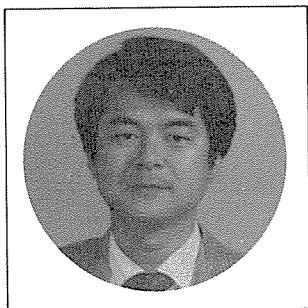


광섬유 센서의 원리 및 응용



金 炳 允

韓國과학기술원교수 · 물리학

지금은 널리 알려진 광섬유가 세인의 관심을 끌기 시작한 것은 1970년대 초반에 저손실 광섬유가 개발되면서 부터, 즉 전자 신호대신 빛을 이용한 통신이 가시화되면서 부터이다. 광섬유는 석영유리로 만들어지며 그 굵기가 약 $100\mu\text{m}$ 정도 인데, 초기의 광섬유는 소위 다중 모드 광섬유라 하여 그 대역폭이 상대적으로 작아서(약 $1\text{GH}\cdot\text{km}$ 이하), 1980년도 이후에는 거의 모든 장거리 통신용 광섬유는 소위 단일모드 광섬유(대역폭 $10\text{GH}\cdot\text{km}$ 이상)로 대체되었다.

1975년을 전후해서 개발된 단일모드 광섬유는 광통신 뿐만 아니라 또 다른 영역을 개척하는데 이용되는데 그것이 광섬유를 이용한 센서의 개발이다. 물론 여러 형태의 다중모드 광섬유를 이용한 센서들이 연구되어 왔지만, 단일모드 광섬유를 이용한 간섭계형 센서들이 개발됨으로써 그 응용범위가 급속도로 확대되었다.

근래에 와서 광섬유센서는 국가방위의 첨단장비인 자이로스코프와 수중음파탐지기 뿐만 아니라 의료진단용 센서 및 산업자동화용 센서 등에

그 활용이 증가하고 있는 추세이다.

광섬유 센서의 종류에는 여러가지가 있으며, 그 분류방법도 다양하지만, 그 기본원리는 외부에서 가해지는 신호에 의해 유도되는 빛의 여러 가지 특성변화를 측정함으로써 우리가 측정하고자 하는 외부신호를 볼 수 있게 된다. 여기에서 외부에서 가해지는 신호에는 온도, 압력, 전기장, 자기장, 회전, 전압, 전류, 화학물질의 농도, 미세이동 등 거의 모든 종류의 신호가 포함되며, 이러한 신호들이 변화를 유도할 수 있는 빛의 성질은 세기(intensity), 위상(phase), 편광(polarization), 파장(wavelength) 등이다. 외부의 신호가 빛의 성질을 변화시키는 물리적 현상들 중에는 굴절률의 변화, 편광상태의 변화, 상대론적 위상변화, 비선형현상의 변화 등이 있다. 이들 여러가지 현상들을 적절히 이용하여, 우리가 관심이 있는 물리적 양들을 측정하는 것이 광섬유 센서의 기본 원리이다.

위에 설명한 빛의 특성변화를 측정하는 방법에는 여러가지가 있는데, 우선 흔히 쓰이는 광섬유

센서의 분류방법으로 크게 두가지로 나눈다. 그 하나는 소위 “intrinsic 센서”로 이 경우에는 유리 또는 특수한 물질로 만들어진 광섬유 그 자체가 센서의 역할을 하게 되는데, 외부에서 가해진 신호가 광섬유의 빛의 전파 특성을 변화시키며 이를 측정하게 된다. 다른 하나는 소위 “extrinsic 센서”로 이 경우에 광섬유는 단지 빛을 전달하는 매체로 이용되며, 외부신호에 따른 광학적 특성 변화는 광학결정, 렌즈, 거울 편광판 등으로 형성된 광학시스템에서 일어나게 된다. 또 다른 분류방법으로 광섬유 센서를 intensity type 센서와 간섭계형(interferometric) 센서로 구분하기도 하는데, 대개의 경우 전자는 그 구조가 간단한 대신에 후자는 그 정밀도가 훨씬 높은 차이점이 있다.

어떤 종류의 광섬유 센서이든 간에, 그 기본구조는 광원, 광섬유, 감지부 및 detector로 되어 있다. 전기가 통하는 전도체가 포함되어 있지 않으므로 주변의 여러 장치에서 발생되는 전기적 잡음이 전혀 없고, 폭발위험이 있는 환경에서도 안전하게 작동할 뿐 아니라, 그 정밀도도 또한 매우 높은 장점이 있다. 특기할만한 점으로, 광섬유 센서는 원거리에서 작동할 수 있으며 또한 여러개의 센서를 동시 측정할 수 있으며 위치에 따른 물리량의 변화를 측정할 수 있는 특징을 가지고 있어서 종래의 방법으로는 불가능했던 여러 응용 분야에 활용이 되고 있는 추세이다.

■ 광섬유 센서의 종류 및 응용

광섬유 센서의 응용분야는 기존의 다른 센서를 대체하고 나아가서 새로운 분야에 적용되기 때문에 매우 넓은 분야를 확보하고 있으며 현재에도 날로 늘어가고 있다. 광섬유 센서들을 간단하게 분류하기는 쉽지 않으나 일단 크게 세가지로 분류할 수 있는데, 이들은 첫째 소위 process control을 위한 센서, 둘째 균용 센서, 셋째 biomedical용 센서들이다. Process control을 위한 센서들은 주로 산업자동화에 응용되며 온도, 인장, 영상, 변위, 수위 등을 측정하는데 이용된다. 균용센서로는 자이로스코프, 수중음파탐지기, 자기센서 등

이 있고, biomedical 센서로는 혈중농도 측정, 피의 속도 등을 측정한다.

(1) ON-OFF 센서

가장 간단한 형태의 광섬유 센서로 예를들면 콘베어 벨트에 물건이 있는지 없는지를 가려내며 지나간 물건의 갯수를 알 수 있는데 주로 생산라인에서 많이 쓰인다. 그 원리는 간단히 광섬유를 통해서 전달된 빛이 물체에 반사하는 것을 다시 광섬유를 통해 광검파기로 감지하든지 또는 물체에 의해서 빛이 가려지는 현상을 이용하는데 이때 사용되는 광섬유는 주로 값이 싼 다중모드 플라스틱 광섬유가 사용된다. 이 장치로서 감지할 수 있는 것들은 ① 제품에 인쇄된 표시들(날짜, barcode, 상표 등) ② 제품의 색깔 감지 ③ 불량품 감지(전자제품의 기관 등) ④ 제품의 갯수 등이 있다.

(2) 온도센서

온도센서는 대부분이 광섬유 끝부분에 빛의 흡수체나 발광체를 놓고 이들의 파장에 따른 특성을 측정함으로써 온도를 잰다. 그 흡수체 또는 발광체로는 반도체 또는 형광물질 등이 이용되며 그 활용도가 높은 만큼 종류도 또한 다양하게 개발되어 있다.

반도체 흡수체를 사용한 온도센서는 온도변화에 따른 흡수파장의 선형변화를 이용하는 것으로써 약 $3\text{Å}/\text{C}$ 의 계수를 갖고 있으며 $1.3\mu\text{m}$ LED에서 나온 빛이 GaAs chip에 의해서 흡수가 일어나는데 그 흡수되는 양은 온도의 함수이다. 따라서 GaAs chip을 통과한 후 다시 반사되어 돌아오는 $1.3\mu\text{m}$ LED의 빛의 양을 측정하는데, $0.8\mu\text{m}$ LED의 빛을 동시에 사용하여 이를 기준값으로 삼으면 여러가지 광소자에 의한 광손실의 효과를 상쇄시킬 수 있어서 그 정밀도를 증가시킬 수 있다 (GaAs는 $0.8\mu\text{m}$ 빛을 흡수하지 않고 통과시킨다).

이런 형태의 광섬유 온도센서로 약 $\pm 2\text{C}$ 의 정밀도로 -20C 부터 150C 까지의 온도 측정기가 개발되어 있다.

발광형 온도센서는 광섬유 끝에 놓인 형광물질이 광섬유를 통해서 전달된 빛을 흡수한 후에 다시 다른 파장의 빛을 내게 되는데, 이 빛의 파장

분포를 측정하면 온도를 잴 수 있다.

더욱 높은 온도를 측정하기 위해서 소위 흑체 복사를 이용한 온도센서도 개발되어 있다. 이는 광섬유(유리 또는 crystal)를 높은 온도(150℃~1200℃)에 높으면 흑체복사를 하게 되는데 이때의 파장분포가 온도의 함수이므로 이를 측정함으로써 온도를 알 수 있게 된다. 센서는 주로 제철소 등에서 녹은 금속의 온도를 측정하거나, 반도체 산업에서의 공정에서의 온도측정에 사용된다.

한가지 특기할만한 온도센서로는 비선형광학을 이용한 온도분포센서가 있는데 이는 소위 빛에 의한 Raman scattering 효과를 이용한다. 온도 분포센서는 514.5nm의 빛을 광섬유에 넣으면 이 빛의 진행방향과 반대방향으로 파장이 조금 다른 빛이 발생되는데, 이 빛의 강도가 온도의 함수인 점을 이용하여, 마치 OTDR과 같은 장치를 사용하면 위치에 따른 온도의 분포를 측정할 수 있게 된다. 현재의로는 위치의 분해능이 수 m이고 온도의 정밀도는 2~3℃이다.

(3) 변위센서

간단한 형태의 변위센서로는 광섬유 다발을 Y 형태로 조합하여 광섬유를 통하여 입사된 빛이 물체에 의해서 반사되면 이를 다시 광섬유로 잡아서 그 빛의 세기를 측정하는 것이 있다. 이경우 다발의 끝부분과 물체와의 거리에 따라 되돌아오는 빛의 양이 변화하게 되는데, 그 함수는 광섬유 다발의 구조와 밀접한 관계가 있다. 이러한 종류의 변위센서는 주로 산업용 로봇에 많이 응용되며, 이를 변형시키면 기체나 유체의 압력을 측정하는 압력센서로도 사용할 수 있다.

(4) 압력센서

광섬유 압력센서는 기체나 유체의 압력을 측정하는데 이용되며, 앞에서 언급한 바와 같이 광섬유 다발을 사용한 변위센서를 변형시켜 사용하기 도 하지만, 더 낡은 방법으로 1가닥의 광섬유 끝에 미세형 Fabri-Perot 간섭계를 이용하는 것이 있다. 외부의 압력에 의해 실리콘으로 된 박막이 움직이면 두개의 반사면으로 형성된 F-P 간섭계의 반사광의 파장분포가 변하게 된다. 이 파장분포의 변화를 측정하면 박막의 움직인 정도를 알

게 되고 따라서 외부에서 가해진 압력을 구할 수 있다. 이 센서는 그 부피가 매우 작고 0.1~1PSI 정도의 분해능을 가지고 있다.

(5) 액체 수위센서

이 센서는 액체의 수위를 측정하는 것으로써 특히 화학공장 등의 저장탱크에 그 활용도가 크다. 그 원리는 매우 간단하여 광섬유를 통하여 전달된 빛이 끝부분의 프리즘에 의해 반사되어 오는 것을 측정하는데, 프리즘이 기체속에 있을 때는 빛이 거의 되돌아 오지만, 액체속에 들어가면 굴절률 변화때문에 거의 모든 빛이 액체속으로 새어나가게 된다. 따라서 수면이 프리즘 높이까지 있다는 것을 알 수 있다. 프리즘은 따로 만들 수도 있고 광섬유의 끝부분을 프리즘 모양으로 가공하여 제작할 수도 있다.

(6) 전류센서

광섬유 전류센서는 Faraday effect를 이용하는 데, 이는 단일모드 광섬유 속을 진행하는 빛의 직선 편광이 외부에서 광섬유의 축과 나란히 가해진 자기장에 의해서 회전하게 되며 그 회전각이 자기장의 세기에 비례하는 점을 이용한다. 전기 줄에 전류가 흐르면 그 둘레에 원형의 자기장이 형성되며 이 자기장의 세기는 전류의 양에 비례하므로, 광섬유를 도체에 감으면 Faraday effect가 최대가 되며 이를 측정함으로써 전류를 측정하게 된다. 그 정밀도는 대개 20mA 정도이고 최대 전류용량이 수십 KA에 이르므로 발전소나 또는 변전소 등지에 활용될 수 있다. 특히 Faraday effect가 큰 유리로 광섬유로 만들어서 그 감도를 높일 수 있고, 전류센서를 위한 low birefringence 광섬유를 사용해야 하는 현재 상용으로 구할 수 있다.

(7) 2중 모드 광섬유센서

이는 새로운 형태의 광섬유 센서로서, 두개의 공간 모드가 진행할 수 있는 광섬유를 이용한다. 그 두개의 모드는 LP₀₁ 및 LP₁₁ 모드인데 LP₀₁ 모드는 symmetric 모드이고 LP₁₁ 모드는 antisymmetric 모드이다. 이 두개의 공간모드가 한 가닥의 광섬유 심속을 진행할 때 그 진행속도가 서로 다르므로 위상차가 진행거리에 비례해서 늘어나게 되는데 그 위상차이에 의해서 광섬유 끝에서

나오는 빛의 세기가 변화하게 된다.

이때 그 빛의 분포를 2개의 광검파기를 써서 측정하면 위상차의 변화를 구할 수 있게 된다. 이 이중모드 광섬유가 외부의 영향을 받으면 두 모드사이의 위상차에 변화가 생기게 되는데 이를 측정함으로써 외부에서 가해진 물리량의 변화를 측정할 수 있다. 두개의 모드사이에 형성되는 위상차이가 2π 가 되는 광섬유의 길이를 beatlength라 하는데 실제 광섬유에 있어서 보통 $50\mu\text{m}$ 에서 1mm 까지 얻을 수가 있고 이는 광섬유 심의 직경에 반비례한다. 가장 간단한 형태의 이중 모드 광섬유센서로 변형과 온도를 동시에 측정할 수 있는 센서가 있는데 이는 두개의 공간모드 외에 이 광섬유가 지탱할 수 있는 두개의 직선편광 성분을 동시에 측정함으로써 가능해지는데, 이러한 점이 이중모드 광섬유가 다른 형태의 광섬유 센서보다 좋은 점의 대표적인 예가 된다. 광섬유를 잡아늘리면 빛이 더 먼거리를 진행해야 하므로 위상차가 늘어나고, 온도가 변하면 굴절률이 바뀌어서 두 모드 사이의 위상차가 발생하는데, 이 두가지 현상 모두 빛의 편광방향에 대한 함수이다. 이러한 광섬유 변형센서의 경우 그 분해능은 1\AA 이하이며 최대 strain은 약 1% 정도이다. 현재 이중 모드 광섬유센서는 우주 항공산업체에서 새로이 개발중인 신소재 복합재료에 응용연구가 진행중이며, 이 신소재로 비행물체의 구조물을 만들 경우 마치 신경조직이 있는 것처럼 물체의 변형 및 온도, 압력 등을 계속 감시할 수가 있어서 가까운 장래에 널리 쓰일 것으로 예상된다. 최근에는 이중 모드 광섬유를 piezo-electric 물체에 감아서 송전선의 전압을 측정하는 등 그 응용범위가 넓어지고 있는 추세이다.

(8) 자이로스코프

광섬유 자이로스코프는 1976년에 최초로 발표된 이후에 전세계적으로 매우 활발하게 연구되어 왔으며 모든 광섬유센서 중에서 최고도의 난도와 매력을 지니고 있는 센서인데 그 응용분야는 군사용 미사일 및 비행기 잠수함 등의 항법장치에 사용되고, 로봇트 등 산업용 응용분야도 매우 넓다. 기존의 기계식 자이로스코프나 RLG(ring laser

gyro) 등에 비해 움직이는 부분이 전혀 없고, 수명이 길며 대량생산할 경우에 가격도 매우 저렴해 질 것으로 예상된다. 광섬유 gyro 기술은 그동안 상당한 발전을 거듭하여 이제 바야흐로 실용화 단계에 접어들고 있으나, 여전히 개량된 성능을 가진 새로운 방식들이 활발히 연구되고 있다.

광섬유 자이로스코프의 동작원리는 일반상대성이론에 그 근거를 둔 소위 Sagnac 효과를 이용한다. Sagnac 효과란 빛이 원형의 광로를 진행할 때 광원을 포함한 전체의 광학계가 회전을 하게 되면, 그 회전방향과 같은 방향으로 진행하는 빛과 반대방향으로 진행하는 빛 사이에 회전각속도에 비례하는 위상차가 발생하는 현상인데, 광섬유를 이용하여 원형의 간섭계를 형성하여 이 회전에 의해 유도되는 두 빛사이의 위상차를 정하는 것이 광섬유 자이로스코프이다. 광섬유 자이로스코프의 감도를 높이고 안정성을 향상시키기 위하여 흔히 편광유지광섬유, SLD(superluminescent diode), 고도의 extinction ratio를 가진 편광기 등 특수한 광섬유 소자들이 많이 사용되며 특히 근래에는 광집적회로를 이용한 소자가 널리 활용되고 있다. 광섬유 자이로스코프는 크게 나누어서 두가지 종류가 있는데 그 하나는 간섭계형 gyro이고 다른 하나는 원형공명기형(ring resonator) gyro인데 이중에서 간섭계형 gyro는 그 동작방법에 따라 closed-loop 및 open-loop gyro로 나뉘어 진다. 전자는 전기신호처리부분이 비교적 간단해지는 대신에 주파수대역이 넓은 위상변조기가 필요하게 되며 후자는 광학부분이 간단하고 전기신호처리부분이 비교적 복잡해진다. 이 두경우 모두 광섬유 코일의 길이는 $100\text{m} \sim 1\text{km}$ 의 범위를 사용하며 직경은 응용분야에 따라 틀리는데 대략 $5\text{cm} \sim 20\text{cm}$ 의 범위가 사용된다. 이러한 형태의 광섬유 gyro는 약 $0.01^\circ/\text{h}$ 이하의 감도와 안정성을 가질 수 있으며, 각 광섬유 소자의 성능에 크게 좌우되므로 좋은 광섬유 소자를 필수조건으로 한다. 간섭계형 gyro에 비해서 ring resonator형 gyro의 경우는 광섬유의 길이는 짧아도 되지만 acousto-optic 주파수 변조기등 다른 광학소자가 많이 필요하게 되어 여러가지 문제점이 발생

하게 된다. 최근에 들어서 광섬유 자체를 증폭 매질로 활용하는 광섬유 RLG에 대한 연구가 다시 활기를 띠고 있는데, 이는 매우 중요한 분야로서 더욱 연구해 볼 가치가 있다. 현재의 세계 주요연구실에서 자이로스코프의 감도 및 안정성에 따른 여러 응용분야가 연구되고 있고 한 가지 특기할 만한 것은 최근들어서 Nd 또는 Er을 포함한 광섬유를 사용하여 주파수가 매우 안정되고 광대역폭이 매우 넓은 광섬유 gyro에 이상적인 광원이 개발되고 있어서 새로운 가능성을 보여주고 있다.

(9) 음파 분포 계측센서

수중이나 공기중에서 음파를 탐지하는 것은 군사용의 경우 잠수함 추적에 주로 이용되며, 상용의 경우 해저지질 탐사 및 기타 과학연구용 센서로서 많이 활용되는데, 특히 여러개의 센서를 한 가닥 또는 몇가닥의 광섬유로 함께 연결해서 사용하는 소위 sensor array는 위치에 따른 음파의 분포를 측정함으로써 정밀한 측정이 가능해진다. 기존의 음파분포센서는 그 부피 및 무게가 매우 커서 다루기 힘들었으나 광섬유센서로 이를 대체할 경우 약 1000개의 센서를 작은 부피로 만들어 대량 1km~3km 정도의 길이에 분포된 음파를 측정할 수 있게 되어 그 파급효과는 대단히 클 것으로 기대되고 있다.

이 음파 분포 계측센서의 경우, 한가지 중요한 조건은 중심부의 광원 및 신호처리 장치가 있는 사령부를 제외하고는 전기신호를 전혀 쓰지 말아야 한다는 것이다. 따라서 각 센서들을 원거리센서의 형태를 갖고 있어야 하며 광원을 pulse로 만들어 쓸 수 있는 방식과 광원의 주파수를 변조시켜 얻을 수 있는 방법이 대표적으로 쓰이고 있다. 이러한 원거리 센서 여러개를 한가닥의 광섬유로 광원 및 광검파기에 연결하는 센서 array는 광원을 pulse로 만들고 각각의 센서로 부터 돌아오는 신호가 시간상으로 분리되는 형태의 time division multiplexing(TDM)을 써서 얻어진다. 각각의 센서와 길이가 약 50m정도일 때 센서의 감도는 수 μ rad 정도로서 기존의 센서보다 같거나 높은 성능을 얻을 수 있다. 이와같은 음파 분포 계측장치는 세계주요국가에서 정책적으로 개발하여 이미

실용화단계에 와 있으며, 분포 계측센서는 생산라인의 전 공정에서 온도, 압력 등을 동시에 측정할 수 있어서 그 활용도가 대단히 클 것으로 예측된다.

(10) 의료용센서

광섬유센서가 의료용으로 사용될 경우 현재 장시간이 소요되는 여러가지 검사들이(예를 들면 피검사, 조직검사 등) 즉석에서 실시될 수 있어서 획기적인 변화를 가져올 수 있다. 의료용센서는 광섬유 끝부분에 센서 Tip을 부착시켜 얻어지며 주로 측정하고자 하는 변수의 변화에 따른 빛의 세기변화를 측정한다. 이들은 크게 세가지로 구분되는데 이들은 ① 분광형 센서 ② Transducer 센서 ③ all-fiber 센서이다. 분광형센서는 조직이나 혈액의 광학적 특성을 광섬유를 통하여 전달된 빛을 통하여 얻은 방식이며, transducer 센서는 광섬유 끝에 부착된 감지부의 광학적 성질이 그 주위의 혈액 등의 농도변화에 따라 변화되는 것은 감지하는 방식이고, 끝으로 all-fiber 센서는 특수한 광섬유 자체의 광유도 특성이 주변의 물질에 따라 변화되고 이를 빛의 변화로 측정하는 식이다.

■ 결 론

광섬유센서는 그 종류도 다양하고 응용범위도 매우 넓은 뿐아니라 기존의 센서가 못하는 특성을 가지고 있어서 여러 분야에서 중대한 기술혁신을 유도할 것으로 기대된다. 선진제국에서는 이미 지난 15년여에 걸쳐서 정부의 주도하에 기업 및 대학의 연구소 등에서 연구가 진행되어 이미 실용화 단계에 있는 센서들이 여러 종류가 있으며 그 중 몇가지는 우리나라에서도 전략적 중요성을 띠고 있다. 우리나라의 제반연구 및 기반 기술여건을 감안할 때, 광섬유 센서는 비교적 수월하게 선진기술을 따라갈 수 있는 장점이 있다.

◇ 이 글은 '91 國內外 한국과학기술자 학술회의 추계워크숍의 생산기술분과에서 발표한 내용을 전재한 것임
..... 편집자