

광섬유 격자 센서

이 병 호

(서울대 전기공학부)

1. 서 론

광섬유(optical fiber)가 개발되기 전부터 빛을 이용해서 물리량을 측정하는 방법은 많이 개발되었지만, 1970년대 초 비교적 저손실의 광섬유 개발에 성공한 이후 광섬유를 센서로 사용하는 연구가 많이 이루어져 왔다. 광섬유 센서는 전자기 간섭(electromagnetic interference: EMI)에 영향을 받지 않고 감도가 높으며 안전하게 데이터를 전송할 수 있다. 뿐만 아니라 가격대가 낮고 소형 경량이며 설치가 쉽기 때문에 보통의 다른 센서가 사용될 수 없는 특수한 장소나 높은 감도를 요구하는 특수한 목적에 효과적으로 사용될 수 있다. 광섬유 센서를 이용해서 센서 주위의 스트레인, 온도, 회전율, 압력, 전자기장의 세기, 음향, 수위, 유체의 흐름 등의 물리량과 가스성분과 같은 케미컬(chemical)을 측정하는 방법에 대해 많은 연구가 이루어져 왔으며, 여러 지

점(multi-point) 또는 분포된(distributed) 위치에서의 물리량을 측정하는 연구에도 많은 진전이 이루어졌다. 이러한 다양한 광섬유 센서들은 여러 가지 원리를 이용한다[1].

이중에서 본 소고에서는 광섬유 격자(fiber grating)를 이용하는 방법을 설명하고자 한다. 광섬유에 굴절률 변화 패턴을 만들 수 있다는 사실은 1978년 Hill 등에 의해 발견되었고[2], 1989년 Meltz 등에 의해 자외선 레이저를 광섬유 측면에 조사하여 광섬유의 특정 부위에 원하는 파장에 대해서 반사 특성을 보이는 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg Grating: FBG)를 만드는 방법이 고안된[3] 이후로 이의 연구가 괄목할만한 발전을 이루어 오늘날에는 광통신용 소자와 광섬유 센서로 이용되고 있다. 표 1은 여러 가지 기법의 광섬유 센서들을 비교한 것으로서, 광섬유 격자를 이용하는 센서는 그 감지도가 높고 여러 지점에서의 스트레인이나 온도변화와 같은 물리량을 동시에 측정할 수 있다는 장점이 있다[4].

표 1. 여러 가지 광섬유 센서 기술의 비교(4).

	Multiplexing Capability	Single-Fiber Configuration	Single-Ended Configuration	Sensitivity	Suitability for Short Range Length	Embeddibility 10 sensing Locations
Sagnac/Mach-Zehnder	Good	N	Y	High	Low	Poor
Michelson	Good	N	Y	High	Medium	Poor
Sagnac	Good	N	N	Medium	Low	Poor
Raman (distributed sensor)	Good	Y	Y	Low	Low	Good
Rayleigh (distributed sensor)	Good	Y	Y	Low	Low	Good
Sagnac/Mach Zehnder (distributed sensor)	Good	Y	N	Low	Low	Good
Fabry-Perot etalon (distributed sensor)	Good	Y	Y	High	High	Good
Fiber grating (distributed sensor)	Good	Y	Y	High	High	Good
Microbending	Good	Y	Y	Low-medium	Medium-high	Good
Dual-mode sensor	Poor	Y	Y	High	High	Poor
Polarization	Poor	Y	Y	High	High	Poor-medium
Break sensors	Poor	Y	Y	Low-medium	High	Good

2. 광섬유 격자 센서의 원리

광섬유 격자는 게르마늄(germanium)이 높게 도핑(doping)된 광섬유 또는 수소처리(hydrogen loading)된 광섬유에 KrF 엑시머(excimer) 레이저 또는 제 2고조파(frequency-doubled) Ar 이온 레이저를 쬐어서 만든다. 광섬유 격자는 크게 주기적인 격자와 비주기적인 격자로 분류할 수 있다. 주기적인 격자에는 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating), 장주기 격자(long period grating: LPG), 경사진 격자(tilted grating) 등이 있고 비주기적인 격자에는 처핑된 광섬유 격자(chirped fiber grating) 등이 해당된다. 이러한 격자들은 센서 헤드(sensor head)나 센서 헤드로부터 반사된 파장을 읽어내는 정보 추출 시스템(디모듈레이터; demodulator)에 사용된다. 광섬유 격자를 사용하는 센서 헤드의 대부분은 광섬유 브래그 격자를 사용한다. 광섬유 브래그 격자는 광섬유 코어(core)의 굴절률을 주기적으로 변조하여 특정 파장(브래그 파장, Bragg wavelength)의 빛을 반사시키는 광섬유 소자이다. 광섬유 브래그 격자의 구조 및 동작 특성이 그림 1에 나타나 있다. 광섬유 코어의 주기적인 굴절률 변화는 브래그 격자의 역할을 하게 되며 그림처럼 넓은 스펙트럼을 갖는 광원을 광섬유에 입사시키면 다음의 브래그 조건을 만족시키는 파장 성분(브래그 파장: λ_B)이 광섬유 격자 부위에서 반사되며 나머지 파장 성분은 그대로 통과한다.

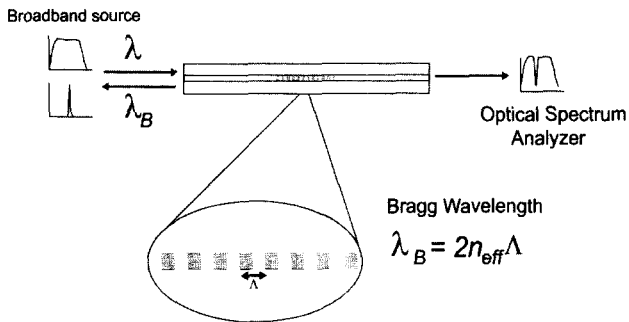


그림 1. 광섬유 브래그 격자의 구조 및 동작 특성

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda \quad (1)$$

여기에서, n_{eff} 는 광섬유 브래그 격자의 유효 굴절률(effective refractive index)이고 Λ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 주기이다. 이와 같이 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 주기의 함수가 되고 광섬유 격자에 외부에서 온도나 스트레인이 인가되면 유효 굴절률 또는 격자의 주기가 변하게 되어 브래그 파장은 달라지게 되는데 그 변하는 정도는 다음과 같은 식으로 표현된다[5].

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi) \Delta T + (1 - P_e) \Delta \epsilon \quad (2)$$

여기에서, ΔT , $\Delta \epsilon$ 은 각각 인가한 온도 변화와 스트레인이고, α 는 광섬유의 온도에 따른 열팽창 계수(thermal expansion coefficient)이고 ξ 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermo-optic coefficient)이다. 일반적인 실리카의 경우 $\alpha \sim 5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$, $\xi \sim 8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 이므로 온도에 의한 브래그 파장 변화는 대부분 굴절률 변화에 기인한다. P_e 는 광탄성 상수(photoelastic constant)로서 그 값은 대략 0.22이다. 광섬유 브래그 격자에 인가된 스트레인은 광섬유를 늘리거나 압축할 수 있는데 이 때마다 격자 주기가 늘어나거나 줄어들어서 브래그 파장은 더 장파장이 되거나 단파장이 된다. 광섬유에 인가되는 스트레인은 보통 ϵ (스트레인)의 단위로 표현된다. 이는 비율로 정의된다. 예를 들어 1 m의 광섬유가 1 μm 늘어났다면 그 때 인가된 스트레인은 $1 \mu\text{m}/1\text{m} = 1 \mu\epsilon$ (마이크로 스트레인)으로 표현된다. 광섬유 브래그 격자의 온도 및 스트레인에 대한 브래그 파장의 변화는 선형적으로 나타나게 되는데 그림 2가 1550 nm 영역에서 온도변화에 대한 광섬유 브래그 격자의 반사 파장(브래그 파장)을 측정 한 것이고, 그림 3이 스트레인에 대한 브래그 파장을 측정 한 것이다. 일반적인 광섬유 격자에 대해, 온도 변화에 대한 브래그 파장의 변화율은 1550 nm 근처의 파장에 대해 $\sim 13 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 1300 nm 근처에 대해 $\sim 10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 830 nm 근처에 대해 $\sim 6.8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 이며, 스트레인에 대한 브래그 파장의 변화율은 1550 nm 근처에 대해 $\sim 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$, 1300 nm 근처에 대해 $\sim 1 \text{ pm}/\mu\epsilon$, 830 nm 근처에 대해 $\sim 0.64 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 이다[6].

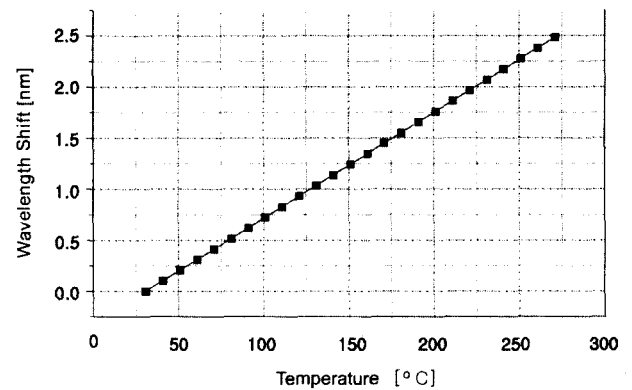


그림 2. 1550 nm 근처의 파장에 대해 측정된, 온도 변화에 대한 브래그 파장의 변화

따라서 이와 같이 변화된 브래그 파장을 관찰한다면 광섬유 브래그 격자가 부착된 위치의 온도나 스트레인을 알 수 있게 되는 것이다. 광섬유 브래그 격자 센서는 그 측정 인자에 대한 정보가 반사되어 오는 빛의 파장에 있기 때문에 브래그 파장이 서로 다른 광섬유 격자들끼리 서로 영향

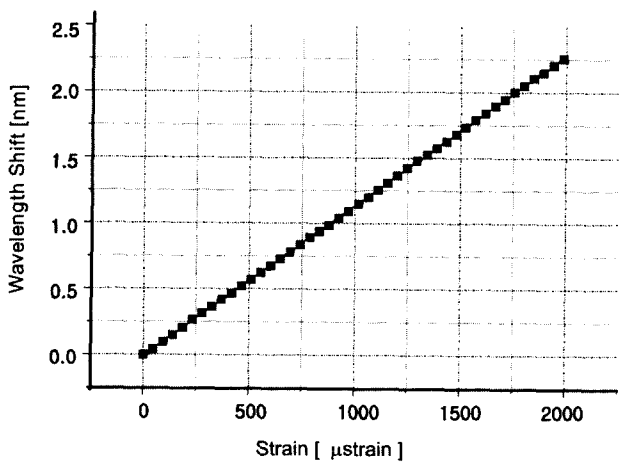


그림 3. 1550 nm 근처의 파장에 대해 측정된, 스트레인에 대한 브래그 파장의 변화

을 주고 받지 않는다. 이것은 하나의 광섬유에 파장이 서로 다른 브래그 격자들을 새김으로써 다중점(여러 위치) 측정을 가능하게 한다.

그런데, 반사되어 돌아오는 빛의 파장에는 광섬유 격자가 부착된 구조물의 온도와 스트레인 정보가 모두 포함되어 있기 때문에 이를 분리해 내어야 한다. 1994년 Xu 등에 의해서 이러한 연구가 처음으로 수행되었다[7]. 이들은 브래그 파장이 크게 다른(850 nm, 1300 nm) 격자들을 광섬유에 새겨 이를 하나의 센서 헤드로 사용하는 것으로서, 가해진 물리량에 대해서 서로 다른 브래그 파장 변화율을 얻을 수 있었다. 그 이후에도 온도와 스트레인의 효과를 분리하려는 노력들이 많이 있었는데 그림 4가 그러한 접근 방법 중 하나를 나타내고 있다[8,9]. 동일한 광섬유 모체에서 인장된 외경이 다른 두 광섬유에 브래그 반사 파장이 다른 두 개의 격자를 형성하면, 두 광섬유의 열광학 계수가 같아 온도에 의한 반응이 동일하므로 온도 변화에 의해 두 브래그 파장은 동일한 간격을 유지하며 이동한다. 하지만, 스트레인이 걸릴 경우 두 부분의 광섬유 굵기가 다르므로, 두 격자의 반사 파장의 변화율이 서로 달라져 그 파장 간격은 스트레인에 따라 변화한다. 그러므로 두 브래그 파장 간격의 변화는 주위 온도의 변화에 무관하며 스트레인의 변화에 의해서만 결정되므로, 두 브래그 파장 간격의 변화와 어느 한 파장의 이동을 관찰하면 온도와 스트레인 효과를 분리해낼 수 있게 된다.

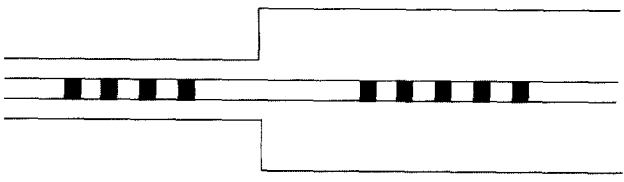


그림 4. 지름이 다른 광섬유에 새겨진 격자쌍을 이용한 온도/스트레인 분리 센서

이러한 방법의 단점은 크기가 다른 광섬유끼리의 스플라이싱(splicing)으로 인해 구조적으로 약하고 빛의 손실을 유발하게 된다는 것이다. 이를 보완하기 위해, 동일한 광섬유에 서로 다른 파장의 브래그 격자를 새기고 속이 빈 유리 튜브에 넣어 한 쪽 격자만 유리 벽면에 부착하여 스트레인에 의한 영향을 받지 않게 하는 방법이 제안되었다[10]. 즉 유리관에 고착된 격자의 경우 스트레인이 가해질 때 광섬유 축방향의 길이변화가 거의 없거나 무시할 정도이므로 스트레인에 따른 브래그 파장의 변화를 관측할 수 없다. 하지만 두 격자가 같은 유리관에 삽입되어 있고 공간적으로도 가깝기 때문에 온도에 대한 두 격자의 파장 변화율은 동일하다. 따라서 두 격자의 브래그 파장 변화를 관측하면 온도와 스트레인 효과를 분리해낼 수 있게 된다.

그 외에도 여러 가지 방법이 있으며[11], 실제적으로 쓰이는 간단한 방법으로는, 스트레인을 측정하기 위한 센서 격자 주위에 느슨하게 고정된(즉, 스트레인의 영향을 받지 않는) 또 하나의 참조 격자를 놓아 이로부터 온도의 영향을 없애어, 센서 격자의 반사파장에서 스트레인의 영향만을 구별하는 것이다.

광섬유 격자 센서가 주로 온도나 스트레인을 측정하기 위해 사용되어 왔던 것은 사실이지만 그 외에도 가속도, 자기장, 압력, 케미컬 등 다양한 영역의 측정이 가능하다는 것이 여러 연구들을 통해서 밝혀졌다.

하나의 예로, 그림 5가 특수한 구조물에 광섬유 브래그 격자를 부착하여 가속도를 측정하는 방법을 나타낸 것이다[12]. 가속도가 주어질 때마다 중앙에 있는 추의 무게 때문에 두 판(plate)이 휘어지게 되고 이 영향이 브래그 격자에 스트레인으로 작용하여 파장의 변화를 유발한다. 이 연구에서는 $40 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 정도의 최소 동적(dynamic) 측정 가속도를 얻을 수 있었다.

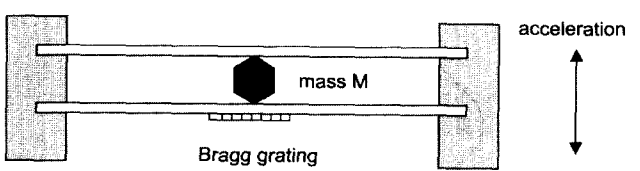


그림 5. 광섬유 브래그 격자를 이용한 가속도 측정계[12]

또 다른 예로서 자기장을 측정하는 방법이 있다. Kersey 등은 1994년 광섬유 브래그 격자에 코일을 감아 자기장이 광섬유 축방향으로 생기게 한 다음 패러데이 효과(Faraday effect)에 의해 브래그 파장이 분리되는 현상을 이용하여 자기장의 양을 측정하는 방법을 제안하였다[13]. 즉 패러데이 효과에 의해 오른쪽으로 원형 편광된 빛(right circularly polarized light)과 왼쪽으로 원형 편광된 빛(left circularly polarized light) 사이의 유효 굴절률 차이가 자기장의 양에 비례하게 되는 것이다. 따라서 브래그 파장이 분리되는 정도를 관찰하면 광섬유 브래그 격자 주위의 자기장의 양을 알아낼 수 있게 된다. Kersey 등은 약 1.8 Gauss의 최소

측정치를 얻을 수 있었고 100 Tesla(10⁶ Gauss)까지 측정할 수 있었다.

광섬유 브래그 격자 센서는 앞서 설명한 스트레인 즉 광섬유 길이 방향으로 가해지는 스트레인 뿐 아니라 광섬유의 반지름 방향으로 가해지는 스트레인에 대해서도 어느 정도의 민감도를 가지고 있다. 이러한 맥락에서 광섬유 격자 센서가 기존의 압력 센서보다 더 안정적인 측정이 가능함이 1991년 Morey 등에 의해서 밝혀졌다[14]. 이들은 광섬유 격자의 브래그 파장이 다음과 같이 나타나는 점을 이용하여 광섬유 격자 주위의 압력이 증가함에 따라 브래그 파장이 단파장 쪽으로 이동하는 것을 관찰하였다.

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = 0.715 e_z - 0.418 e_r \quad (3)$$

여기에서, e_z 는 광섬유 축 방향의 스트레인이고 e_r 은 반지름 방향의 스트레인이다. 이들은 브래그 파장의 이동을 0.01 nm까지 측정하여 약 0.117 MPa의 분해능을 얻을 수 있었다.

장주기 광섬유 격자는 광섬유 주위의 케미컬의 종류나 농도 등을 알 수 있게 해주는 역할을 한다[15]. 이는, 장주기 광섬유 격자가 빛을 코어 모드(core mode)로부터 클래딩 모드(cladding mode)로 결합시키며, 클래딩 모드의 특성은 그 바깥부분의 물질에 직접적인 영향을 받기 때문이다. 장주기 광섬유 격자는 광섬유 브래그 격자의 굴절률 변조 패턴보다 훨씬 큰 수 백 마이크로 미터의 굴절률 변조 주기를 가지고 있으며, 코어 모드와 클래딩 모드 사이에 결합되는 파장은 다음과 같이 나타난다.

$$\lambda_i = (n_{01} - n_{clad}^i) \Lambda \quad (4)$$

여기에서, λ_i 는 i 번째 결합 파장이고, n_{01} 은 코어 모드의 유효 굴절률, n_{clad}^i 는 i 번째 클래딩 모드의 유효 굴절률이다. 이 때 n_{clad}^i 가 광섬유의 클래딩 바깥을 채우고 있는 물질의 굴절률의 함수이므로 λ 를 관찰하면 케미컬의 농도나 종류를 알 수 있게 된다. 이 연구에서는 수크로오스(sucrose)의 농도를 0.07 g/ml부터 0.22 g/ml까지 3 g/ml의 단위로 측정할 수 있었고 그림 7과 같이 굴절률이 1.33에서 1.42까지 해당되는 케미컬의 종류를 구별할 수 있었다.

3. 광섬유 브래그 격자 센서 디모듈레이터(demodulator)

광섬유 브래그 격자 센서 시스템에서 센서 헤드를 구성하는 브래그 격자만큼 중요한 부분이 반사되는 광 신호의 파장 변화를 전기적인 신호로 바꿔줄 수 있는 디모듈레이터라고 할 수 있다. 지금까지 다양한 방법들이 고안되어 사용되어 왔지만 그 중에서도 다중화된 시스템에서 가장 많이 쓰이는 패브리-페로(Fabry-Perot) 필터(filter) 디모듈레

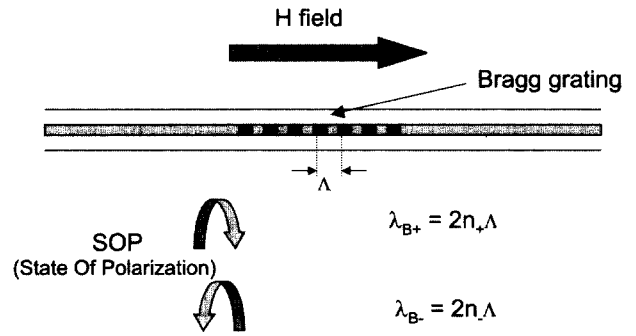


그림 6. 자기장에 의해 유도된 복굴절에 의한 브래그 파장 분리(+, -는 각각 오른쪽과 왼쪽 원형 편광을 뜻한다.)

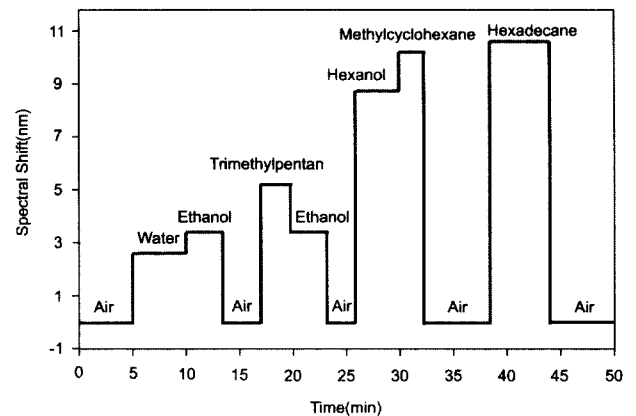


그림 7. 케미컬 종류에 따른 파장 이동 [15]

이터를 소개하겠다. 가장 흔히 사용되는 기술은 fiber-pigtailed 패브리-페로 튜너블(tunable) 필터를 좁은 대역의 필터로 이용하는 것이다[16]. 이 필터는 종종 광섬유 패브리-페로 간섭계(fiber Fabry-Perot Interferometer)로 불린다. 이는 두 개의 마주보고 떨어져 있는 부분적 반사면으로 구성되어 있다. 빛이 그 면과 면 사이로 입사하면, 그 공진기(cavity) 사이에서 많은 반사가 일어나고 그 반사된 빛들이 간섭을 일으키고 일부는 투과되므로 파장에 따라 주기적인 특성의 투과율을 갖게 된다. 경계면(반사면)에서 부분적으로 반사되는 임의의 광파가 한번의 왕복운동을 통해 추가적으로 겹쳐 되는 위상은 다음과 같다.

$$\phi = 2\pi \frac{2nl}{\lambda} + \phi_0 \quad (5)$$

여기에서 n 은 공진기 물질의 굴절률이고, l 은 공진기 길이, λ 는 진공에서의 파장, ϕ_0 는 공진기 양 끝에서 반사되는 빛의 위상 변화의 합이다. 만약 위상차, 즉, 여분의 위상이 2π 의 정수배라면 보강간섭에 의해 투과량은 최대가 된다.

그림 8은 전형적인 패브리-페로 필터의 파장에 대한 투과도 곡선을 나타내고 있다. 튜너블 광섬유 패브리-페로 필터는 0.2~0.6 nm의 대역폭을 갖고 40~60 nm의 FSR(free

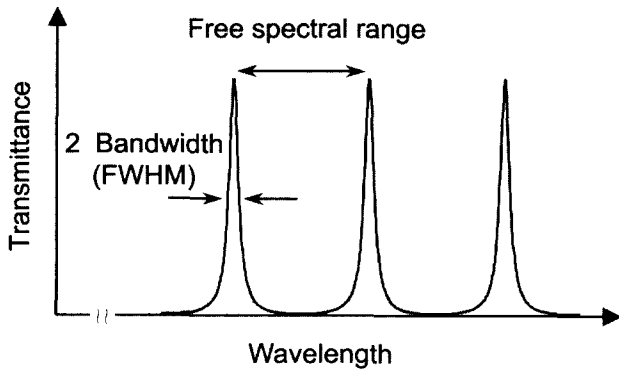


그림 8. 패브리-페로 필터의 파장에 대한 투과도

spectral range)에 100~200의 finesse factor(FSR/대역폭)를 갖는 것이 일반적이다. 필터의 튜닝은 piezoelectric 소자를 이용하여 반사 표면의 간격을 정확하게 조정하면 된다. 현재 사용되는 패브리-페로 필터는 1 kHz 혹은 그 이상의 주사(scanning) 속도를 갖는다.

그림 9는 하나의 광섬유 브래그 격자 센서 헤드에 대해 튜닝된 광섬유 패브리-페로 필터를 이용하여 파장 변화를 측정해내는 센서 시스템의 모식도이다. 이 경우에 디모듈레이터는 트래킹(tracking) 혹은 폐루프 모드(closed-loop mode)에서 동작한다. 일반적으로 광섬유 패브리-페로 필터의 대역폭은 광섬유 브래그 격자의 대역폭과 비교할 수 있을 정도의 크기이다. FSR은 측정의 모호성을 피하기 위해 격자의 동작 범위보다 커야 한다. Kersey 등[16]은 40 nm의 측정 영역을 가지며 1 pm 분해능으로 동작하는 디모듈레이션 센서 시스템을 보고한 바 있다.

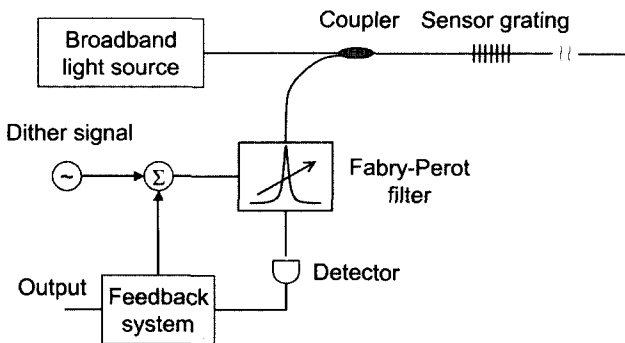


그림 9. 패브리-페로 필터 디모듈레이터를 사용한 센서 시스템

그림 10은 64개의 광섬유 브래그 격자로 이루어진 센서 시스템의 모식도를 나타내고 있다[17]. 디모듈레이터부는 운반할 수 있도록 작고 가벼우며(5 pound 이하) 튼튼하게 만들어지고 랩탑 컴퓨터(laptop computer)에 측정결과가 표시된다. 이 시스템은 4개의 광원(edge-emitting light-emitting diodes: ELEDs)을 사용하고, 6개의 커플러, 2개의 광섬유 패브리-페로 필터, 2개의 광 검출기와 나머지 전기적인 회

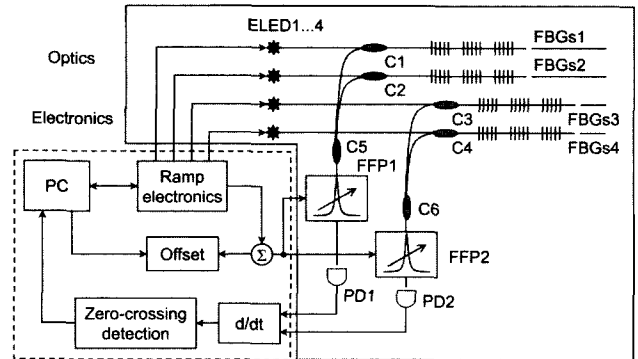


그림 10. 광섬유 패브리-페로 (FFP) 필터 디모듈레이터를 이용한 64채널 센서 시스템[17]

로 부분으로 구성되어 있다. 각 광섬유 패브리-페로 필터는 약 45 nm의 FSR을 가지고 있으며, 이것은 한 번의 필터 스캔으로 2.7 nm 파장 간격을 가진 16개의 각각의 센서를 동작시킬 수 있다. 이 파장 간격은 각각의 광섬유 브래그 격자에 $-1300 \sim +1300 \mu\epsilon$ 의 스트레인을 인가할 수 있는 간격이다. 이 시스템의 내재적인 스트레인 신호의 변동량은 45 Hz에서 $-2 \sim +2 \mu\epsilon$ 정도이다. 이 스트레인 분해능과 스캐닝 속도는 교량 또는 선박과 같은 대형 구조물의 스트레인 측정에 적합하다. 측정 장치가 보통 1년 이상씩의 오랜 기간 동안 현장(field site)에 설치되어 있게 되므로 광섬유 패브리-페로 필터와 광원은 thermoelectric unit 위에 올려지게 된다. 이것은 일정한 온도 유지를 가능하게 하는데, 이것이 시스템의 안정도와 스트레인 계산의 일관성을 극대화시킨다. 이 밖에도 많은 종류의 디모듈레이터가 연구되었으며, 단일 격자 센서용으로는 구조가 단순한 edge filter 등이 쓰이기도 한다. 불균형(unbalanced) 광섬유 마하-젠더(Mach-Zehnder) 간섭계를 이용한 디모듈레이터도 많이 연구되었으며 이는 감지도가 매우 높고 동적 스트레인 측정에 유리하지만, 온도 변화와 같은 주위 환경에 디모듈레이터 자체가 민감한 영향을 받기 때문에 이에 대한 추가 보완 장치가 요구된다.

본 소고에서 자세히 다루지는 않았지만, 광섬유 격자를 이용한 스트레인의 측정에 있어서, 교량이나 도로 등의 토목구조물에의 적용을 위해서는 동적 모니터링(dynamic monitoring)이 중요하며 이에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다. 그림 11은 비교적 단순한 구조의 디모듈레이터를 사용하여[18] 동적 스트레인을 모니터링하는 간단한 예를 보여준다.

4. 결론

지금까지 기술한 바와 같이 광섬유 격자를 이용한 센서 시스템에 대한 연구는 전 세계적으로 수많은 대학, 연구소, 산업체 등에서 수행되고 있으며, 날로 그 중요성을 더해가고 있다. 스트레인이나 온도, 압력, 휨 등 여러 가지 물리량

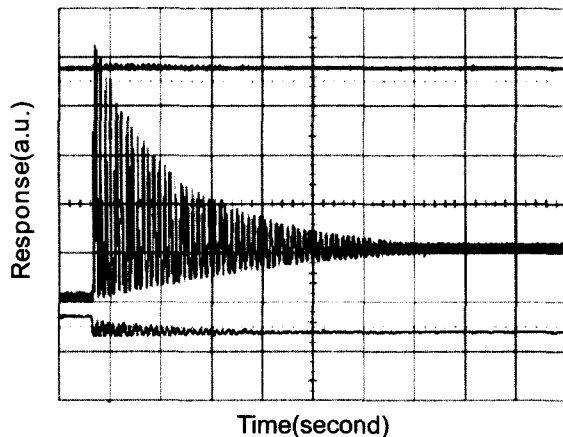


그림 11. 한쪽 끝이 고정된 자에 광섬유 격자 센서를 붙이고, 다른 한쪽을 눌렀다가 놓았을 때, 자의 주기적인 휨 패턴에 따라 모니터링된 동적 스트레인의 예

에 대한 다양한 형태의 광섬유 격자 계측기법과 새로운 디모듈레이션 기법이 꾸준히 보고되고 있다. 영국, 미국, 캐나다 등에서 광섬유 격자를 이용한 센서 시스템이 빌딩, 교량, 선박, 유전 등 다양한 구조물에 대해 시험되고 있고 상용화되고 있다. 이미 토목구조물용 센서시스템은 연구단계를 넘어서 가격 경쟁력이 중요한 문제가 되는 상태이다. 또 한편으로는 광섬유 격자 센서를 저온 측정, 생체온도 측정 등 특수한 용도에 적용하고자 하는 연구도 꾸준히 진행되고 있다.

참고문헌

[1] E. Udd, ed., *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*, Wiley(Interscience), New York, USA, 1991.

[2] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, pp. 647-649, 1978.

[3] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method," *Opt. Lett.*, vol. 14, pp. 823-825, 1989.

[4] E. Udd, ed., *Fiber Optic Smart Structures*, Wiley (Interscience), New York, USA, 1995.

[5] Y. N. Ning and B. T. Meggitt, "Fiber Bragg grating sensors: signal processing aspects," in *Optical Fiber Sensor Technology Volume 2 - Devices and Technology* (edited by K. T. V. Grattan and B. T. Meggitt), Chapman & Hall, London, UK, 1998, pp. 381-417.

[6] Y.-J. Rao, "Fiber Bragg grating sensors: principles and applications," in *Optical Fiber Sensor Technology Volume 2 - Devices and Technology* (edited by K. T. V. Grattan and B. T. Meggitt), Chapman & Hall, London, UK, 1998, pp. 355-389.

[7] M. G. Xu, J.-L. Archambault, L. Reekie, and J. P. Dakin, "Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors," *Electron. Lett.*, vol. 30, pp. 1085-1087, 1994.

[8] S. W. James, M. L. Dockney, and R. P. Tatam, "Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors," *Electron. Lett.*, vol. 32, pp. 1133-1134, 1996.

[9] S. B. Lee, Y. Liu, and S. S. Choi, "Dual-wavelength fiber Bragg grating laser and its strained tuning characteristics," *Optoelectronics and Communication Conference (OECC '96)*, Chiba, Japan, July 1996, pp. 352-353.

[10] M. Song, S. B. Lee, S. S. Choi, and B. Lee, "Simultaneous measurement of temperature and strain using two fiber Bragg gratings embedded in a glass tube," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 3, pp. 160-162, 1997.

[11] A. Othonos and K. Kalli, *Fiber Bragg Gratings - Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*, Artech House, Norwood, MA, USA, 1999.

[12] M. D. Todd, G. A. Johnson, B. A. Althouse, and S. T. Vohra, "Flexural beam-based fiber Bragg grating accelerometers," *IEEE Photon. Technol. Lett.* vol. 10, pp. 1605-1607, 1998.

[13] A. D. Kersey and M. J. Marrone, "Fiber Bragg grating high magnetic-field probe," *The 10th International Conference on Optical Fiber Sensors* (edited by B. Culshaw and J. D. C. Jones), *Proc. SPIE*, vol. 2360, 1994, pp. 53-56.

[14] W. W. Morey, G. Meltz, and J. M. Weiss, "Evaluation of a fiber Bragg grating hydrostatic pressure sensor," *The 8th Optical Fiber Sensors Conference*, IEEE, New York, USA, 1991, paper PD4.

[15] Z. Zhang and J. S. Sirkis, "Temperature-compensated long period grating chemical sensor," *The 12th International Conference on Optical Fiber Sensors, 1997 OSA Technical Digest Series*, vol. 16, Optical Society of America, Washington, D.C., USA, 1997, pp.294-297.

[16] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength



- filter," *Optics Letters*, vol. 18, pp. 1370-1372, 1993.
- [17] S. T. Vohra, M. D. Todd, G. A. Johnson, C. C. Chang, and B. A. Danver, "Fiber Bragg grating sensor system for civil structure monitoring: applications and field tests," *Proc. of the 13th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Kyongju, Korea, *Proc. SPIE*, vol. 3746, 1999, pp. 32-37.
- [18] S. Kim, S. Kim, J. Kwon, and B. Lee, "Novel fiber Bragg grating sensor demodulator using fiber birefringence," *Proc. of the 13th Annual Meeting of IEEE Lasers and Electro-Optics Society.*, Puerto Rico, USA, Nov. 2000, pp. 687-688.

저 자 소 개



이병호(李茲浩)

정회원. 현재 서울대학교 전기공학부 부교수. 1964년생. 1987년 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사), 1989년 서울대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학 석사), 1993년 Department of EECS, University of California at Berkeley 졸업(Ph.D.). 1994년 9월부터 서울대학교 전기공학부 근무. 1999년 대한전기학회 표창 수상. IEEE Senior Member. 국제 논문지 및 학술대회에 약 150편의 논문 발표. 국내 논문지 및 학술대회에 약 190편의 논문 발표. 현재 국가지정연구실 운영. 주 관심 분야는 광섬유 격자, 홀로그래픽 메모리, 3차원 디스플레이 등.