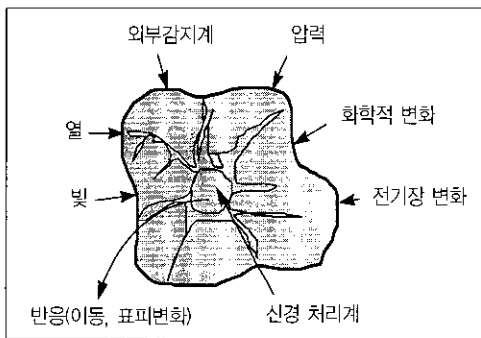


광기술을 이용한 스마트 구조설계

이 글에서는 스마트 광섬유 센서의 개요를 설명하고, 광섬유 센서에 의한 구조안전모니터링의 응용 사례와 스마트 광섬유 센서의 전망 및 향후 과제에 대해 소개한다. **홍창선**

과학기술이 급속히 발전하면서 정보화 기술은 우리의 생활 패턴을 많이 바꾸어 놓고 있다. 이러한 기술의 발전은 인간생활뿐 아니라 생명이 없는 기계구조물도 생명체처럼 느끼고 말할 수 있도록 하는 기술로 발전하고 있다. 이른바 스마트 테크놀러지라는 것이 앞으로 우리 생활과 밀접한 여

러가지 구조물에 적용되는 날이 멀지 않았다. 사람은 다치거나 어디가 아프면 진찰을 받고 처방을 하여 생명을 연장하기도 하나, 일반 구조물은 사용 중에 손상을 입거나 균열이 가도 알 수가 없으므로 완전히 파괴되어 재난과 큰 인명 손실을 입게 된다. 우리나라에서도 교량 및 건물 붕괴와 같은 대형 토목 구조물의 붕괴사고가 발생함에 따라 구조물의 안전성 확보를 위한 실시간 모니터링의 필요성이 증대하고 있다. 이러한 구조물에 생명체처럼 감지하고 말할 수 있는 센서를 신경망처럼



스마트 구조물과 유사한 단세포 동물의 특성

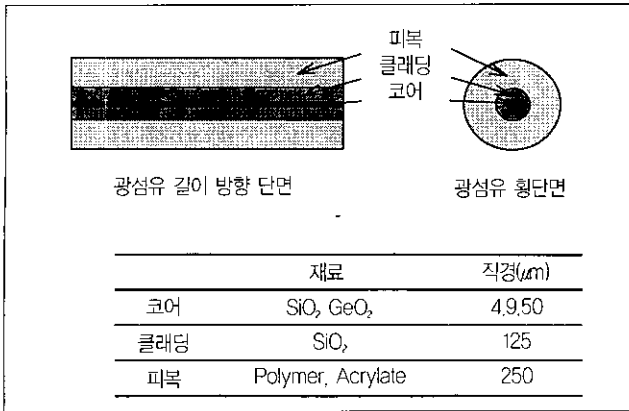
삼입하거나 부착하여 스마트 구조를 제작한다. 스마트 구조는 과도한 하중을 받거나 균열이 발생하여 위험한 수준에 이를 때 사전에 경고하도록 하여 사고를 미리 예방할 수 있게 한다.

구조물의 안전진단을 위해서 구조물과 센서를 일체형으로 제작하여 구조물의 각 부분의 이상 상태를 검출할 수 있도록 하는 스마트 구조 기술(smart structure technology)의 사용이 요구된다. 이러한 기술은 대형 구조물이나 항공기, 원자력 발전소와 같이 한번 사고로 큰 재난을 입게 되는

구조물에 특히 매력적이다. 스마트 구조물은 그림과 같이 단세포 동물이 외부의 환경 변화(압력, 빛, 온도, 전기장 등)를 센서로 감지하고 신호처리를 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.

특히 항공기를 비롯하여 토목 구조물과 같은 대형 구조물에 사용해 온 전통적인 비파괴 검사 방법을 보완하기 위해서 광섬유 센서에 의하여 실시간으로 구조물의 건전성을 감시하도록 하는 연구가 국내외에서 활발히 진행 중이다. 광섬유 센서 기술은 여러가지 장점을 갖고 있어 스마트 구조 기술에의 적용이 기대되고 있다. 광섬유는 전자기 간섭을 받지 않으며, 온도, 압력, 전기장의 강도, 자기장의 강도, 응력, 변형률, 성

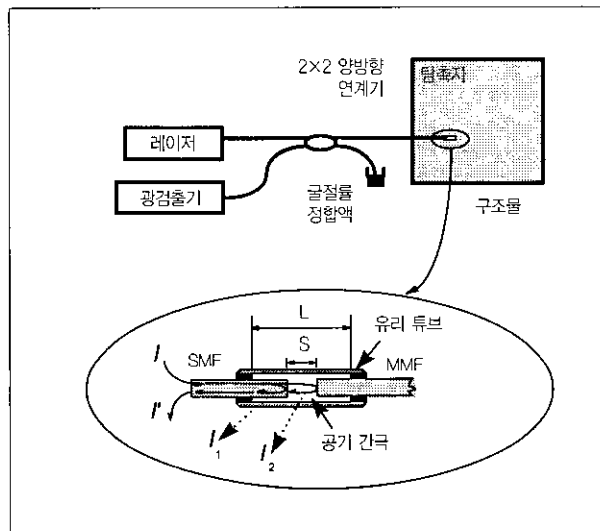


광섬유의 구조

형 상태 등을 감지할 수 있게 제작할 수 있어서 스마트 구조물 개발 용으로 많은 주목을 받고 있다. 또한 광섬유는 미세한 특성에 따라 복합재료 구조를 성형시에 삽입하기 용이하다. 이 센서들은 단일점 감지뿐만 아니라 여러 물리량을 동시에 측정할 수도 있다. 또한, 측정하고자 하는 여러 지점의 정보를 한 가닥의 광섬유로 신호를 받을 수 있다. 우리는 광통신의 발달로 하나의 광섬유에 수많은 사람들의 통화 내용이 빠르게 전달되는 것을 알고 있다. 우리나라는 광통신을 위해서 광섬유를 생산하고 있으며, 이러한 광섬유를 이용하여 센서를 만들면 부가가치는 엄청나게 높아진다. 이와 같이 광기술을 확장하여 광센서를 구조물에 적용하면 구조물이 생명체처럼 느끼고 위험상태가 감지되면 사전에 경고신호를 보낼 수 있게 된다.

현재 광섬유 센서 형태 중 패브리-페로 센서(Fabry-Perot

가장 주목받고 있는 센서이다. 진정한 분포된 시스템의 선택사항이 제한된 범위 내에서 제안되고 조사되었지만, 세 가지 센서 형태를 벗어나지 않는다. 패브리-페로와 브래그 그레이팅 센서는 단일점 센서로 제작할 수 있고 여러 광학적 다중화 기법의 적용이 가능하여 준-분포된 시스템 구성이 가능하다. 중간 정도 게이지 길이의 변형을 감지는 이 두 형태의 센서로 감지가 가능하다. 기본적으로 광섬유 센서는 스마트 구조 적용 영역에서 필요한 모든 파라



패브리-페로 간섭센서

sensor), 브래그 그레이팅 센서(Bragg Grating sensor), 긴 게이지 길이 센서 등 세 가지가

미터를 감지할 수 있도록 제작이 가능하다.

스마트 광섬유 센서

스마트 광섬유 센서를 위한 광섬유의 구조는 일반적으로 그림과 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. 빛은 광섬유의 코어 부분으로 전파하게 되는데 광손실 없이 가장 효율적으로 전파되도록 하려면 코어 부분으로부터 클래딩 부분으로 전반사가 이루어지면서 전파되도록 하여야 광 손실이 가장 적게 된다. 빛은 굴절률이 높은 데서 낮은 데로 전파되어야 전반사가 발생하므로 단일모드 광섬유의 경우 광섬유 코어의 굴절률이 클래딩의 굴절률보다 약 0.1%에서 0.2% 정도 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 여러가지가 있으나, 구조 안전 모니터링을

위하여 많이 개발되고 있는 형태인 광섬유 외부 패브리-페로 간섭 센서, 광섬유 브래그-그레이팅 센서 및 긴 게이지 길이 광섬유 센서의 원리는 다음과 같다.

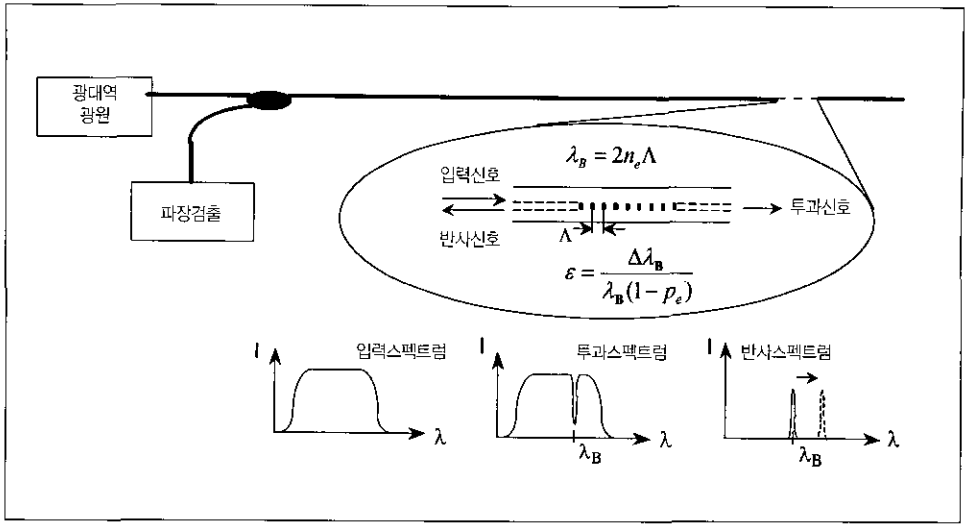
광섬유 외부 패브리-페로 간섭 센서는 광섬유에 입사된 빛이 패브리-페로

탐촉자 끝단에서 입사광 I 의 약 4%인 I_1 이 반사되도록 하고, 나머지 약 96%는 광섬유를 빠져 나와 공기 간극(air gap)을 통과하여 다른 쪽 끝단의 광섬유 단면에서 다시 4%가 I_2 로 반사되도록 하여 이 반사된 두 빛 I_1, I_2 가 입사된 쪽으로 되돌아 나가면서 광섬유 연계기에서 만나서 서로 위상 간섭을 일으켜 공기 간극의 변형량 즉 두 광경로의 변화 발생량만큼 위상차가 발생하도록 하여 정현파의 광출력 신호가 발생하도록 구성된다. 변형률이나 음향신호를 취득하여 파손검출도 실시간으로 모니터링할 수 있다.

최근 광센서로서 브래그-그레이팅(Bragg gratings)센서의 이용에 관심이 크게 증대되고 있다. 이 센서는 측정 영역에 대해 비교적 낮은 비용으로 다양한 센서를 구성할 수 있는 장점이 있다. 브래그-그레이팅은 UV 레이저 광원에 의한 에너지 펄스로 광섬유 측면을 조임에 의하여 광섬유 코어 안에 생긴 주기적인 굴절률 차이가 있는 영역을 말한다. 이 브

래그 그레이팅 영역은 광섬유 내부를 통과하는 빛에서 일정한 파장대역의 빛만을 반사하는 특성을 갖고 있다. 그런데 이 브래그-그레이팅 영역이 변형을 받게 되면 이 반사되는 빛의 파장영역이 변형량에 비례하여 이동하게 된다. 따라서 이 파장의 이동량을 측정하면 변형량을 알 수 있게 되는 것이다. 파장이 다른 여러 센서를 한 개의 라인상에 구성할 수 있는 장점이 있어 여러 지점의 변형상태를 측정해야 하는 대형구조물에 적용하는 데 매력적이다.

광섬유 센서의 게이지 길이가 비교적 길게 하여 그림과 같이 구조물의 분포된 특성을 감지하게 하는 센서가 있다. 이 센서는 구현하는 원리에 따라 파장분할형(wavelength division type), 시간분할형(time division type) 또는 반사광 손실형(reflected light loss type) 등 여러 형태가 있다. 이 센서는 변형률 분해능은 떨어지나 넓은 영역에 걸쳐 외부 조건 및 구조 내부의 손상 등을 검출할 수 있는 장점을 가지고 있다.

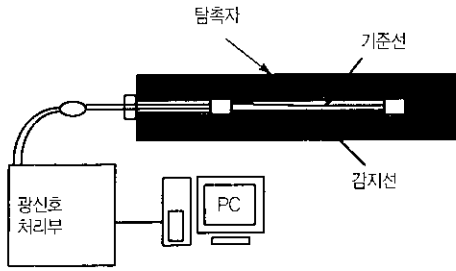


Bragg grating 센서 개념

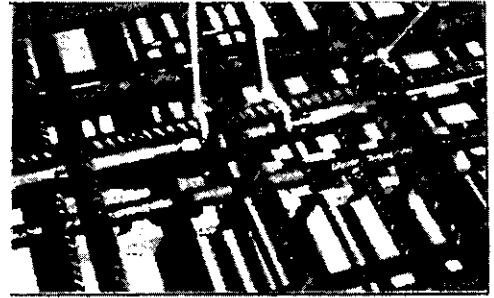
구조 모니터링 응용 사례

광섬유 센서에 의한 구조 안전 모니터링을 위한 여러 사례가 있으나, 대표적인 예로 대형구조물과 항공기 복합재 구조물 응용에 대하여 간단하게 소개한다. 스마트 대형 구조물의 모니터링을 위한 광섬유 센서의 응용은 두 가지 장점을 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.

콘크리트 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 필요 없어서 대형 구조물의 모니터링 센서로 적합하다.



(a) 콘크리트 내부로 매설하기 위한 광섬유 센서의 탐촉자 제작



(b) 광섬유 센서 탐촉자의 매설

광섬유 센서의 건축구조물 응용 예

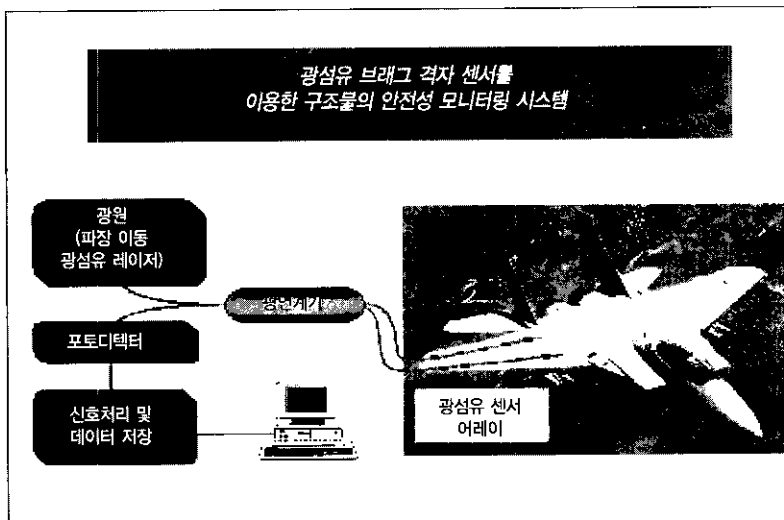
광섬유 센서는 작기 때문에 항공기용 복합재 구조물의 구조 특성 변화 없이 구조물에 삽입할 수 있어서 구조물의 집적된 안전 감시를 할 수 있다. 집적된 광섬유 센서는 그림과 같이 복합재 제작 중에 내부에 삽입되고 외부의 적용은 복합재 구조물 제작 후 외부에 부착하게 된다. 항공기 사용 중에 발생하는 외부로부터의 충격이나 과대 하중에 의한 구조 상태를 조종사에게 안내하여 실시간으로 대처할 수 있도록 한다.

스마트 광섬유 센서의 전망 및 향후 과제

광섬유는 광통신의 대중화로 그 사용이 나날이 증가하고 있으며, 그에 따라 부품 가격도 저렴해지고 있는 추세이다. 따라서 광섬유 센서는 대형 구조물인 항공기를 비롯하여 교량, 터널, 빌딩뿐만 아니라 각 가정의 자동화(home automation)를 위한 센서로 사용될 가능성이 커서 광섬유 센서 시장도 대단히 커질 것으로 전망된다. 광섬유 센서 원리에 대한 많은

기본적인 연구를 전자 또는 물리학 분야에서 진행시켰으나, 이러한 센서 원리를 구조의 안전진단뿐만 아니라 대형기계 분야에 응용할 수 있도록 적합하게 보완하는 기계, 토목, 항공우주분야 등과의 학제적 연구가 향후 필요하다.

광섬유 센서에 의한 구조 모니터링 연구는 그 동안 구조물 안에 여러 형태의 광섬유 센서를 삽입하는 연구가 수행되어 왔다. 이러한 연구는 실험실에서 감지 가능성을 보이기 위한 기초연구로서 수행되어 왔으며, 실제 적용을 위한 많은 연구가 필요하다. 아직 실용화가 부진한 것은 센서 시스템을 구조물의 일부분에 사용하기 위한 실제적인 적용 방법을 개발하기 위하여 광섬유센서 전문가와 사용자측인 기계분야나 건설분야와의 엔지니어와의 교류가 부족하고 실용화를 위한 주의를 기울이지 않았기 때문이다. 따라서 향후 광섬유 센서에 의한 구조 안전 진단 기술을 실용화하기 위해서는 광섬유센서 개발자와 구조 엔지니어와의 기술교류가 좀더 활발해야 한다.



광섬유 센서의 항공기 구조 안전 모니터링 응용 예