

침입탐지를 위한 광섬유 BOTDA 센서의 개발

권일범*, 김치엽*, 최만용*, 유재왕**

Development of Fiber Optic BOTDA Sensor for Intrusion Detection

Il-Bum Kwon*, Chi-Yeop Kim*, Man-Yong Choi*, Jae-Wang Yu**

요 약

넓은 지역에 걸친 침입자의 침투를 감지하기 위하여 수십 km의 광섬유 길이 전체를 감지부로 사용할 수 있는 광섬유 BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis) 센서를 개발하였다. 광섬유 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 실험장치를 설치하여 실험을 수행하였다. 이 실험으로부터 시간간격 1.5 초동안 광섬유 약 4.81 km의 길이를 거리분해능 3 m로 침입자를 탐지할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

Fiber optic BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis) sensor was developed to be able to detect intrusion effect through several ten kilometer optical fiber. 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 simulating 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.

1. 서 론

시설물 등의 주변을 보호하기 위한 침입자를 탐지하는 센서로는 IR 광센서, 매설된 자기센서, 누설 동축케이블 센서 등이 폭넓게 사용되고 있다^[1]. IR 광센서는 과다한 비나 먼지 등에 의하여 성능이 저하될 뿐만 아니라 감시 라인을 항상 직선으로만 설치해야하는 단점을 갖고 있다. 한편

자기센서와 누설 동축 케이블 센서는 극도의 열악한 전자기 간섭이 있는 환경에서는 사용이 불가능하다. 따라서 광섬유 센서시스템이 시설물 등의 주변의 침입자 탐지를 위하여 개발되어졌다. 그 중에 하나는 광섬유를 시설물 등의 보호하고자 하는 주변에 설치하여 침입자가 침입하고자 할 때는 광섬유를 절단하지 않고는 침입이 불가능하게 하여 광섬유를 절단하게되면 빛의 손실을 감지하는 광섬유 센서이다^[2]. 또 다른 것으로는 시설물 등의 주변에 설치된 다중모드 광섬유가 침입자에 의하여 굽힘을 받으면 광섬유 내부를 진행하는 빛의 편광 방향이 변화되어 그 영향을 감지하는 센서이다^[3]. 그러나 다중모드 광섬유 편광 센서는 편광이 유효한 감지거리가 수 미터로 짧은 단점을 갖고 있다. 광섬유의 내부를 진행하는 다중모드의 간섭에 의한 스펙클 패턴 (speckle pattern)을 이용하는 침입자 탐지 연구는 간섭을

* 한국표준과학연구원 산업측정표준부
(Korea Research Institute of Standards and Science, Division of Industrial Metrology)

** 광주과학기술원 정보통신공학과
<접수일자 : 2001년 2월 28일>

이용하므로 감지도가 매우 높으나 감지가능 거리가 수 백 미터 이내로 한정된다^[45]. 또한 광섬유 사나к 간섭 센서를 이용한 침입자 탐지 연구가 많이 진행되었으나 이 방법 또한 감지 가능 거리가 수 백 미터 이내이다. 따라서 이러한 침입탐지를 위한 광섬유 센서의 탐지 가능거리를 수십 킬로미터로 길게 하기 위하여 광섬유의 산란현상(scattering phenomena)을 이용하는 센서를 사용하게 되었다.

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)이라 하고 이와 달리 산란현상에 의해 분자나 입자 사이에 에너지교환을 줄 경우 비탄성적(Inelastic)이라고 하며, 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]. 그러나 이 센서는 광섬유의 레일리 산란에 의한 후방 산란 광을 측정하므로 임의의 침입자에 의한 외란이 큰 경우 그 후방의 침입여부는 확인이 불가능한 단점을 갖고 있다. 이러한 단점을 극복할 수 있는 센서가 광섬유의 유도 브릴루앙 산란(stimulated Brillouin scattering)을 이용하는 센서이다. 유도 브릴루앙 산란 광섬유 센서는 단일모드 광섬유에 펄핑 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 펄핑 펄스 광의 주파수에 대해 광섬유 고유의 브릴루앙 주파수 천이(Brillouin frequency shift)만큼 어긋나게 함으로써 펄핑 펄스 광에 의한 브릴루앙 산란 신호가 CW 프로브 신호를 유도 증폭시키는 것이다^[11]. 이렇게 함으로써 높은 브릴루앙 신호를 얻는 것이 가능하다. 특히 스위스의 Luc 교수는 광전변조기 1개를 사

용한 광섬유 BOTDA 센서를 개발하여 분포 변형률 및 온도 측정에 적용하는 연구를 수행하고 있지만 이 센서의 신호처리 시간은 보통 30분 이상이 소요되어 침입탐지용으로 사용하는 것은 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 침입탐지를 위한 감지 가능 거리를 수 백미터 이상으로 할 수 있는 광역의 침입자 탐지를 위한 광섬유의 브릴루앙 산란 특성을 이용하는 광섬유 BOTDA 센서를 구성하고, 침입탐지를 모사할 수 있는 실험 장치에 의하여 광섬유에 변형을 가한 후 개발된 센서의 침입탐지 성능을 검토하였다.

2. 작동 원리

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 따라서도 변화한다. Fig. 1과 같이 피측정 광섬유의 양단에서 펄핑 펄스 광과 CW 프로브 광을 배치하여 광섬유에 광을 입사시킬 때, 펄핑 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 펄핑 펄스 광은 유도 브릴루앙 산란에 의해 CW 프로브 광으로 광에너지 변환을 하며, 이에 따라 CW 프로브 광은 피측정 광섬유 내에서 브릴루앙 광증폭을 하게된다. 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. 2와 같은 특성을 갖는다. Fig. 2는 일반적인 단일모드 광섬유에 대하여 펄핑 펄스 광의 펄스폭은 30 ns에 대하여 이론적인 수식에 의하여 얻어진 그래프이다. 펄핑 펄스 광과 CW 프로브 광사이의 주파수차 $\Delta\nu = \nu_b$ 일 때 수신 신호는 최대가 되므로 Fig. 2에서 주파수 축에서 최대 출력을 얻는 곳이 브릴루앙 고유 주파수 천이를 가질 때의 신

호출력임을 보이고 있다.

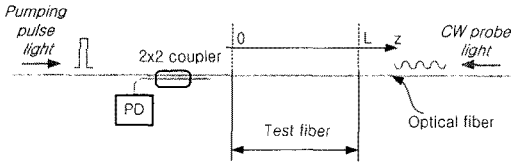


그림 1. 광섬유 BOTDA 센서의 개념도.

Fig. 1. Schematic diagram of fiber optic BOTDA sensor.

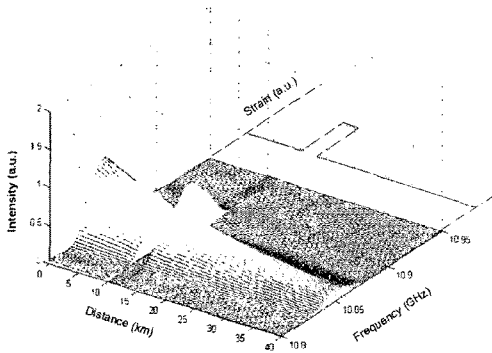


그림 2. 브릴루앙 주파수 천이와 변형률의 관계.

Fig. 2. Relation between strain and Brillouin frequency shift.

광섬유에 작용하는 변형률에 따른 브릴루앙 주파수 시프트 ν_b 의 변화는 다음의 수식으로 표현이 가능하다^[12].

$$\nu_b(\epsilon) = \nu_b(0) (1 + C\epsilon) \quad (1)$$

$\nu_b(0)$: 변형률이 없을 경우의 브릴루앙 주파수 시프트

C : 브릴루앙 주파수 시프트의 변형률 계수

광통신용으로 많이 사용되는 석영계 단일모드 광섬유에 1.3 μm 의 파장을 갖는 입력광원을 사용할 때 변형률이 없으면 주파수 천이는 12-13 GHz 영역의 값을 가지며, 1.5 μm 의 입력광원에 대해서는 주파수 천이가 약 10-11 GHz 영역의 값을 가진다. 이러한 광섬유의 브릴루앙 주파수 천이는 변형률과 온도의 변화에 따른 주파수의 변화가 각각 5 MHz/0.01%, 1 MHz/1K로 알려져 있다.

이와 같은 광섬유의 브릴루앙 산란에 의한 주파수 천이로부터 변형률을 구하고자 할 때는 위와 같은 식 1을 사용하면 된다. 그러나 침입자 감시를 위한 광섬유 브릴루앙 산란형 센서의 구성을 위해서는 광섬유의 브릴루앙 고유 주파수를 구하여 그 주파수를 고정시켜 놓은 상태에서 산란 신호의 변화를 보는 것이 검출시간을 절약하는 효과를 가져올 것이다. 이러한 브릴루앙 산란 신호의 시간축 즉 광섬유 길이에 따른 변화를 관찰하기 위한 신호특성은 다음 장에서 설명한다.

3. 광섬유 BOTDA 센서의 수신신호의 특성

광섬유 BOTDA 센서의 시간축 상의 출력신호는 다음과 같이 정리할 수 있다^[6]. 펌핑 펄스광이 그림 1과 같이 광섬유의 +Z 방향으로 전파하고 있다고 가정하면 광섬유 안의 $Z=z$ 위치에서의 펄스 광 에너지는 $E_p(Z)\delta(Z-z)$ 로 표현이 가능한데 여기서 $\delta(Z)$ 는 델타 함수이다. CW 프로브 광 에너지는 광섬유 안의 $Z=z$ 에서 $P_{cw}(z)$ 로 표현하고 -Z 방향으로 전파하는 것으로 가정한다. 그러면 영역 $[z, z+dz]$ 안의 펌핑 펄스 광과 브릴루앙 상호 작용을 하는 CW 프로브 광 에너지는 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} dE_{cw}(z, z+dz) &= P_{cw}(z) \exp(-\alpha_{cw}z)dt + (g/A)E_p(z)P_{cw}(z) \exp(-\alpha_{cw}z)dz \quad (2) \\ &= P_{cw}(L) \exp(-\alpha_{cw}L)dt + (g/A)E_p(L)P_{cw}(L) \exp(-\alpha_{cw}L)dz \end{aligned}$$

여기서 g 는 브릴루앙 이득 상수[m/W]이고, A 는 광섬유의 유효 단면적[m²]이며, α_{cw} 는 CW 광파장에서의 광섬유의 손실계수이며, L 은 광섬유의 전체길이[m]이다. 광 에너지 $dE_{cw}(z, z+dz)$ 가 $Z=0$ 에 도달하는 시간 간격 dt 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} dt &= (1/\nu_p + 1/\nu_{cw})dz \\ &= 2dz/\nu \quad (3) \end{aligned}$$

여기서 ν_p 와 ν_{cw} 는 광섬유 안을 진행하는 펄스 펄스 광과 CW 프로브 광의 속도이다. 평균 속도는 식 3에서와 같이 정의된다. 실제로, $\nu_b \ll \nu$ 이므로 $\nu_p = \nu_{cw} = \nu$ 로 가정할 수 있다. 시간이 아래와 같을 때에

$$t = 2z/\nu \quad (4)$$

펄스 광이 입사되는 지점 즉 $Z=0$ 에서 검출되는 CW 프로브 광 에너지는 다음으로 주어진다.

$$P_d(z) = dE_{cw}/dt = P_{cw}(L) \exp(-\alpha_{cw}L) + (g/A)E_p(z)P_{cw}(L) \exp(-\alpha_{cw}L)\nu/2 \quad (5)$$

자연적인 브릴루앙 산란 효과를 무시하면, 펄스 펄스 광 에너지는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$dE_p(z)/dz = -[\alpha_p + (g/A)P_{cw}(z)]E_p(z) \quad (6)$$

여기서 $P_{cw}(z)$ 는

$$P_{cw}(z) = P_{cw}(L) \exp[-\alpha_{cw}(L-z)] \quad (7)$$

여기서 α_p 는 펄스 펄스 광의 파장에 대한 광섬유의 손실 계수이다. $E_p(z)$ 는 해석적으로 다음과 같이 얻어진다.

$$E_p(z) = E_p(0) \exp(-\alpha_p z) \exp[-(g/A)P_{cw}(L) \times \exp(-\alpha_{cw}L) \{ \exp(\alpha_{cw}z) - 1 \} / \alpha_{cw}] \quad (8)$$

입사된 펄스 펄스 광이 협소한 폭 W 와 에너지 $P_p(0)$ 를 가진다면, 식 5는 다음 식이 된다.

$$P_d(z) = P_{dc} + P_b(z) \quad (9)$$

여기서 P_{dc} 는

$$P_{dc} = P_{cw}(L) \exp(-\alpha_{cw}L) \quad (10)$$

그리고

$$P_b(z) = (g/A)(\nu W/2)P_{cw}(L) \exp(-\alpha_{cw}L) P_p(0) \exp(-\alpha_p z) \times \exp[-(g/A)P_{cw}(L) \exp(-\alpha_{cw}L) \{ \exp(\alpha_{cw}z) - 1 \} / \alpha_{cw}] \quad (11)$$

여기서, P_{dc} 는 펄스 펄스 광과 상호작용 없이 $z=0$ 에 도착하는 CW 프로브 광의 에너지이다. $P_b(z)$ 는 펄스 펄스 광과 브릴루앙 상호작용하여 변화되는 CW 프로브 광 에너지를 표현한다. 만약 $(g/A)P_{cw}(L) \exp(-\alpha_{cw}L) |1 - \exp(\alpha_{cw}z)| / \alpha_{cw} \ll 1$ 이라면, $P_b(z)$ 는 근사적으로 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$P_b(z) = (g/A)(\nu W/2)P_{cw}(L) \exp(-\alpha_{cw}L) P_p(0) \exp(-\alpha_p z) \quad (12)$$

여기서 브릴루앙 이득 상수 g 는 다음의 잘 알려진 수식으로 표현된다^[7].

$$g = 2\pi n^7 p_{12}^2 \gamma / c \lambda^2 \rho \nu_a \Delta \nu_b \quad (13)$$

여기서 n 은 광섬유의 굴절률이고, p_{12} 는 광섬유의 광탄성 상수이며, c 는 광속이고, λ 는 광원의 파장이며, ρ 는 광섬유의 밀도이고, ν_a 는 음속이며, $\Delta \nu_b$ 는 브릴루앙 이득의 선폭이고, γ 는 편광 계수이다. 브릴루앙 이득 상수를 구하기 위하여 표 1에서와 같은 1550 nm 파장의 광원과 일반적인 단일모드 광섬유에 해당하는 값들을 사용하였다.

광섬유 BOTDA 센서의 최종 수신신호는 본 논문의 실험조건과 유사하게 하여 식 5를 정리한 식 11로 계산 할 수 있으며, 근사식으로는 식 12도 사용할 수 있다. 식 12를 사용하여 펄스 폭 30 ns와 최대 에너지 1341 mW의 펄스 펄스 광과 5.7 mW의 CW 프로브 광을 사용하여 광섬유의

고유 브릴루앙 주파수 천이값을 10.823 GHz로 하여 광섬유 4.810 km의 수신 신호를 계산하여 Fig. 3에 나타내었다. 이 그림에서 침입자의 출현은 광섬유의 2.4 km부터 2.410 km 사이에서 광섬유에 0.01%의 변형률을 유발하는 것으로 가정하면 앞에서 언급한 바와 같이 일반 단일모드 광섬유의 변형률 감지도가 5 MHz/0.01%이므로 브릴루앙 주파수 천이값을 5 MHz 증가된 10.827 GHz로 설정하여 계산하였다. 이와 같은 모사계산에 의하면 수신신호에는 그림 3과 같이 해당 위치에서의 급격한 신호 감소로 나타남을 알 수 있다. 따라서 침입자의 위치와 침입자의 특성을 급격한 신호감소 위치와 정도로부터 판별이 가능하다.

표 1. 브릴루앙 이득 상수 계산에 사용된 파라미터들의 값.

Table 1. Values of parameters used in calculation of Brillouin gain factor.

Parameter	Symbol	Value
Refractive index	n	1.45
Photoelastic constant	p_{12}	0.29
Density	ρ	$2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Acoustic velocity	v_a	$6 \times 10^3 \text{ m/s}$
Brillouin gain bandwidth	$\Delta\nu_b$	13.4 MHz
Polarization factor	γ	0.5

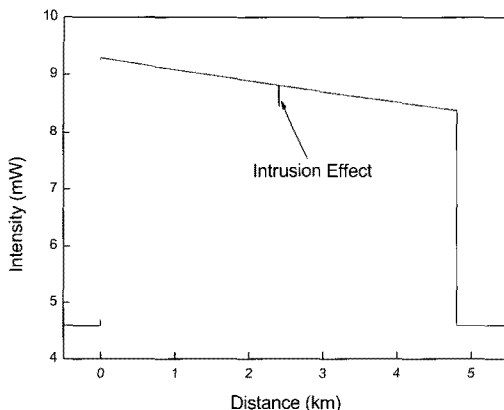


그림 3. 침입자 출현에 따른 광섬유 센서 수신신호의 변화.

Fig. 3. Change of fiber optic signal according to intrusion effect.

4. 센서시스템의 제작

광섬유 BOTDA 센서는 Fig. 4와 같이 광원부와 광검출부 및 광 변조부로 구성된다. 광원부는 최대출력 30 mW의 최대 선폭 5 MHz인 DFB 다이오드 레이저와 최대 출력 18 dBm인 광증폭기로 이루어져 있다. 펄핑 펄스 광은 펄스로 변조하기 위하여 2.5 Gb/sec 변조 가능한 JDS사의 광전 변조기(EOM1: electro-optic modulator 1)를 사용하여 펄스 폭 30 nsec와 50 nsec를 발생시켜 실험하였다. 광섬유 BOTDA 센서의 펄핑 펄스광은 광섬유 내부를 지나면서 반사되어 오는 빛을 측정하므로 펄스폭 30 ns는 광섬유의 길이로는 3 m에 해당하는 거리를 해당하므로, 30 ns 펄스에 의한 실험은 거리 분해능이 3 m임을 의미한다. 한편 CW 프로브 광은 JDS사의 20 Gb/sec까지 변조 가능한 JDS사의 광전변조기 EOM2를 사용하여 약 10 GHz 대역으로 CW 프로브 광을 변조시켰다. 또한 광 검출부는 Newfocus사의 모델 1811을 광수신기로 사용하여 신호를 받아 A/D 변환기를 사용하여 PC로 데이터를 전송하였다. 한편 펄핑 펄스 광 변조를 위한 펄스 제너레이터는 HP사의 모델 81110A를 사용하였으며, CW 프로브 광 변조를 위한 RF 신호 발생기는 HP사의 모델 83752A를 사용하였다. 광섬유 양방향 연계기(fiber optic bidirectional coupler)는 한국단자의 제품(광분할비 50:50)을 사용하였다. 단일모드 광섬유는 삼성전자의 광섬유를 사용하였다. 이와 같이 구성된 브릴루앙 센서를 펄핑 펄스 광 변조를 하지 않은 상태에서 CW 프로브 광의 주파수만을 스위핑하면서 신호 취득을 하게 되면 Fig. 5와 같은 브릴루앙 이득 스펙트럼을 얻게된다. 이 그림으로부터 광섬유의 브릴루앙 고유 주파수 천이값이 약 10.823 GHz임을 알 수 있었다. 또한 스펙트럼의 대역폭을 FWHM(full width at half maximum)으로 측정한 결과 약 13.4 MHz임을 알 수 있었다. 따라서, 침입탐지를 위한 광섬유 BOTDA 센서시스템의 작동은 펄핑 펄스 광을 발생시키면서, CW 프로브 광의 주파수를 브릴루앙 고유 주파수 10.823 GHz로 고정시킨 후 후방산란 신호를 펄핑 펄스광을 트리거소스로 하여 고속 A/D 변환기로 취득하여 평균화 처리하면 구하고자 하는 후방산란 신호를 얻게 된다. 이 신호는 외부의 침입자에 의한 광섬유의 변형률에 따라 위치 및 신호 감소 정도가 변화하게 될 것이다.

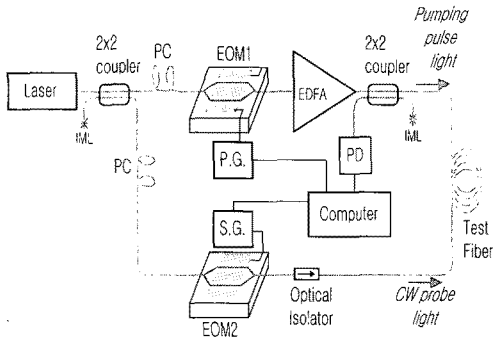


그림 4. 광섬유 BOTDA 센서의 구성.
Fig. 4. Construction of fiber optic BOTDA sensor.

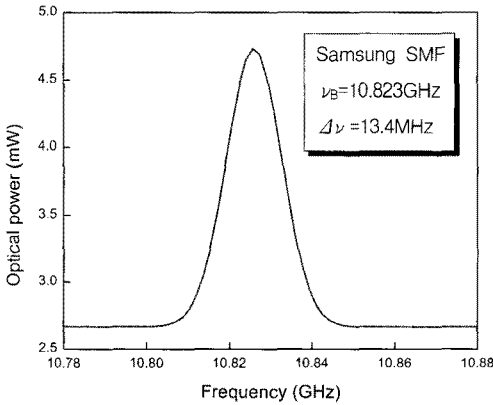


그림 5. 단일모드 광섬유의 브릴루앙 이득 스펙트럼.
Fig. 5. Brillouin gain spectrum of single mode optical fiber.

5. 침입 탐지 실험

광섬유 BOTDA 센서에 의하여 침입탐지 실험을 수행하기 위하여 Fig. 6과 같이 광학테이블위에 침입자의 효과를 주기 위하여 광섬유에 인장 변형을 가할 수 있도록 이송장치를 설치하였다. 광섬유의 전체길이는 약 4.8 km로 하였으며 펌핑 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. 6과 같은 이송장치를 설치하여 광섬유를 신장시키도록 구성하여 약 100 마이크론의 변형률이 작용하도록 이송장치를 작동시킨 후 고정시켰다.

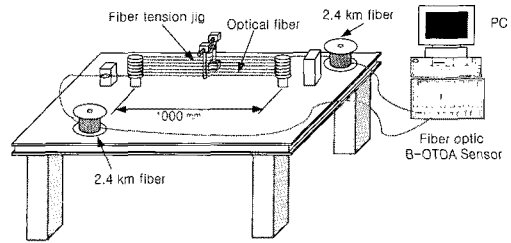
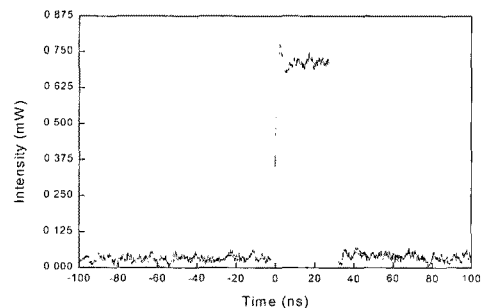


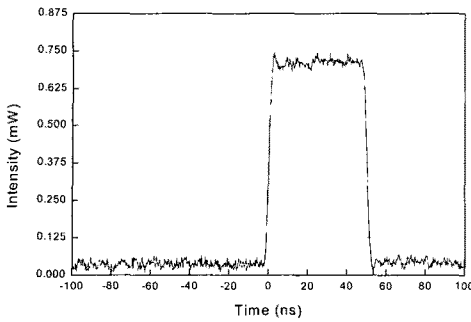
그림 6. 침입자에 의한 광섬유의 변형을 발생 모의 실험 장치.
Fig. 6. Experimental setup for inducing strain on optical fiber by intrusion.

6. 실험 결과의 분석

광섬유 BOTDA 센서의 펌핑 펄스광은 Fig. 7에 보인 것과 같이 펄스폭이 각각 30 ns와 50 ns를 구현하여 실험을 수행하였다. 펄스광의 광강도는 광증폭기 앞에서 측정하여 약 0.72 mW 정도임을 알 수 있다. 그러나 광증폭기의 증폭도가 30 dB이므로 약 720 mW정도의 펄스 광을 얻게된다. 한편 CW 프로브 광은 Fig. 8에 보인 것처럼 광전변조기 EOM2의 바이어스 전압을 조정하지 않으면 Fig. 8 (a)와 같이 10 GHz로 완전히 변조되지 않은 기본 파장인 1555 nm가 출력됨을 볼 수 있다. 그러나, 광전변조기 EOM2의 바이어스 전압을 최적값으로 변조시켰을 때는 Fig. 8 (b)와 같이 기본 파장 대역의 빛은 없고 10 GHz 대역에서 변조된 빛인 1554.90 nm와 1555.10 nm의 변조된 파장의 빛이 크게 출력됨을 볼 수 있다. 이러한 CW 프로브 광원이 제대로 변조될 때에 브릴루앙 산란 신호가 크게 출력되므로 항상 10 GHz 대역에서의 광변조가 유효하게 될 수 있도록 바이어스 전압을 조정해 주는 것이 필요하다.



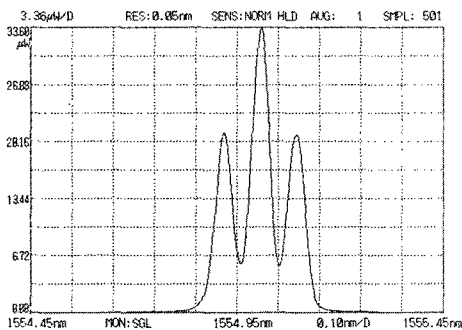
(a) Pulse width = 30 nsec.



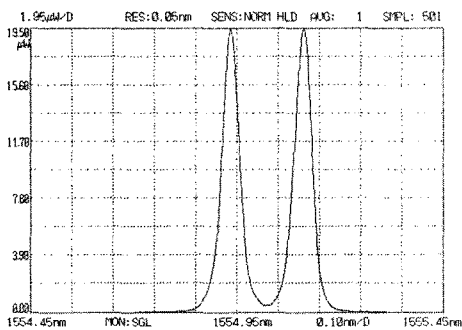
(b) Pulse width = 50 nsec.

그림 7. 펌핑 펄스 광의 형태.

Fig. 7. Waveform of pumping pulse light.



(a) without bias



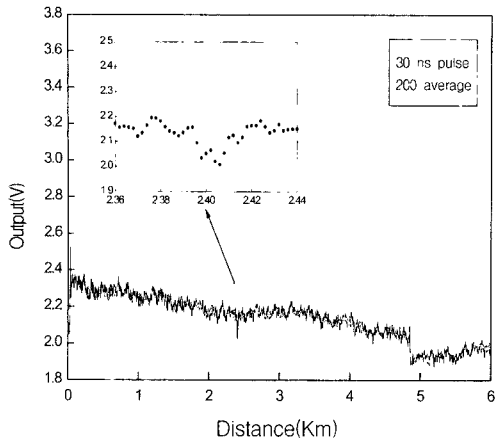
(b) with bias

그림 8. CW 프로브 광의 파장 스펙트럼.

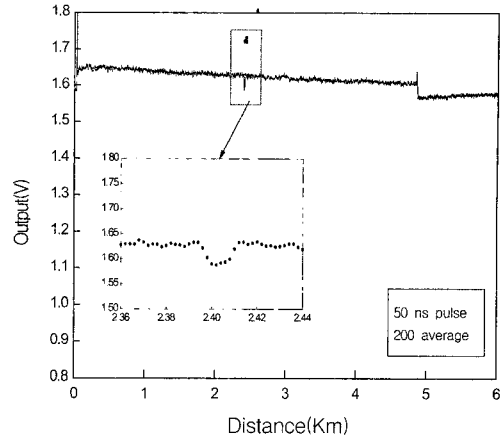
Fig. 8. Wavelength spectrum of CW probe light.

침입감시 모의 실험으로부터 광섬유 BOTDA 센서의 최종출력 신호를 얻어서 Fig. 9에 나타내었다. 침입자에 의한 변형량은 광섬유 길이 10 m 구간에 약 100 마이크로미터의 변형률이 작용하도록 이송장치를 고정시켰다. 그 후 CW 프로브 광은 브릴루앙 고유 주파수 천이값인 10.823 GHz로 변조하면서, 펌핑 펄스광의 폭은 광섬유의 거리

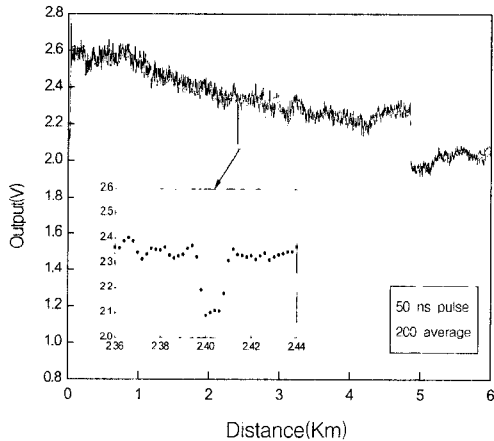
분해능이 각각 3 m와 5 m에 해당하는 30, 50 ns의 두 경우에 대하여 실험하였다. 또한 평균화 처리에 따른 신호 특성을 고찰하기 위하여 200회, 2000회의 평균화 처리 신호를 Fig. 9에 보였다. 평균화 처리 시간은 200회의 경우 약 1.5 초 정도 소요되고, 2000회 평균화하는 경우 약 13초의 시간이 소요된다. 평균화 처리를 200회 수행하면서 광섬유의 거리분해능 3 m에 해당하는 30 ns의 펄스폭을 갖는 펌핑 펄스 광을 사용한 경우의 신호는 신호의 신호대 잡음비가 좋지 않음을 Fig. 9 (a)에서 볼 수 있으나 침입자에 의한 신호 검출에는 문제가 없음을 알 수 있다. 또한 평균화 처리를 200회 수행하고 50 ns의 펄스광을 사용한 경우의 신호인 Fig. 9 (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. 9 (c)와 (d)에 보였다. 이 경우에 출력 신호가 광섬유 거리에 대하여 선형성을 보이고 신호대 잡음비가 많이 개선되어 있음을 볼 수 있다. 또한 Fig. 9 (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. 9 (d)의 확대 그래프를 보면 변형률이 인가된 광섬유 10 m에 대한 신호 감소를 뚜렷하게 보이고 있다. 또한 Fig. 9 (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 펌핑 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 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.



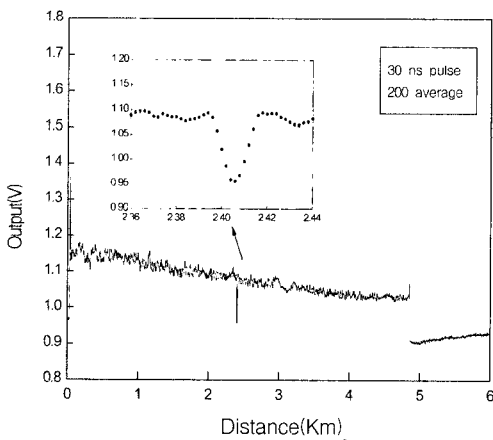
(a)



(d)



(b)



(c)

그림 9. 광섬유 BOTDA 센서의 신호 특성.

Fig. 9. Signal characteristics of fiber optic BOTDA sensor.

7. 결 론

침입탐지용으로 사용하기 위한 광섬유 BOTDA 센서를 개발하기 위하여 단일 레이저 다이오드와 광전변조기 2개를 사용하는 센서 시스템을 구성하고 침입탐지 모의 실험을 수행하였다. 이러한 연구를 통하여 광섬유 전체길이 약 4.81 km에 대하여 거리분해능 3 m의 성능으로 광섬유 10 m에 작용하는 침입자에 의한 광섬유의 변형을 변화에 대한 위치와 정도를 최소 약 1.5 초에 해당하는 200회 평균화 처리에 의하여 탐지할 수 있음을 확인하였다. 향후 광섬유 측정 가능 거리를 증가시키는 것과 평균화처리에 대한 연구를 수행할 필요가 있다.

감사의 글

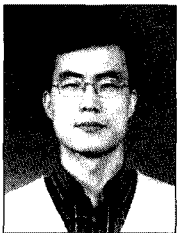
본 연구는 과학기술부에서 주관하는 민간겸용 기술개발사업의 '침입/구조안전 감시용 광섬유 산란형 센서시스템 개발'과제의 일환으로 수행되었음을 밝히며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

[1] C. Y. Leung, I. Chang, and Si-Hsu, "Fiber optic line sensing system for perimeter protection system against intrusion," OFS'86, 1986, pp. 113-116.
 [2] S. Luigi, in Proc. of 1983 International Canahan Conf. on Security Technology," Zurich, Switzerland, Oct. 4-6, 1983, p. 223.
 [3] D. H. Rowe, in Proc. of 1983 Conf. on Crime Countermeasures and Security, Lexington, KY, May 11-13, 1983, p. 9.
 [4] E. Udd, "Sagnac interferometer based secure communication systems," 11th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors, 1996, pp. 594-597.
 [5] E. Ronnekleiv and K. Blotekjar, "Distributed fiber sensor for location of disturbances," 9th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors, 1993.
 [6] M. K. Barnoski and S. M. Jensen, Applied Optics, Vol. 15, No. 9, pp. 2112-2115, Sept. 1976.
 [7] J. P. Dakin, "Distributed optical fiber sensors," 7th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors, 1990, pp. 377-385.

[8] 권일범, 유재왕, 김치엽, 최만용, 백세중, "광섬유 유도 브릴루앙 산란형 센서의 구성 및 특성," 광전자학술대회, 2000, pp. 507-508.
 [9] M. Nickles, L. Thevenaz, P. Robert, "Simple distributed fiber sensor based on Brillouin gain spectrum analysis," Optics Letters, Vol. 21. No. 10, 1996, pp. 758-760.
 [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. 1998, pp. 263-268.
 [11] L. Thevenaz, M. Facchini, A. Fellay, P. Robert, "Monitoring of large structure using distributed Brillouin scattering fiber sensing," OFS-13, 1999, pp. 345-348.
 [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, 1995, pp. 1296-1302.

著 者 紹 介



권 일 범

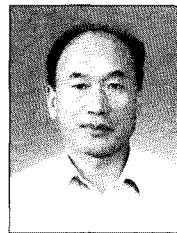
1963년 5월 12일생.
 1987년 한국항공대학교 항공기계공학과 졸업(공학사).
 1989년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사).

1997년 한국과학기술원 항공우주공학과 졸업(공학박사).

1989년~1992년 포항산업과학연구원 강재연구부.

1997~현재 한국표준과학연구원 산업측정표준부 시설안전계측연구센터 선임연구원.

주관심분야 : 광섬유 센서 개발 및 응용, 구조 안전 감시기술, 인공지능 응용



최 만 용

1957년 2월 20일생.
 1979년 한양대학교 정밀기계공학과 졸업(공학사).
 1982년 한양대학교 대학원 계측공학전공(공학석사)

1983년 동경대학 대학원

1985년 한양대학 대학원 계측공학전공(공학박사)

1986년 1월부터 현재까지 한국표준과학연구원 시설안전계측연구센터 책임연구원.

주관심분야 : 계측모델연구, 센서 및 계측기기 설계, 현장계측 기술, 상시감시기술, 센서신뢰성시험기술

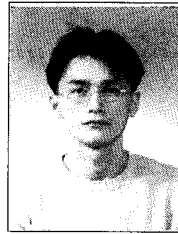


김치엽

1957년 1월 20일생.
1984년 인하대학교 전자공학과 졸업(공학사).
1984년 3월-1986년 6월 금성사 연구소 회로설계연구.

1986년 7월부터 현재까지 한국표준과학연구원 시설안전계측연구센터 선임연구원.

주관심분야: 센서 및 계측기기 설계, 광섬유 센서 개발 및 응용, 현장계측 기술, 상시감시 기술



유재왕

1975년 1월 23일생.
1996년 전북대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사).
1998년 전북대학원 전기공학과 졸업(공학석사).

1998년~현재 광주과학기술원 정보통신공학과 박사과정재학중.

주관심분야: 특수광섬유 제작 및 광섬유 소자 제작