

## 광섬유 센서를 이용한 구조물 안전 모니터링 기술

### Structural Health Monitoring Using Fiber Optic Sensors

권일범

Il-Bum Kwon

#### 1. 서론

국내에서는 교량 및 건물 붕괴와 같은 대형 토목 구조물의 붕괴 사고가 발생함에 따라 구조물의 안전성 확보를 위한 실시간 모니터링의 필요성이 증대하고 있다. 미국에서는 20년 이상 된 교량의 보수 등과 관련하여 실시간 모니터링 기술에 대한 연구를 활발하게 수행하고 있는 실정이다. 이러한 현실에 맞추어 구조물의 안전진단을 위하여 구조물과 센서를 일체형으로 제작하여 구조물의 각 부분의 이상 상태를 검출할 수 있도록 하는 스마트 구조 기술(*smart structure technology*)의 사용이 요구된다. 스마트 구조물은 Fig. 1과 같이 단세포 동물이 외부의 환경 변화(압력, 빛, 온도, 전기장 등)를 센서로 감지하고 신호 처리를 하여 행동하는 것과 유사하게 구조물 외부에서 주어지는 변화인 습도, 온도, 압력, 힘 등의 영향을 감지함과 동시에 구조물 내부의 변화도 감지하여 구조 상태를 파악하는 기능을 갖는 구조물을 말한다.

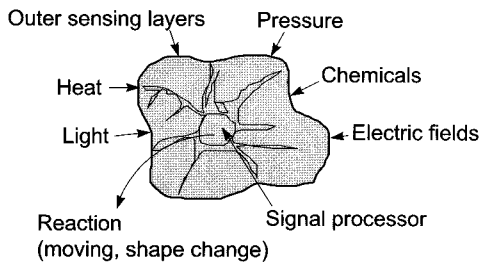


Fig. 1 Schematics of smart structures

특히 항공기를 비롯하여 토목 구조물과 같은 대형 구조물에 사용하여 온 전통적인 비파괴 검사 방법을 보완 할 수 있는 광섬유 센서에 의하여 실시간으로 구조물의 건전성을 감시하도록 하는 연구가 활발히 진행 중이다. 광섬유 센서 기술은 여러 가지 장점을 갖고 있어 스마트 구조 기술에의 적용이 기대되고 있다. 광섬유는 전자기 간섭을 받지 않으며 온도, 압력, 전기장의 강도, 자기장의 강도, 응력, 변형률, 성형 상태 등을 감지할 수 있게 제작할 수 있어서 스마트 구조물의 개발에 주목 받고 있다. 이 센서들은 단일 점 감지만만 아니라 혼합된 효과를 측정할 수 있으며 여러 방법으로 다중화(*multiplexing*)를 시킬 수 있다. 즉 여러 지점에서 측정하고자 하는 여러 정보를 한 가닥의 광섬유로 신호를 받을 수 있다. 또한 광섬유는 매우 높은 선폭의 데이터 통로가 될 수 있다. 이러한 속성을 조합하여 광섬유를 이용한 스마트 구조물을 개발하고 있다. 현재 광섬유센서 형태는 여러가지가 있지만 여기에 소개하는 형태가 주로 구조물 측정에 사용되는 센서 유형이다. 페브리-페로 센서(*Fabry-Perot sensor*), 브래그 그레이팅 센서(*Bragg Grating sensor*), 분포 물리량 측정을 위한 OTDR(*Optical Time Domain Reflectometry*) 센서 등이 가장 주목 받고 있는 센서이다. 그 이외에 다양한 센서 유형이 소개되어졌지만 여기에 소개된 센서 형태를 많이 벗어나지 않는다. 페브리-페로와 브래그 그레이팅 센서는 단일 점 센서로 제작할 수 있고 여러 광학적 다중화 기법의 적용이 가능하여 준-분포된 시

\* 한국표준과학연구원 환경안전계측센터 스마트계측그룹(Smart Measurement Group, Center for Environment and Safety Measurement, Korea Research Institute of Standards & Science, Daejeon, 305-340, E-mail: ibkwon@kriss.re.kr)

스텝 구성이 가능하다. 중간 정도 게이지 길이의 변형을 감지는 이 두 형태의 센서로 감지가 가능하다. 기본적으로 광섬유 센서는 스마트 구조 적용 영역에서 필요한 모든 파라메타를 감지할 수 있도록 제작이 가능하다. 본 원고에서는 구조물과 일체화하여 사용하기 쉬운 스마트 센서로 광섬유 센서를 소개하고 구조 모니터링에의 응용 사례를 보인다. 또한 광섬유 센서 기술의 전망과 실용화를 위한 향후 과제에 대하여 소개한다.

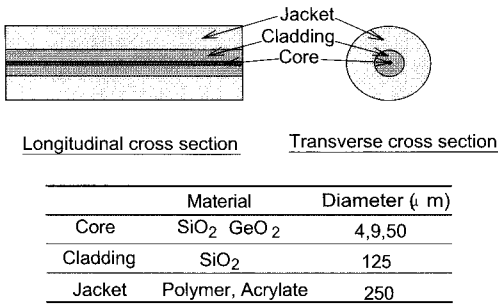


Fig. 2 Structures of optical fiber

## 2. 스마트 광섬유 센서

스마트 광섬유 센서를 위한 광섬유의 구조는 일반적으로 Fig. 2와 같이 코어(core), 클래딩(cladding), 재킷(jacket) 부분으로 이루어져 있다. 코어와 클래딩의 주성분은 유리로 구성되어 있으며 재킷은 주구조인 코어와 클래딩을 보호하기 위하여 폴리머나 아크릴을 사용하여 클래딩 표면을 외부 손상으로부터 보호한다. 광섬유는 단일모드(single-mode) 광섬유와 다중모드(multi-mode) 광섬유로 분류된다. 다중모드 광섬유는 코어의 직경이 50~60 μm로 단일모드 광섬유에 비해 크고 근거리 통신용으로 사용되며 단일모드 광섬유는 코어의 직경이 4~9 μm로 매우 작으며 전송 손실이 다중모드 광섬유보다 작기 때문에 장거리 통신용이나 광 간섭형 센서용으로 많이 사용된다. 빛은 광섬유의 코어 부분으로 전파하게 되는데 광 손실 없이 가장 효율적으로 전파되도록 하려면 코어 부분으로부터 클래딩 부분으로 전반사가 이루어지면서 전파되도록 하여야 광 손실이 가장 적게 된다. 빛은 굴절률이 높은데서 낮은 데로 전파되어야 전반사가 발생하므로 단일모드 광섬유의 경우 광섬유 코어의 굴절률이 클래딩의 굴절률보다 약 0.1 %에서 0.2 %정

도 크게 하고 다중모드 광섬유인 경우는 광섬유 코어의 굴절률을 클래딩의 굴절률보다 1 %에서 2 % 정도 크게 하여 광섬유를 제작하게 된다. 광섬유 센서는 광 응용 방식에 따라 강도형, 간섭형, 파장형 등의 여러 가지가 있으나 구조 안전 모니터링을 위하여 많이 개발되고 있는 형태인 광섬유 외부 패브리-페로 간섭 센서, 광섬유 브래그-그레이팅 센서 등은 다음과 같다.

### 2.1. 광섬유 외부 패브리-페로 간섭 센서

(Fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensor)

광섬유 외부 패브리-페로 간섭 센서는 Fig. 3과 같이 광섬유에 입사된 빛이 패브리-페로 탐촉자 끝단에서 입사광 I<sub>1</sub>의 약 4%인 I<sub>1</sub>이 반사되도록 하고 나머지 약 96%는 광섬유를 빠져 나와 공기 간극(air gap)층을 통과하여 다른 쪽 끝단의 광섬유 단면에서 다시 4%가 I<sub>2</sub>로 반사되도록 하여 이 반사된 두 빛 I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>가 입사된 쪽으로 되돌아 나가면서 광섬유 연계기에서 만나서 서로 위상 간섭을 일으켜 공기 간극의 변형량 즉 두 광 경로의 변화 발생량만큼 위상차를 발생하도록 하여 정현파의 광 출력 신호가 발생하도록 구성된다.

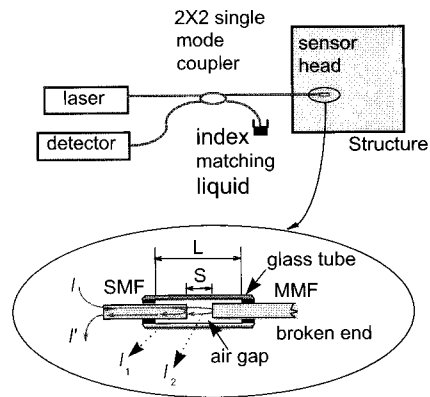


Fig. 3 Fiber optic extrinsic Fabry-Perot sensor

### 2.2. 광섬유 브래그-그레이팅 센서

최근 들어 센서로서 photo refractive Bragg gratings의 이용에 관심이 크게 증대되고 있다. 이 센서는 측정 영역에 대해 비교적 낮은 비용으로 다양한 센서를 구성할 수 있는 장점이 있다. 브래그-그

레이팅은 UV 레이저 광원에 의한 에너지 펄스로 광섬유 측면을 쪼임에 의하여 광섬유 코어 안에 생긴 주기적인 굴절률 차이가 있는 영역을 말한다. 이 브래그 그레이팅 영역은 광섬유 내부를 통과하는 빛에서 일정한 파장대역의 빛만을 반사하는 특성을 갖고 있다. 그런데 이 브래그-그레이팅 영역이 변형을 받게 되면 그레이팅 간격이 변하게 되고 반사되는 빛의 파장영역도 변형량에 비례하여 이동하게 된다. 따라서 반사된 빛의 파장이나 파장의 이동량( $\Delta\lambda$ )을 측정하면 변형량을 알 수 있게 되는 것이다.(Fig. 4)

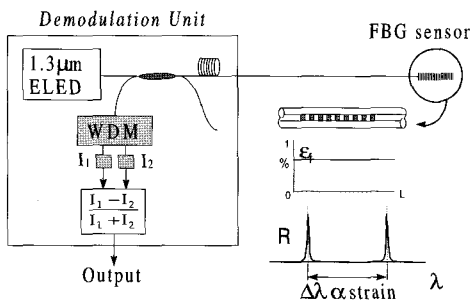


Fig. 4 Fiber optic Bragg grating sensor

2.3. 광섬유 편광 센서

광섬유 내부를 진행하는 빛의 편광을 이용한 센서는 편광유지 광섬유를 사용하여 구성된다. 편광유지 광섬유는 빛의 진행이 빠른 축과 느린 축이 존재하는 광섬유이다. 따라서 광섬유에 입사되는 빛의 편광은 빠른 축과 느린 축을 각각 x, y 축이라고 하면 각각에 대하여 그 성분이 존재하도록 45도 정도의 편광각을 주어 광섬유에 입사를 시키면 광섬유를 진행하는 빛은 Fig. 5와 같이 광섬유 단면의 x, y 축 성분이 존재하면서 진행하게 된다. 그렇지만 이 두 성분의 빛은 약간의 파장 차이 발생으로 인하여 광섬유 길이 방향으로 위상이 맞추어지는 경우와 맞추어지지 않는 경우가 생긴다. 광섬유의 다른 끝단에서 편광판을 통과시킨 후의 빛을 보면

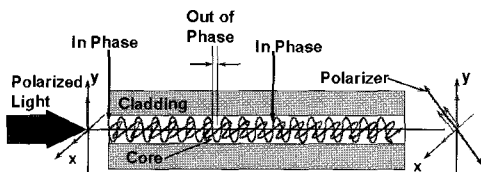


Fig. 5 Fiber optic polarization sensor

외란이 광섬유에 작용한 이후에 광섬유의 길이, 굴절률 또는 편광축이 변화하게 되면 편광판 통과 이후의 빛의 세기가 변화하게 될 것이다. 따라서 외란의 변화와 이 광세기의 관계로부터 외부의 영향을 측정 또는 감지하게 된다.

2.4. 광섬유 사낙(Sagnac) 센서

Fig. 6과 같이 광원인 레이저 다이오드의 빛이 광섬유에 입사된 이후에 첫 번째 광섬유 연계기를 지나면서 두 갈래의 빛 즉 시계 방향(CW)으로 흐르는 빛과 반시계 방향(CCW)으로 흐르는 빛으로 나뉘게 된다. 이 두 빛은 각각 후단으로 가면서 두 번째 광섬유 연계기를 지나게 되고 콜리메이터를 통과한 이후에 측정하고자 하는 물체의 표면에서 반사된 이후에 첫 번째 광섬유 연계기에서 두 빛이 만나면서 위상 간섭을 일으키게 되는 현상을 이용하게 된다. 따라서 외부 물체의 표면 변위가 파장보다 상당히 작을 때 유효하게 측정할 수 있게 된다. 주로 초음파 및 음향 방출 등에 의한 물체 표면의 탄성 측정에 사용된다.

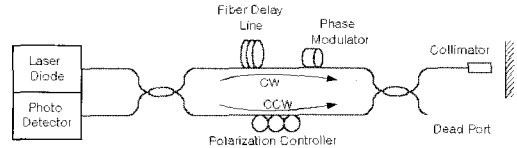


Fig. 6 Fiber optic Sagnac interferometric sensor

2.5. 광섬유 브릴루앙(Brillouin) 산란 OTDR 센서

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.

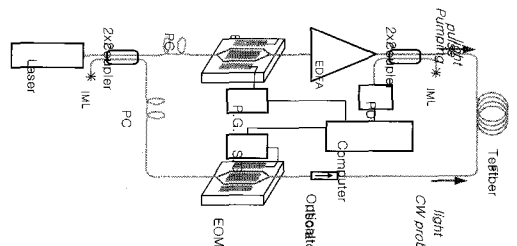


Fig. 7 Fiber optic Brillouin scattering OTDR sensor

Fig. 7과 같이 피 측정 광섬유의 양단에서 펄핑 펄스(pulse) 광과 CW 프로브(probe) 광을 배치하여 광섬유에 광을 입사시킬 때, 펄핑 펄스 광의 광주파수를  $\nu_p$ , CW 프로브 광의 광주파수를  $\nu_{cw}$ 라 하면 두 광원의 주파수차는  $\Delta\nu = \nu_p - \nu_{cw}$ 가 된다. 두 광원의 광 주파수차  $\Delta\nu$ 를 피 측정 광섬유의 브릴루앙 주파수 시프트  $\nu_b$ 와 일치하도록 광원의 광 주파수를 조정하면 펄핑 펄스 광은 유도 브릴루앙 산란에 의해 CW 프로브 광으로 광 에너지 변환을 하며, 이에 따라 CW 프로브 광은 피 측정 광섬유 내에서 브릴루앙 광 증폭을 하게 된다. 이렇게 함으로써 브릴루앙 신호의 해석이 용이하게 된다. 증폭된 CW 프로브 광 신호는 광 검출기에 의해서 전기신호로 변환되며 이 전기신호는 두 광원의 주파수 차 및 시간에 따라서 Fig. 8과 같은 특성을 갖는다. Fig.8은 일반적인 단일모드 광섬유에 대하여 펄핑 펄스 광의 펄스폭은 30 ns에 대하여 이론적인 수식에 의하여 얻어진 브릴루앙 스펙트럼 그래프이다. 펄핑 펄스 광과 CW 프로브 광사이의 주파수차  $\Delta\nu = \nu_b$ 일 때 수신 신호는 최대가 되므로 Fig. 8에서 주파수 축에서 최대 출력을 얻는 곳이 브릴루앙 고유 주파수 천이를 가질 때의 신호출력임을 보이고 있다. 이러한 브릴루앙 고유 주파수 천이값은 변형률 또는 온도 변화와 비례하여 변화하므로 센서로 사용이 가능하다.

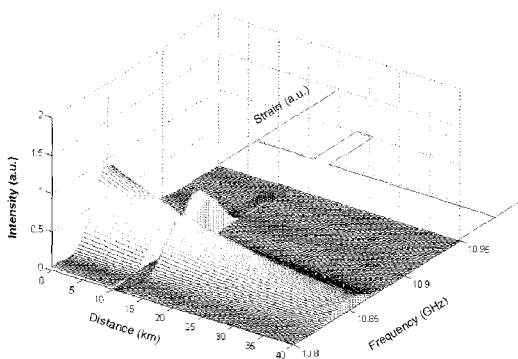


Fig. 8 Relation between strain and Brillouin frequency shift

2.6. 광섬유 라만 산란 OTDR 센서

광섬유 내부를 진행하는 빛의 후방 산란광 중에는 입사광의 주파수와 약 10 THz 정도의 차이를 두고 Anti-Stokes 광과 Stokes 광이 존재하게 된다. 이 산

란광은 레일리 산란광 또는 브릴루앙 산란광보다 훨씬 작은 세기를 갖는데 광섬유에 가해지는 온도 변화에 따라서 Stokes 광과 Anti-Stokes 광사이의 비 R(T)가 변화한다. 이러한 관계를 이용하여 분포 온도 측정을 위한 센서로 사용하게 된다.(Fig. 9)

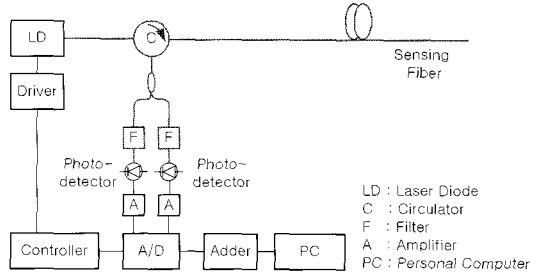


Fig. 9 Fiber optic Raman scattering OTDR sensor

3. 구조 모니터링 응용 사례

광섬유 센서에 의한 구조 안전 모니터링을 위한 여러 사례가 있으나 대표적인 예로 토목 구조물과 항공기 복합재 구조물 응용 예에 대하여 간단하게 소개한다. 스마트 토목 구조물의 모니터링을 위한 광섬유 센서의 응용은 2가지장점을 이용하는 경우가 많다. 첫째로는 매우 넓은 영역에서 집적된 감지 가능성을 갖고 있는 것이 매우 큰 장점이다. 둘째로는 광섬유라는 전파 매체가 극히 작은 손실 특성을 갖고 있어서 별다른 증폭 장치 없이 신호 처리 전기 장치를 먼 거리에 둘 수 있게 하는 것이다.

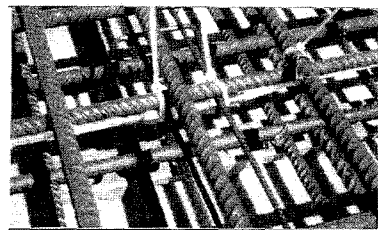
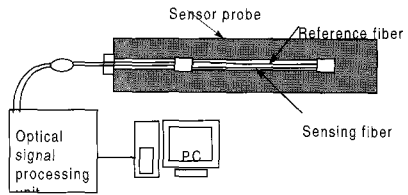


Fig. 10 Application examples of fiber optic sensors: (a) Probe for embedding in concrete (b) Embedding of fiber optic probe

Fig. 10은 콘크리트 토목 구조물 내부에 광섬유 센서를 삽입하기 위한 탐촉자를 제작하고 매설하기 위하여 철근 주위에 고정시키는 사진을 보이고 있다. 이와 같이 광섬유 센서는 전기적인 방법에 비하여 전자파 장애가 없고 증폭 장치도 필요가 없어서 대형 구조물의 모니터링 센서로 적합하다. 또한 Fig. 11과 같이 대형 구조물에는 많은 센서가 적용되는 경우가 많은데 그 때마다 대량의 케이블 포설이 많은 비용과 노동을 필요로 한다. 그러나 분포형 물리량이 측정 가능한 광섬유 센서를 사용하면 그러한 단점을 광섬유 한 개의 라인으로 극복할 수 있다.

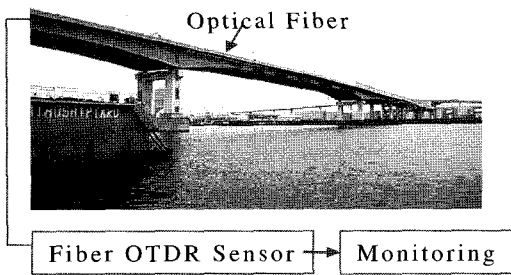


Fig. 11 Measurement of large bridge by fiber optic distributed sensor

광섬유 센서는 작기 때문에 항공기용 복합재 구조물의 구조 특성 변화 없이 구조물에 삽입할 수 있어서 구조물의 집적된 안전 감시를 할 수 있다. 집적된 광섬유 센서는 Fig. 12와 같이 복합재 제작 중에 내부에 삽입되고 외부의 적용은 복합재 구조물 제작 후 외부에 부착하게 된다. 항공기 사용중에 발생하는 외부로부터의 충격이나 과대 하중에 의한 구조 상태를 조종사에게 안내하여 실시간으로 대처할 수 있도록 한다.

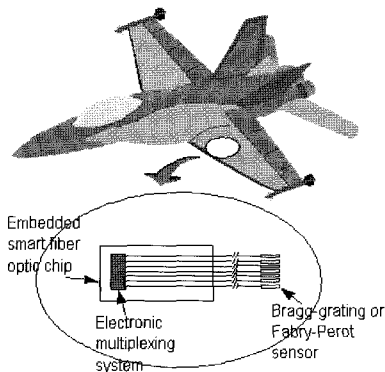


Fig. 12 Health monitoring of aircraft structures by fiber optic sensors

#### 4. 스마트 광섬유 센서의 전망 및 향후 과제

광섬유는 광 통신 선로로 그 사용이 나날이 증가되고 있으며 그에 따라 부품 가격도 저렴해지고 있는 추세이다. 광섬유 케이블이 각 가정으로 연결될 날도 가까운 시일 내에 실현될 것으로 전망된다. 이에 따라 광섬유 센서는 대형 구조물인 항공기를 비롯하여 교량, 터널, 빌딩뿐만 아니라 각 가정의 자동화(home automation)를 위한 센서로 사용될 가능성이 커져 광섬유 센서 시장도 대단히 커질 것으로 전망된다. 광섬유 센서 원리에 대한 많은 기본적인 연구를 전기, 전자 또는 물리학과에서 진행시켰으나 이러한 센서 원리를 구조 안전 진단뿐만 아니라 대형 기계 분야에 응용할 수 있도록 적합하게 보완하는 연구가 향후 필요하다. 광섬유 센서에 의한 구조 모니터링 연구는 그동안 구조물 안에 여러 형태의 광섬유 센서를 삽입하는 연구가 수행되어 왔으나 이러한 연구는 실험실에서 감지 가능성을 보이기 위한 연구가 수행되어 왔으며 실제 적용을 위한 많은 연구가 필요하다. 얇은 복합재 구조물 안에 삽입 센서의 가능성이 여러 연구 그룹들에 의하여 수행되어 왔으나 새로 개발된 시스템의 사용이 구조 공학자로부터 계속적인 반대를 받아왔다. 이것은 센서 시스템을 구조물의 일부분에 사용하기 위한 실제적인 적용 방법을 개발하는데 주의를 기울이지 않았기 때문이다. 마찬가지로 토목 구조물 적용을 위해서도 콘크리트 구조물과 강 구조물 각각에 사용할 수 있는 기법이 정립되지 않았기 때문에 아직은 실제 적용이 어려운 실정이다. 따라서 향후 광섬유 센서에 의한 구조 안전 진단 기술을 실용화하기 위해서는 광섬유 센서 기본 기술의 개발뿐만 아니라 매설용 탐촉자의 개발, 부착용 탐촉자의 개발, 탐촉자로부터 광전 시스템 본체까지의 광섬유 케이블 연결, 센서 어레이 구성, 구조물 보수 후의 센서 사용 가능성 등의 문제가 해결되어야 할 것이다.