

## 스펙클 패턴을 이용한 반사형 광섬유 센서에 대한 연구

정은주 · 박재희<sup>†</sup>

### A Study of the Reflection Type Optical Fiber Sensor Based on Speckle Detection

Eunju Jung and Jaehee Park<sup>†</sup>

#### Abstract

A reflection type optical fiber line sensor based on the speckle detection has been developed using the optical fiber mirror with the reflectance of 72 %. Some experiments were carried on with the automobile and the 500 m length multimod fiber. When the automobile passed on the fiber sensor, two abrupt changes of the output waveform occurred like the transmission type sensor based on the speckle variations. The signal to noise ratio of this sensor was about 40 dB.

**Key Words :** fiber sensor, speckle pattern

#### 1. 서 론

최근 광섬유를 이용한 많은 종류의 광부품들이 연구 개발되어 왔으며 그 중에서 광섬유 센서에 대한 연구가 활발하게 진행되어지고 있다. 광섬유 센서는 센서 재질인 광섬유가 신호 전송 역할을 겸하고 있어서 종래의 전자 센서에 비해 외부 전기장에 영향을 받지 않고, 원격제어가 용이하고, 폭발성이나 화재의 위험이 있는 열악한 환경에서도 안전하게 사용할 수 있고, 넓은 지역을 감지할 수 있기 때문에 그 활용성이 증가하고 있다<sup>[1]</sup>.

광섬유 센서에서 사용되는 광원 및 광부품들이 고가이기 때문에 여러 개의 광섬유 센서들이 광원과 광부품들을 공유할 수 있는 광섬유 다중화형 센서나 광섬유 분포형 센서 개발에 많은 관심을 보여 왔다. 다중화형 센서들은 주로 Fiber Bragg Grating, Sagnac 간섭계, 마젠더 간섭계, 및 페브리-페로 간섭계 어레이<sup>[2,3]</sup>를 사용하여 개발되어 지고 있다. 간섭계 어레이를 이용하여 개발된 다중화형 광섬유 센서들은 높은 감도를 가지고 있으나 신호처리가 복잡하고 고가이다. 분포형 광섬유

센서들은 OTDR(Optical Time Domain Reflectometer)<sup>[4,5]</sup>, 편광현상<sup>[6]</sup>, 및 스페클 패턴<sup>[7-9]</sup>들을 이용하여 개발되어 지고 있다. 편광현상을 이용한 광섬유 분포형 센서는 외부 섭동이 광섬유에 인가되면 광섬유에 진행 중인 빛의 편광현상이 변하기 때문에 빛의 편광현상 변화로부터 외부에 인가된 물리적인 양을 측정하는 센서이다. 이런 분포형 센서는 측정 감도는 매우 높으나 신뢰성 있는 측정이 매우 어렵다. OTDR방식을 이용하는 광섬유 분포형 센서는 광섬유 내에서 일어나는 레일리 산란 현상을 이용하여 외부에서 인가된 압력 혹은 온도 등을 측정하는 방법이다. 이런 방식의 분포형 센서는 넓은 범위를 측정할 수 있고 섭동이 인가되는 지역의 위치를 알아낼 수 있으나 측정감도가 매우 낮다. 스페클 변화를 이용한 광섬유 분포형 센서는 광섬유 내부를 진행하는 빛의 모드와 모드사이의 간섭 현상 때문에 발생하는 스페클 패턴을 이용하는 센서이다. 외부에서 광섬유 센서에 압력을 인가하면 진행되는 빛의 모드와 모드사이의 광경로차에 의해서 스페클 패턴이 변하게 되며 스페클 패턴의 변화로부터 외부에서 인가된 압력 혹은 진동 등을 측정한다. 스페클 패턴을 이용한 광섬유 센서의 경우 고감도이고, 넓은 지역을 감지할 수 있고, 비교적 간단하게 신호처리를 수행할 수 있어서 분포형 광섬유 침입자 센서로 많이 사용되어지고 있다. 그러나 현재까지 개발된 스페클 패턴을

계명대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Engineering, Keimyung University)

<sup>†</sup>Corresponding author: jpark@kmu.ck.keimyung.ac.kr  
(Received : December 3, 2003, Accepted : December 30, 2003)

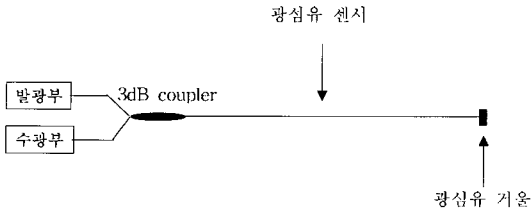


그림 1. 스펙클 패턴을 이용한 반사형 광섬유 센서  
 Fig. 1. Reflection type of an optical fiber sensor based on the speckle detection.

이용한 분포형 광섬유 센서는 전송형으로 센서 역할을 하는 광섬유 설치에 많은 제약이 있었다. 그래서 본 연구에서는 광섬유 센서 설치가 용이한 광섬유 센서 끝단면에 부착된 고 반사율의 광섬유 거울에서 반사되어 되돌아 온 빛의 스펙클 패턴을 이용한 센서를 개발하여 스펙클 패턴을 이용한 전송형 센서처럼 광섬유 센서로서의 사용 가능성에 대해 조사하였다.

## 2. 이 론

### 2.1. 스펙클 패턴

광섬유 센서 끝단면에 부착된 고 반사율의 광섬유 거울에서 반사되어 되돌아 온 빛의 스펙클 패턴을 이용한 분포형 광섬유 센서는 그림 1에 있다. 발광부에 있는 레이저에서 방출되어 다중모드 광섬유에 결합된 코히어런트한 빛이 3 dB coupler에서 두개로 나누어져 그 중 한개의 빛만이 센서 역할을 하는 광섬유 내부로 진행하다가 광섬유 끝부분에 있는 광섬유 거울을 만나면 그곳에서 반사되어 수광부로 되돌아 온다. 광섬유에 결합된 빛은 광섬유 내부를 진행하면서 모드와 모드 사이에 간섭을 일으켜 수광부에 있는 광섬유 끝단에서 빛을 방출하여 끝단면에서 일정한 거리에 있는 스크린에 비추면 밝고 어두운 부분이 나타난다. 이 밝고 어두운 부분을 스펙클이라 하며 외부에서 광섬유에 입력이 인가되면 밝고 어두운 부분들의 위치가 바뀌게 된다. 만약 광섬유에서 전송되는 빛의 모드가  $N$ 개이면 광섬유 끝단면에서  $r$ 만큼 떨어진 스크린 위의 한점에서의 광강도는

$$I(x, y) = \frac{R}{4} \left| \sum_{m=1}^N E_m(\vec{r}) \exp[i(\vec{k}_m \cdot \vec{r} - \omega t) + i\Phi_m] \right|^2 \quad (1)$$

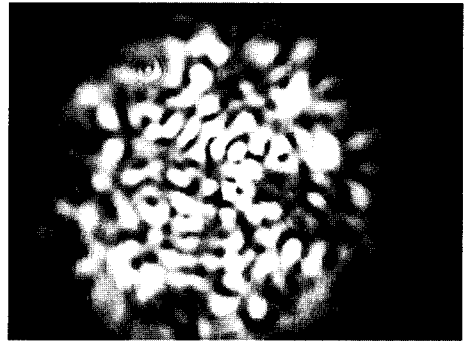
$$I_{total} = \iint I(x, y) dx dy = constant \quad (2)$$

이다.  $K_m$ 은  $m$ 번째 모드의 자유공간에서의 전파상수이고,  $\Phi_m$ 은  $m$ 번째 모드의 빛이 광섬유에서 방출되기

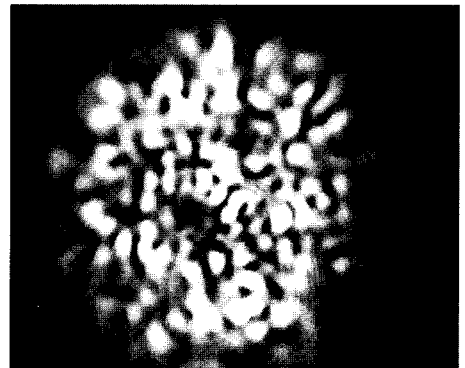
직전의 위상이고,  $\omega$ 는 레이저 빛의 각 주파수이고,  $E_m(\vec{r})$ 은  $r$  지점에서의  $m$ 번째 모드 광파의 크기이며  $R$ 은 거울의 반사율이다. 여기서 광섬유 거울의 반사율은 모든 모드에 대해 동일한  $R$  값을 가진다고 가정하였다. 외부에서 광섬유에 섭동을 인가하면 전송중인 빛의 위상이 변하여 평면에서의 광 간섭현상이 변하게 된다. 변화된 광 간섭에 의한 강도는

$$I(x, y) = \frac{R}{4} \left| \sum_{m=1}^N E_m(\vec{r}) \exp[i(\vec{k}_m \cdot \vec{r} - \omega t) + i(\Phi_m + \Delta\Phi_m)] \right|^2 \quad (3)$$

이다. 여기서  $\Delta\Phi_m$ 은 외부 섭동에 의한  $m$ 번째 모드의 위상변화이다. 광섬유에 인가되는 같은 외부 섭동에 대해 모드마다 위상변화가 다르게 되기 때문에 평면에서의 스펙클 패턴이 변화한다. 그림 2의 a는 광섬유에 외부 섭동이 인가되기 전의 스펙클 패턴 사진이고 그림 2의 b는 광섬유에 외부 섭동이 인가된 후의 스펙클 패



(a)



(b)

그림 2. 스펙클 패턴(a:섭동이 인가되기 전, b:섭동이 인가된 후)

Fig. 2. Speckle patterns.

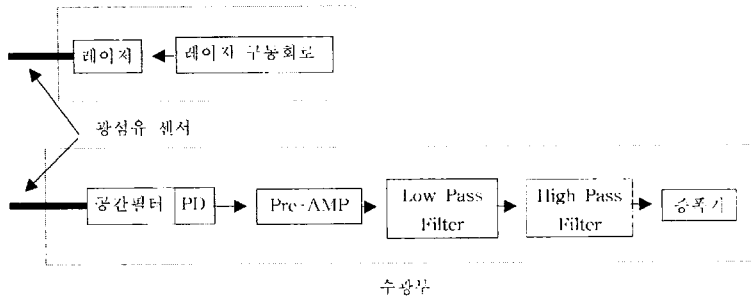


그림 3. 수광부와 발광부

Fig. 3. A laser and a photodetector module.

던 사진이다. 그림 2로부터 광섬유에 인가된 외부 섭동에 의하여 스펙클 패턴이 변화한다는 것을 알 수 있다.

## 2.2. 반사형 광섬유 센서

반사형 광섬유 센서(그림 1)는 발광부, 3-dB Coupler, 광섬유 센서, 광섬유 거울, 및 수광부로 구성되어 있다. 발광부(그림 3)의 레이저 구동회로에서 레이저에 전류를 공급하면 레이저에서 코히어런트한 빛이 나와 광섬유로 입사된다. 광섬유에 입사된 빛은 3-dB coupler를 통과하여 센서 역할을 수행하는 광섬유를 따라 전파되다가 광섬유 센서 끝에 있는 광섬유 거울을 만난다. 광섬유 거울을 만난 빛은 그곳에서 반사되어 발광부와 같은 위치에 있는 수광부(그림 3)로 되돌아와서 전기신호로 변환된다.

발광부는 레이저 구동회로와 광섬유가 붙어 있는 레이저로 구성되어 있으며 레이저 구동회로는 레이저에 빛이 나와서 광섬유에 전달되도록 레이저에 전류를 공급한다. 수광부는 공간필터, 광검출기(PD), 저주파 필터(Low Pass Filter), 고주파 필터(High Pass Filter), 및 증폭기로 구성되어 있다. 광섬유 끝단면에서 약간 떨어진 지점에 광검출기를 설치하여 제작된 공간필터는 수식 (2)에서 알 수 있듯이 광섬유 끝단면에서 방출되는 전체 광량은 항상 일정하기 때문에 광섬유 끝단면에서 나오는 스펙클 패턴 일부만 PD에서 검출되게 한다. 광검출기는 공간필터에 의해 검출된 일부분의 스펙클 패턴을 전기신호로 바꾸어 준다. 광검출기에서 변환된 전기신호는 PRE-Amp에서 조금 증폭되고 5 kHz의 cutoff 주파수를 가진 저주파 필터와 50 Hz의 cutoff 주파수를 가진 고주파 필터를 통과하여 증폭기로 보내진다. 증폭기로 보내진 신호는 신호처리하기가 용이한 크기로 증폭된다. 저주파 필터와 고주파 필터는 필요없는 노이즈 신호는 차단 시키고 알기 원하는 특정 주파수의 신호만 통과 시키기 위해 사용되어 졌다.

## 2.3. 광섬유 거울

광섬유 거울은 깨끗이 절단된 광섬유에 유전체 물질 혹은 금속물질을 정착시킴으로써 제작되어진다<sup>10)</sup>. 광섬유 거울이 고 반사율을 가지기 위해서 광섬유 끝단면에 두 종류 이상의 유전체 물질을 사용하여 다층 증착 시키던지 한 종류의 금속물질을 코팅 시킴으로써 만들어진다. 고 반사율의 광섬유 거울(그림 2.5)을 만들기 위해 주로 사용되는 금속물질들(표 1)로는 알루미늄, 은, 금, 로듐 및 백금이 있다. 알루미늄은 증발이 쉽고 반사율이 좋으며 플라스틱을 포함한 모든 물질에 강하게 부착되는 성질을 지녔다. 그런 이유로 반사를 위한 코팅물 제작에 금속 필름으로 많이 사용된다. 그러나 알루미늄은 매우 급속히 형성되는 산화물이 부식으로부터 알루미늄을 코팅을 보호하지만 사용할수록 점차 반사율은 떨어진다. 특히 외부에 노출된 경우 먼지와 진흙이 표면에 묻고 그것은 반사율을 떨어뜨리는 원인이 된다. 은은 가장 대중적인 금속이며 대기에 노출되면 은황화물층을 형성하여 변색된다. 처음의 반사율이 높고 증발의 극도의 안정 때문에 단기간 사용을 위해 주로 선택된다. 그래서 은은 간헐적 판금, 평면도 테스트를 위한 일시적인 코팅을 위해 흔히 사용된다. 금은 적외선 반사코팅을 위한 가장 좋은 금속이다. 그 반사율은 가시광선에서 급속히 떨어지기 때문에 파장의 길이가 700 nm 이후의 영역에서 많이 사용되어진다. 금은 유리에 너무 무르고 필름이 상처를 쉽게 입는 경향이 있지만 크롬이나 니크롬 필름에 강하게 들러붙기 때문에 금과 유리접착기면 사이에 이들의 하층지대로 자주 사용한다. 로듐과 백금은 반사율이 앞서 언급한 금속들에 비해 매우 작으나 매우 저항력 있는 안정된 필름이 필요할 때 사용되며 유리에 매우 강하게 부착하는 성질을 지녔다. 광섬유 끝단면에 금속물질은 증착시켜 광섬유 거울을 제작했을 때 광섬유 거울(그림 4)의 반사율<sup>11)</sup>은

표 1. 코팅 금속물질

Table 1. Metal materials for coating

Wavelengths, $\mu$	Silver		Gold		Copper		Aluminum	
	n	k	n	k	n	k	n	k
0.40	0.075	1.93	1.45		0.85		0.40	3.92
0.45	0.055	2.42	1.40	1.88	0.87	2.20	0.49	4.32
0.50	0.050	2.87	0.84	1.84	0.88	2.42	0.62	4.80
0.55	0.055	3.32	0.34	2.37	0.72	2.42	0.76	5.32
0.60	0.060	3.75	0.23	2.97	0.17	3.07	0.97	6.00
0.65	0.070	4.20	0.19	3.50	0.13	3.65	1.24	6.60
0.70	0.075	4.62	0.17	3.97	0.12	4.17	1.55	7.00
0.75	0.080	5.05	0.16	4.42	0.12	4.62	1.80	7.12
0.80	0.090	5.45	0.16	4.84	0.12	5.07	1.99	7.05
0.85	0.100	5.85	0.17	5.30	0.12	5.47	2.08	7.15
0.90	0.105	6.22	0.18	5.72	0.13	5.86	1.96	7.70
0.95	0.110	6.56	0.19	6.10	0.13	6.22	1.75	8.50
2.0	0.48	14.4	0.54	11.2			2.30	16.5
3.0					1.22	17.1		
4.0	1.89	28.7	1.49	22.2			5.97	30.3
6.0	4.15	42.6	3.01	33.0			11.0	42.4
7.0					5.25	40.7		
8.0	7.14	56.1	5.05	43.5			17.0	55.0
10.0	10.69	69.0	7.41	53.4			25.4	67.3

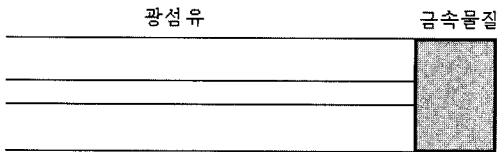


그림 4. 광섬유 거울  
Fig. 4. Optical fiber mirror.

$$R = \frac{(n_0 - n_1)^2 + k^2}{(n_0 + n_1)^2 + k^2} \quad (4)$$

이다. 여기서  $n_0$ 는 광섬유의 유효굴절률이고  $n_1$ 는 금속의 굴절률의 실수부이며  $k_1$ 은 금속의 굴절률의 허수부이다.

### 3. 실험 및 결과

#### 3.1. 광섬유 거울 제작

연구에 사용된 고 반사율의 광섬유 거울은 알루미늄을 사용하여 제작되어졌다. 광섬유 거울을 제작하기 위해서 먼저 멀티모드 광섬유를 직각으로 깨끗하게 절단하여 알코올을 이용하여 먼지 등을 제거하였다. 그리고

광섬유 끝단에 코팅이 일정하게 되도록 광섬유를 고정시키고 타겟에 열을 가해 금속을 증발시키는 열증착기를 이용하여 알루미늄 금속을 광섬유 끝단면에 코팅하였다. 광섬유 끝단면에 증착된 알루미늄의 두께는 약 2  $\mu$ m였다. 측정된 광섬유 거울의 반사율은 72 %였고 수식 (4)를 이용하여 계산된 광섬유 거울의 반사율은 80 %였다. 이론치와 계산치가 다른 이유는 금속을 코팅하기 전에 절단된 광섬유의 끝단면이 깨끗하지 않아서 알루미늄이 균일하게 증착되지 않았기 때문으로 판단된다.

#### 3.2. 실험 및 결과

실험장치(그림 5)는 발광부, 수광부, 오실로스코프, 3 dB-coupler, 500 m 멀티모드 광섬유(코어직경: 50  $\mu$ m, 클래딩 직경: 125  $\mu$ m, 코어의 반사율: 1.4527, 클래딩의 반사율: 1.4483), 72 % 반사율을 가진 알루미늄 코팅된 광섬유 거울로 구성되어졌다. 구동회로에서 전류를 파장이 830 nm이고 coherent length가 50 cm인 레이저에 공급하면 레이저에서 빛이 방출되어 광섬유에 입사한다. 광섬유에 입사한 빛은 3 dB 결합기(coupler)를 거쳐 광섬유를 따라 진행하다가 광섬유 거울에 도

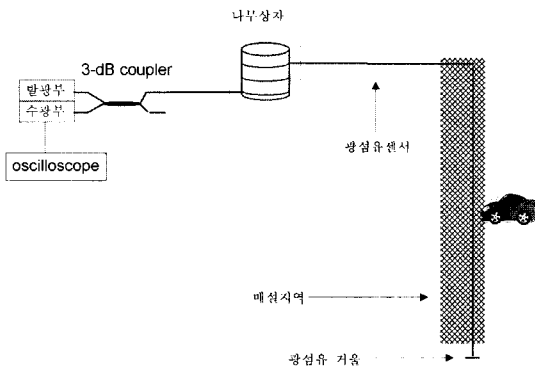
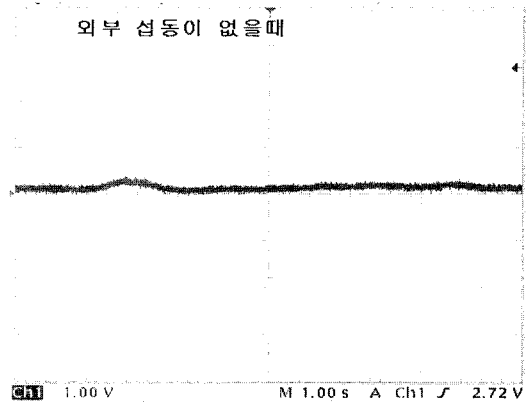
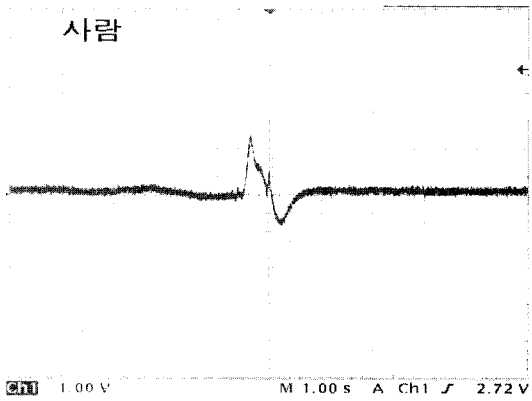


그림 5. 실험장치  
Fig. 5. Experimental setup.

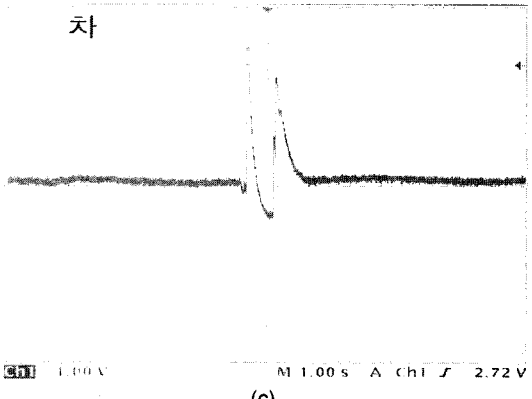
착한다. 광섬유 거울에 도착한 빛은 거울에 반사되어 되돌아 와서 3dB-coupler를 거쳐 발광부와 같은 위치에 있는 수광부로 간다. 수광부에 돌아온 빛은 일부분만 광검출기(PD)에 검출되어 전기신호로 바뀌어 오실로스코프에 나타난다. 센서 역할을 하는 광섬유 내에서 진행되는 빛은 모드와 모드 사이에 간섭을 일으켜 수광부에서 스펙클 패턴을 생성한다. 수광부에서 생성된 스펙클 패턴중 공간필터에 의해 일부만 PD에서 검출된다. 광섬유 센서에 외부섭동을 인가하면 수광부에서 스펙클 패턴이 변화하고 PD에 검출되는 스펙클 패턴도 변화하게 된다. PD에서 검출된 스펙클 패턴 변화로부터 광섬유 센서에 섭동이 인가되었음을 알 수 있다. 반사형 센서의 특성을 조사하기 위한 실험은 맑고 바람이 없는날 아스팔트도로 위에서 대우 마티즈를 이용하여 수행되어졌다. 센서역할을 하는 멀티모드 광섬유 500m 중 5m 정도를 아스팔트위에 두고 그 위를 인조 잔디로 덮고 청색 접착 면테이프를 사용하여 고정하였고 나머지 광섬유는 외부 노이즈로부터 보호하기 위해서 나무 상자안에 보관되어졌다. 실험은 75kg의 사람과 대우마티즈가 각각 센서 역할을 하는 광섬유가 깔려있는 감지지역을 지나감으로써 광섬유에 외력을 인가하였다. 그림 6의 (a)는 광섬유 센서에 섭동이 인가되지 않았을때의 출력 파형이고 그림 6의 (b)와 (c)는 사람과 대우 마티즈가 광섬유 센서 설치지역을 지나갈 때 오실로스코프에서 나타난 출력파형이다. 그림 6의 (a)는 광섬유 센서에 외부 섭동이 인가되지 않았을때는 출력 신호에 아무런 변화가 없다는 것을 보여주고 있다. 그림 6의 (b)와 (c)는 광섬유 센서에 외부 섭동이 인가 되었을 때의 출력신호들로서 사람이 센서위를 지나갈때는 한 개의 작은 변화만 나타났고 마티즈가 센서위를 지나갔을 때는 출력신호에 두 개의 큰 변화가 나타났다. 이는 대우 마티즈가 사람보다 무겁기



(a)



(b)



(c)

그림 6. 결과 파형  
Fig. 6. Results.

때문에 스펙클 변화를 많이 야기시켰고 앞뒤로 바뀌기 있어 광섬유센서에 압력이 두 번 인가되어졌기 때문이다. 출력 파형에서 측정된 잡음의 크기는 약 35mV였고 최대 신호의 크기는 약 3.5V였다. 그래서 계산된 반사형 광섬유 센서의 신호대 잡음비(SNR)는 약 40

dB였다. 반사형 센서의 dynamic range는 수광부에 있는 고주파 필터의 cutoff 주파수에 의해 결정된다. 그래서 개발된 반사형 센서의 dynamic range는 5 kHz이다. 본 연구에서 수행된 실험 결과들이 반사형 센서의 특성들이 스펙클 패턴을 이용한 전송형 센서<sup>[8]</sup>의 특성들과 유사하여 전송형 센서로 개발된 모든 종류의 센서들을 반사형 센서로 개발이 가능함을 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

기존의 스펙클 패턴을 이용한 광섬유 센서는 전송형 센서로서 같은 위치에 수광부와 발광부가 있기 때문에 센서 역할을 하는 광섬유 설치에 많은 제약이 있었다. 그래서 본 연구에서는 알루미늄을 깨끗하게 절단된 광섬유 끝단면에 코팅하여 제작된 약 72%의 반사율을 가진 광섬유 거울을 이용하여 센서 설치가 용이한 스펙클 패턴을 이용한 반사형 광섬유 센서를 개발하여 스펙클 패턴을 이용한 전송형 센서처럼 광섬유 센서로서의 사용 가능성에 대해 조사하였다. 특성 실험은 500 m 멀티모드 광섬유중에 5 m 길이의 광섬유 센서를 아스팔트위에 두고 인조잔디와 테이프로 고정하고 대우 마티즈를 사용하여 수행되어졌다. 광섬유 센서에 외부 섭동이 인가되지 않았을 때는 출력신호에 변화가 없었고 광섬유 센서에 외부 섭동을 인가 하였을 때는 출력 신호에 변화가 나타났다. 연구 결과로부터 개발된 반사형 광섬유 센서의 신호대 잡음비(SNR)는 약 40 dB로 계산되었고 bandwidth(dynamic range)는 5 kHz였다. 본 연구에서 수행된 실험 결과들이 스펙클 패턴을 이용한 반사형 센서의 특성들이 전송형 센서와 거의 동일함을 보여 주었다. 앞으로 본 연구의 결과를 바탕으로 반사형 광섬유 센서를 사용한 침입탐지 기법 및 진동과 압력 측정기술을 개발하고 더 나아가서 전송형 광섬유 센서보다 감도가 좋은 반사형 센서를 개발하기 위하여 신호대 잡음비의 향상에 대한 연구도 진행해야 될 것으로 판단된다.

#### 참고 문헌

- [1] R. Willsch, "Application of Optical Fibre Sensors: Technical and Market Trends", *Applications of Optical Fiber Sensors*, SPIE vol. 4074, pp. 24-31, 2000.
- [2] C. Bryson, "Interferometric Sensor System for Security Applications", *Tenth International Conference on Optical Fiber Sensor*, vol. 2360, pp. 485-488, 1994.
- [3] A. Kersey, K. Dorsey, and A. Dandridge, "Trans-Missive Serial Interferometric Fiber Sensor Array", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 7, pp. 846-851, 1989.
- [4] J. Park and H. Taylor, "Fiber Optic Intrusion Sensor Using Coherent Optical Time Domain Reflectometer", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 42, pp. 3481-3482, 2003.
- [5] 백세종, 권일범, 정철, 유재황, "광섬유 ROTDR 센서를 이용한 침입 탐지기법의 개발", *센서학회지*, 제11권, pp. 209-217, 2002.
- [6] J. Hazan, M. Steers, G. Delmas, and J. Nagel., "Buried Optical Fiber Pressure Sensor for Intrusion Detection", *Carnahan Conference on Security Technology*, pp. 125-129, 1989.
- [7] Chung-ye Leung and Ifan Chang, "Optical Fiber Line Sensor Based on Speckle Detection", *Carnahan Conference on Security Technology*, pp. 125-129, 1986.
- [8] 엄년식, 김요희, 양승국, 오상기, 김인수, 박재희, 강신원, "스펙클 패턴을 이용한 침입자 센서", *전자공학학회지*, 제38권, pp. 82-88, 2001.
- [9] 김인수, 박재희 "스펙클 패턴을 이용한 광섬유 침입자 센서 시스템에 대한 연구", *한국광학회지*, 제44권, pp. 230-235, 2003.
- [10] J. Park and H. Taylor, "Fabrication of Low Reflectance Optical Fiber Mirrors", *Electronics Letters*, vol. 32, pp. 2342-2343, 1996.
- [11] M. Ohring, *The Material Science of Thin Films*, Academic-Press, 1991.



**정 은 주**

- 1980년 2월 16일생
- 2002년 계명대학교 전자공학과 졸업(학사)
- 2002년 ~ 현재 계명대학교 전자공학과 석사 과정
- 주관심 분야 : 광섬유 센서, 센서 신호처리



**박 재 희**

- 1962년 2월 17일생
- 1984년 경북대학교 전자공학과 졸업(학사)
- 1992년 Texas A&M 대학 전자공학과 졸업(석사)
- 1995년 Texas A&M 대학 전자공학과 졸업(박사)
- 1984년 ~ 1990년 국방과학 연구소 연구원
- 1995년 ~ 1997년 삼성전기주식회사 부장
- 2001년 Texas A&M 대학 전자공학과 교환교수
- 1997년 ~ 현재 계명대학교 전자공학과 부교수
- 주관심 분야 : 광섬유 센서, 센서 신호처리