

분포온도 계측을 위한 광파이버 온도센서 시스템에 관한 연구

The Study on the Fiber Optic Sensor for the Distributed Temperature Measurement

\*이광진\*, 최성구\*, 노도환\*

\*전북대학교 공과대학 전기공학과 (Tel: 0652-70-2398; Fax: 70-2394)

**Abstracts** A distributed Optical fiber temperature sensor can continually monitor the measurand at every point along of its fiber length. It is based on OTDR technics which uses extremely weak backward scattered light called Raman scattering. When the Pulsed high intensity laser light injected into the optical fiber there are several kind of backscattered light such as Rayleigh, Stokes, and anti-Stokes, etc. caused by impurities molecular vibrations.

The temperature distribution is derived from the intensity ratio of Raman scatted light -Stokes versus anti-Stokes- and the time function between light injection and signal detection. It is shown that the principle of distributed sensing, the system design, and the result of experiments.

**Keywords** OTDR, DTS, Backscattering, Raman Scattering, Fiber Sensor

1. 서론

전력 전송로, 석유 화학 공장 등의 대규모 산업 시스템은 온도, 압력 등의 여러 물리량이 공간적으로 널리 분포되어 있다. 따라서, 시스템의 효율적인 동작을 관리 감독하기 위해서는 여러 물리량을 동시 분포계측 할수 있는 시스템이 요구되고 있다.

현재 이용되고 있는 계측 방식은 다수의 점센서를 조합하여 사용하는 다점 계측 방식으로, 장거리, 넓은 지역에서 필요한 정보를 얻기 위해서는 많은 센서, 전원, 정보 전송로 등이 필요하다. 이것은 계측 시스템을 복잡하고 비효율적으로 만들고 있다.

광섬유를 센서로 사용하는 분포형 센서는 전원공급로, 센서, 정보 전송로 등을 일체화 할 수 있을뿐 아니라, 광섬유의 장점을 이용하여 전기적 스파크, 강력한 전자기 감섭등의 위험한 환경 및 시공간적으로 제한된 환경을 원격 계측할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 전력설비등과 같이 널리 분포되어 있는 시스템이 온도 변화에 의해 열화되는 것을 방지하는 진단시스템의 하나로써 광섬유 분포형 온도센서의 원리와 그 시스템의 구성 및 실험결과를 나타내었다. 이 광섬유 분포형 온도센서는 OTDR의 원리를 이용한 것으로서 광섬유 내의 Raman산란을 이용하여 온도 분포를 계측하는 것이다.

2. 분포계측의 원리

2.1 OTDR의 기본원리

분포형 센서는 공간적으로 널리 분포되어 있는 계측 대상의 물리량을 측정하기 위한 센서이다. 광섬유에 펄스폭이 짧은 펄스광을 입사하면 광섬유 전체를 통해 재질이나 굴절률의 미소 변동으로 인하여 산란이 발생하고, 굴절률 불연속면에서는 Fresnel 반사가 발생하여 전체적으로 광 강도가 감소된 상태로 진행한다. 산란된 광의 대부분은 광섬유 밖으로 방출되지만, 일부는 광섬유 내를 역전파하여 입사단으로 되돌아온다. 돌아온 광의 성분중에서 불연속 구간의 반사를 제외한 98% 이상이 Rayleigh 산란광이며 그파장은 입사광의 파장과 동일하다.

각종 물리량이 광섬유에 가해지거나 혹은 광섬유 자체내의 결함이나 파손점이 있을 때 입사단으로 돌아오는 산란광은 그 산

란 지점까지의 왕복 시간지연을 가지고 있기 때문에 도달시간을 측정하면, 광속을 알고 있으므로 그 산란이 발생한 위치를 알 수 있다는 것이 OTDR의 원리이다. 그림 1은 OTDR의 기본 구성도이다.

분포형 온도센서는 OTDR의 기본원리를 이용한 것으로, 하나의 광파이버로서 수 Km의 장거리에 걸쳐 온도의 분포상태에 관한 정보를 얻을수 있다는 점에서 응용·연구개발 되고 있다.

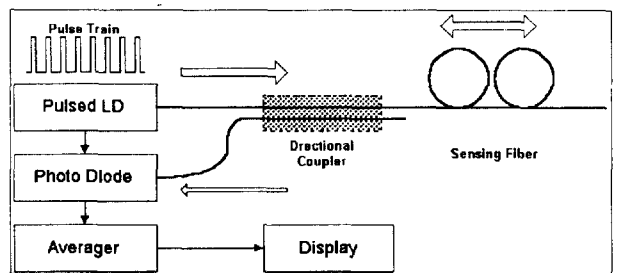


그림 1 OTDR의 기본 구성도

Fig 1 Basic Composition of OTDR System

OTDR의 동작원리는 광파이버에 펄스광을 입사하여, 광파이버의 내부에서 유발되는 여러 가지 요인들에 의하여 Rayleigh, Raman 산란등이 일어난다. 이러한 산란광 중에서 입사단으로 되돌아 오는 후방산란광의 세기변화를 입사후의 시간의 함수로 하여 측정하므로써 광파이버 내부의 전송손실분포, 장애점 등을 측정하는 방법이다. 따라서, 광파이버의 후방산란광계수, 손실 및 전송광의 편광상태가 피측정 물리량의 변화를 연속적으로 검출하는 것이 가능하다.

광파이버 내에서 산란이 발생하는 원리를 그림 2에 도식화 하였다. 광파이버에 입사된 빛이 거리 l인 지점에서 다시 되돌아오는 시간 t는 다음과 같으며 c는 광속, n은 굴절률, v는 광파이버 내의 광속을 나타낸다.

$$t = \frac{2l}{v} = \frac{2nl}{c} \quad (1)$$

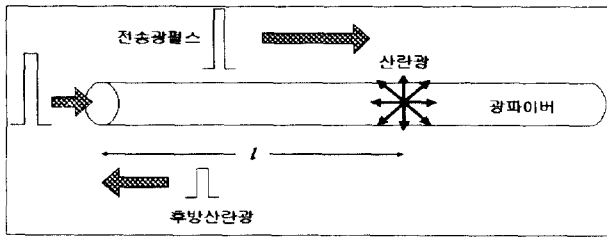


그림 2 광섬유 내에서의 후방산란광의 발생  
Fig 2 Generation of Backscattering Light in Optical Fiber

### 2.2 Raman 산란을 이용한 온도 측정의 원리

광섬유에 광을 입사시키면 구성 원자, 분자 등에 의해 산란, 흡수, 재발광 등이 일어난다. 산란광 중에는 입사광과 동일한 파장 성분의 Rayleigh 산란광과 다른 파장성분의 산란광이 존재하며 다른 파장의 성분들은 파장천이의 원인에 따라 명칭이 다르다. 광섬유 구성 물질의 격자 열진동 중에서 횡과모드와 상호작용으로 인한 것을 Raman 산란광이라 부르며 석영분자에 흡수되어 열진동의 횡과모드를 여기한 후 재발광하면 광 에너지를 잃은 장파장의 Stokes 광( $\lambda_s$ )으로 변환되고 횡과모드를 흡수하여 재 발광하면 에너지를 얻은 단파장 anti-Stokes 광( $\lambda_a$ )이 된다.

Stokes 광과 anti-Stokes 광의 파장은 다음과 같다.

$$\frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{\lambda_0} - \nu_k \quad (2)$$

$$\frac{1}{\lambda_a} = \frac{1}{\lambda_0} + \nu_k \quad (3)$$

$\lambda_0$ 는 입사광의 파장,  $\lambda_a$ 는 Anti-stokes 광의 파장,  $\lambda_s$ 는 Stokes 광의 파장,  $\nu_k$ 는 Raman 산란에 의한 파수 변천량을 나타낸다. 그림 3은 광 섬유 진동입자에 의한 광의 산란과 파장 특성을 나타낸 것이며, 그림 4는 각 산란광의 파장대와 크기를 나타낸 스펙트럼이다.

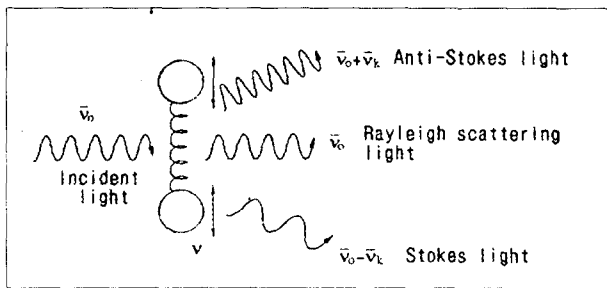


그림 3 광섬유 구성 입자에 의한 광의 산란  
Fig 3 Raman scattering by component of optica fiber

$\nu_k$ 는 물체의 재질에 따라 달라지는 것으로서 실리카의 경우에 일반적으로  $400 \text{ cm}^{-1}$  정도로서 파장  $800 \sim 850 \text{ nm}$ 의 전송영역에서 약  $30 \text{ nm}$ 의 파장천이가 일어난다. Raman 산란광의 세기는 Rayleigh 산란광의 약  $10^{-3}$ , 입사광의  $10^{-9}$  정도로 매우 미약하다. 그러나 Raman 산란광의 두 성분은 Rayleigh 산란광보다 온도에 대해서 훨씬 더 민감하다. 특히 anti-Stokes 산란광은 Stokes 산란광보다  $1/3 \sim 1/4$  정도의 세기이지만 온도에 대한 감도는 7배 정도 크다. 왜냐하면, 열평형 상태에서 분자진동, 격자진동 등에 의하여 여기된 분자의 수는 절대온도에 직접적 연관이 있기 때문이다.

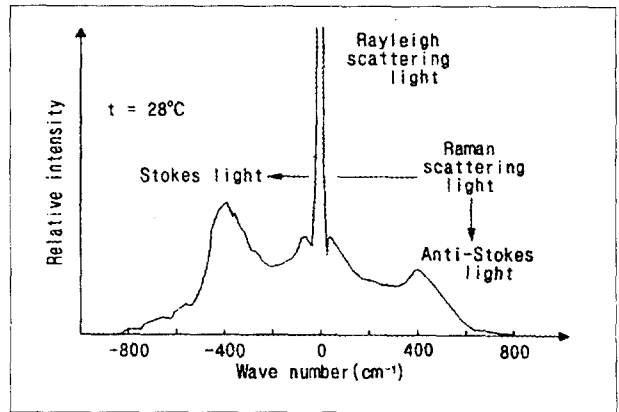


그림 4 Rayleigh 산란광과 Raman 산란광의 스펙트럼  
Fig 4 Rayleigh & Raman scattering spectrum in optical fiber

온도의 측정은 식 (4)에서와 같이 온도 변화에 대한 anti-Stokes 산란광의 세기를 측정하는 방법과 식 (5)와 같이 Stokes 광과 Anti-stokes 광의 비  $R(T)$ 로서 온도를 측정하는 방법이 있다. 후자의 방법은 광원의 파장과 재료가 일정하다면,  $R(T)$ 는 온도  $T$ 에 관한 함수이므로  $R(T)$ 를 측정하는 것에 의해 온도를 측정할 수 있다.

$$P_{AS}(l) = \frac{1}{2} P_0 W S \gamma_s(l) v \exp \left\{ - \int_l^0 \alpha(l) dl \right\} \times \exp \left\{ - \frac{hcv}{kT} \right\} \quad (4)$$

$$R(T) = A \left( \frac{\lambda_s}{\lambda_a} \right)^4 \exp \left( \frac{-hcv}{kT} \right) \quad (5)$$

$P_{AS}$ 는 anti-Stokes 후방산란광의 세기,  $P_0$ 는 펄스광의 최대 크기,  $W$ 는 펄스광의 펄스폭,  $S$ 는 광파이버에서 재결합되는 Rayleigh 산란광의 비,  $\gamma_s$ 는 Rayleigh 산란광에 의한 산란계수,  $\alpha(l)$ 는 거리  $l$ 에서의 감쇠계수,  $A$ 는 비례상수,  $h$ 는 플랑크 상수,  $k$ 는 볼츠만 상수,  $T$ 는 광파이버의 절대온도를 나타낸다.

온도의 감도는 식 (5)를 미분함으로써 구할 수 있다.

$$dR(T) = \frac{1}{R} \left( \frac{kT^2}{hcv} \right) dR \quad (6)$$

비례상수  $A$ 는 온도가 알려진 광파이버 기준부에서 온도를 측정함으로써 알 수 있다.

그러나, 측정되는 온도 분포는 광파이버 각 지점에서의 실제 온도가 아니라 입사 펄스광의 펄스폭에 해당하는 거리에 걸쳐 평균화 된 온도이다. 이것은 입사되는 펄스광이 펄스폭에 대응하는 길이 만큼 분포되어 있기 때문이다. 이것을 응답거리라 하며 고감도의 온도 분포측정을 위해 짧은 펄스광을 사용해야 한다. 그러나 펄스폭이 짧아지면 후방산란광의 세기는 약해지므로 온도 정확도가 낮아진다.

식 (4)로부터 알 수 있듯이 후방산란광의 세기를 증가시키려면, 넓은 펄스폭, 높은 입력 펄스광, 높은 산란 계수가 요구된다. 그러나, 넓은 펄스폭의 광원은 거리측정 정확도를 떨어지게 하므로 알맞지 않다. 측정거리 정확도는 다음과 같다.

$$\Delta Z = \frac{vW}{2} \quad (7)$$

### 3. 센서계의 구성

그림 5는 Raman 역산란광을 이용한 분포형 온도센서의 구성을 나타낸 것이다. 광펄스는 분광 광학계를 지나서 광섬유로 입사되고 광섬유 안에서는 여러 요인으로 인해 Raman 역산란광이 발생하여 입사단으로 돌아오면 분광 광학계에 의해서 Stokes 광과 anti-Stokes 광으로 분리된 후에 검출소자를 거치면서 전기

신호로 변환된다. 이 신호는 아날로그 앰프에 의해서 증폭된 후 잡음 감소를 위하여 평균화 처리된다. 이 과정을 수천번 반복하여 전체 측정 데이터를 가산 평균하면 랜덤 잡음은 감소하며, 평균화 처리한 데이터는 컴퓨터로 전송되고 최종적으로는 온도 데이터로 변환된다.

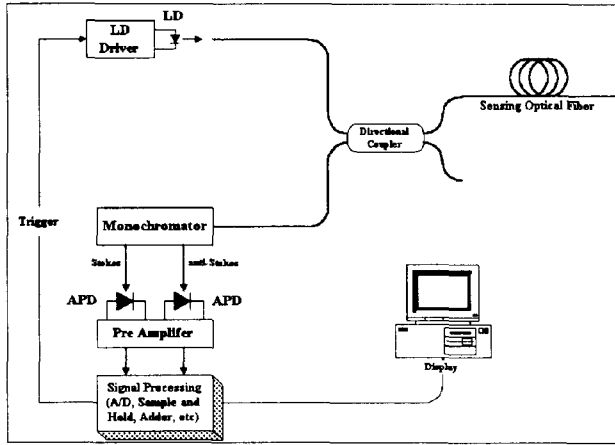


그림 5 분포형 광센서 시스템의 구성도  
Fig 5 Composition of distributed optical fiber sensor system

이와 같은 구성법을 사용하면 원리적으로 각 지점간의 온도차 즉, 상대치는 간단히 측정할 수 있지만 절대치를 측정하기는 어렵기 때문에 센서 내부에 온도 기준용 광섬유를 수백 m 내장하고 있으며 피측정 광섬유와 동시에 온도를 계측하고 내장한 광섬유의 온도는 별도의 수단으로 측정하여 광섬유 전체 길이의 온도 절대치를 결정한다. 분포형 온도센서의 특성을 나타내는 파라미터로는 일반적으로 온도 정밀도 및 측정온도 범위 외에도 거리분해능, 응답거리 및 측정가능거리 등이 있다. 이와 같은 여러 특성들은 상호 밀접하게 관련되어 있다.

온도정밀도는 신호 강도와 잡음 레벨과의 SNR로 결정된다. 광섬유로 펄스폭  $W$ 의 광펄스를 입사하고  $t$ 초 후에 검출된 Raman 산란광의 강도는 다음 식으로 주어진다.

$$P(t) = P_0 \cdot W \cdot b \cdot \beta \cdot \exp(-a \cdot v \cdot t) \quad (8)$$

여기서  $v$ 는 광섬유 안의 광속,  $\beta$ 는 Raman 산란강도,  $b$ 는 전체 Raman 산란강도에 대한 역 산란광의 비율,  $a$ 는 광섬유의 전송 손실이다. Raman 산란 강도는 Rayleigh 산란 강도의 약  $10^{-3}$  배로 아주 미약하므로 큰 Raman산란 강도를 얻기 위한 연구가 필요하며 광원으로는 일반 통신용 반도체 레이저에 비해서 출력이 큰 펄스 반도체 레이저를 사용하고 센서로 사용한 광섬유는 온도 감도를 높이기 위해 도핑한 직경이 큰 GI 광섬유를 사용한다. 즉, 광 펄스폭  $W$ 를 길게 하면 입사광량이 증가해서 신호 강도도 증대하는 반면 응답거리 특성이 열화되기 때문에 무제한으로 펄스폭을 길게 할 수 없다.

### 3.1 광학계

광학계는 LD, LD 구동회로, 광 분리부, 광학 필터, 광 검출부로 구성된다. LD 구동회로에서 출력되는 DC 전원과 트리거 신호로서 LD를 구동하게 되며, 중심파장 904 nm, 최대출력 20 W, 펄스폭 15 ns, PRF(Pulse Repetition rate) 10 kHz의 LD를 사용하였다.

광 분리부는 광파이버 2×2 커플러(Optical Fiber Coupler)를 이용하여 LD의 펄스광을 센서 광파이버에 입사시키고, 센서 광파이버에서 되돌아오는 후방산란광을 monochromator를 사용하여

여 분리하며, 광파이버 connector로 anti-Stokes 산란광과 Stokes 산란광으로 다시 분리한다.

표 1. LD 및 LD 구동회로의 특성  
Table 1. Characteristic of LD and LD driver

Wavelength	904 nm
Peak Power	20 W
Pulse width	15 ns
PRF	10 kHz
Trigger input	4 V, 10 kHz, Duration 2μs

표 2 광섬유 커플러의 특성  
Table 2 Characteristic of Optical fiber Coupler

Number of ports	2×2
Wavelength range	800 ~ 900 nm
Fiber	50/125 μm, GI

분리된 광신호는 매우 미약하므로 PD(Photodiode)보다 감도가 우수한 Si-APD(avalanche photodiode)를 이용하여 증폭된 전기신호로서 변환하게 된다. 그러나 APD의 잡음은 신호의 검출의 정확도를 떨어뜨리는 주요한 작용을 하므로 정확한 온도 분포를 측정하기 위해서 신호처리가 필요하다.

표 3 Si-APD의 특성  
Table 3 Characteristic of Si-APD

Active Area	φ 3 mm
Spectral Response	400~1000 nm
Peak Wavelength	800 nm
Cutoff frequency	4 kHz~10 kHz
Photoelectric Sensitivity	2.3×10 <sup>4</sup> V/W

### 3.2 신호처리부

신호처리는 변환된 전기신호를 신호처리회로의 A/D 변환기를 이용하여 디지털 신호로 변환하고, 저장한다. 광파이버에 입사하는 많은 펄스광에 대한 데이터를 샘플링 시간에 대응하여 평균화한다. 신호의 평균화 처리는 Si-APD에서 생긴 잡음, 산란광중에 포함된 잡음을 감소시켜, S/N비를 개선함으로써 미약한 Raman 산란광을 정확하게 측정할 수 있게 한다. S/N 비를 높이기 위해서는 강한 세기의 LD, 짧은 펄스폭과 APD 및 신호처리회로의 낮은 잡음 등이 요구된다.

또한 신호처리부에서는 식 (5)를 이용하여 광파이버 각 지점에 대한 온도 분포를 구하게 된다. 따라서 측정 광신호에 대한 입사 펄스광의 세기의 변화, 광파이버 전송 손실의 변화, 외란등의 영향을 제거할 수 있다.

### 3.3 센서 파이버

광파이버 자체가 센서로서 동작하여, 광파이버 각 부위가 센서들의 조합과 같은 역할을 한다. 본 실험에서는 길이 1000 m, 50/125 μm의 통신용 Standard GI(graded index) 다중모드 광파이버를 사용하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 실험방법

본 연구에서는 시스템을 구성해 나가면서 시스템 구성에 필요

한 각 소자들에 대한 기초 실험을 행하였다. 구성된 시스템을 이용하여 실제 온도를 측정하기 위하여 항온조를 사용하였다. 길이 1.1 km의 광파이버의 일부를 감아서 항온조에 놓은 후 온도를 가변시키면서 실험을 행하였다.

광학계의 800 nm에서 최대 감도를 갖는 Si-APD에서 전기 신호로 출력되는 온도 분포 데이터는 신호처리회로에 입력시킨 후 샘플링하고 디지털적으로 가산하여 S/N 비를 향상시키는 디지털 평균화 처리하였다.

#### 4.2 후방산란광 측정

측정된 후방산란광의 파장 및 세기분포를 그림 6에 나타내었다. 파장 904 nm의 전송영역에서 anti-Stokes 산란광과 Stokes 산란광을 monochromator를 사용하여 scanning하여 최대값을 갖는 파장을 찾아냈다.

#### 4.3 온도 측정

본 실험에서는 온도범위 10°C로부터 90°C까지 측정된 Stokes 산란광과 anti-Stokes 산란광의 세기비  $R(T)$  값을 그림 6에 나타내었다. 또한 실험된 온도구간에서 그 측정치가 거의 비례하고 있음을 알 수 있다. 따라서 광파이버의 각 부분에 따른 온도 분포는 광파이버 각 부분에서 발생하는 Stokes 산란광과 anti-Stokes 산란광의 세기를 측정함으로써 구할 수 있음을 알 수 있다.

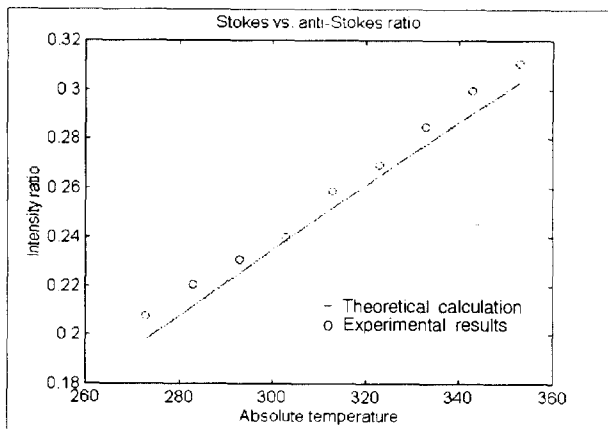


그림 6 온도에 따른 Stokes 산란광과 anti-Stokes 산란광의 Intensity ratio

Fig 6 Intensity ratio of Stokes and anti-Stokes scattering light vs. temperature

### 5. 결론

본 연구에서는 광파이버 내에서의 Raman 후방산란광을 이용하여 분포온도계측을 할수 있는 센서를 구성하였다. Stokes 산란광 및 anti-Stokes 산란광 등의 Raman 산란광의 세기가 광파이버 외부의 온도변화에 의존하는 현상을 증명하였다. 또한 광원의 파장과 재료가 일정한 경우 Raman 산란광의 비는 절대 온도에 관한 함수이므로 이 비를 측정하는 것에 의해 절대 온도를 측정할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 Raman 산란을 이용한 분포형 광파이버 온도 센서 시스템을 구성하여 그 유용성을 확인하였다.

### 참고문헌

- [1] T. G. Giallorenzi, et al., "Optical fiber sensor technology," Journ. of Quantum Electron., Vol. QE-18, p. 626, 1982.
- [2] D. A. Krohn, "Fiber optic sensor fundamentals and applications" ISA, 1988
- [3] J. Dakin and B. Culshaw, "Optical fiber sensor : Principle and Component," Artech House, 1988.
- [4] K. Kyuma, S. Tai, T. Sanada, and M. Nunoshita, "Fiber optic instrument for temperature measurement," Journ. of Quantum Electron. Vol. 18, p. 676, 1982.
- [5] T. Basnett and S. J. Barber, "Distributed temperature measurement with optical fibers," SPIE, Vol. 1120., p. 291, 1989.
- [6] M. K. Barnoski, S. M. Jensen, "Fiber waveguides : a novel technique for investigating attenuation characteristics," Appl. Opt, Vol. 15, No. 9, p. 2112, 1976.
- [7] M. K. Barnoski, M. D. Rourke, S. M. Jensen, and R. T. Melville, "Optical time domin reflectometer," Appl. Opt, Vol. 16, No. 9, p. 2375, 1977.
- [8] J. Dakin, "Temperature distributed measurement using Raman ratio thermometry," SPIE, Vol. 566, pp. 249, 1985.
- [9] J. P. Dakin, "Distributed optical fibre Raman temperature Sensor using a semiconductor light source and detector". IFS. 1990
- [10] H. Hidaka, et al., "Optical Temperature Distribution Temperature fiber sensor," Fujikura Technical Review, p. 43, 1988.
- [11] 田井 修市, 高橋 正信, 久間 和生, "分布形光ファイバセンサ," 計測と制御, Vol. 26, No. 4, 1987
- [12] 橋本 國生, "後方散亂分光で單一モード光ファイバの19km先破断点を検出," Nikkei Electronics, No. 4, p. 179, 1982.