

광섬유를 이용한 분포형 온도 측정장치



대한전선(주)
기술연구소 제2연구부
부장 전찬오

1. 서론

최근 우리나라에서 전력 및 통신구의 화재로 인하여 많은 경제적 손실을 가져오는 사건들이 발생하고 있다. 이와 같은 전력의 수급 및 통신상의 문제는 지역의 주민에 대한 불편 뿐 아니라 정보화 시대에 있어서 매우 큰 손실을 가져올 수 있는 문제이기 때문에 이러한 전력 및 통신구에 대한 상시적인 감시가 필요하다는 의견이 크게 대두되고 있다.

그러나, 전력 및 통신구와 같이 감시 영역이 복잡하고 넓은 경우 기존의 감시체계를 이용하려면 많은 수의 감시장치 또는 센서와 이를 다시 중앙 통제실로 보내는 전송장치등이 필요하게 되어 그 경제성에 대해 논란의 여지가 많다. 또한 지하 전력구의 경우 송전압이 점차 상승되어 가는 추세이므로 전력케이블로부터 유도되는 전압이 각 센서 또는 통신 매체를 이용할 경우 이에 유도되는 전압으로 인해 왜곡된 data가 전송 되거나 장치의 안정성에 문제가 될 수 있는 것이다. 그러므로, 이러한 영역에 대해 광섬유를 이용한 분포형 온도 측정장치를 적용하는 것은 매우 효율적인 해법이 될 수 있는 것이다.

광섬유는 통신용 매체이면서 온도 센서로 사용이

가능하다는 것은 오래전부터 알려져 왔다. 그러나 온도정보를 싣고 있는 광 신호는 통신용 신호에 비해 매우 미약하므로 이 미약한 신호를 검출하여 온도를 산출하기 위해서는 별도의 장치가 필요하게 되며 본 글에서는 이러한 장치의 원리와 특성, 그리고 응용범위에 대해 간략하게나마 기술해 보고자 한다.

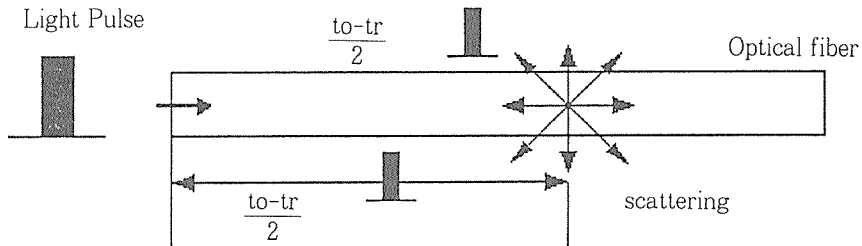
광섬유의 손실을 측정하는데 사용되는 OTDR(Optical Time Domain Reflectometer)은 광 pulse를 fiber에 입사시키고 fiber 내에서 여러방향으로 산란되는 빛 중에서 후방으로 산란되어 입사단으로 되돌아오는 빛(후방산란광)을 sampling receiver를 통해 그 빛의 강도를 분석하는 형태로 되어 있다. 이러한 장치에서 fiber 영역내에서 거리에 대한 함수로써 손실을 표시하기 위해서는 광 pulse를 입사시킨 시간과 후방산란광이 되돌아오는 시간의 차이를 이용하여 sampling된 산란광이 fiber의 어느 부분에서 산란된 빛인가를 산출해 낸다. 또한 이러한 거리에 대한 분해능을 높이기 위해서는 입사시키는 광 pulse의 진폭과 sampling time이 이에 대한 성능을

결정 짓게 된다.

동시에 한 측정점 이상의 sampling 신호를 받는 것을 피하기 위해서는 광 pulse는 $C/2L$ 이하로 제한되는데 여기서 C는 광속, L은 전체 fiber의 길이이다. 즉, fiber의 측정에 사용되는 time domain 해석에서 중요한 거리 분해능은 얼마나 pulse의 폭을 좁게 하고 같은 영역에 대한 신호의 S/N비를 개선하느냐 하는 것에 의존한다 할 수 있다.

광섬유를 이용한 분포형 온도 측정장치는 전력·통신구 뿐 아니라 앞으로 건설될 많은 intelligent building, 공장의 pipe line, tank 등 그 사용범위를 넓혀 갈 것이며 이상온도의 검출과 온도의 분포 측정 및 온도의 변화율등 온도 data 분석을 적용할 수 있는 여러분야에 이용될 것이다.

2. 측정장치의 원리



〈그림-1〉 분포형 온도 측정장치의 원리

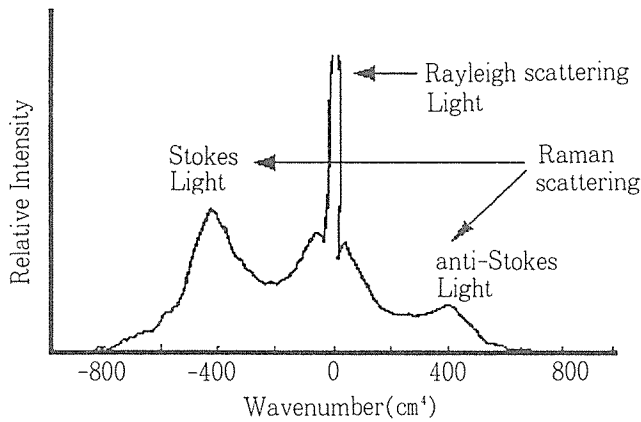
〈그림-1〉에서 보는 바와 같이 측정대상영역에 설치된 fiber sensor의 한쪽 끝단에서 광 pulse를 입사시킨다. 이때 광 pulse가 입사된 시간 t_0 와 fiber의 어떤점에서 산란된 빛이 입사단으로 돌아오는 시간 t_r 과의 차 Δt 를 이용하여 빛이 산란된 지점까지의 거리를 알 수 있다. 이때 거리 x는,

$$x = v \cdot \Delta t / 2 \dots\dots\dots (1)$$

로 나타낼 수 있고 여기서 v는 fiber내에서의 빛의 속도를 의미한다.

또한 광 pulse가 산란된 지점의 온도는 후방산란

된 빛 중에서 Raman scattering된 빛의 세기로부터 산출해 내는데 후방산란광에는 크게 다음과 같은 두 가지의 성분으로 구별된다. 하나는 fiber의 재료의 분자내의 탄성충돌에 의한 Rayleigh scattering으로서 입사된 광 pulse의 대부분을 차지하게 된다. 다른 하나는 성분은 비탄성 충돌에 의해 산란되는 Raman scattering으로서 이 산란광은 Rayleigh scattering과 달리 입사된 광 pulse와 다른 파장을 갖게 된다. 〈그림-2〉에 Rayleigh scattering과 Raman scattering에 대한 spectrum을 간략하게 나타내었다.



(그림-2) Rayleigh scattering과 Raman scattering

이 Raman scattering은 두개의 다른 성분으로 나뉘어지는데 anti-Stokes light 성분과 Stokes light 성분으로서 각각 입사광 pulse의 파수에서 +400cm⁻¹와 -400cm⁻¹씩 shifting하여 나타난다. 이때 Raman scattering의 intensity는 매우 미약하여 입사광의 10⁻⁹배, Rayleigh scattering의 10⁻³배에 해당하는 정도의 아주 미약한 광이다.

그러나 이 두개의 성분이 Rayleigh scattering성분의 산란광에 비하여 온도의존성이 훨씬 높게 나타나므로 미약한 Raman scattering을 온도 측정 신호로 사용하게 된다. 또한 온도 산출에 있어서 두성분의 비율을 이용하므로써 fiber sensor 자체의 재료성분에 대한 의존성을 무시할 수 있으며 오직 온도에 대한 의존성만을 이용할 수 있게 된다.

식(2)에 온도의존성에 대한 연관성을 나타내었다. 이 식은 입사파의 파장과 optical fiber의 재료가 일정할 경우에 성립되는 식으로서 광섬유를 이용한 분포형 온도 측정장치의 주된 기능을 수행하도록 해주는 식이라 할 수 있다.

$$I_a/I_s = \frac{(\bar{\nu}_0 + \bar{\nu}_k)^4}{(\bar{\nu}_0 - \bar{\nu}_k)^4} \exp(-h \cdot \nu \cdot \bar{\nu}_k / K \cdot T) \dots (2)$$

여기서 I_a = anti-Stokes scattering의 세기

I_s = Stokes scattering의 세기

$\bar{\nu}_0$ = 입사 광 pulse의 파수

$\bar{\nu}_k$ = 유리의 파수 전이

h = Plank's constant

ν = fiber내 빛의 속도

K = Boltzmann 상수

T = 절대온도

여러 온도에서 측정되는 intensity의 비를 온도에 대한 함수로 나타내보면 -50°C ~ +200°C 사이에서는 거의 일정한 출력을 나타낸다. 그러므로, fiber sensor내의 여러점에서 측정되는 온도를 거리에 대한 곡선으로 나타내면 fiber sensor가 포설된 지역의 온도분포를 쉽게 알 수 있게 된다.

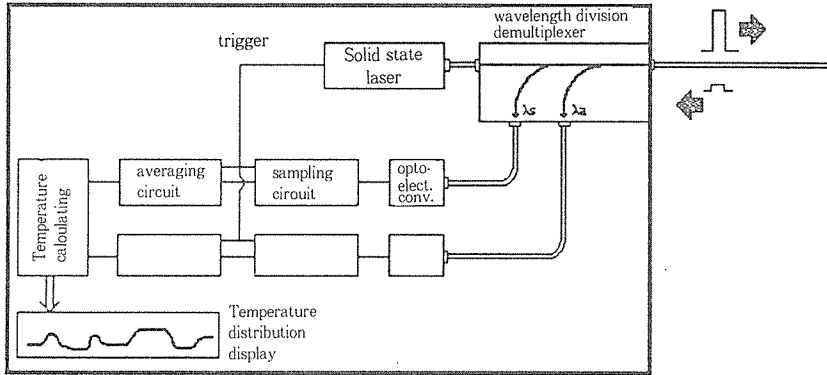
3. 측정장치의 구성

분포형 온도 측정장치의 구성을 (그림-3)에 간략하게 나타내었다. 이 장치는 온도센서로서의 광섬유와 측정 unit 본체 그리고 온도의 계산과 온도분포의 display 및 data 저장분석이 가능한 PC로 구성되어 있다.

반도체 레이저로부터 fiber에 입사된 광 pulse는 산란을 일으키고 이 산란광중 일부가 후방으로 되돌아와 photodiode로 검출되는데 전체 후방산란광중에서 측정에 사용되는 Stokes 및 anti-Stokes 산란광만을 분리하여 각기 따로 Si-APD로 검출한다. 검출된 두 성분의 강도는 APD에서 전기신호로 변환되어 증폭되는데 10ns의 간격으로 digitized되어 저장된다. 이때 입사된 pulse에 대해 거리에 대한 함수로

서 시간이 일정한 data들을 평균하여 그 거리에 대한 온도를 산출하게 된다. 광섬유의 굴절율을 고려한 광속을 감안하면 10ns의 sampling time에 상응

하는 거리분해능은 fiber길이에 대해 약 1m로 주어진다.



(그림-3) 분포형 온도 측정장치의 개략

평균화 과정은 S/N비를 개선하기 위해 필수적으로 수행되어야 하며 그러므로써 미약한 Raman scattering에 의한 신호를 측정하는데 있어 정밀도를 향상시킬 수 있다. 앞의 식(2)를 통해 온도를 산출해내고 이 온도를 sampling된 시간에 따른 거리함수로 표시해 주므로써 fiber sensor가 포설된 구간에 대한 온도 분포를 알 수 있다. 이러한 온도분포 산출 방법은 광원의 power fluctuation이나 fiber sensor에 의한 외란 전송손실 등의 성분에 의한 영향을 상쇄시키므로써 측정 오차를 감쇄시킬 수 있다.

분포형 온도 측정장치에서는 최대 측정 가능 거리와 거리에 대한 해상도가 중요한 성능의 척도이다. 최대 측정가능 거리는 광원의 세기와 fiber의 손실이 그 parameter가 되고 거리에 대한 해상되는 입사광 pulse와 sampling time이 그에 관련된 parameter가 된다. 또한 system의 가격 대비 성능을 향상시키기 위하여 미약한 Raman scattering의 두성분을 모두 측정하지 않고 측정이 쉬운 한 성분만을 분리해 intensity를 측정하고 비율 계산을 위한 다른 한 성분은 Rayleigh 성분을 측정하므로써 S/N비를 크게 개선하면서 온도 해상도를 약간 감쇄시키는 방법도 있다. 이러한 측정방법의 변형은 장치 제작시 그 환경과 용도, 외적인 여러가지 요인들을 분석하여 알맞는 방식을 채택하여야 한다.

정밀도의 사전 측정 및 측정을 위한 보정과정은 모든 측정장치의 기본적인 check point라 할 수 있

는데 분포형 온도 측정장치의 보정 및 정밀도 측정은 최대 측정가능 거리 판단 후 측정가능 거리 이내의 fiber sensor를 포설하고 수m의 sampling section을 설정한 후 이 sensor 부위를 정온 온도 chamber에 넣어 둔 채로 장치의 보정 및 정밀도 측정을 할 수 있다. 장치의 기본적인 보정시에 이러한 방법을 사용하며 fiber 센서의 정밀도 측정, 센서구조에 따른 온도 변화 검지시간(delay time) 등을 측정하는데도 이러한 방법이 필요하다.

4. Applications

분포형 온도 측정장치는 산업분야 전반에 걸쳐 온도 측정 및 감시가 필요한 영역에 사용될 수 있다. 서론에서 보인 바와 같이 전력구 및 통신구 등 측정 대상영역이 매우 긴 경우에 적용이 적합하고 전자파 장애로 인해 기존의 전기 센서가 오동작을 할 우려가 있는 곳, 또는 전기적 절연이 문제가 되는 곳에 적용하면 장치비에 대한 성능면에서 우수한 효과를 볼 수 있을 것으로 기대된다.

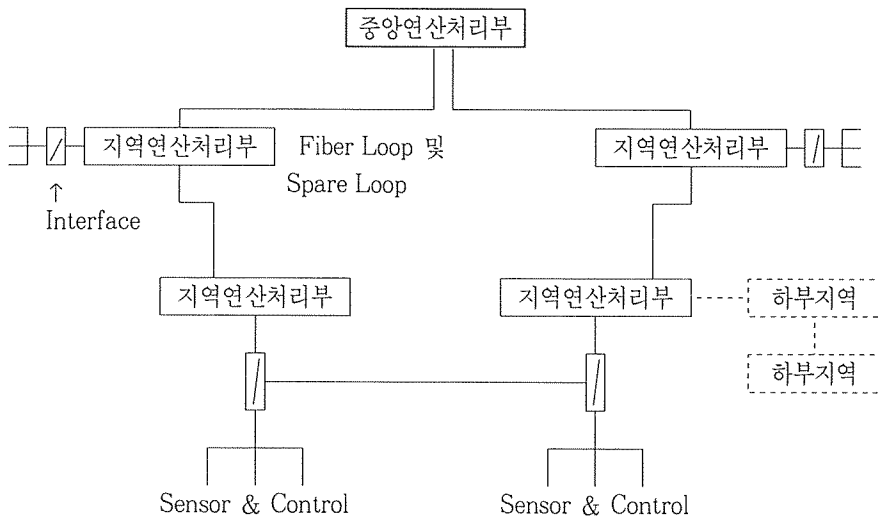
지하 전력구에서의 적용

정보화 사회로 발전하는 과정에서 전력 및 통신선의 안정성 확보는 필수적인 조건이다. 또한 전력 및

통신선이 지중 매설되는 추세에 있으며 이러한 선로의 안정성 확보를 위해 선로 구간에 대한 monitoring 및 위기 상황에 대한 조기 감지 기능을 제공하기 위해서는 on-line monitoring 및 사고 방지기능의 상시 수행이 필요한 것이다.

그러므로 전 구간에 대한 분포형 온도 측정장치의 포설과 함께 다른 여러가지 센서 및 control 장치들이 동시에 적용되고 각 sector 별로 필요한 control

신호까지 중앙에서 관리할 수 있는 장치들이 제공되고 있다. 또한 이러한 장치들이 전력구 내에서 오동작 없이 기능을 수행하기 위해서 센서를 이용한 측정 및 측정 data의 전송에 광 섬유를 적용하고 광 전송장치를 포함시키는 추세에 있다. 실제 광범위 분포형 온도 측정장치를 포함하는 지하 전력구 감시 장치의 구성은 다음과 같다.

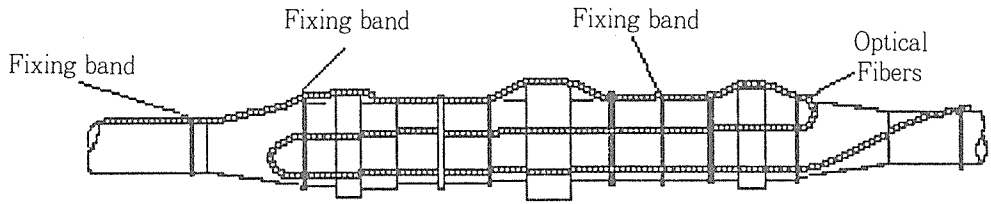


장 치	용 도	비 고
1) 중앙 연산 처리부	- 여러 지역으로 부터 들어오는 data를 수집 · 분석 - Monitoring, 통계처리, 제어 명령판단 - 전체 시스템에 필요한 control data교환	
2) 지역 연산 처리부	- 각 지역의 물리량 측정 및 data 교환과 control 담당	
3) Data interface부	- 지역 연산처리부에 data 공급 및 control data 분산 처리	
4) Sensor부	- 측정 대상에 대한 물리량 측정	

〈그림-4〉 전력구 감시장치의 개념도

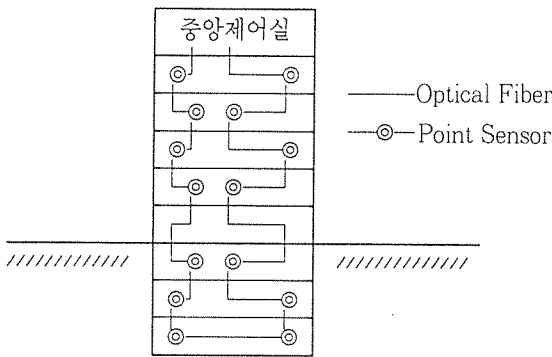
최근에는 전력케이블의 기능 및 통신 또는 센서의 역할을 할 수 있는 광전력 복합케이블의 적용이 증대하고 있는 추세이다. 전력 케이블에 전자유도를 받지 않는 광 케이블을 함께 장치하므로써 전력선이 연결된 지역간의 통신기능을 원활히 수행할 수 있도록 함과 동시에 이 광섬유에 분포형 온도측정장치를 적용하면 전력케이블 자체의 온도 감시기능은 물론 통계적 분석을 통해 상시 허용전류량의 계산, 케이

블의 절연열화점의 조기 판단등을 수행할 수 있는 것이다. 또한 전력케이블의 취약점이라 할 수 있는 접속재 부분에 대한 정밀한 감시기능을 수행하도록 설계할 수도 있다. 이와 같은 기능을 수행하는 분포형 온도 측정장치의 전력케이블 접속재에 적용을 〈그림-5〉에 나타내었다.



〈그림-5〉 전력케이블 접속재에의 적용

측정을 위해서 fiber를 적절한 길이만큼 코일 형식으로 감아둔 point sensor를 구성하여 측정이 필요한 부분에 부착시킬 수 있다. 이러한 point sensor는 설치시 거리 해상도에 대한 보정시간을 단축시킬 수도 있다.



〈그림-6〉 Intelligent building에의 적용 예

Intelligent building에의 적용

최근 건축되고 있는 많은 intelligent building에서는 건물 전체에 대한 monitoring system과 전체 영역에 대한 중앙 집중식 자동제어가 필요하다. 또한 building내의 안정적인 전력 및 통신 service의 보장이 필수적이기 때문에 분포형 온도 측정장치를 이용한 cable duct 및 전력 공급장치에 대한 이상온도 상시 감시를 할 수 있을 뿐 아니라 건물의 온도 측정이 필요한 airconditioning이나 건물의 화재 감시 등에 적용이 예상된다. 즉, 중앙 제어장치에서 optical fiber를 통한 건물의 감시와 제어를 수행하고 이상 온도 발생 또는 이상 온도 변화를 검지하면 그 상황에 적절한 제어명령을 하달한다. 이때 적용되는 분포형 온도 측정장치에서는 각 부위의 정확한 온도

5. 맺음말

이상에서 광섬유를 이용한 분포형 온도 측정장치의 원리와 장치의 구성, 그 응용범위에 대해 살펴 보았다. 분포형 온도 측정장치는 온도측정 대상이 되는 영역이 넓거나 복잡하여 많은 센서의 부착을 통한 중앙제어가 곤란한 경우 또는 전자파 유도에 의한 오동작 등이 염려되는 부분에 적용하여 광섬유 센서가 포설된 전체 영역에 대하여 거리 분해능을 가지면서 거리에 대한 온도 분포를 측정할 수 있다. 또한 이에 관련된 실제적인 포설을 위한 연구가 진행중이다. 광범위한 온도분포를 알 필요가 있을 경우 그 포설 환경과 영역의 넓이 등을 감안하여 장치를 구성한다면 높은 가격대 성능비를 가지도록 할 수 있을 것이다.

또한 분포형 온도 측정장치는 온도를 측정하는 것 이외에 방대한 양의 온도 분포 data를 분석하여 그로부터 열화정도 판별 또는 고장 수명 판정 등의 새로운 물리량을 평가하고 평가된 물리량을 적용하여 인간의 생활에 적용시킬수 있는 software의 개발을 필요로 한다. 분포형 온도측정장치를 사용하는 각 분야에서 제작되어야 할 이 software와 함께 전기, 통신 뿐 아니라 건축, 토목, 물리 등의 여러분야에 그 적용 분야를 넓혀 갈 것으로 기대된다.