

## 정보시대와 광섬유 센서

예 운 해

경희대학교 전자정보학부, 레이저공학연구소

### I. 서 론

인류역사상 가장 위대한 발명품 중 하나인 컴퓨터는 디지털 혁명이라고 일컬어지는 정보시대를 열었으며, 초기 정보시대가 경험하고 있는 가장 두드러진 것은 컴퓨터를 두뇌로 가진 현대의 기기가 프로그램의 수정을 통하여 다양한 기능을 수행할 수 있게 되었다는 점이다. 따라서 다수의 단순기능 기계를 소수의 복합기능 기계가 대신하게 되었고, 소프트웨어가 차지하는 비중도 커졌다. 또한 정보의 생산, 관리 및 유통 관련 산업이 부상하였으며, 이를 위해 뉴스, 주문형 비디오, 행정 데이터 서비스 등과 같은 통상적인 정보 외에도 실시간 교통정보, 환경/재해 정보 등과 같은 고급정보를 제공하기 위해 대량의 정보를 경제적인 비용으로 생산할 수 있는 정보생산 장치에 대한 관심이 고조되고 있다. 또한 이들 정보를 고속으로 유통시킬 수 있는 초고속 통신망의 보급은 폭발적인 증가추세에 있으며, 레이저와 광섬유로 구성된 초고속 광통신 시스템이 그 위치를 확고히 점하고 있다.

대량의 정보를 경제적인 비용으로 생산하기 위한 정보생산 장치로서의 센서는 개별센서의 특성뿐만 아니라 다수의 센서가 결합된 형태로서의 센서시스템의 성능과 경제성이 고려되어야 하며, 측정된 대량의 정보를 전송함에 있어서 광통신 시스템과의 양립성이 우수하여야 한다. 또한 센서를 설치할 때 측정데이터의 정확성과 소자의 내구성이 보장될 수 있어야 하며, 이와 동시에 설치대상에 대한 영향이 무시될 수 있어야 할 것

이다.

산업혁명이후의 문명은 철근과 콘크리트에 전적으로 의존하고 있는데 이를 바탕으로 한 구조물의 수명은 100년 내외이고, 과도한 사용으로 인하여 현재 지구 곳곳에서 재앙을 일으키고 있으며, 앞으로 더욱 심각할 것으로 예상된다. 예를 들어 미국의 연방고속도로협회(FHA)에 따르면 미국 내 11만개에 달하는 고속도로상 교량의 평균연령은 2001년 현재 43세이며, 이들 교량의 1/3 이상이 이미 문제점을 갖고 있고 이들의 상태가 심각한 속도로 악화되고 있다고 한다. 또한 공장의 가동중단 사태요인의 90% 이상이 오랜 사용에 의한 재질의 피로누적에 의한 것으로 추산되고 있다.

이러한 문제에 대한 대책으로 등장한 개념이 스마트 구조물이다. 스마트 구조물이란 구조물 스스로가 자기 진단을 행하고, 진단 데이터의 해석과 의사결정을 행하며, 환경의 변화에 반응하도록 구성된 것을 말하며, 이를 위해서는 다수의 센서로 구성된 센서네트워크, 프로세서, 액츄에이터를 구비해야 한다. 이러한 구성요소들은 근년에 들어 실용화되고 있으나 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 전기형 센서인 써미스터와 스트레인 게이지를 들 수 있다. 전기식

센서의 경우 감지정보를 판독하기 위해서 센서당 2가닥의 전선을 필요로 하며, 이들 전선은 구조물 자체의 강도에 나쁜 영향을 미치기 때문에 센서를 외부 부착형으로밖에 사용할 수 없다. 따라서 고장발생이 잦고 복잡성 때문에 유지보수 또한 어렵다.

본 글에서는 정보시대와 광섬유 센서의 관계를 조명하기 위해 광섬유 센서의 특성, 기술 및 연구 개발 동향을 살펴보고, 시험적으로 적용되고 있는 예를 소개하고자 한다.

## II. 광섬유 센서기술

광섬유 센서의 연구는 1970년 코닝이 개발한 광섬유로 실현된 광통신의 연구와 같이해 왔으며, 소형으로 초정밀 광대역 측정이 가능하고, 전자파의 영향을 받지 않으며, 광섬유의 저손실 때문에 원격측정이 용이하고, 센서부에서 전기를 사용하지 않으며, 광섬유의 재질인 실리카의 뛰어난 내부식성 때문에 사용환경에 대한 제약이 없다. 이외에도 분포계측이 가능하며, 100um 정도인 광섬유의 작은 직경과 광섬유의 재료인 실리카의 뛰어난 강도는 콘크리트 또는 복합재 구조물의 제작과정에서 구조물의 강도에 영향을 주지 않고 구조물 내에 심는 것(embedding)이 가능하여 부하효과 없이 가장 정확한 측정 데이터를 오랜 기간동안 제공할 수 있다.

광섬유 센서는 광섬유가 부착된 레이저 다이오드와 광검출기를 필요로 하기 때문에 광섬유센서 시스템의 가격은 전기적인 센서에 비해 월등히 비싸며, 역사가 짧아 충분히 검증되지 않은 신생 기술이라는 단점도 갖고 있다. 따라서 현재까지 보급된 광섬유 센서의 수와 관련 업체의 수는 미미하며, 센서를 전문으로 다루는 잡지(예: Sensors online)에서 다루어지는 비중 또한 낮아 겨우 기술이나 소개하는 정도이다. 특히 최근 광통신 붐에 편승하여 많은 관련 업체들이 광통신 관련 회사로 탈바꿈하는 까닭에 새로운 광섬

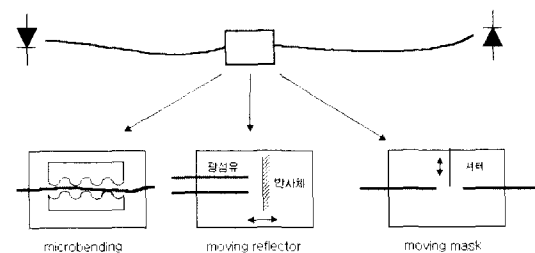
유 센서 제품은 별로 등장하지 못하고 있으며, 광섬유 센서 업체로 지목할 수 있는 회사의 수 또한 많이 감소된 것으로 확인되고 있다.

그럼에도 불구하고 일부 업체와 대학, 그리고 연구기관에서는 광섬유 센서 관련 기술에 대한 연구를 지속하고 있는데 이렇게 광섬유 센서가 계속적인 관심을 받고 있는 이유로는 정보시대에서의 대량정보생산 도구로서 다중화 및 원격 능력을 가진 광섬유 센서가 가장 유망하기 때문이다.

광섬유 센서는 광섬유를 지나가는 빛의 세기변화, 광섬유의 굴절률 및 길이 변화, 모드 변화, 그리고 편광상태의 변화를 이용하여 피측정량을 추정하는 센서로서 이용되는 효과에 따라 세기형, 위상형, 회절격자형, 모드변조형, 편광형, 분포측정형 등으로 구분되며, 이를 이용하여 측정할 수 있는 측정량으로는 전압, 전류, 온도, 압력, 스트레인, 회전율, 음향, 가스농도 등 전기형 센서가 감지할 수 있는 거의 모든 종류를 망라한다<sup>[1]</sup>.

**세기형 광섬유 센서**는 <그림 1>과 같이 미세굴곡(microbending) 또는 접촉손실의 변화에 의한 빛의 세기변화를 이용하는 센서로서 광원으로는 LED가 주로 사용되며, 광섬유로는 플라스틱 광섬유 또는 다중모드 실리카 광섬유가 사용된다. 측정감도는 그다지 높지 않으나 비교적 값싸게 구현될 수 있어 이미 많은 수가 거리, 진동, 압력 등의 물리량 측정에 사용되고 있다.

**분포계측용 센서**: DTS(distributed temperature sensing)기술은 광펄스가 광섬유를 지나갈 때 광섬유 조성의 변화와 온도에 따른 분자의 진동에 의한 후방산란되는 빛과 후방산란된 빛이



<그림 1> 세기변조형 광섬유 센서의 예.

광검출기에 도달하는 시간을 이용하여 광섬유 길이방향을 따라 온도분포를 측정할 수 있는 기술로 1980년대 영국의 Southampton에서 개발하였다. 이 기술에서 위치 확인은 Optical Time Domain Reflectometry(OTDR)를 이용하며, 온도측정은 산란 성분들(Rayleigh, Brillouin, 그리고 Raman 산란)중 Raman 산란을 이용하는데 Raman 산란은 온도에 의한 분자진동으로 발생하며, 온도의 측정은 Anti-Stokes선과 Stokes선의 비율을 이용하여 수행된다. 분포계측형 센서는 수 km이상에 이르는 광섬유의 모든 지점이 계측점이 될 수 있도록 구성되며, 측정하고자하는 부위에 광섬유를 설치한 다음 광섬유의 길이방향을 따라 임의 지점을 선택하여 해당부위에서의 물리량을 측정하며 개념적으로 가장 발전된 센서이다<sup>12-31</sup>.

**위상변조형** 광섬유 센서는 피측정량이 광섬유의 굴절률 또는 길이를 변화시킬 때 광섬유를 통과하는 빛이 경험하게되는 위상변화를 간섭계를 이용하여 측정하는 센서로서 간섭계형 센서로도 불린다. 광섬유로는 단일모드 광섬유 또는 편광유지 광섬유를 사용하며, 광원으로는 단색성이

우수한 레이저를 주로 사용한다. 간섭계로는 Fabry-Perot, Michelson, Mach-Zehnder, 또는 Sagnac 광섬유 간섭계가 주로 사용된다. 위상변조형 광섬유 센서는 감도가 가장 높고 센서의 감도가 감지부인 센싱암(sensing arm)을 이루는 광섬유의 길이에 비례하므로 감도조절이 용이하다. 음향, 회전율, 자기장, 가속도, 스트레인, 온도, 전류 등 다양한 종류의 측정변수를 위한 센서가 개발되었으며, 동적범위(dynamic range) 또한 가장 넓다. 그러나 센서를 구성하는 부품들이 비싸고, 신호처리가 복잡하기 때문에 가격이 일반 센서와 비교가 되지 않을 정도로 높다<sup>11</sup>.

**회절격자형**(fiber Bragg grating : FBG) 광섬유 센서는 1989년 Meltz 등에 의해 개발된 기술로 강한 자외선 홀로그래프를 이용하여 광섬유 코어에 Bragg회절격자를 형성한 다음 이를 센서소자로 이용하며, 피측정량에 의한 회절격자 부위의 굴절률 변화와 길이 변화에 의한 Bragg 파장의 변화를 측정함으로써 동작한다<sup>4</sup>.

그 외 다중모드 광섬유를 통과하는 도파모드의 분포가 광섬유의 진동 또는 비틀림에 의해 변화

<표 1> 광섬유 센서 업체별 기술

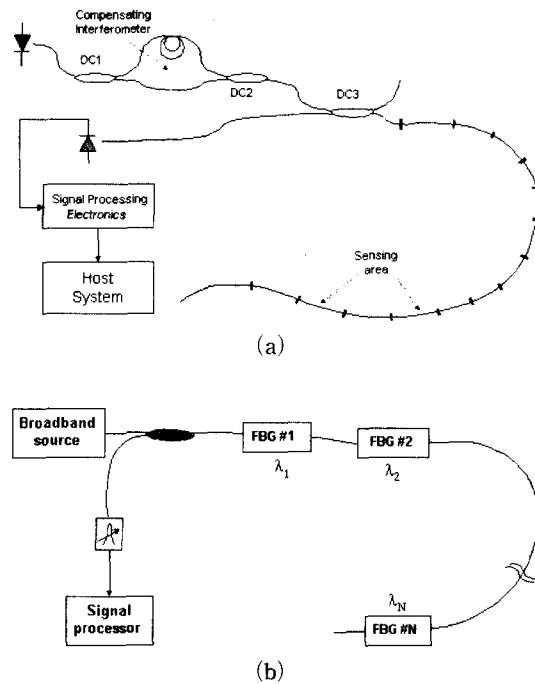
사용기술	측정변수	업체명(국가)	기 타
DTS	압력, 온도분포	Sensa(영국), Sensortran(미국) FFT(호주)	Sensa는 oil분야에 기반 확보/York사 합병. FFT는 침투, 가스누출진단센서를 주로하며, 기술은 미확인
FBG	온도, 압력, 유속	CiDRA(미국) Blue Road Research(미국)	CiDRA는 센서회사로 출발하였으나 광통신부품회사로 거의 전환
FPI	압력, 스트레인	Fiber Dynamics(미국), Optrand(미국)	Gas산업용 엔진센서
FPI	온도, 압력,....	FISO(캐나다)	
모드변환형	진동, 침투	Fiber Sensys(미국)	침입자감시
위상형(Sagnac)	침 투	ECSI International(미국) BEI Communications(미국)	
절단형	침 투	VUgate(미국), Alarm Center Inc(미국)	

는 것을 이용하는 **모드변조형**<sup>[5]</sup>, 피측정량에 의한 광섬유 도파모드의 편광상태 변화를 이용하는 **편광형** 등이 있다. 이들 광섬유 센서 중 모드변조형, 분포측정형은 LED와 다중모드 광섬유를 이용하기 때문에 광학계의 비용이 비교적 낮으며, 이를 적용한 센서로는 진동, 침입, 온도 등을 들 수 있다.

군사용, 전력산업 등 비용에 크게 영향을 받지 않는 특수분야에의 적용을 목적으로하는 광섬유 센서는 이미 기술개발이 완료되어 현장에 사용되고 있는데 이러한 광섬유 센서의 예로는 자이로스코프, 음향센서어레이, 전압/전류 센서 등이 있다. 기술의 분류상 위상형과 편광형이 주로 사용되었고, 음향센서 어레이를 제외하고는 개별센서 소자이거나 다중화가 어려운 기술이다. 또한 세기형의 경우 값싸게 구현이 가능하여 ON/OFF 센서, 거리센서 등의 형태로 이미 많이 사용되고 있으나 다중화 구성에 적합치 않아 정보생산용 센서로는 한계가 있다. 이들을 제외한 광섬유 센서 전문 업체를 열거해보면 <표 1>과 같다.

### III. 정보시대의 광섬유 센서

정보시대의 대량정보 생산도구로서의 광섬유 센서는 앞에서 언급한 바와 같이 다중화 능력과 원격측정 능력을 기본적으로 갖추어야 하고, 대부분의 응용에서 고속 측정능력과 embedding이 요구된다. 이는 정보시대에서 이들 센서가 스마트 구조물의 구현 또는 고속 대량정보의 생산을 위한 도구로서 역할을 수행할 것으로 예측되기 때문이다. 이러한 요구사항을 고려할 때 고감도를 필요로 하는 응용에서는 간섭계형을, 그 외의 경우에는 분포측정형과 회절격자형, 그리고 모드변환형 등이 사용될 것으로 예견된다. 분포측정형의 경우 광섬유 자체의 각 부분이 센싱점으로 정의될 수가 있으므로 그 자체로써 다중화 센서이며, 기타의 경우 다중화 센서가 되기 위해서는 센서소자를 직렬 또는 병렬로 배치하여야 한다.



<그림 2> 다중화 센서의 구성 예 : (a) Fabry-Perot 센서를 이용한 다중화 센서, (b) FBG sensor array.

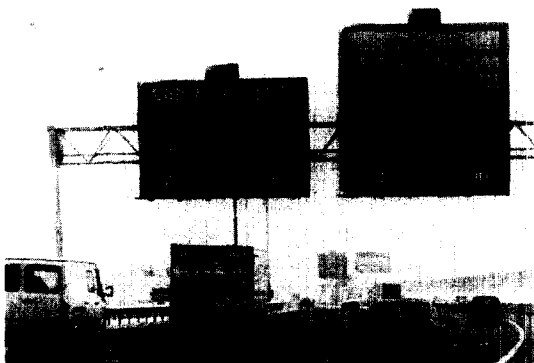
예를 들어 FBG분포형은 광섬유의 길이방향을 따라 <그림 2(a)>와 같이 다수의 FBG를 직렬로 배치하여 다중점 센서로 변환할 수 있으며, 위상형 센서 중 FP간섭계는 <그림 2(b)>와 같이 간섭계를 이루는 거울을 일정간격으로 배치함으로써 다중점 센서로 변환할 수 있다.

이러한 다중화 광섬유 센서시스템은 빌딩, 지하철, 철도, 교량, 댐 등과 같은 대형구조물에 사용되는 스마트 구조물용과 감옥, 군사시설, 공항, 사유지 등에 침입자를 감시하거나 저지하는 것을 목적으로 하는 침입자 감시용, 그리고 도로망을 따라 움직이는 차량의 속도, 하중 등을 측정하는 ITS(Intelligent Transportation System)용 등으로 구분되어 광섬유 센서관련 업체와 연구소 등에서 중점적으로 연구되고 있으며, 활발히 연구를 진행중인 곳으로는 <표 1>의 업체와 Toronto 대학의 UTIAS, Maryland 대학의 SMSRC, Virginia 공대의 FEORC, UC Davis

의 AHMCT 등의 연구소를 들 수 있다.

아래에서는 이들 업체와 연구기관이 목표로 연구개발을 진행중인 응용분야와 적용 사례를 정리하고, 마지막으로 국내에서의 연구활동을 소개하고자 한다.

**도로교통**의 중추적인 역할을 담당하고 있는 자동차의 지능화와 함께 도로교통 및 교통정보 통신망의 첨단화를 위해 세계 각국에서 추진중인 ITS는 자동차를 중심으로 하는 도로교통이 제공하는 부정적인 측면으로서의 교통사고, 환경과피 등에 대한 대책으로 등장될 시스템으로 지능화된 도로와 지능화된 자동차, 자동차와 자동차, 그리고 자동차와 도로를 통신으로 연결하는 것을 기본으로 하며, 자동차 항법시스템/자동운전/안전유지 등의 운송시스템 자체에 대한 기능의 보완과 도로 및 교통의 관리, 물류관리 등을 포함하는 새로운 도로 교통시스템을 의미한다. ITS용으로 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 분야 응용될 센서는 다중화 능력과 embedding 능력을 갖추어야 하며, 이를 위한 광섬유 센서가 구미 각국에서 많이 연구 발표되었고 현재에도 연구 중에 있으며, <그림 3>은 네덜란드의 고속도로에 설치되어 운용중인 광섬유 교통정보 안내판을 보인다.



<그림 3> 광섬유 교통정보 안내판.

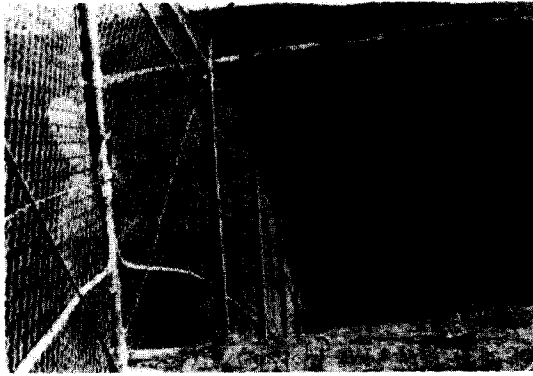
**인프라 및 산업응용** : 산업발전과 더불어 빌딩, 지하철, 철도, 교량, 송유관, 가스관, 통신 및 전력 수송구, 댐 등의 대형 구조물이 급증하고 있으나 이들 대형 구조물을 포함한 기간 구조물의 건강상태는 관심의 대상에서 제외되었던 것이 사실이다. 그러나 세계적으로 대형 구조물의 수가 크게 늘어나면서 이와 관련된 대형 사고 또한 급증하기에 이르렀으며, 산업사회를 지탱하는 받침대 역할을 하는 이들 대형 구조물의 건강상태에 대한 관심 또한 날로 높아지고 있다.

스마트 구조물에서는 구조물 스스로가 자신의 걸모습뿐만 아니라 내부 깊숙한 곳의 건강 상태를 말할 수 있도록 하기 위하여 완성된 구조물의 경우에는 중요 지점마다 진동 또는 스트레인 센서를 부착하여 지능형 구조물로 전환시키고, 앞으로 건설예정인 구조물은 다수의 진동 또는 스트레인 센서를 매립형태로 설치되어야 한다. 지능형 구조물을 위한 센서로의 실현가능성이 가장 높은 해결책이 광섬유를 이용한 기술로서 이는 광섬유 센서의 다중화 능력과 embedding 능력 때문이다<sup>[6,7]</sup>. <그림 4>에 지능형 구조물로 변환하기 위해 1995년 캐나다의 어느 수력발전소의 터빈에 회절격자형 광섬유 센서를 설치하고 있는 현장을 담은 사진으로 국내의 경우에도 90년대 중반 쌍용건설에서 김포대교에 FP 간섭계형 센서를 설치한 적이 있으며, KIST에서는 남해대교에 설치하여 시험 중에 있다.

**보안/경비 응용** : 기술의 발달에 따른 위험시설



<그림 4> 발전소의 스마트화 시공장면.

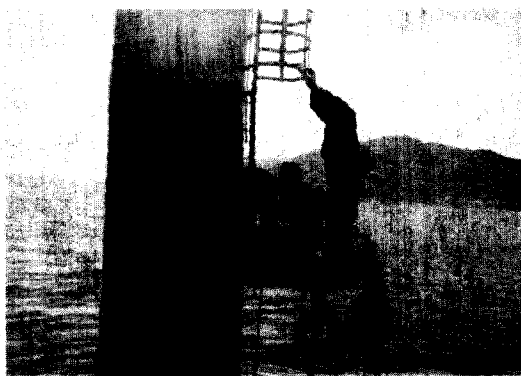


〈그림 5〉 침입감시용 광섬유 센서가 설치된 담장.

물의 대량 등장과 지구사회의 복잡화에 따라 개인 및 국가 중요시설물 및 위험시설물에 대한 보안시스템의 요구가 크게 증대됨에 따라 이러한 역할을 담당할 시스템으로 침입자감시용 센서시스템이 부각되고 있다. 〈그림 5〉에 보인 미국 Fiber Sensys사의 침투감시용 광섬유 센서는 철조망의 하단에 다수의 모드변조형 광섬유 센서를 직결한 준분포형 센서로 울타리를 통한 침입을 감지하는데 사용할 목적으로 개발된 센서의 일례이다<sup>18,9)</sup>.

그 외에도 자연재해를 예방할 목적으로 멀리 떨어진 지점에 설치되어 예측에 필요한 정보를 얻기 위해 설치할 수도 있으며, 〈그림 6〉은 남해상의 기상탑에 광섬유 압력/온도센서를 설치하고 있는 장면의 사진을 보인 것이다.

국내의 광섬유센서 연구는 양산제품이외에 대한



〈그림 6〉 광섬유 온도/압력 센서 해상설치장면.

투자를 절제하는 국내 기업의 특성상 대학과 국공립 연구소를 중심으로 소규모로 진행되어 왔으며, 이마저도 최근 수년동안 관련 연구인력이 광통신분야로 선회하여 연구자체가 위축되어 있다. 또한 각종 광부품 및 소재기술 등 기초기술 뿐만 아니라 광 관련 산업에서 가장 중요한 패키징 기술은 너무나 취약한 상태에 있다. 그럼에도 불구하고 수동소자 및 관련 소재에 대한 연구가 KETI를 중심으로 몇몇 중소기업에서(도남시스템, 한국단자공업, ...) 진행되고 있으며, 능동소자 및 광통신부품에 대한 연구는 삼성전자, LG전선 등의 업체에서 수행되고 있다. 현재 광섬유센서에 대한 연구를 수행하고 있는 기관으로는 KIST, 국방과학연구소, 한국전기연구소, 한국표준연구원 등의 연구소, KAIST, 경북대, 경희대, 서울대 등의 대학, 대우전자, 아이에스텍 등의 기업이 있으며, 이들이 주로 관심을 보인 센서로는 FOG, 온도, 압력, 전압/전류, 스트레인, 진동, 음향센서 등이다. 위에서 정의한 정보시대용 광섬유 센서에 가까운 연구로는 서울대와 KIST의 FBG형 센서, 한국표준연구원과 한국전기연구소에서의 FP 간섭계형 및 분포계측형 센서, 그리고 경희대에서 수행중인 다중화 광섬유 센서용 신호처리 연구를 들 수 있다.

#### IV. 맺음말

광섬유센서는 이들이 갖는 많은 장점에도 불구하고 이들을 전문으로 하는 업체의 수가 소수에 지나지 않으며, 대규모 현장적용은 아직 이루어지지 않고 있어 여전히 초기 단계에 있다고 볼 수 있다. 광원을 포함한 광학부품의 가격, 센서의 패키징과 케이블링 비용, 값비싼 신호처리, 그리고 관련업계의 인력부족 등 복합적인 요인이 작용한 결과로 보여진다. 최근 초고속통신에 대한 폭발적인 관심과 투자는 광섬유센서의 상용화에 커다란 영향을 끼친 것으로 판단되며, 그 첫 번째가 센서개발연구집단의 급격한 감소이고, 또 다

른 것으로는 광섬유 센서의 보급시기를 크게 앞당겼다는 점이다. 센서집단의 급격한 감소는 광통신 업체로의 전환 또는 인력의 이동 때문이며, 이에도 불구하고 광섬유 센서의 보급시기를 앞당겼다는 것은 광통신 개발집단의 급격한 증가가 광섬유센서 연구집단으로 쉽게 전환이 가능한 유능한 광섬유 관련 연구인력과 기업의 급격한 증가를 의미하고, 동시에 다양한 종류의 광통신 부품의 개발과 대량생산/경쟁체제는 광섬유 부품가격의 하락을 의미하기 때문이다. 최근 미국의 테러사태와 관련하여 방재예측 시스템에 대한 관심이 국내에서의 광섬유 센서기술 본격연구로 이어질 수도 있을 것으로 생각된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] T. G. Giallorenzi, et. al., "Optical fibre sensor technology," IEEE J. Quantum Electron., QE-18, pp. 626-665, 1982.
- [2] J. P. Dakin and M. Volanthen, "Distributed and multiplexed fibre grating sensors," OFS-13, pp. 134-140, 1999.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] R. M. Measures, "Fiber optics in composite materials," SPIE vol. 1267, pp.

241-256, 1990.

- [7] H. Rausch, "Fiber optic sensors: Rx for the infrastructure," Photonic Spectra, 29(3), pp. 80-89, 1995.
- [8] www.fibersensys.com
- [9] www.fft.com.au

#### 저 자 소 개



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 교수, <주관심 분야 : 광섬유 광학(광통신부품, 광섬유 센서 및 센서신호처리)>