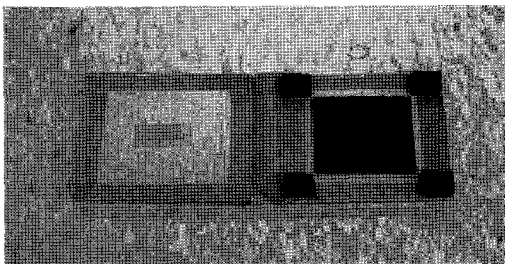


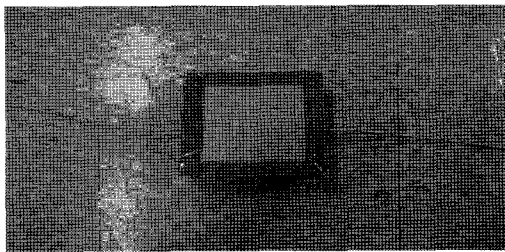
Fig. 9 Experimental setup for intrusion detection using optical fiber buried in sand

침입 탐지판은 첫째로 광섬유센서를 보호하기 위한 가장 중요한 기능과 실내 및 실외와 같은 여러 환경 하에서도 외부 침입자에 의한 침입감지 기능을 할 수 있도록 설계되었다. 침입탐지판은 일정 두께를 가지는 나무 바닥판을 이용하였다. 전체크기가 14 cm × 14 cm인 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 cm 정도의 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 탐지 판의 최종 완성품을 Fig. 10에 보였다. 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

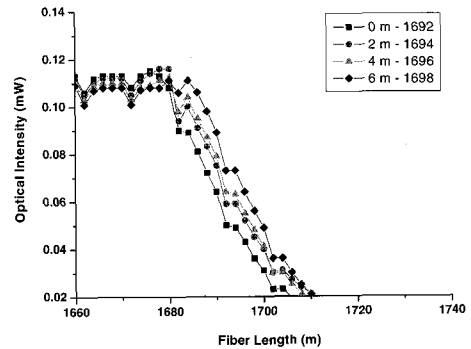


(b) Sensing plate with optical fiber

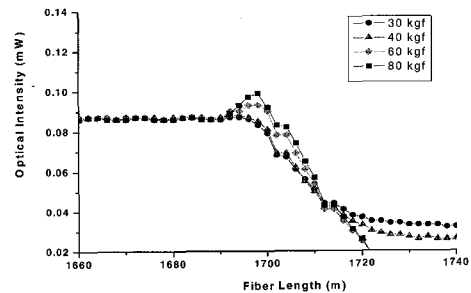
Fig. 10 Manufactured sensing plate for embedding in sand

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. 광섬유 ROTDR 센서는 펄스 폭이 30 ns로 하여 10 km 이상의 길이에 대하여 신호의 구분이 용이하도록 작동하였다. Fig. 11에서는 광섬유 ROTDR 센서에 침입자의 위치가 변했을 때 그 위치 변화와 무게 등급을 잘 구분하는 것을 확인하기 위하여 센서 신호를 보였다. 침입자 위치 변화에 따른 실험은 감지 광섬유 1692 m 지점을 기준으로 하여 2 m 간격을 두고 신호의 변화를 고찰하도록 하였다. 센서 신호 출력이 급격히 감소하는 위치가 광섬유 길이 축에서 보면 약 2 m 간격을 두고 차이가 있음을 볼 수 있다. 따라서 ROTDR 센서 시스템은 미분 신호로부터 각각의 침입자의 위치를 정확하게 검출할 수 있

었다. 또한 Fig. 11(b)는 침입자의 무게를 모사하기 위하여 20 kgf의 추와 30 kgf 추를 사용하여 무게 변화를 30, 40, 60, 80 kgf로 변화시키면서 탐지판 위에 두어 그 영향에 따른 출력 신호를 고찰한 것이다. 물론 이 경우에도 센서 최종 신호의 출력 레벨은 무게 등급을 잘 구분할 수 있었다. 이 그림에서 약 1700 m 부근에 작용하는 침입자의 무게 변화 영향에 따라 센서 신호의 변화 기울기가 거의 비례하여 변화함을 볼 수 있다.



(a) Scattering signals with respect to location of intruders



(b) Scattering signals with respect to weights of intruders

Fig. 11 Scattering light signals due to location and weights of intruders

또한 무게 등급별 탐지 실험을 여러번 수행하여 센서의 최종 신호인 미분 신호의 레벨을 측정하여 오차정도를 확인하는 실험을 수행하였다. 그림 12에는 각각의 무게 등급을 30, 40, 60, 80 kgf를 여러번 인가하는 경우 신호 레벨의 변화를 정리하여 보이고 있다. 그림으로부터 무게 등급 판별을 위한 레벨 설정에 따라 오차가 발생할 수 있음을 볼 수 있다. 그러나 40 kgf와 80 kgf의 무게는 오차없이 구분할 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 30 kgf 이

하와 60 kgf이상의 경우도 무게 등급 판별 오차가 없이 잘 구분할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 본 침입자 탐지용으로 사용할 때 필요한 작은 동물과 인간 침입자를 구분하는데 유용하게 사용할 수 있음을 볼 수 있다.

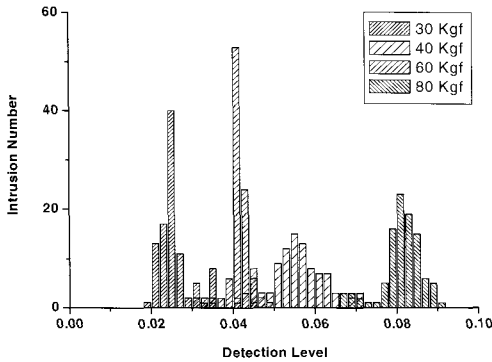


Fig. 12 Detection characteristics of the ROTDR sensor system with respect to weight levels

3.2. 광섬유 BOTDA 센서에 의한 침입자탐지 실험

광섬유 BOTDA 센서에 의하여 침입탐지 실험을 수행하기 위하여 Fig. 13과 같이 광학테이블 위에 침입자의 효과를 주기 위하여 광섬유에 인장 변형을 가할 수 있도록 이송장치를 설치하였다. 광섬유의 전체길이는 약 4.8 km로 하였으며 펄핑 펄스 광으로부터 약 2.4 km 근처에 약 10 m 구간에 걸쳐 침입자에 의한 광섬유의 변형이 발생하는 부분으로 실험할 수 있도록 준비하였다. 외부 침입자에 의한 광섬유의 변형을 발생시키기 위하여 Fig. 13과 같은 이송장치를 설치하여 광섬유를 신장시키도록 구성하여 약 100 마이크론의 변형률이 작용하도록 이송장치를 작동시킨 후 고정시켰다.

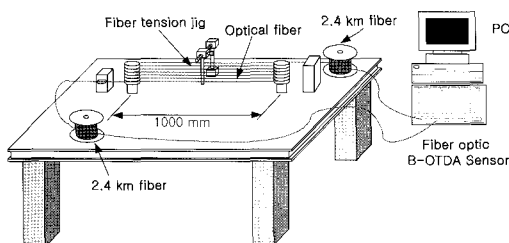


Fig. 13 Experimental setup for inducing strain on optical fiber by intrusion

광섬유 BOTDA 센서의 펄핑 펄스광은 펄스폭이 각각 30 ns와 50 ns를 구현하여 실험을 수행하였다. 펄스광 강도는 약 720 mW정도의 펄스 광을 사용하였다. 침입감시 모의 실험으로부터 광섬유 BOTDA 센서의 최종출력 신호를 얻어서 Fig. 14에 나타내었다. 침입자에 의한 변형량은 광섬유 길이 10 m 구간에 약 100 마이크론의 변형률이 작용하도록 이송장치를 고정시켰다. 그 후 CW 프로브 광은 브릴루앙 고유 주파수 천이값인 10.823 GHz로 번조하면서, 펄핑 펄스광의 폭은 광섬유의 거리분해능이 각각 3 m와 5 m에 해당하는 30, 50 ns의 두 경우에 대하여 실험하였다. 또한 평균화 처리에 따른 신호 특성을 고찰하기 위하여 200회, 2000회의 평균화 처리 신호를 Fig. 14에 보였다. 평균화 처리 시간은 200회의 경우 약 1.5초 정도 소요되고, 2000회 평균화하는 경우 약 13초의 시간이 소요된다. 평균화 처리를 200회 수행하면서 광섬유의 거리분해능 3 m에 해당하는 30 ns의 펄스폭을 갖는 펄핑 펄스 광을 사용한 경우의 신호는 신호의 신호대 잡음비가 좋지 않음을 Fig. 14 (a)에서 볼 수 있으나 침입자에 의한 신호 검출에는 문제가 없음을 알 수 있다. 또한 평균화 처리를 200회 수행하고 50 ns의 펄스광을 사용한 경우의 신호인 Fig. 14 (b)에서는 오히려 신호대 잡음비가 향상되어 침입자에 의한 신호 검출이 30 ns 펄스를 사용하는 경우보다 용이함을 알 수 있다. 한편 평균화 처리를 2000회 수행한 경우의 신호는 Fig. 14 (c)와 (d)에 보였다. 이 경우에 출력 신호가 광섬유 거리에 대하여 선형성을 보이고 신호대 잡음비가 많이 개선되어 있음을 볼 수 있다. 또한 Fig. 14 (c)와 (d)의 확대한 작은 그래프에서 알 수 있듯이 침입자에 의한 신호 영역을 매우 정확하게 검출하고 있음을 알 수 있다. 디지털 데이터 취득은 50 MHz의 속도로 하고 있으므로 확대한 작은 그래프의 점 한 개 사이의 거리는 2 m의 거리를 의미한다. 따라서 Fig. 14 (d)의 확대 그래프를 보면 변형률이 인가된 광섬유 10 m에 대한 신호 감소를 뚜렷하게 보이고 있다. 또한 Fig. 14 (a)만을 제외하고는 침입자에 의한 변형이 가해진 거리 10 m에 해당하는 모두 5개의 유효한 데이터 점들을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러므로 본 센서시스템의 거리분해능은 펄핑 펄스광의 폭 30 ns인 점을 고려하면 3 m 이하임을 확인할 수 있다. 특히 50 ns의 펄스폭을 사용한 경우 더욱 거리 분해능 측면에서 오히려 유리한 결과를 가져왔다. 이러한 결과는 30 ns의

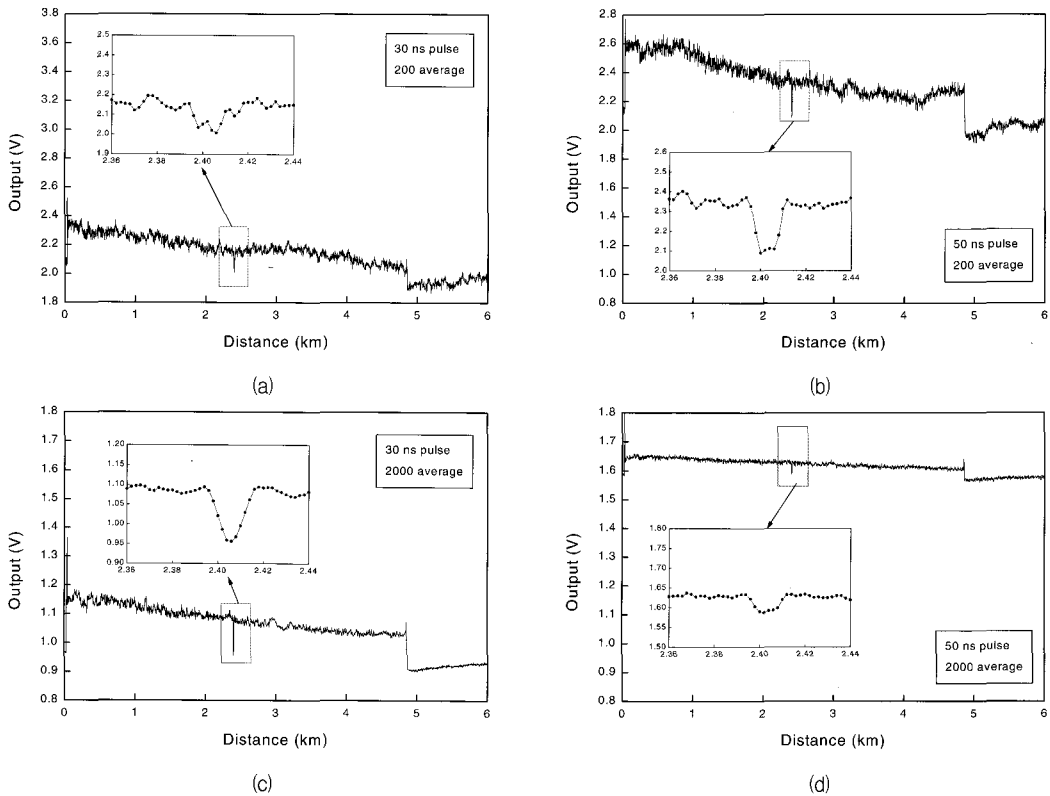


Fig. 14 Signal characteristics of fiber optic BOTDA sensor

펄스보다 50 ns의 펄스를 사용하는 경우에 신호대 잡음비가 훨씬 우수하여 나타나는 것으로 사려된다. 만약 충분한 평균화처리를 수행하면 30 ns의 펄스를 사용한 경우가 거리 분해능이 더욱 좋을 것으로 사려된다. 본 논문에서는 단지 광섬유 BOTDA 센서에 의한 침입 탐지 가능성만을 제시하고자 하였으나, 향후에는 평균화 처리 횟수 및 펄스폭의 관계에 대하여 더욱 자세한 고찰이 필요할 것으로 사려된다.

4. 결 론

사회기반시설물 보안을 위하여 수 십 킬로미터 영역에서 수 m의 분해능으로 침입자를 탐지하는 광섬유 ROTDR 센서를 구성하고 탐지 실험을 수행하였으며, 또한 보다 광역 탐지를 위하여 수 백 킬로미터의 영역에서 수 m의 분해능으로 침입자를 탐지할 수 있는 광섬유 BOTDA 센서도 구성하여 침입 탐지 기본 특성을 조사하였다. 광섬유 ROTDR 센서는 파장 1.55 μm , 거리범위 12 km, 펄스폭 30 ns 으로

하여 신호처리 평균화 횟수를 30회 실시하고 3초 이내로 신호처리가 진행되도록 하였다. 위치 검출 오차는 2 m임을 확인하였고, 무게는 2 등급을 오차없이 구분할 수 있도록 구성되었음을 확인할 수 있었다. 광섬유 BOTDA 센서는 한개의 레이저 다이오드를 사용하여 구성하였으며, 광섬유 전체길이 약 4.81 km에 대하여 거리분해능 3 m의 성능으로 광섬유 10 m에 작용하는 침입자에 의한 광섬유의 변형률 변화에 대한 위치와 정도를 최소 약 1.5초에 해당하는 200회 평균화 처리에 의하여 탐지할 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 장거리에 걸쳐 사회기반시설물에 대한 침입자 감시가 가능하여 사회기반 시설물의 종합적인 안전관리를 위한 모니터링 시스템으로 적용이 가능하다.

후 기

본 논문은 과학기술부 국가지정연구실사업 과제 연구로 수행되었음을 밝히며 관계자 여러분께 감사드립니다.

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] Erlend Ronnekleiv and Kjell Blotekjar, "Distributed fiber sensor for location of disturbances," 9th Optical Fiber Sensors Conference, (1993)
- [4] Duwayne R. Anderson, Florian G. Bell, "Optical Time-Domain Reflectometry," Tektronix Inc. pp. 1-10, (1997)
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] J. P. Dakin, "Distributed optical fiber sensors," 7th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors, pp. 377-385, (1990)
- [8] 권일범, 유재왕, 김치엽, 최만용, 백세중, "광섬유 유도 브릴루앙 산란형 센서의 구성 및 특성," 광전자학술대회, pp. 507-508, (2000)
- [9] M. Nickles, L. Thevenaz and P. Robert, "Simple distributed fiber sensor based on Brillouin gain spectrum analysis," Optics Letters, Vol. 21. No. 10, pp. 758-760, (1996)
- [10] V. Lecoche, D. J. Webb, C. N. Pannel, and D. A. Jackson, "Brillouin Based Distributed Fibre Sensor Incorporating a Mode-locked Brillouin Fibre Ring Laser," Optics Communications, Vol. 152. pp. 263-268, (1998)
- [11] L. Thevenaz, M. Facchini, A. Fellay and P. Robert, "Monitoring of large structure using distributed Brillouin scattering fiber sensing," OFS-13, pp. 345-348, (1999)
- [12] T. Horiguchi, K. Shimizu, T. Kurashima, M. Tateta, and Y. Koyamada, "Development of a Distributed Sensing Technique Using Brillouin Scattering," Journal of Lightwave Technology, Vol. 13. No. 7, pp. 1296-1302, (1995)