

광섬유 센서의 현황

예 윤 해

경희대학교 전자공학과, 레이저 공학연구소

20세기에 등장한 컴퓨터는 디지털 혁명이라고 부르는 정보시대를 열었으며, 초기 정보시대로서 컴퓨터 시대가 경험하고 있는 가장 두드러진 변화는 과거 기계가 맨 처음 의도되었던 기능 이외의 용도로 사용될 수 없었던데 반해 컴퓨터를 두뇌로 가진 현대의 기계는 프로그램의 수정을 통하여 다양한 기능을 수행할 수 있게 되었다는 점이다. 예를 들어 종래의 TV는 오로지 시청하는 기능밖에 할 수 없었으나 현대의 컴퓨터는 본래의 기능뿐만 아니라 CD 재생기, TV, 팩시밀리, 비디오 전화 등 다양한 기능을 수행하도록 만들어져 있으며, 이러한 기능의 복합화는 지금도 계속되고 있다. 따라서 정보시대에는 단순기능의 기계를 대량으로 사용하기보다는 소수의 복합기능 기계로서 대신하게 될 것이며, 기계에 비해 정보 또는 소프트웨어가 차지하는 역할이 더욱 커질 것이다. 또한 정보의 생산, 관리 및 유통에 관련된 산업이 중심 산업으로 부상할 것이며, 이를 위해서는 주문형 비디오, 행정 데이터 서비스 등과 같은 통상적인 정보 외에도 실시간 교통정보, 환경/재해 관리 등과 같은 고급 정보 서비스를 제공하기 위해 대량의 정보를 경제적인 비용으로 생산할 수 있는 정보생산 장치, 대량의 정보를 저장할 수 있는 기억장치, 그리고 이들 정보를 고속으로 유통시킬 수 있는 초고속 통신망과 이들의 운용을 위한 소프트웨어가 중요한 위치를 점할 것으로 예상된다. 대량의 정보를 고속으로 유통시킬 수 있는 통신망으로는 이미 레이저와 광섬유로 구성된 초고속 광통신 시스템이 그 위치를 확고히 점하고 있으며, 정보저장 시스템 또한 광기록 장치가 현재로서는 유일한 대안으로 인식되고 있다.

대량의 정보를 경제적인 비용으로 생산하기 위한 정보생산 장치로서의 센서는 개별센서의 특성뿐만 아니라 다수의 센서가 결합된 형태로서의 센서시스템의 성능과 경제성이 고려되어야 하며, 이러한 관점에서 볼 때 광섬유 센서는 센서부에서 전원을 필요로 하지 않으며, 한 가닥 광섬유의 길이방향을 쫓아 다수의 센서를 연결할 수 있는 다중화 능력과 광통신 시스템과의 양립성 등이 우수하므로 정보시대에서의 정보생산장치로서 주요한 위치를 점할 것으로 예상된다. 또한 이들 광섬유 센서는 단순한 정보생산도구로서의 역할뿐만 아니라 스마트 구조물을 위한 센서로의 채택가능성 또한 가장 높게 점쳐지고 있다.

스마트 구조물이란 구조물 스스로가 환경을 느끼고, 데이터 해석과 의사결정을 행하며, 환경의 변화에 반응하도록 구성된 것을 말하며, 이를 위해서는 다수의 센서로 구성된 센서네트워크, 프로세서, 액츄에이터를 구비해야 한다. 이러한 구성소자들은 근년에 들어 실용화되었으나 스마트 구조물이 일반화되기 위해서는 아직 센서와 계측기술, 프로세서와 액츄에이터의 소형화 및 성능개선 등에 더 많은 연구노력이 있어야 한다.

스마트 구조물에서의 센서는 구조물의 온도, 변형, 형상, 힘, 진동, 부식, 기계적 손상 등을 측정하게 되나 이중 가장 필수적인 양으로는 온도와 스트레인을 들 수 있다. 이러한 목적으로 현재까지 주로 연구되어온 센서는 전기적인 센서로서 써미스터와 스트레인 게이지를 들 수 있으나 이 경우 센서에서의 감지정보를 판독하기 위해서 센서당 최소 2가닥의 전선을 필요로 한다. 이들 전선은 구조물 자체의 강도에 나쁜 영향을 미치며, 전선이

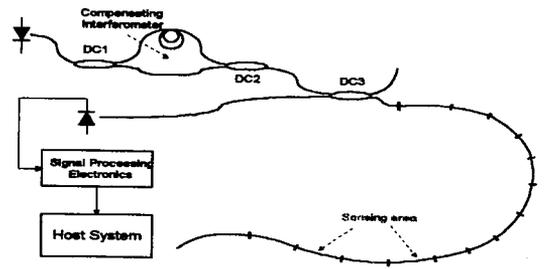
갖는 저항과 전원에 의한 자기가열효과(self-heating effect)는 대형 구조물에서 센서와 프로세서간 연결선의 저항값 증가를 통하여 측정오차의 급격한 증가를 초래한다. 따라서 대형 구조물의 스마트화를 위해 전기적 센서를 채택하는 것으로 가정할 때 센서네트워크를 구성하는 센서의 수에 따른 전선의 수와 직경 및 길이의 증가는 센서를 외부 부착형으로밖에 사용할 수 없다는 제약이 가해지며, 그 복잡성 때문에 유지보수 또한 사실상 불가능하게 된다.

광섬유 센서에 대한 연구는 1970년 코닝이 개발한 저손실 광섬유로 실현된 광통신의 연구와 보조를 같이해 왔으며, 소형으로 초정밀 광대역 측정이 가능하고, 전자파의 영향을 받지 않으며, 광섬유의 손실이 작기 때문에 원격측정이 용이하고, 센서부에서 전기를 사용하지 않으므로 폭발 위험성이 높은 환경에서도 사용할 수 있으며, 광섬유의 재질인 실리카의 뛰어난 내부식성을 이용함으로써 사용환경에 대한 제약이 없다는 장점이 있다. 이외에도 분포계측이 가능하며, 100 um정도인 광섬유의 작은 직경과 광섬유의 재료인 실리카의 뛰어난 강도는 콘크리트 또는 복합재 구조물의 제작과정에서 구조물의 강도에 영향을 주지 않고 구조물 내에 심는(embedding) 것이 가능하며, 따라서 부하효과 없이 가장 정확한 측정 데이터를 제공할 수 있다. 그러나 이들 광섬유 센서는 기본적으로 광섬유가 부착된 레이저 다이오드와 광검출기를 필요로 하기 때문에 광섬유센서 시스템의 가격은 일반적으로 사용되는 전기적인 센서에 비해 월등히 비싸며, 이들 센서기술의 역사가 짧기 때문에 충분히 검증되지 않은 신생기술이라는 단점도 갖고 있다.

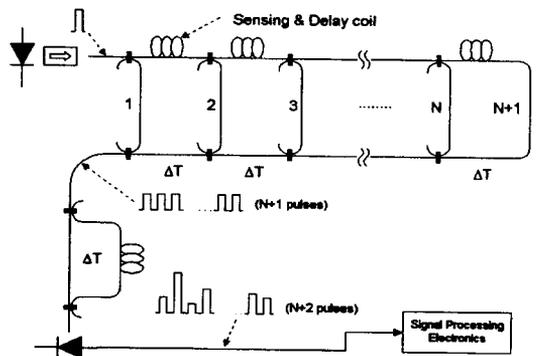
위에서 지적된 바와 같이 기존의 센서에 대비한 여러 단점에도 불구하고 광섬유 센서가 계속적인 관심을 받고있는 이유로는 광섬유 센서가 갖는 뛰어난 embedding 능력과 다중화 능력, 그리고 기존의 센서가 제공해 주지 못하고 있는 특성의 보유, 그리고 고가임에도 불구하고 기존의 센서에 대해 가격 경쟁력을 갖는 가스 및 전력분야 등에서 응용이 있으며, 또한 광섬유 센서가 정보시대에서 가장 경쟁력을 갖춘 정보생산 장치로 예상되기

때문이다. 그러나 아직까지는 응용분야의 제한 때문에 이들 기술의 상용화가 극히 제한적으로 진행되어 광섬유 센서의 향후 정보생산장치로서의 우월성을 보여줄 수 있는 단적인 적용례는 흔하지 않다. 아래에서는 정보시대에서의 정보생산장치로서 가장 중요하다고 생각되는 다중화능력을 중심으로 광섬유 센서의 기술을 개략적으로 소개하였다.

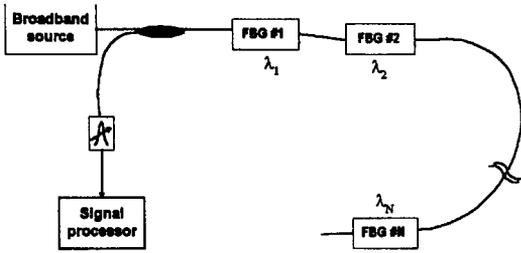
다중화 센서, FBG 센서, 그리고 분포계측용 센서는 광섬유 센서를 여타 종류의 센서와 구분 짓는 특적인 다중화의 방법에 따라 센서를 분류한 것으로서 다중화 광섬유 센서는 Fig. 1(a) 또는 Fig. 1(b)와 같이 광섬유의 길이방향을 따라 간섭계로 구성된 다수의 센서가 연결된 센서어레이를 말하며, FBG (fiber Bragg grating) 센서는 강한 자외선을 이용하여 광섬유 코어에 회절격자를 새겨 넣어 만든 광섬유 Bragg 회절격자를 Fig. 1(c)



(a) An example of multiplexed sensor arra (Fabry-Perot type)



(b) An example of multiplexed sensor arra (Mach-Zehnder type.)



(c) FBG sensor array.

(Fig. 1) Examples of multiplexed sensor array.

에서와 같이 광섬유의 길이방향을 따라 직렬로 배치한 센서어레이를 말한다. 다중화 센서와 FBG 센서는 분포형 센서에 비해 측정점의 위치가 고정된 준분포형 센서인데 반해 분포계측형 광섬유 센서는 수 km에 이르는 광섬유의 모든 지점이 측정점이 될 수 있도록 구성된 센서로서 측정하고자 하는 부위에 광섬유를 설치한 다음 광섬유의 길이방향을 따라 임의의 지점을 선택하여 해당부위에서의 물리량을 측정할 수 있는 센서형으로 개념적으로는 가장 발전된 형태의 센서이다.

아래에서는 향후 적용을 목표로 집중 연구되고 있는 사례를 통하여 광섬유 센서의 현황과 가능성을 살펴보고, 마지막으로 국내에서의 연구활동을 소개하고자 한다.

항공시스템에 광기술이 사용되어온 역사는 꽤 깊으며, 최근 들어서 이 기술의 채용패턴이 과거와는 달리 대담해지고 있다. 이는 새로운 기술의 채용에 대해 지극히 보수적인 항공기 산업분야에서 채용할 정도로 광섬유 관련 기술이 발전되었을 뿐만 아니라 가벼우면서도 뛰어난 정보 수송능력, 항공기의 운항조건과 같은 열악한 주변환경에서도 문제없이 사용될 수 있다는 점 등등이 항공기 메이커들을 유혹하고 있기 때문이다. 이러한 시도의 대표적 예로 NASA와 McDonnell Douglas에서 공동으로 수행한 FOCSI (fiber-optic control system integration) 프로그램을 들 수 있으며, 이는 항공기가 비행장의 관제탑, 라디오나 TV의 송신탑, 또는 최근 들어 그 이용이 폭증하고 있는 공중 통신 등으로부터 받게되는 전자파 방해로부터

안전하면서 경제성과 효율성을 갖춘 비행기를 개발하기 위해 기존 비행기의 전자센서 및 시스템을 모두 광섬유센서 및 광섬유시스템으로 대체하기 위한 시도로서 시작되었으며, 그 결과가 1995년 이미 시험 비행의 성공으로 증명되었다. 또한 비행체에서 가장 중요한 센서 중 하나인 자이로스코프를 광섬유 센서화한 광섬유 자이로스코프(FOG)도 미국의 Honeywell, Litton, Allied Signals, 일본의 JAE, Hitachi Cable, 그리고 유럽의 Photonetics 등에 의해 관련기술이 개발 완료되었고, 상용화된 FOG가 보잉사의 B-777에 탑재되어 운행중이며, 일본 Nissan자동차의 경우 차량항법장치를 위해 Hitachi사로부터 월 3천 개의 FOG를 사들이고 있다. FOG는 미국의 경우 군사용을 중심으로, 일본의 경우에는 주로 자동차를 위시한 상용목적의 이동체 적용을 위해 연구 개발되어 왔으며, 일본 Hitachi의 경우 이미 7만개 이상을 보급한 것으로 알려져 있다.

최근 도로교통의 중추적인 역할을 담당하고 있는 자동차의 지능화와 함께 도로교통 및 교통정보통신망의 첨단화도 함께 진행되고 있다. 미국에서 지능형 운송시스템의 개발을 담당하고 있는 ITS America는 ITS를 위한 개발투자비가 1992년부터 20년 동안 350억 달러에 이를 것으로 추산하고 있으며, 미국 이외에도 일본, 유럽, 대만 등 세계각국에서 ITS(Intelligent Transportation System) 개발을 위해 많은 연구비와 인력을 투입하고 있다. ITS는 현재 자동차를 중심으로 하는 도로교통이 제공하는 부정적인 측면으로서의 교통사고, 환경 파괴 등에 대한 대책으로 등장하게 될 시스템으로 지능화된 도로와 지능화된 자동차, 자동차와 자동차, 그리고 자동차와 도로를 통신으로 연결하는 것을 기본으로 하며, 자동차 항법시스템/자동운전/안전 유지 등의 운송시스템 자체에 대한 기능의 보완과 도로 및 교통의 관리, 물류관리 등을 포함하는 새로운 도로 교통시스템을 의미한다. 이를 위해서는 컴퓨터 기술을 포함한 전자기술 뿐만 아니라 광학기술 등 첨단 기술이 집중적으로 동원되어야 한다. ITS에서 응용이 예상되어 현재 개발되었거나 개발중인 센서로는 속도 제어와 차선 유지

등과 같은 자동차용 센서, 과적 차량 단속, 교통체증, 차량 속도 등과 같은 교통상황 점검용 센서, 그리고 교량 및 노면상태의 검사와 같은 도로관리용 센서를 들 수 있다. 이들 센서들은 구미 각국에서 많이 연구 발표되고 있으며, 다중화 능력과 embedding능력을 가진 광섬유센서가 ITS용 센서 분야에서도 기술적 우위를 점할 것으로 예상된다.

군사: FOG는 일반 항공기뿐만 아니라 미사일을 포함한 각종 군사용 무기 또는 군사장비의 핵심 부품으로서 주로 개별소자 형태로 사용되며, 예열 시간, 전력소비, 수명, 크기 등에서 종래의 기계식 자이로스코프에 비해 우수하기 때문에 많은 연구 노력을 집중하여 개발을 완료하였다. 그러나 아직은 가격이 비싸고, 신생기술이기 때문에 널리 이용되고 있지는 못하다.

군사용을 목표로 연구개발중인 다중화 광섬유센서의 대표적인 예로는 음향센서어레이를 들 수 있다. 이는 최근 연근해역에서의 전투, 밀입국, 해상침투 등에 대한 관심이 증대됨에 따라 이 지역에서의 광역감시 및 대잠수함 응용을 목적으로 쉽게 설치하고 철거할 수 있는 고성능 센서어레이의 필요성이 대두되었으며, 바다라는 특수한 환경 하에서 압전소자를 사용하는 종래의 센서어레이가 수명, 전력소모량, 배열 센서의 수 및 센서어레이의 길이 증가에 따른 급격한 어레이 케이블의 무게증가와 이에 따른 취급상의 문제, 그리고 유지보수의 어려움 등으로 인해 실용성이 떨어지는데 반해 광섬유 음향센서어레이의 경우 전력소모량이 현저히 작고 센서에서 전기를 요하지 않기 때문에 설치 또한 아주 편리하다는 장점이 있다. 미국의 경우 1996년 미해군연구소에서 1가닥의 광섬유에 256개의 고감도 수중음향센서를 연결한 센서어레이를 개발하여 현장시험을 마쳤으며, 종래의 센서어레이에 비해 전력소모, 크기, 무게, 설치 및 철거의 편이성 측면에서 크게 뛰어난함을 확인한 것으로 보고되었다.

인프라 및 산업응용: 산업발전과 더불어 빌딩, 지하철, 철도, 교량, 송유관, 가스관, 통신 및 전력 수송구, 댐 등의 대형 구조물이 급증하고 있으나 이들 대형 구조물을 포함한 기간 구조물의 건강상

태는 관심의 대상에서 제외되었던 것이 사실이다. 그러나 세계적으로 대형 구조물의 수가 크게 늘어나면서 이와 관련된 대형 사고 또한 급증하기에 이르렀으며, 산업사회를 지탱하는 받침대 역할을 하는 이들 대형 구조물의 건강상태에 대한 관심 또한 날로 높아지고 있다. 미국의 연방고속도로협회(FHA)에 따르면 미국의 경우 약 11만개에 달하는 고속도로상 교량의 평균연령은 1995년 현재 37세에 이르며, 이들 교량은 매 2년마다 세밀히 점검되고 있다. 그러나 놀랍게도 현재 이들 교량의 약 3분의 1이 문제점을 안고 있는 것으로 밝혀졌으며, 이들의 상태가 심상치 않은 속도로 악화되고 있다고 한다. 또한 공장의 가동중단 사태를 야기하는 요인의 90% 이상이 오랜 사용에 의한 재질의 피로누적에 의한 것으로 추산되고 있다.

이들 문제에 대한 미국정부의 대책은 해당 구조물 또는 공장을 당장 철거 재건축 하는 대신 현재 구조물의 사용가능한 시간을 최대한 늘릴 수 있는 방법을 찾는 것이다. 이를 위해서는 구조물 스스로가 자신의 결모습뿐만 아니라 내부 깊숙한 곳의 건강 상태를 말할 수 있도록 하기 위한 장치를 갖추어야 하며, 이를 위해서는 이미 완성된 구조물의 경우에는 중요 지점마다 진동 또는 스트레인 센서를 부착하여 지능형 구조물로의 전환시키고, 앞으로 건설예정인 구조물을 지능형으로 설계되어야



(Fig. 2) Fiber pressure and vibration sensors are installed in a hydro-electric dam(Photonic Spectra, 1995)



(Fig. 3) DTS fiber optic sensor cable is laid on the gas cleaning vessel of a power plant(Power News, Jan., 1995).

한다. 지능형 구조물을 위한 센서로의 실현가능성이 가장 높은 해결책으로 등장하고 있는 것이 광섬유를 이용한 기술로서 이들 센서가 다중화 능력이 뛰어나고, 계측점에서 전기를 필요로 하지 않기 때문이다. Fig. 2와 3은 지능형 구조물로의 변환이 시도되고 있는 예로서 Fig. 2는 수력발전소의 댐에 광섬유 센서를 설치하고 있는 현장을 담은 사진이며, Fig. 3은 일본 히로시마 근처에 있는 발전소에서 가스세척 용기의 온도분포를 계측함으로써 발전이 중단되는 사태를 예방하고자 영국 York사의 분포계측용 광섬유 온도센서인 DTS시스템을 설치한 것을 보여주고 있다. DTS 시스템은 4km 길이의 광섬유 케이블 상에 있는 약 16000지점의 온도를 동시에 계측할 수 있으며, 온도측정 범위와 분해능은 각각 $-190^{\circ}\text{C} \sim 460^{\circ}\text{C}$, 1°C 이다.

전력산업분야는 센서측면에서 볼 때 주변환경이 가장 열악한 응용분야중의 하나로서 수십만 볼트에 이르는 고전압 환경 하에서 전압, 전류 또는 온도의 측정, 굴뚝에서의 유독가스와의 같은 화학적인량의 측정, 진동, 압력 등 다양한 종류의 변수를 측정해야 한다. 이러한 측정 환경에서의 종래의 전기적 센서가 갖는 문제점과 비용은 광섬유 센서의 절대적 우위를 쉽게 판단케 하며, 따라서 이들 응용을 위한 센서에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다. 그 중에서도 광섬유 전압센서와 전류센서는

이미 개발이 완료되어 실장시험(field test)이 10년 이상 진행중이며, 전력회사를 중심으로 연구개발이 수행되어왔다.

국내의 광섬유센서 연구는 대량생산가능 제품이거나 개발완료 및 성능확인이 완료되지 않은 분야에 대한 기술투자를 절제하는 국내 기업의 특성상 대학과 국공립 연구소를 중심으로 소규모로 진행되어 왔으며, 이마저도 최근 수년동안 정보통신 분야가 폭발적인 관심을 불러일으키면서 관련 연구 인력이 광통신분야로 선회한 까닭에 현재 위축된 상태에 처해 있다. 또한 광섬유센서를 포함한 광섬유 관련 산업 전반에 걸쳐 우리 나라가 겪고있는 가장 큰 문제는 관련 기초기술이 취약하다는 점이다. 각종 광부품(능동, 수동소자 포함) 및 소재기술 뿐만 아니라 광섬유 관련 산업 전반에 걸쳐 가장 중요한 패키징 기술은 너무나 취약한 상태에 있다. 그러나 최근 광통신 분야에 대한 폭발적인 관심은 광섬유 관련 기초기술의 개발에 대한 관심을 불러와 수동소자 및 관련 소재에 대한 연구가 전자부품기술연구소를 중심으로 몇몇 중소기업에서(한국단자공업, 도남시스템, ...) 진행되고 있으며, 능동소자 및 기타 광통신부품에 대한 연구는 삼성전자, LG전선 등의 업계에서, 그리고 패키징 기술은 앞에서 거명된 기관들과 대학에서 수행중이며, 따라서 이들 기초기술이 조만간 국내에서도 가용할 것으로 예상된다. 이들 기초기술이 확보되는 시점에서 국내의 광섬유센서 기술도 비약적인 발전을 보일 수 있을 것으로 예상되며, 현재까지 광섬유센서에 대한 연구를 수행한 적이 있거나 부분적으로나마 수행하고 있는 기관으로는 KIST, 국방과학연구소, 한국전기연구소 등의 연구소, KAIST, 경북대, 경희대, 서울대, 성균관대, 전북대, 한국해양대 등의 대학, LG 전선, 대우고등기술연구소 등의 기업이 있으며, 이들이 주로 관심을 보인 센서로는 FOG, 온도, 압력, 전압/전류, 자기장, 스트레인, 진동, 음향센서 등이다. 또 이들이 주된 연구대상으로 삼은 광섬유센서는 간섭형이었으나 최근에는 FBG형 광섬유 센서로 관심과 연구노력을 집중시키고 있다.

결론: 광통신, 광센서, 광 신호처리 등의 광학산

업은 우리 사회가 정보화 사회로 진행함에 따라 가까운 시일 안에 중요한 산업으로의 성장잠재력이 있다. 따라서 전반적인 광기술뿐만 아니라 광섬유 센서에 대한 폭넓은 관심이 요구되는 데에도 불구하고 우리는 불행히도 그러하질 못하고 있다. 현재 이 분야에 대한 국내의 기술을 아직은 연구 단계로서 이미 기술개발을 완료하고 양산단계 직전에 있는 구미와 일본에 비해 많이 뒤쳐져 있는 것이 사실이다. 그러나 현시점에서 다행인 점은 선진국에서 개발을 완료한 것은 일부에 지나지 않아서 아직은 추격이 가능하다는 점이다. 이러한 상황은 국내에서의 초고속 정보통신에 대한 폭발적인 관심과 함께 시작된 국내기업의 광통신 산업에 대한 관심이 지속적이고 장기적인 안목에 기초하여 광학부품, 광학관련 소재, 그리고 광학시스템에 대한 복합적인 연구노력으로 발전할 수 있다는 가능성을 생각할 때 비관적인 것만은 아니다. 따라서 미래의 중요기술인 광섬유센서를 포함한 광학산업을 메모리 산업에서와 같은 총체적인 성공으로 이끌어가기 위해서는 광학산업의 중요성을 모두가 인식하고 관심과 연구노력을 기울여야하며, 이를 통해서만 정보통신사업에서와 같은 허울뿐인 성공을 피해나갈 수 있을 것으로 생각한다.

저자 소개



芮潤海

1858년 8월 10일생, 1980년 2월 경북대학교 전자공학과(공학사), 1982년 2월 서울대학교 대학원 전자공학과(공학석사), 1991년 8월 Texas A&M University EE (Ph. D.), 1982년 11월~1997년 1월

금성사 중앙연구소, 1992년 3월~현재 경희대학교 전자공학과 부교수, 주관심 분야: 광섬유 광학(부품, 광섬유 센서 및 센서신호처리, 통신)