광섬유 센서기술과 실용화 개발방향

예윤해
경희대학교 전자정보학부, 레이저공학연구소

Ⅰ. 서 론

1970년 Corning에 의해 개발된 저손실 광섬유는 오늘날 광통신으로 일상화되었으며, 또한 새로운 센서인 광섬유 센서에 대한 연구개발을 시작케 했다. 광섬유 센서기술은 광섬유의 재료인 유전체의 잇점을 최대한 활용함으로써 종전 기술로는 불가능에 가까웠던 전기적으로 잡음이 많은 지점이나 위험한 환경에서도 계측을 가능케 하였다.

광섬유 센서 연구개발의 주 원동력은 광섬유가 갖는 전자파 간섭에 대한 내성, 센서부에서 전기를 사용하지 않기 때문에 폭발성이 강한 환경에서도 사용이 가능하다는 점, 고감도, 가는 광섬유에서 오는 소형, 경량, 고속측정 및 유연성, 그리고 다중화 및 분포측정 능력 등을 들 수 있다. 이러한 특성은 광섬유 센서에 대한 많은 관심을 초래하였으며, 그 결과 오늘날 측정되고 있는 거의 모든 종류의 피측정량에 대한 측정방법을 완성하기에 이르렀다[1~2]. 그러나 이러한 광섬유 센서는 오늘날까지도 일반화되지 못하고 있으며, 실용화 노력 또한 광섬유 센서가 가진 가능성에 비해 미진한 상태에 있다.

본 논문에서는 광섬유 센서의 기술과 특성, 광섬유 센서가 기존의 센서에 대해 비교우위에 있는 것으로 판단되는 응용분야, 광섬유 센서의 개발현황과 실용화 사례를 살펴봄으로써 이들 센서를 일반화하기 위한 연구방향을 제시해보고자 한다.

Ⅱ. 광섬유 센서 기술

광섬유 센서는 피측정량이 초래한 빛의 세기변화, 광섬유의 굴절률 및 길이 변화, 모드 변화, 그리고 편광상태의 변화를 이용하여 피측정량을 추정하는 센서로서 이용되는 효과에 따라 세기형, 위상형, 회절격자형, 모드형, 편광형, 분포측정형 등으로 구분되며, 이를 이용하여 측정할 수 있는 측정량으로는 전압, 전류, 온도, 압력, 스트레인, 회전율, 음향, 가스농도 등 거의 모든 종류를 망라한다[1].

세기형 광섬유 센서는 그림 1과 같이 microbending 또는 접속손실의 변화에 의해 광섬유를 통과하는 빛의 세기변화를 이용하는 센서로서 광원으로는 LED가 주로 사용되며, 광섬유로는 플라스틱 광섬유(POF) 또는 다중모드 실리카 광섬유가 사용된다. 정밀도는 그다지 높지 않으나 비교적 값싸게 구현될 수 있어 이미 많은 수가 거리, 진동, 압력 등의 물리량 측정에 사용되고 있다[2].

위상변조형 광섬유 센서[1~2]는 피측정량이 광섬유의 굴절률 변화 또는 길이의 변화를 유발할 때 발생된 광섬유를 통과하는 빛의 위상변화를 간섭계를 이용하여 측정하는 센서로서 광섬유로는 단일모드 광섬유 또는 편광유지 광섬유를 사용하며, 광원으로는 단색성이 우수한 레이저를 주로 사용한다. 간섭계로는 그림 2에서 보인 Fabry-Perot, Michelson, Mach-Zehnder, 또는 Sagnac 광섬유 간섭계가 주로 사용되며, 위상변조형 광섬유 센서는 현재까지 개발된 센서 중 가장 감도가 높고 센서의 감도가 감지부인 센싱암을 이루는 광섬유의 길이에 비례하므로 감도조절이 용이하다. 음향[3], 회전율[4], 자기장[5], 가속도[6], 스트레인[7], 온도[8], 전류[9~10] 등 다양한 종류의 측정변수를 위한 센서가 개발되었으며, 다이나믹 레인지 또한 타의 추종을 불허한다. 그러나 센서를 구성하는 부품의 가격 및 비교적 복잡한 신호처리는 이들 센서의 비용이 일반 센서와는 비교가 되지 않을 정도로 높아 일반적인 응용에 커다란 장애가 되고 있다.

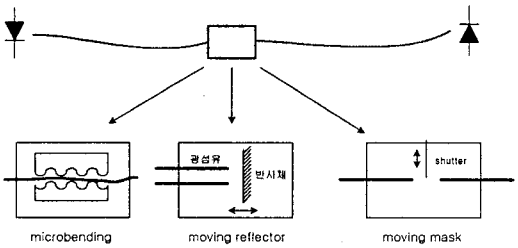


그림 1. 세기변조형 광섬유 센서의 예.

Fig. 1. Intensity-modulated fiber optic sensor.

회절격자형(fiber Bragg grating : FBG) 광섬유 센서는 1989년 Meltz 등[11]이 강한 자외선 홀로그램을 이용하여 광섬유 코어에 회절격자를 형성하는 방법을 개발한 후 급격한 발전을 이룬 센서로서 피측정량에 의한 회절격자 부위의 굴절률 변화와 길이 변화에 의한 Bragg 파장의 변화를 광학필터로 측정함으로써 동작하는 센서로서 다중점 센서로 확장이 용이하며, 가격이 비교적 저렴하고 센서의 감도 또한 비교적 높기 때문에 가장 각광 받는 센서의 하나이다[12].

그 외의 센서형으로는 다중모드 광섬유를 통과하는 도파모드의 분포가 광섬유의 진동 또는 비틀림에 의해 변하는 것을 이용하는 모드형, 피측정량에 의한 광섬유 도파모드의 편광상태 변화를 이용하는 편광형, 광섬유를 통과하는 빛의 손실 또는 산란이 피측정량에 의해 변하는 것을 optical time domain reflectometry(OTDR)를 이용해 광섬유의 길이를 따라 측정함으로써 광섬유의 길이방향을 따라 피측정량의 분포를 측정하는 분포측정형 광섬유 센서 등으로 나눌 수 있다. 이들 광섬유 센서 중 모드형, 분포측정형은 LED와 다중모드 광섬유를 이용하며, 따라서 광학계의 비용은 비교적 낮고, 이를 적용한 센서로는 진동, 침입, 온도 등이 있다.

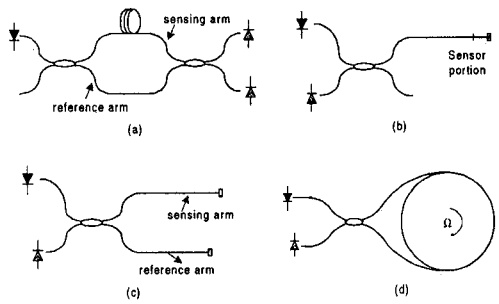


그림 2. 위상변조형 광섬유 센서에 사용되는 간섭계의 종류.

Fig. 2. Types of interferometers used in the phase modulation sensor (a) Mach-Zehnder, (b) Fabry-Perot, (c) Michelson, (d) Sagnac.

이러한 광섬유 센서는 소형으로 초정밀 광대역 측정이 가능하고, 전자파의 영향을 받지 않으며, 광섬유의 손실이 작기 때문에 원격측정이 용이하다. 또한 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 센서의 가격은 기존의 센서와 비교할 때 월등히 비싸며, 또한 비교적 최근에 개발된 까닭에 충분히 검증 받지 못했다는 단점도 있어 기존의 센서로는 계측이 용이치 않는 전력산업, 가스산업 등의 분야에서도 신기술의 적용에 보

수적인 업계의 특성상 쉽게 받아들여지지 않고 있다.

Ⅲ. 비교우위로 판단되는 분야[13]

앞에서 살펴본 바와 같이 광섬유 센서는 수많은 장점에도 불구하고 가격경쟁력과 신생기술이라는 두 가지 단점때문에 그 보급이 일반화 되지 못하고 있다. 본 절에서는 광섬유 센서가 기존의 센서에 비해 비교우위에 있는 응용 분야를 정리해 봄으로써 향후의 연구 및 개발방향을 제시해 보고자 한다.

- 전자파가 강한 환경 : 모터를 포함한 대형 유도부하가 많은 공장의 작업장, 고전압/대전류의 전력산업 등의 환경을 들 수 있으며, 광섬유를 이용한 간단한 on/off 센서와 거리 센서의 경우 가격경쟁력 또한 비교적 우수하여 공장의 일반 작업장에서는 이미 일반화된 상태이다[14]. 또한 고전압/고전류가 동반된 전력산업에서의 전압/전류의 측정 또는 변압기에서의 온도 측정 등이 좋은 예이다[15~18]

- 열악한 환경에서의 측정을 요하는 분야 : 고온, 고전압, 전자파를 동반한 마이크로웨이브 오븐, 폭발성이 강한 물질을 다량 취급하는 자동차 공장의 도장작업장, 연료저장소, 가스저장소 및 수송배관, 발전소, 그리고 부식성이 강한 가스, 화학물질, 해양환경 등에서 전기적 센서는 작동불능, 폭발위험, 또는 수명단축이 예상된다. 이 경우 센서부에서 전기를 사용하지 않고, 전자파의 간섭을 받지 않으며, 내부식성이 강한 실리카 광섬유로 제작된 광섬유 센서는 우수한 대안이 되고 있다[17, 19~21].

- 다수의 센서를 요하거나 분포측정이 필요한 응용[22] : 전자기술의 발달과 함께 다수의 지점에서 물리량을 동시에 측정함으로써 소위 지능형 구조물을 구성하고자 하는 시도가 진행되고 있으며, 동시에 제한된 공간 내에서 특정 변수의 분포를 측정하고자 하는 시도도 병행되고 있다. 이러한 관점에서 볼 때 광섬유 센서는 센서부에서 전원을 필요로 하지 않으며, 한 가닥 광섬유의 길이방향을 좇아 다수의 센서를 연결할 수 있는 다중화 능력과 분포측정 능력이 우수하고, 광섬유의 크기가 작아 구조물의 강도에 영향을 미치지 않으면서 구조물 내부에 삽입하는 것도 가능하다. 또한 동일한 구성으로 다양한 종류의 변수를 동시에 측정하는 것도 가능하므로 적용범위가 상당히 넓을 것으로 예상된다. 또한 이러한 구성에서는 한 개의 광학구성으로 다수의 센서를 동시에 구동할 수 있으므로 광섬유 센서가 비싸다는 단점을 보완할 수 있다. 따라서 이러한 응용에서는 광섬유 센서가 기존의 센서에 비해 오히려 가격 우위에 있다고도 평가할 수 있다.

분포측정의 응용 예로는

· 빌딩, 교량, 댐, 저장탱크 등의 구조 강도를 시험하거나 배, 비행체 등에서의 스트레스 모니터링[28],

· 변압기, 발전기, 용광로, 화재감시 시스템 등에서의 온도 모니터링[26],

· 항공산업에서 복합재료에 심어져 온도, 스트레인, 진동 등의 분포를 실시간 측정[25],

· 파이프라인 등에서의 누설감시[23],

· 침입경보시스템에서의 진동 측정, 도로망에서의 교통정보 수집[27] 등을 들 수 있다.

- 가격이 주된 요소로 작용하지 않거나 기존의 센서로 측정이 불가능한 분야 : 고가의 시스템에서는 개별요소의 가격보다는 성능과 안정성 등이 우선 되며, 이러한 예로는 군사응용, 항공산업, 자원탐사 등을 들 수 있다. 이들 분야에서의 광섬유 센서 응용 예로는 광섬유 자이로스코프[4], 수중음향 센서배열[26] 등이 대표적이다.

- 소형센서를 요하는 응용 : 의료용 센서는 주사기의 내부에 삽입이 가능할 정도로 소형이어야 하며, 인체에 악영향을 미치지 않으면서 실시간 측정이 가능하고, 동시에 일회용의 요건을 만족시키기 위하여 센서부만 교체 가능한 경제적인 센서이어야 한다. 이러한 요건을 만족하는 센서로서 광섬유 센서가 가장 유망한 것으로 예상되고 있다[28].

위에서 제시된 비교우위 분야 중 분포측정용의 경우 측정점의 수를 크게 할 경우 측정점당 비용을 기존 센서의 비용 수준으로 낮출 수 있고, 동시에 한 두 가닥의 광섬유로 전체 센서를 연결할 수 있다는 부가적인 잇점이 있다. 따라서 다양한 종류의 실용성을 갖춘 분포측정형 광섬유 센서가 개발될 경우 곧바로 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 전력산업용 센서의 경우 적용 환경의 고전압(수백 kV) 때문에 종래의 센서를 이용하고자 할 때 필요한 절연관련 비용이 광섬유 센서의 비용을 오히려 능가하고, 수요규모 또한 적지 않아 현 시점에서도 종래의 센서에 대해 비교우위에 있다. 그러나 신기술의 채용에 보수적인 이들 산업의 특수성 때문에 신뢰성을 확인시키기까지에는 많은 시간을 요하며, 십년 가까이 진행되어온 신뢰성 시험이 완료되는 대로 널리 보급될 것으로 생각된다[10]. 그러나 앞의 두 가지와 의료용 센서를 제외하고는 관련 분야의 센서시장 규모가 그리 크지 않아 광섬유 센서의 대규모 적용가능성은 별로 없어 보인다.

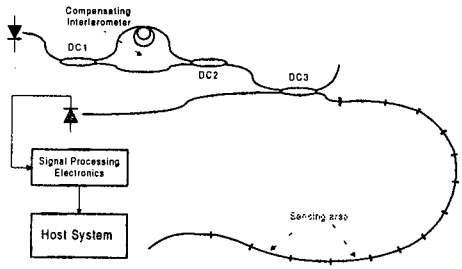
Ⅳ. 광섬유 센서의 실용화 사례

본 절에서는 광섬유 센서 중 가장 경쟁력이 있는 것으로 평가된 분포측정용 센서기술로서의 다중화 센서 기술을 개략적으로 소개한 후 이들의 응용 예, 그리고 향후 적용을 목표로 집중 연구되고 있는 사례를 통하여 광섬유 센서의 유용성을 확인함과 동시에 이들 센서의 적용에 대한 관심을 고조시키고자 한다.

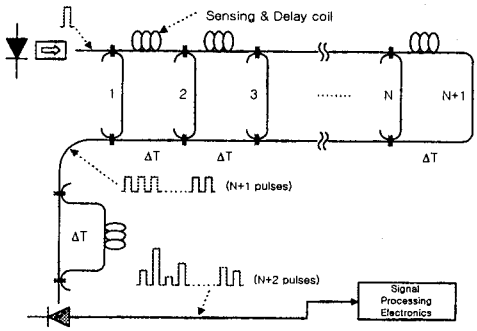
광섬유 센서 시스템에 다수의 센서를 연결하는 방법, 즉 다중화 방법에 따라 분포형(distributed), 준분포형(quasi-distributed)으로 나누어지고, 다시 센서의 구성방식에 따라 FBG 센서, 간섭계형, 그리고 세기형으로 구분할 수 있으며, 준분포형 센서의 대표적인 구성 예를 다음에 보였다. 그림 3 (a)와 그림 3(b)는 광섬유의 길이방향을 따라 간섭계로 구성된 다수의 센서가 연결되어 있으며, 그림 3(c)에서는 FBG가 광섬유의 길이방향을 따라 직렬로 배치된 형태이다. 그림 4는 분포형 광섬유 센서의 구성을 보인 것으로 펄스구동된 광원에 일정길이의 광섬유가 연결된 형태로서 피측정량에 의한 광손실 또는 산란의 변화를 OTDR을 이용하여 광섬유의 길이를 좇아 측정함으로써 피측정량의 공간적 분포를 측정한다.

그림 3의 다중화 센서는 측정점의 위치가 고정된 준분포형인데 반해 그림 4의 분포계측형 광섬유 센서는 수십 km에 이르는 광섬유의 모든 지점이 계측점이 될 수 있도록 구성된 센서로서 측정하고자하는 부위에 광섬유를 설치한 다음 광섬유의 길이방향을 따라 임의 지점을 선택하여 해당부위에서의 물리량을 측정할 수 있는 센서형으로 개념적으로는 가장 발전된 형태의 센서로 평가할 수 있다[29].

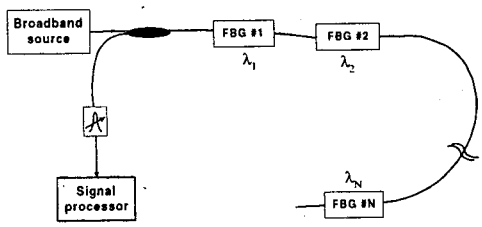
- 군사응용 : 광섬유 센서기술의 발전과 가벼우면서도 뛰어난 정보 수송능력, 항공기의 운항조건과 같은 열악한 주변환경에서도 문제없이 사용될 수 있다는 점 등으로 새로운 기술의 채용에 대해 보수적인 항공기 산업분야에서도 채용되기에 이르렀으며, 일예로 NASA와 McDonnell Douglas가 공동으로 수행한 FOCSI(fiber-optic control system integration)[30] 프로그램을 들 수 있다. 이는 최근들어 폭증하고 있는 공중 통신 등으로부터 받게되는 전자파 방해로부터 안전하면서 경제성과 효율성을 갖춘 비행기를 개발하기 위해 기존의 전자시스템을 모두 광학시스템으로 대체하기 위한 시도로서 시작되었으며, 그 결과가 1995년 시험 비행의 성공으로 증명되었다. 또한 비행체에서 가장 중요한 센서 중 하나인 자이로스코프를 대체할 광섬유 자이로스코프(FOG)도 미국의 Litton, Honeywell, 일본의 JAE, Hitachi Cable, 그리고 유럽의 Photonetics 등에 의해 관련기술이 개발 완료되었고, 상용화된 FOG가 보잉사의 B-777에 탑재되어 운행중이다.



(a) Fabry-Perot type.



(b) Mach-Zehnder type.



(c) FBG sensor array.

그림 3. 준분포형 센서의 구성.
Fig. 3. Quasi-distributed sensors.

군사응용을 목표로 연구개발중인 다중화 센서의 대표적인 예로는 음향센서를 들 수 있다. 이는 최근 연근해역에서의 전투, 밀입국, 해상침투 등에 대한 관심이 증대됨에 따라 이 지역에서의 광역감시, 그리

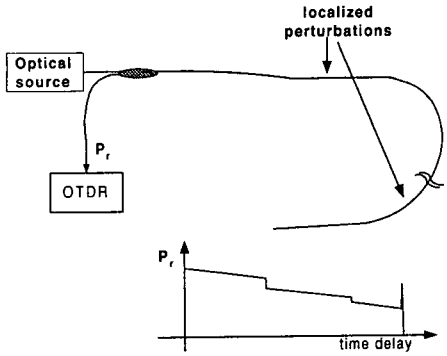


그림 4. 분포형 센서의 구성과 동작원리.
Fig. 4. Principle of distributed sensor.

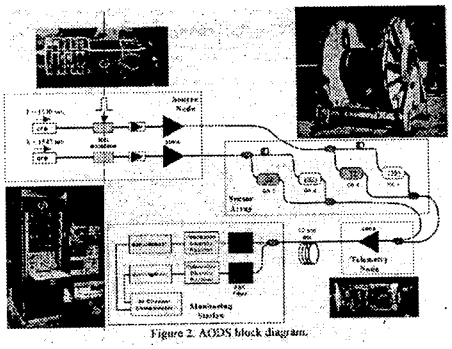


그림 5. 미해군연구소의 음향센서배열[31].
Fig. 5. Acoustic sensor array.

고 대 잠수함 응용을 목적으로 쉽게 설치하고 철거할 수 있는 고성능 센서배열의 필요성과 압전소자를 사용하는 종래의 센서가 수명, 전력소모량, 배열 센서의 수와 길이의 증가에 따른 급격한 케이블의 무게증가와 이에 따른 취급상의 문제, 그리고 유지보수의 어려움 등으로 인해 실용성이 떨어지는데 반해 광섬유센서는 전력소모가 작고 센서부에서 전기를 요하지 않기 때문에 기동성이 뛰어난 음향센서를 쉽게 제작할 수 있기 때문이다. 미국의 경우 1996년 미해군연구소에서 그림 5와 같이 1가닥의 광섬유에 64개의 고감도 수중음향센서를 연결한 센서배열을 개발하여 현장시험을 마쳤으며[31], 종래의 센서에 비해 전력소모, 크기, 무게, 설치 및 철거의 편이성 등 모든 측면에서 뛰어남을 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 기간 구조물의 건강상태는 관심의 대상에서 제외되어 왔다. 그러나 대형 구조물과 관련된 사고가 급증함에 따라 이들 대형 구조물의 상태에 대한 관심도 높아지고 있다. 미연방고속도로협회(FHA)에 따르면 미국내의 11만개에 달하는 고속도로 교량의 평균연령은 1995년 현재 37세이고, 이들 교량의 약 3분의 1이 문제점을 안고 있으며, 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 대책은 해당 구조물을 재건축하는 대신 구조물의 사용가능한 시간을 최대한 늘릴 수 있는 방법을 찾자는 것이며, 따라서 구조물 스스로가 자신의 건강 상태를 알려줄 수 있도록 하기 위한 장치를 갖추게 하는 것이다.

이를 위해 중요 지점마다 진동/스트레인 센서를 부착함으로써 지능형 구조물로의 전환이 필요하며, 이 목적에 부합하는 최선의 센서로서 FBG 센서가 각광받고 있다. 그림 6은 댐의 지능화를 위해 FBG센서를 설치하는 장면의 사진이다.

그림 6. 진동과 압력 측정용 FBG센서 설치장면[23].
Fig. 6. Picture of the installation of FBG sensor array.

- 분포계측 응용 : 피측정량의 공간적 분포는 해당 공정의 균일성(uniformity)을 확인하는 가장 확실한 수단이며, 각종 장비의 스트레스 측정에도 유용하다 [22]. 그림 7은 일본 히로시마 근처에 있는 발전소에서 가스세척 용기의 온도분포를 계측하기 위하여 영국 York사의 분포계측용 광섬유 온도센서인 DTS(distributed temperature sensor)시스템[24]을 설치하는 장면을 보여주고 있다. 여기서 사용된 DTS 시스템은 4km길이 광섬유 케이블 상에 있는 약 16000지점의 온도를 동시에 계측할 수 있으며, 온도측정 범위와 분해능은 각각 -190 ℃~460℃, 1 ℃이다.

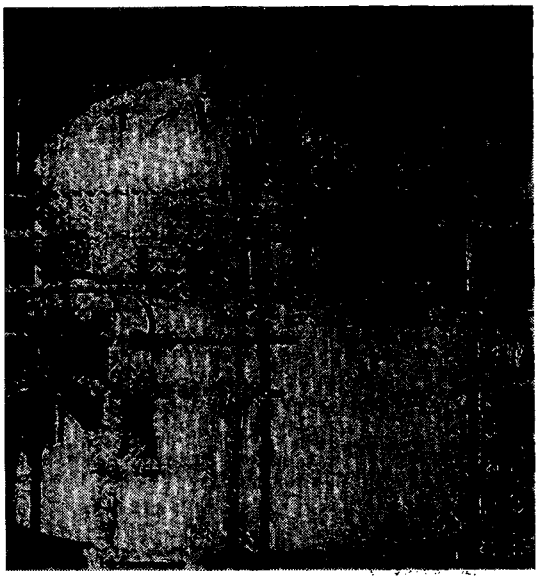


그림 7. 발전소에 설치된 DTS 센서[24].
Fig. 7. DTS sensor installed in a power plant.

- 보안/경비 응용 : 기술의 발달에 따른 위험시설물의 대량 등장과 지구사회의 복잡화에 따라 개인 및 국가 중요시설물 및 위험시설물에 대한 보안시스템의 요구가 크게 증대됨에 따라 이러한 역할을 담당할 시스템으로 다중화 광섬유 센서의 중요성이 부각되고 있다. 그림 8은 미국 Fiber Sensys사의 침투감시용 광섬유 센서[32]를 철조망의 하단에 설치한 장면의 사진으로 다수의 모드형 광섬유 센서를 직결하여 구성한 준분포형 센서의 일종이다.

이외에도 도로상에서 소통상태를 방해함이 없이 실시간으로 교통상황 뿐만 아니라 과적차량까지 감지할 수 있는 광섬유 센서가 등장하고 있다[33].

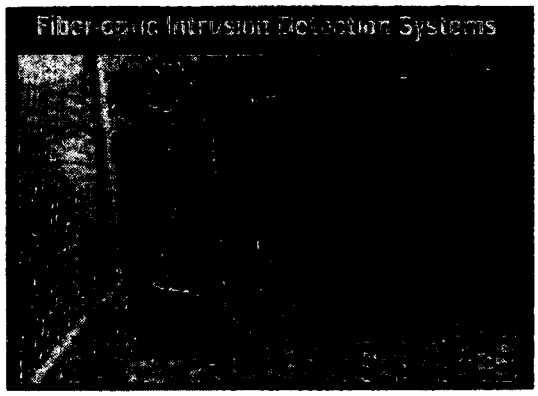


그림 8. 침입자 감시를 목적으로 철조망에 설치된 광섬유 센서[32].
Fig. 8. Security fence for intrusion detection.

V. 맺음말

광섬유 센서는 기존의 센서에 비해 가격경쟁력에서 특히 뒤지고 있어 많은 장점에도 불구하고 일반화되지 못한 것이 현실이다. 그러나 광섬유 센서의 뛰어난 embedding 능력과 다중화 능력, 그리고 기존의 센서로 대체가 불가능한 일부의 제한된 응용에서는 이들 센서가 성능과 가격 모두에서 기존의 센서를 능가하며, 이들 분야를 중심으로 적용이 시작되고 있다. 다중화 센서를 중심으로 한 지속적인 기술개발과 실용화를 위한 노력이 합쳐질 때 이들 센서가 일반화될 것으로 기대된다.

VI. 참고문헌

1. T. G. Giallorenzi, et. al., "Optical fibre sensor technology", IEEE J. Quantum Electron., QE-18, pp. 626-665, 1982.
2. B. Culshaw, Optical fibre sensing and signal processing, (Peter Peregrinus, 1984).
3. J. A. Bucaro, and J. H. Cole, "Acousto-optic sensor development", Proceedings of EASCON, IEEE Pub 79CH1476-1, pp. 572-580, 1979.
4. V. Vali and R. W. Shorthill, "Fiber ring interferometer", Appl. Opt., 15(5), pp. 1099-1100, 1976.
5. A. Dandridge, A. B. Tveten, G. H. Siegel, E. J. West, and T. G. Giallorenzi, "Optical

fibre magnetic field sensor", Electron. Lett., 16, p. 408, 1980.
6. A. B. Tveten, A. Dandridge, C. M. Davis, and T. G. Giallorenzi, "Fiber optic accelerometer", Electron. Lett., 16(22), p. 854, 1980.
7. C. D. Butter and G. B. Hocker, "Fiber optic strain gauge", Appl. Opt., 17(18), p. 2867, 1978.
8. G. B. Hocker, "Fiber-optic sensing of pressure and temperature", Appl. Opt., 18, pp. 1445-1448, 1979.
9. A. Dandridge, A. B. Tveten, and T. G. Giallorenzi, "Interferometric current sensors using optical fibres", Electron. Lett., 17(15), pp. 523-525, 1981.
10. T. Sawa and K. Kurosawa, "Development of optical instrument transformers", IEEE. Power delivery, 5(2), pp. 884-891, 1990.
11. G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fiber by a transverse holographic method", Opt. Lett., 14, p. 823, 1989.
12. J. P. Dakin and M. Volanthen, "Distributed and multiplexed fibre grating sensors", OFS-13, pp. 134-140, 1999.
13. T. J. Parro, "Fiber optic sensors for industrial applications", ISA Transactions, vol. 28(2), pp. 31-34, 1989.
14. D. A. Krohn, Fiber optic sensor fundamentals and applications, (ISA, 1988).
15. A. J. Rogers, "Optical temperature sensor for high voltage applications", Appl. Opt., 21(5), pp. 882-885, 1982.
16. M. Martinelli, "Applications of optical fiber sensors in electrical power plants : opportunity and challenge for the coherent sensors", OFS-9, pp. 403-408, Firenze, Italia, 1993.
17. Takaoka Electric MFG Co., catalog Takaoka Thermometer FT1210, 1988.
18. G. R. Jones, et. al., "Optical fiber monitoring of power circuit breakers", SPIE vol. 1120, pp. 224-235, 1989.
19. K. A. Wickersheim and W. D. Hyatt, "Commercial applications of fiberoptic temperature measurement", SPIE vol. 1267, pp. 84-96. 1990.
20. C. P. Cockshott et. al., "Applications of optical sensors in the automobile industry", SPIE vol. 1120, pp. 210-216, 1989.
21. J. K. Zientkiewicz, "self-referenced fiber optic system for remote methane detection", SPIE vol. 1120, pp. 284-290, 1989.
22. A. D. Kersey and A. Dandridge, "Distributed and multiplexed fiber-optic sensor systems", Journal of the institution of Electronic and Radio Engineers, 58(5), pp. S99-111, 1988.
23. H. Rausch, "Fiber optic sensors : Rx for the infrastructure", Photonic Spectra, 29(3), pp. 80-89, 1995.
24. Asia Pacific Power news, #1, p. 6, 1995.
25. R. M. Measures, "Fiber optics in composite materials", SPIE vol. 1267, pp.241-256, 1990.
26. J. A. Bucaro et. al., "Optical fiber acoustic sensor", Appl. Opt., 16(7), pp. 1761-1762, 1977.
27. C. Leung and I. Chang, "Optical fiber line sensor based on speckle detection", Proceeding of Int'l Canahan conference on security technol., pp. 125-129, 1986.
28. B. Timble, "Fifty thousand pressure sensors per year, A successful fiber sensor for medical applications", OFS-9, pp. 457-462, 1993.
29. X. Bao, D. J. Webb and D. A. Jackson, "Optical fibre based distributed temperature sensor with a 22 km sensing length", OFS-9, pp. 75-78, 1993.
30. D. Thompson and C. Bedoya, "Optical fiber finally takes off", Photonic Spectra, 29(4), pp. 82-90, 1995.
31. A. R. Davis, C. K. Kirkendall, A. Dandridge, and A. D. Kersey, "64 channel all optical deployable acoustic array", OFS-12, pp. 616-619, 1997.
32. www.fibersensys.com
33. www.fft.com.au