

## 1. 서론

광섬유 센서는 가볍고 작으며 구부리기 쉬운 광섬유를 이용하여 구현하는 센서로 전자기 잡음이 없고 유리 섬유이므로 부식이 되지 않으며 수 미터 레벨의 긴 길이의 게이지 길이 또는 수 마이크로 미터의 짧은 게이지 길이의 센서를 다양하게 구현하는 것이 가능하다[1]. 특히 항공기와 대형 건물을 비롯하여 다양한 산업 설비의 모니터링 및 이상 진단 등을 위한 센서로 가장 적합하다. 이러한 광섬유 센서는 구조물 안전성 모니터링을 위하여 약 10여종의 센서 유형이 개발되었다. 그 중에서 광섬유 간섭형 센서와 광섬유 브래그 격자를 이용하는 광섬유 브래그 격자 센서와 광섬유의 비선형 산란을 이용하는 브릴루앙 산란형 시간영역 반사 센서와 라만 시간 영역

유 브래그 격자는 센서로 응용되는 경우 파장 다중화에 의하여 광섬유 한 라인에 여러 개의 센서를 구성하여 작동하는 다중화가 가능한 매우 강력한 장점을 갖고 있어서 기존의 센서에 비교하여 가격 및 성능 측면의 경쟁력을 갖고 있다. 광섬유 브래그 격자는 주로 광감응 물질을 광섬유 제작시 첨가하여 제작한 이후에 만들어진 광감응 광섬유를 UV 레이저와 위상마스크를 이용하여 광섬유 코어에 굴절률의 주기적인 패턴을 약 500여 나노미터 주기로 만여 개를 새겨 넣으면 그 길이가 약 1 센티미터 정도 되는데 이 구간을 지나는 빛은 굴절률의 주기적인 패턴과 공진하는 특정한 파장, 즉 브래그 파장만 광섬유의 후방으로 반사된다. 그런데 이 브래그 파장은 광섬유의 온도와 변형률 상태에 대하여 비례하여 변화되는 특징이 있다. 따라서 이 특성을 이용하면 브래그 파장이 다른 광

# 특집 1 ■ 2017 OFS-25 국내유치 기념

## 광섬유 센서와 구조물 안전성 모니터링 분야의 적용

권일범\*

반사 센서가 가장 유용한 것으로 알려져 있다. 본 고에서는 이러한 구조물 안전성 모니터링을 위한 광섬유 센서를 살펴보고 저자의 개발 내용을 간단히 소개한다.

### 2. 광섬유 브래그 격자 센서와 그 응용

광섬유 브래그 격자는 1970년대에 우연한 실험 중에 발견된 이후에 광섬유 광학 필터, 파장 가변 소자 및 센서 등으로 다양한 응용 분야가 개발되었다. 이러한 광섬

유 브래그 격자를 광섬유 한 라인에 여러 개를 결정되어진 광섬유 라인의 임의의 위치에 설치해 두고 반사해 돌아오는 브래그 파장을 검출하면 해당 위치에서의 온도나 변형률을 브래그 파장으로부터 측정할 수 있다. 이러한 광섬유 브래그 격자 센서와 관련하여 비교적 새로운 연구 결과인 동일한 브래그 파장을 갖는 브래그 격자 센서에 대하여도 다중화가 가능하도록 하는 기법을 소개한다[2]. 이 센서 구성은 그림 1과 같은데 광전변조기에 의하여 1 MHz의 삼각파 형태로 광세기를 변조하여 광섬유에 입사시키고, 광섬유 브래그 격자 센서 5개를 광섬유

\* 한국표준과학연구원 안전측정센터

광섬유 센서와 구조물 안전성 모니터링 분야의 적용

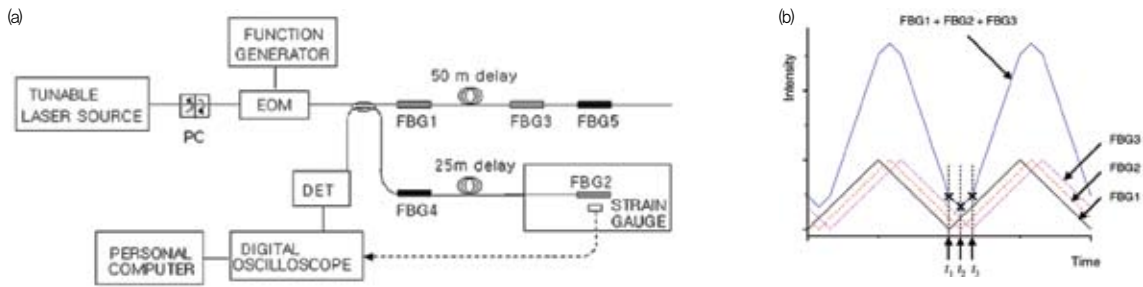


그림 1. The layout of a FBG sensor system with five probes using intensity modulation (a), and the signal output from the sensor system (b).

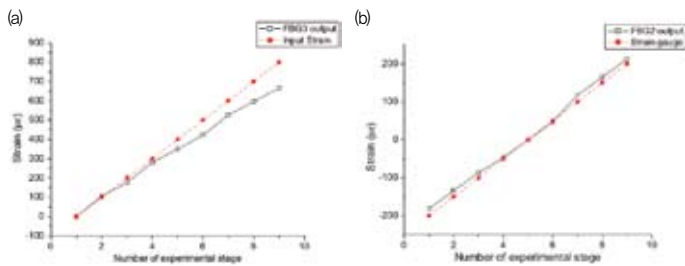


그림 2. The strain of FBG2 probe (a), and the strain of FBG3 probe (b) of the FBG sensor system with five probes using intensity modulation.

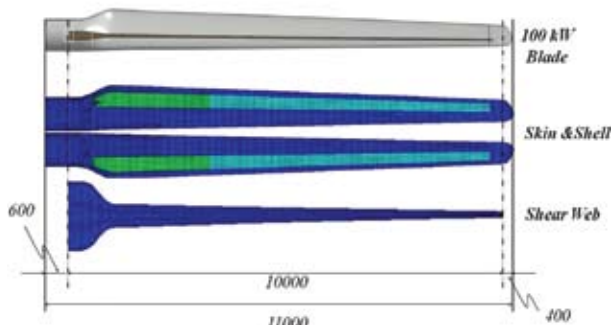


그림 3. Geometry of wind turbine blade installed in the laboratory of Korea Research Institute of Standards and Science.

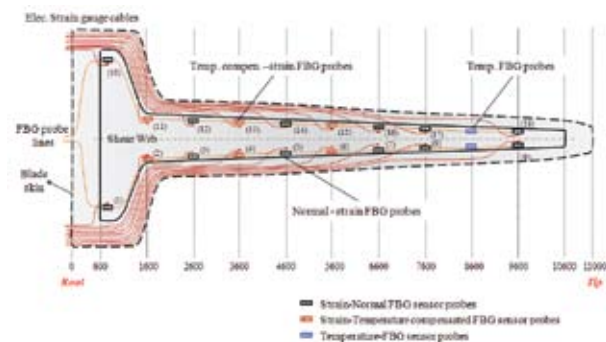


그림 4. Fiber optic Bragg grating sensor installation on the shear web in the wind turbine blade.

연계기를 사용하여 연결하였을 때, 동일한 브래그 파장을 갖는 브래그 격자 센서 1,2,3는 각각 그림 1의 (b)와 같이 파란 색 선의 결과를 줄 것이다. 이 결과를 임의의 시간  $t_1, t_2, t_3$ 에 대한 값으로 3차 연립 방정식을 풀어내면 세개의 광섬유 브래그 격자 센서 각각에 대한 응답 특성을 얻어낼 수 있다. 이러한 광 응답 특성은 광원의 광 파장을 바꾸어 가면서 얻게 되면 각 센서에서의 브래그 파장 스펙트럼을 얻을 수

있게되며 스펙트럼의 최대값을 주는 브래그 파장을 결정하게 되면 측정하고자 하는 물리량을 결정할 수 있게 된다. 그림 2에는 변형률 게이지와 비교한 브래그 격자 센서 2와 브래그 격자 센서 3의 값으로 잘 일치함을 볼 수 있다.

한편, 최근에는 신재생 에너지 산업에서의 광섬유 센서의 응용 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 복합재료를 사용하는 풍력발전기 블레이드의 실시간 모니터링을 위한 연구 및 시범 적용 예가 증가하고 있다. 그림 3은 광섬유 센서를 시범 적용한 100 kW급 블레이드의 개념도를 보이고 있다 [3]. 블레이드의 뿌리부터 끝단까지의 전체길이는 11 m이다. 이 블레이드의 굽힘 강성을 유지하기 위하여 블레이드의 가운데 부분에 전단 웹이라고 하는 바람의 힘을 견디도록 지지하는 부분이 있다. 이 전단 웹의 상하 부분에 그림 4처럼 광섬유 브래그 격자 센서와 변형률 게이지를 설치하여 바람의 영향에 따라서 블레이드가 얼마나 휘는지를 알아낼 수 있도록 하였다. 그림 5에는 측정된 변형률로부터 블레이드의 처짐을 결정할 수 있도록 측정된 실험값과 잘 일치함을 확인할 수 있다.

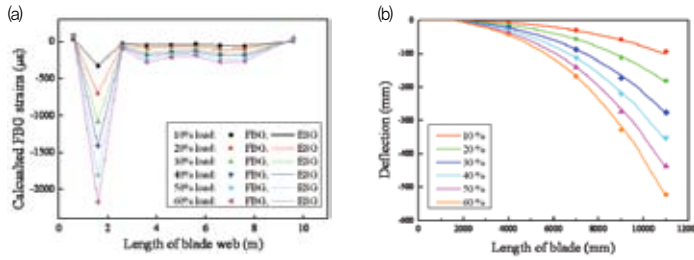
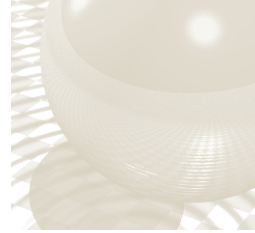


그림 5. (a) Strains and (b) deflections of the wind turbine blade.

### 3. 광섬유 브릴루앙 시간 영역 반사 센서와 그 응용

광섬유를 지나는 빛의 세기가 어느 한도 이상이면 원래 빛의 파장과 다른 파장을 갖는 비선형 광 산란이 발생한다. 그 중에서 광섬유 내부를 지나는 빛과 그 빛의 기본 산란광에 의한 음향광자가 상호 간섭을 일으켜 도플러 간섭을 일으키면서 후방으로 산란을 일으키는 브릴루

앙 산란광이 존재한다. 이 브릴루앙 산란광은 1500 nm 대역의 기본 전송 광에 대하여 약 0.1 nm 벗어난 대역에서 발생한다. 따라서 브릴루앙 산란광은 기본 전송과 구별해 내는 것이 어렵고 그 광 파워가 작아서 측정해 내기도 어렵다. 그런데 이 브릴루앙 광산란 주파수는 광섬유가 겪는 온도나 변형률에 선형적으로 비례한다. 따

라서 브릴루앙 주파수를 읽어낼 수 있으면 그 값으로부터 광섬유에 작용하는 온도나 변형률을 환산계수를 사용하여 결정할 수 있다. 그림 6은 이러한 브릴루앙 산란형 시간영역반사 센서중 브릴루앙 산란 증폭을 유도하는 센서를 보이고 있다.

광섬유의 왼쪽 끝단에서 입력되는 펄스 광원은 시간 영역 반사계를 구동시키면서도 브릴루앙 산란광을 위한 펌핑광으로도 작용한다. 광섬유의 오른쪽 끝단에서 입

력되는 연속광원은 펌핑 펄스광과의 주파수 차이를 광섬유의 브릴루앙 주파수와 일치하는지 아닌지를 알아내기 위한 프로브 광의 역할을 하게 된다. 만약 광섬유의 임의의 위치에서 변형률이나 온도가 가해지면 그 부분만 브릴루앙 주파수가 변동되므로 펌핑 펄스광과 프로브 연속광 사이의 주파수가 이 브릴루앙 주파수가 되어야 후방산란광의 증폭이 일어나므로 증폭되는 위치와 주파수를 알면 변형률 또는 온도가 가해진 위치와 정도를 알 수 있게 되는 것이다.

이러한 브릴루앙 시간영역센서는 공간 분해능, 즉, 얼마나 작은 길이의 변형률 또는 온도를 측정할 수 있게 하는가가 중요한 이슈이다. 따라서 본 저자의 연구팀은 펌핑 펄스광의 폭을 다르게 한 두 개의 펄스폭에 대한 후방 산란광을 얻어서 수식에 의한 연산처리를 하면 간단하게 공간 분해능을 10배이상 향상시킬 수 있음을 알아내었다[4]. 즉, 그림 7(a)와 같이 일반 펄스광과 그보다 약간 작은 폭의 펄스광을 사용하여 각각 후방 산란광을 얻은 후에 신호처리를 하게되면 그림 7 (b)와 같이 신호처

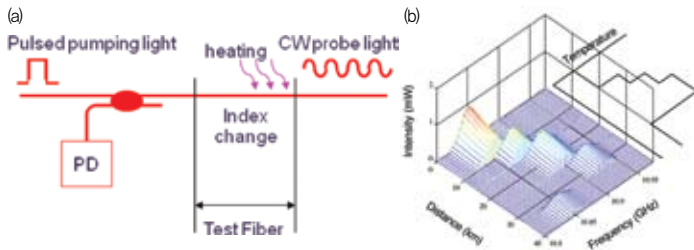


그림 6. (a) schematic, and (b) signal of fiber optic BOTDA sensor.

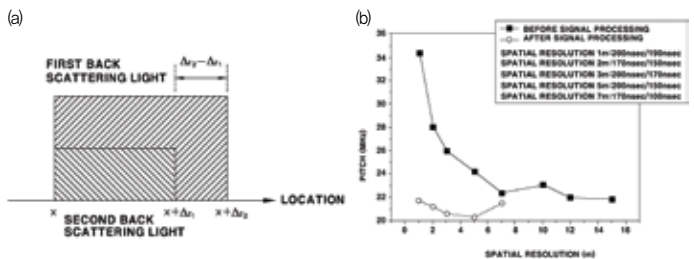


그림 7. (a) Back scattering light accumulation spaces by two pulsed lights having small width difference of BOTDA, and (b) the pitches of Brillouin gain spectrum using two pulsed lights.

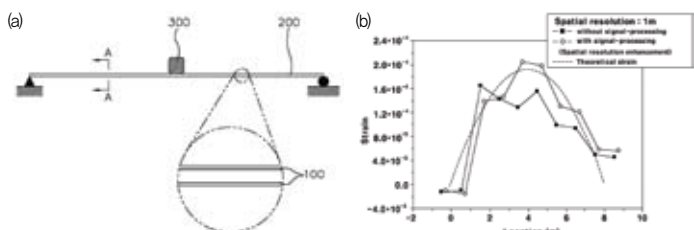


그림 8. (a) A sensing fiber application on one steel beam, and (b) the strain of the beam measured by the BOTDA with two pulsed lights.

## 광섬유 센서와 구조물 안전성 모니터링 분야의 적용

리 전보다 신호처리 후에는 공간 분해능에 해당하는 피치가 훨씬 적어짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 미국, 중국, 유럽 특허로 등록되어 있다[5]. 이러한 신호처리 기법을 적용한 단순 지지보의 측정결과인 그림 8에서도 공간 분해능 향상이 잘 나타나고 있음을 볼 수 있다.

### 4. 광섬유 라만 시간 영역 반사 센서와 그 응용

광섬유의 브릴루앙 산란과 유사하게 라만 산란광도 어떤 광 파워 이상의 빛이 광섬유 내부를 진행할 때 포톤과 매질 상호 작용에 의하여 나타나는 비선형 광산란이다. 이 안티-스토크스 라만 산란광의 광 파워는 광섬유에 작용하는 온도에 의존한다고 다음 식(1)에 의하여 밝혀져 있다.

$$T(z) = \left( \frac{k_B}{hc\Delta\nu} \log \left( \frac{I_f(z_0)}{I_f(z)} \left( e^{\frac{hc\Delta\nu}{k_B T(z_0)}} - 1 \right) + 1 \right) \right)^{-1}$$

이러한 라만 산란광을 시간영역 반사계 방식으로 후방에서 측정하게 되면 광섬유의 임의 위치에서의 후방산란광의 증감을 검출하여 온도 결정식 (1)을 사용하여 온도를 측정할 수 있다. 본 연구팀은 최근 이러한 광섬유 라만 시간 영역 반사 센서의 신호를 자동 보정하는 신호처리 방식을 개발하여 국내 특허 등록 및 국외 특허 출원을 하였다[6]. 이 새로운 방식은 광섬유 라만 시간영역 반사 센서가 광세기 방식의 센서로 그 세기가 여러 요인에 의하여 흔들려서 측정 오차를 만들어내는 단점을 보완하는 방식이다[7]. 즉, 그림 9와 같이 광섬유 라만 시간영역 반사 센서의 광섬유 끝단에 전반사 미러를 설치하고, 후방 산란광을 기존의 2배의 시간 동안 측정한 이후에 연산 신호처리 방법으로 처리하면 여러 요인에 의하여 흔들리는 광신호 세기 오차를 자동 보정할 수 있게 된다. 그림 10을 사용하여 그 기본 원리를 설명하면 다음과 같다. 광섬유의 왼쪽에서 입사되는 펄스광은 광섬유 내부를 진행하면서 정상적인 후방 라만 산란광을 만들게 된다. 또한 이 펄스광이 광섬

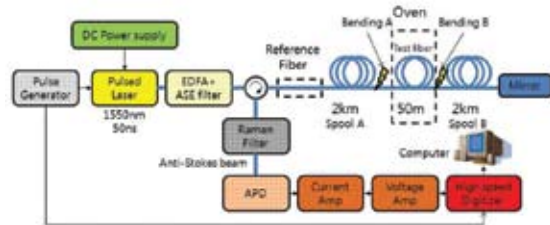


그림 9. Fiber optic Raman OTDR sensor with a mirror at the end of the sensing fiber.

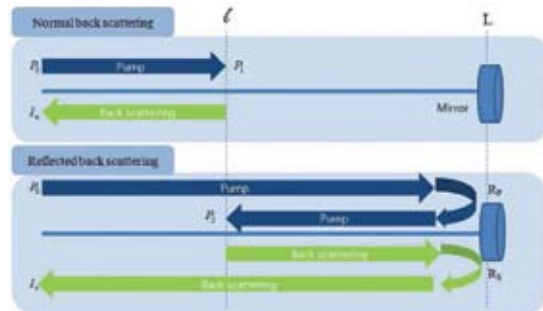


그림 10. The back scattering of the sensing fiber with a mirror in fiber optic Raman OTDR sensor.

유 끝단에서 미러를 만나면 반사되어 광섬유의 입구쪽으로 진행하면서 다시 후방으로 라만 산란광을 되돌려 주는데 이 후방 산란광도 미러에서 반사되어 다시 측정할 수 있게 될 것이다. 따라서 이 반사 후방 산란광과 정상 후방 산란광은 미러 이미지로 대칭을 이루므로 이러한 관계를 고려하여 연산 신호처리를 하여주면 두 후방 산란광의 절대 크기 변화에는 무관한 상대적인 변화에만 관계되는 신호값을 얻게된다. 결국 광세기의 크기에는 영향을 받지않는 자동보정된 온도에만 관계있는 신호값을 얻게된다.

이러한 신호처리에 대한 유효성을 검증하기 위하여 그림 9의 센서를 구성하고 약 4 km의 광섬유의 중간인 약 2 km 지점에 약 50 m의 광섬유를 오븐에 넣고 온도를 증가시키면서 라만 후방 산란광을 그림 11(a)와 같이 얻

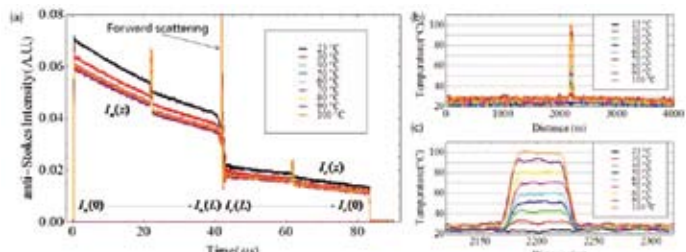
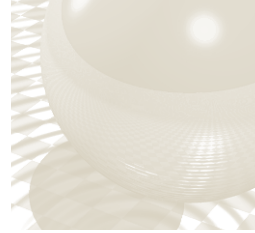


그림 11. (a) Acquired raw signal from proposed fiber optic Raman OTDR (104 times averaging), the change of temperature profiles of 4.3km-long fiber sensor at different oven temperature for (b) full range profile, and (c) enlarged temperature profile over the 2.1km-2.35km.



을 수 있었으며, 이 신호를 연산 처리하면 그림 11 (b), (c)의 온도 변화에만 의존하는 신호를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

광섬유 센서 기술은 광통신 기술의 발전과 더불어 급격하게 발전하여 왔다. 특히 구조물 안전성 모니터링 분야에서는 광섬유 센서가 유일한 측정 수단으로 인식될 정도이다. 그 이유로는 전자기 잡음이 없고, 내부식성이 강하여 내구성이 좋고, 구부릴 수 있으며 작아서 설치가 손쉬운 장점을 갖고 있기 때문이다. 본 원고에서는 구조물 안전성 모니터링 분야에 적용하기 위한 광섬유 센서 기술 중에 본 저자의 연구팀에서 수행해왔던 대표적인 일들을 소개하였다. 세계적으로 그동안 개발된 광섬유 센서는 약 80여종이 존재하는 것으로 알려져 있고, 구조물 안전성 모니터링 분야를 위한 광섬유 센서로는 광섬유 브래그 격자 센서와 광섬유 라만 또는 브릴루앙 시간 영역반사 센서가 가장 유망한 센서로 부각되어 있다. 그러나 이러한 센서도 아직 해결해 주어야 할 문제가 있다. 첫째는 센서 시스템 본체의 가격이다. 건설, 기계, 항공, 원자력 산업 등의 응용 분야에서는 현재 가격의 약 1/10 정도를 요구하고 있다. 따라서 향후 가격을 낮추기 위한 많은 연구가 필요하다. 둘째로는 신뢰성있는 측정 데이터를 제공할 수 있도록 표준화된 사용법의 제시이다. 아직까지 광섬유 센서 사용에 대한 절차 등에 대한 표준이 존재하지 않는다. 그에 따라서 사용자는 광섬유 센서 적용을 매우 어렵게 느낀다. 따라서 향후 센서 및 사용법에 대한 표준화 연구가 진행되어야 할 것이다. 마지막으로 광섬유 센서 설치에 대한 문제이다. 특히 분포 측정을 위한 광섬유는 수 킬로미터 또는 수백 킬로미터를 설치하여 신뢰성있는 측정 결과를 장기간에 걸쳐 제공해야 한다. 한편 극한 환경인 고온, 저온, 다습, 고진동, 또는 충격 및 먼지를 비롯하여 부식 등의 환경에 설치하는 방법도 연구 개발되어야 한다. 이러한 광섬유 센서의 실용화를 위한 많은 연구 개발이 진행되어 센서 사용자의 요구를 만족시킬 수 있는 광섬유 센서 기술이 완성될 수 있기를 희망해 본다.

## 참고문헌

- [1] J.M. Lopez-Higuera, 'Handbook of Optical Fiber Sensing Technology,' John Wiley and Sons, Ltd (2002)
- [2] Jeong-Min Seo, Sang-Hoon Kim, Il-Bum Kwon, Jung-Ju Lee, and Dong-Jin Yoon, "Intensity modulated multiplexing of fiber Bragg grating sensors," Smart Materials and Structures, Vol. 14, No. 1, pp. 177-182 (2005)
- [3] Ki-Sun Choi, Yong-Hak Huh, Il-Bum Kwon and Dong-Jin Yoon, "A tip deflection calculation method for a wind turbine blade using temperature compensated FBG sensors," Smart Materials and Structures Volume 21 Number 2, doi:10.1088/0964-1726/21/2/025008 (2012)
- [4] S-H. Kim, J. J. Lee, and I. B. Kwon, "Structural Monitoring of Bending Beam Using Brillouin Distributed Optical Fiber Sensors," Smart materials and Structures, Vol. 11, No. 3, pp 396-403 (2002)
- [5] Il-Bum Kwon, Dong Jin Yoon, Jung Ju Lee, Sang Hun Kim, "Physical Quantity Measuring Method Using Brillouin Optical Fiber Sensor," US Patent, US7,227,123 B2, China, Japan, Europ, Jun 5 (2007)
- [6] I-B. Kwon etc, "optic fiber distributed temperature sensor system with self-correction function and temperature measuring method using thereof," Domestic Patent and PCT applied (2013)
- [7] Dusan Hwang, Dong-Jin Yoon, Il-Bum Kwon, Dae-Cheol Seo, and Youngjoo Chung, "Novel auto-correction method in a fiber-optic distributed-temperature sensor using reflected anti-Stokes Raman scattering," Optics Express, Vol. 18, No. 10, pp.9747-9754 (2010)

## 약 력



### 권일범

- 2003년 3월 - 현재  
한국표준과학연구원 안전측정센터 책임연구원
- 1997년 3월 - 2003년 2월  
한국표준과학연구원 안전측정센터 선임연구원
- 1992년 9월 - 1997년 2월  
KAIST, 항공우주공학과, 공학박사
- 1989년 2월 - 1992년 8월  
포항산업과학연구원, 강재연구부, 연구원
- 1987년 3월 - 1989년 2월  
KAIST, 기계공학과, 공학석사
- 1983년 3월 - 1987년 2월  
한국항공대학교 항공기계공학과, 공학사