

광섬유센서를 이용한 온도 및 변형을 모니터링 기법의 전력계통분야에 대한 적용성 연구

신 희덕¹, 남 정세*¹, 김 중열², 김 유성²
¹ 대한전선(주) 전력사업부, ² (주)소암 컨설턴트

Applicability of temperature and strain monitoring using a optic fiber to the power system

SHIN HEE-DEOK¹, NAM JEONG-SE*¹, KIM JUNG-YUL², KIM YOO-SUNG²
¹ TAIHAN ELECTRIC WIRE CO., LTD, ² SOAM CONSULTANT CO., LTD

Abstract - 최근 사전 예고 없는 잇따른 대형 정전 사고가 예기치 않게 발생하고 있으며, 심지어는 그 사고 원인을 정확하게 파악하지 못해 신속한 복구가 이루어지지 않아 막대한 피해가 발생되고 있는 실정이다. 따라서 이러한 사고를 사전에 예방하고 또한 상시 전력 계통의 원활한 운전에 기여할 수 있는 모니터링 기법이 절실히 요구되고 있다. 전력선이나 전력 장비에는 다양한 요인에 의해 열화점이 생성될 수 있으며 이는 바로 절연파괴, 화재, 기기 손상 및 제어 기기의 오동작을 유발할 수 있게 된다. 무엇보다 전력선이나 전력 장비 전 구간에 대한 분포 개념의 온도 및 변형을 모니터링 할 수 있다면 이러한 문제는 크게 해소될 수 있을 것이다.

1. 서 론

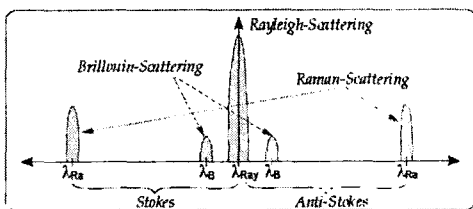
본 연구에서 제시하고 있는 광섬유 센서를 이용한 측정시스템은 광섬유를 따라 분포 개념의 온도를 측정할 수 있는 DTS (Distributed Temperature Sensor) 시스템과 분포 개념의 변형률을 측정할 수 있는 DTSS (Distributed Temperature and Strain Sensor) 시스템으로 구분된다. DTS 시스템은 측정 최대 거리 30km, 최고 온도 분해능 0.01℃, 최소 거리 분해능 50cm로, DTSS는 측정 최대 거리 10km, 최고 변형률 분해능 10μ, 최소 거리 분해능 1m로 측정이 가능하다. 특히, DTSS 시스템은 무엇보다 변형률 측정에 있어 온도 영향을 보정할 수 있으며, 더구나 10Hz 정도의 동적인 변형률도 측정할 수 있다는 탁월한 기능을 갖고 있다. 본 연구는 상기 광섬유 센서를 이용한 모니터링 기법으로 전력 분야 적용 가능성을 점검하는 데 그 목적이 있으며, 그에 대한 전력 계통과 연관된 다양한 응용성 연구가 수행되었다. 그 결과는 전력선(예: 가공 전선, 지중선, 전력구 전력선)과 변전소의 장비(예: 변압기, 고압 개폐기)에 대한 분포 개념의 온도 및 변형을 모니터링이 송배전의 최적화 운전 및 안정성 향상에 큰 도움을 줄 수 있을 뿐만 아니라 효율적인 유지, 관리 및 보수를 통해 막대한 비용 절감 효과를 가져다 줄 수 있음을 보여주고 있다.

2. 본 론

2.1 광섬유센서 이용기술의 근본원리

광섬유에 대단히 폭이 좁은 레이저(Pulsed laser) 파형요소를 보내면 극히 일부분이 흡수되고 대부분은 산란(Scattering)된다. 그중 일부분은 반사되며 광다이오드(수진기능)에 의해 수진되는 진폭은 입사광의 것보다 대단히 작다. 만약, 광섬유의 주위환경에 변화(예: 온도 변화, 변형 변화)가 있으면 다음의 3가지 산란현상이 관심의 대상이 된다.

- 1) Rayleigh Scattering : 큰 진폭을 갖는 Rayleigh 산란은 대체로 케이블 주위 밀도 변화와 연관되며 그의 파장변화는 없다.
- 2) Raman Scattering : Stokes범위에 속한 Raman 산란은 온도변화와 무관하지만, Anti-stokes범위의 것은 온도변화에 따라 그의 진폭 면에서 예민한 반응을 보여준다. 따라서, DTS 시스템에서 시행하는 온도측정은 바로 stokes 및 anti-stokes의 Raman 산란조도(intensities)를 분석함으로써 얻게 되는 결과이다.
- 3) Brillouin Scattering : Brillouin 산란의 stokes 및 Anti-stokes신호는 주파수에 대해 Raman의 것보다 훨씬 인접하고 있다. 더구나 상기 산란신호는 다시 변형을 변화에 따라 그 주파수 위치를 달리하여 분석측면에서 대단히 고도의 분석기법이 요구되고 있다.



<그림 1> 광섬유내 주요 산란 현상

이미 여러 논문을 통해 알려진 Raman 산란을 이용한 DTS 시스템보다는, Brillouin 산란을 이용한 DTSS시스템으로 변형률을 측정하는 다양한 응용성 실험과 성과에 대해 소개하고자 한다.

2.2 DTSS 시스템의 기술수준

지금까지의 변형률측정은 제한된 측정구간에서 제한된 양의 변형률 게이지(strain gauge)에 의해 이루어져 왔기 때문에 현실적으로 시설물 안정성 평가를 위한 불충분한 자료가 될 수밖에 없었다. 그런데, 광섬유센서케이블을 전력케이블을 따라 약 10km설치한 후 1m간격으로 변형률 값을 측정한다면 도합 10,000개 지점의 변형률 값이 취득된다. 이는 바로 10,000개 변형률게이지를 설치하여 동시에 측정하는 결과와 대동하다. 나아가서, 여기에 모니터링이 수행된다면 그에 대한 단일 변형률 게이지 응용은 사용할 필요가 없는 것이다.

광케이블에 의한 변형률 측정은 DTS의 측정원리와 유사하게 케이블을 따라 1m간격으로 변형률값을 얻게된다. 표 1은 현재 DTSS 시스템을 이용한 측정 기술수준을 정리한 것이다.(영국 "Sensornet"社 의 DTSS 장비기준)

<표 1> DTSS측정 기술수준

구 분	단 위	제 시 값	비 고
측정최대거리	km	10km	
최소거리분해능	m	1m	
최고변형률분해능	μ	10μ	

최근 실내 실험에 의해 측정된 광케이블의 최대변형률은 약28,000μ이다. 이는 1m길이의 광케이블이 약 28mm 늘어난 경우이다. 현 DTSS 측정기법은 크게 세가지 유형으로 구분된다.(표 2참조)

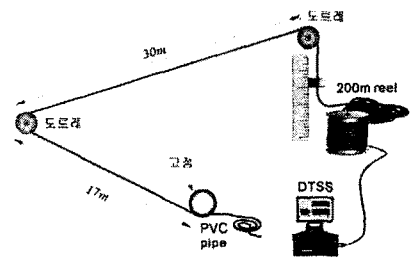
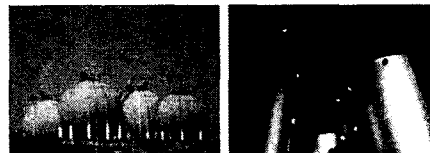
<표 2> 3가지 변형률 측정방법

측정방법	변형률분해능	측정시간	측정거리
분포변형률(온도보정 안함)	10μ	20분	10km
분포변형률(온도보정 실시)	20μ	20분	10km
Dynamic 분포변형률	30μ	0.1초	5km

다음은 전력계통에 응용성을 알아보기 위한 몇 가지 실험을 정리해 보았다.

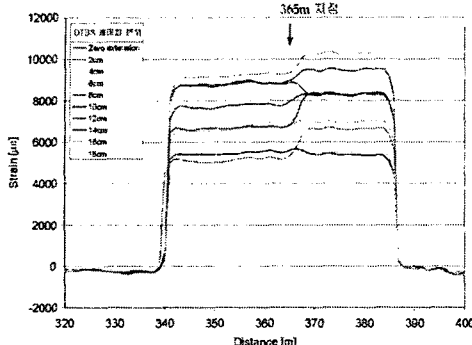
2.3 격납건물을 변위측정을 위한 변형률 측정시험(전력연구원,2005)

그림 2는 원자력 발전소 격납건물의 압력증가에 따른 변위측정을 목적으로 DTSS 케이블을 이용한 변형률 측정기법의 응용가능성을 점검하기 위한 실험모식도를 나타내고 있다. 여기서 DTSS케이블은 격납건물의 변위측정 구간을 고려하여 약45m구간에 변형을 가할 수 있도록 설치하였다. DTSS 케이블에 변위를 주기 위해 늑금자를 따라 이동하는 장치에 DTSS케이블을 직접 부착함으로써 케이블 변위의 정확성을 높이고자 하였다.



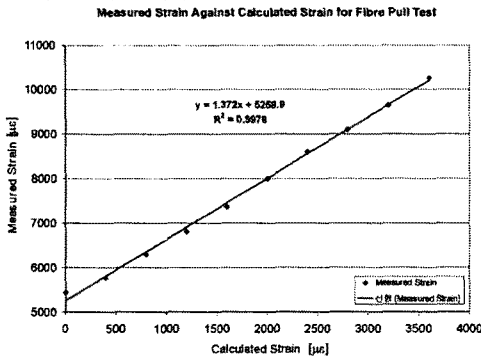
<그림 2> DTSS 케이블 변위에 따른 변형률 측정 실험모식도

그림 3은 DTSS 케이블 변위에 따른 변형률 측정치 (raw data)를 나타내고 있다. 여기서, 케이블 설치 초기(zero extension) 변형률은 약 5,300 μ 로 이는 DTSS 케이블이 처지도록 설치한데 비롯되고 있다. 그림은 DTSS 케이블 변위가 2cm부터 18cm까지 2cm씩 증가됨에 따른 변형률 값을 케이블 변형구간 전체에 대해 나타내고 있다. 약 365m 지점을 중심으로 좌우 케이블의 변형률이 다르게 나타나는 것은 도르래의 마찰력으로 인해 회전이 원활하지 못함으로 인해 일어난 현상이라 할 수 있다. 이러한 문제는 변형 전체구간에 대한 변형률 값(1m 간격으로 측정)들의 평균값을 변형구간의 변형률로 취함으로써 조정될 수 있다.



〈그림 3〉 DTSS 케이블 변위에 따른 변형 측정결과(raw data)

그림 4는 DTSS 케이블 변위에 따른 평균 변형률 값을 나타내고 있다. 여기서, 전체적으로 선형적인 관계로 보이는 것은 바로 변형률의 정의 ((변형률)= Δl (변위) / l (초기길이))와 부합한다는 것을 의미한다. 즉, DTSS에 의한 변형률 측정이 실효성을 얻고 있다는 것이다.



〈그림 4〉 케이블 변위에 의해 이론적 변형치와 실제 변형치 대조

본 실험에서 DTSS 케이블을 이용하여 10,000 μ 이상의 변형률 변화를 측정할 수 있다는 것은 바로 직경 50mm인 격납건물이 500mm변위가 발생하더라도 이를 측정할 수 있다는 것을 입증하는 것이 된다. 따라서, 상기 DTSS 케이블을 이용한 변형률 측정기법은 격납건물의 압력상승시 그에 대한 변위 측정을 위한 기법으로 충분히 활용될 수 있다.

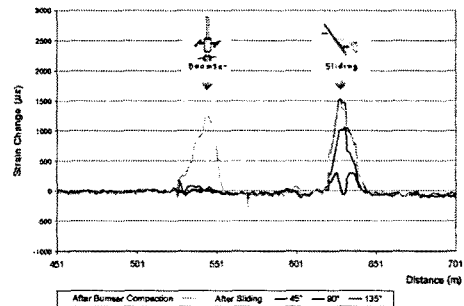
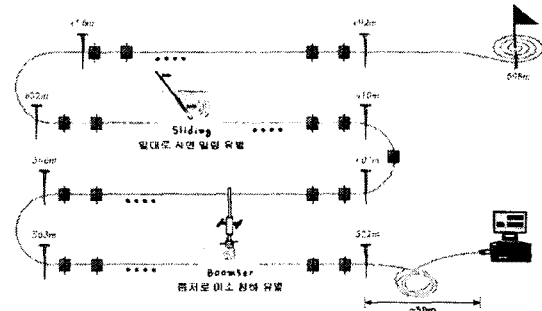
2.4 지면의 Sliding 및 침하 측정(KIGAM,2005)

암반(지반) 거동은 그 이전 상태와 비교하여 모니터링 개념의 변형률 변화로 대변될 수 있다. 우선 침하가 예상되는 전 지역을 대상으로 광섬유 케이블을 지표면에 인접하여 매설한 후 시간 경과에 따른 변형률 측정이 수행되었다. 침하 및 Sliding이 진행되는 곳에는 반드시 변형률 변화가 관찰될 것이며 측정된 변형률 변화폭에 따라 안전에 대한 대책방안이 수립될 수 있다.



〈그림 5〉 지반침하 야외실험 (KIGAM 구내아산)

그림 5는 KIGAM(한국지질자원연구원) 구내 아산에 광섬유케이블이 설치된 전경(깃발로 표시)을 나타내고 있다. 본 야외실험장에서는 Sliding 내지 지반침하가 발생할 가능성이 거의 없어 밀림장치 및 다짐을 통하여 인위적인 변형률 변화를 유도하였다. 그림 6은 DTSS 측정결과를 나타내고 있다. 여기서 밀림장치는 지면의 Sliding 효과를 초래하였으며 그 정도에 따라 변형치가 1,500 μ 까지 점진적으로 차별화되고 있음을 볼 수 있다. 한편 붐저에 의한 지면 다짐은 미소면 지면 침하를 유도할 것이 기대되었으며 그 효과는 약 1,400 μ 변형률로 대변되었다. 상기 실험내용 및 결과를 고려하면 DTSS 기법은 사면안정성 내지 지반 침하예측을 위해 재래의 어떠한 계측기법(예: TDR)보다 효율적이며 경제성을 갖는 방법이 될 것이라 본다.



〈그림 6〉 지반침하 현장사례 (KIGAM 구내아산)

3. 결 론

세계적으로도 DTS를 이용한 온도감시 시스템은 전력케이블에 적용되어 DRS(Dynamic Rating System)등으로까지 적용이 확대되고 있는 추세이지만, DTSS를 이용한 변형률 측정/감시시스템은 아직까지는 초기단계에 있다. 따라서, 대한전선(주)과 소암컨실트(주)는 위의 여러 가지 실험 등을 통해 광섬유 센서를 이용한 모니터링 기법으로 전력분야 적용가능성을 점검하였다. 실험 결과 변형률에 대한 측정/감시시스템이 원자력발전소의 격납 건물 등에서나 지하에 매설된 케이블이 지반 침하에 대한 변형률을 측정할 수 있고, 이는 발생 가능한 사고를 예측하여 미연에 방지하고 궁극적으로는 케이블 수명 연장에도 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 광섬유 센서를 이용한 모니터링 기법은 가공선의 이도변형률 측정이나 전력구내 케이블의 sanke나 교량에 첨가된 케이블의 열신축에 대한 변형률 감시 등에도 확대 적용될 수 있을 것이며 이에 대한 연구는 계속해서 진행할 예정이다. 광섬유센서를 이용한 변형률 모니터링 기법(DTSS)은 전력분야에 적용된다면 송.배전의 최적화 운전 및 안정성 향상에 큰 도움을 줄 수 있을 뿐만 아니라 효율적인 유지, 관리 및 보수를 통해 막대한 비용 절감 효과도 가져다 줄 수 있는 대단히 바람직한 신기술이 될 것이다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] 김중열, 김유성, 권광수, 이태섭, "지반침하 조사를 위한 물리탐사기법의 응용 및 그에 따른 현장사례", 탄광기계화기술세미나, 산업자원부, pp.1'42, 1999
- [2] T.R. Parker, M. Farhadiroushan, V.A. Handerek, and A.J. Rogers, "A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin scatter", IEEE photonics Technology Letters, vol.9 no. 7, pp.979-981, July 1997