

압전소자와 광섬유센서를 이용한 케이블의 손상평가

Estimation of Cable Damages using Piezo Disk and Optical Fiber Sensors

박강근*
Park, Kang-Geun

김이성**
Kim, Ie-Sung

요약

가진력의 영향을 평가하기 위해 이용되는 압전소자와 물체의 변형량을 분석하기 위해 사용되는 광섬유 센서와 변형 게이지는 각종 시험과 실험에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 케이블 시스템에서 발생한 손상을 검토하기 위해 압전소자와 광섬유센서를 이용하였다. 케이블 시스템은 압축이나 휨이 발생하지 않고 막구조에서 단지 인장력을 분담한다. 그러나 기존의 안전진단법을 이용하여 케이블 시스템의 손상을 판단하는 것은 전체구조의 특이한 구조거동 등으로 검토하기 어렵다. 인장부재에서 케이블의 풀림과 할렬이 발생하면 진동을 유발하기 때문에 압전소자를 케이블의 손상을 검토하기 위해 이용하였으며, 이를 광섬유 센서를 이용한 실험의 결과와 비교하였다. 본 연구는 인장응력 하에 케이블 시스템의 손상을 검토하는 방법을 제안하기 위한 실험적 연구이다.

Abstract

Presently means of utilizing sensors such as Piezoelectric(PZT) Element for evaluating the affect of oscillator, strain gauge for analyzing physical changes and use of Fiber Bragg Grating(FBG) Sensor are widely practiced in the field. In this study, PZT and FBG sensors were used to tearing damage of cable systems in these sensors. Cable systems are a construction of elements carrying only tension and no compression or bending in membrane structure. But damage detection of cable systems by using existing safety diagnosis is difficult to detect the characteristic change of overall structural action. If cable snaps are occurred to cable release and tear in tension structures, these are set up a vibration. So, we used piezo-electric materials and result of experiment using this was compared with result of experiment using FBG sensors The purpose of this research is to develop of damage detection method of cable system in tensile stress.

키워드 : 압전부저, 광섬유센서, 진동, 평균치, 손상

Keywords : Piezo Buzzer, FBG, Vibration, RMS, Damage

1. 서론

결정(Crystal)에 외부 변형력(Stress)을 가하면 그 결정 내부의 전기편극(Electric Polarization)이 변화되어 기전력을 발생시키는 압전소자는 구조물의 손상을 파악하기 위해 비파괴시험법(Non-destructive Testing)에서 여러 용도로 이용되고 있

다. 압전소자는 여러 형태로 제조되어 의료 및 전자, 전기 분야에서 사용되고 있으며, 사용용도에 따라 세라믹을 성형하여 제조하기 때문에 비교적 센서의 가격이 고가이지만 양면에 전극이 부착된 압전세라믹 박판을 얇은 금속 동판에 접착시킨 압전부저는 저가격이므로, 이를 이용하여 구조물에 발생한 손상을 검토하기 위해 많은 연구가 진행 중이다. 이러한 센서 이외에 구조부재의 발생한 손상을 검토하는 대표적인 센서가 광섬유 센서이다. 광섬유 센서는 섬유 자체가 감지기능을 가진 것과 센서는 따로 있고 그 신호를 전달하는 경로로서 광섬유를 이용하는 것이 있다. 이러한 센서의 장점으로서는 주위의 전자기적 잡음에 영향

* 정희원 · 부산대학교 건축학부 교수, 공학박사

** 교신저자, 정희원 · 경북대학교 건축토목공학부 연구교수, 공학박사

Tel : 053-950-4766

E-mail : macgang@knu.ac.kr

받지 않는 특징과 별도의 하우징(Housing)을 이용하여 여러 형태의 구조물을 구성하는 주요부재에 발생한 손상을 검토할 수 있는 장점이 있다. 동작원리로는 외부에 온도나 압력이 작용하면 광섬유가 신축되어 광섬유 내부를 통과하는 빛의 굴절 변화를 이용하여 온도나 압력의 변화를 측정한다.

광섬유 센서로 인장 케이블시스템의 단부 및 중앙부에서 발생하는 케이블의 파단과 풀림 등으로 발생하는 손상을 검토하기에는 케이블의 형상과 세장한 단면으로 인해 많은 어려움이 발생하지만 기존 실험 등에 많이 이용되고 있는 변형게이지(Strain Gauge)를 케이블에 직접 부착하여 케이블의 변형을 측정하는 방법보다는 케이블 면과의 부착과 측정영역 상의 센서 민감도 (Sensor Sensitivity) 등의 문제가 비교적 적고 압전소자를 이용하면 케이블 파단 시 발생하는 진동을 직접 측정할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 케이블 시스템의 양단부에 위치한 구속단에 압전 부저형태의 압전소자(Piezo Disk)를 부착하여 케이블에 인장력이 작용할 때 풀림과 파단으로 발생하는 전압의 진폭(Amplitude)과 주기(Frequency)구간을 평균치(Root Mean Square)정리를 이용하여 측정하였다. 그리고 케이블 중앙부에 U자형태의 두랄루민(Duralumin) 하우징(Housing)을 제작하여 광섬유 센서를 고정하고 케이블 양단에 인장력이 작용할 때 측정된 케이블의 신장량과 압전 부저의 발생전압을 비교하였다.

2. 기존 연구

국의 연구동향을 살펴보면, J. Dowd (2001)는 케이블에 발생한 손상을 바람으로 케이블에 발생하는 진동을 이용하여 수치해석과 실험을 하였다. 실제 크기의 케이블을 제작하고 바람으로 발생하는 케이블의 진폭(Amplitude)과 파괴손상으로 발생하는 진폭 간의 관계를 비교한 연구였다.¹⁾

Zhang Xu-she (2007)는 교량 케이블의 응력을 측정하기 위해서 광섬유 센서를 이용하였다. 케이블에 인장력이 작용할 때, 케이블에 부착된 광섬유 센서의 빛 굴절률 변화를 측정하여 케이블에 작용되는 인장응력을 평가한 연구를 하였다.²⁾

국내 연구동향을 살펴보면, 권택진(1995)은 기하

학적 비선형을 고려한 막형 케이블네트 구조물의 최적형상 및 응력변형 해석에 관한 연구를 하였다. 연성 구조 시스템인 케이블 네트 구조물은 초기강성이 매우 약한 구조체이기 때문에 초기강성을 확보하기 위해서는 초기응력의 도입이 필수적이며, 초기강성을 보유하기 전에는 불안정 현상을 나타내지만 초기강성의 비선형성을 고려한 비선형 해석의 요구로 보다 일반화된 비선형 케이블 요소를 제안하였고, 적용 가능한 해석 프로그램(McS-1)을 개발하였다. 형상해석은 기하학적 강성매트릭스만을 이용하여 Newton-Raphson법에 의한 수렴계산을 하며, 응력-변형해석은 각 증분구간에서는 수정하중 증분법을 적용하고, 최종 하중에서 Newton-Raphson법을 이용함으로써 수렴의 범위를 향상시킨 연구였다.³⁾

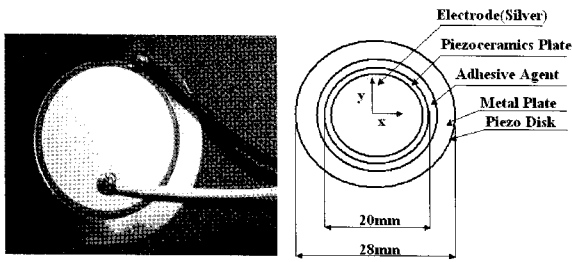
한상을(2006)은 탄성 현수선요소와 일반화 알파법을 이용한 케이블 구조물의 비선형 동적해석에 대해 연구를 하였다. 케이블 구조물의 동적해석 수행시 모드 참여율을 이용하여 고차 모드의 진동을 제거할 수 있는 수치감쇠 기법의 타당성을 검증하고 이러한 수치감쇠기법과 케이블 요소를 적용해 케이블 복합 구조물의 일시적인 불안정 거동을 규명하고 정확한 해를 평가하기 위한 수치해석에 관한 연구였다.⁴⁾

케이블 시스템에 발생한 손상을 검토하는 국내외 기존연구는 정상 상태일 때의 케이블에 발생하는 진폭의 변화에 파단파괴 시 발생하는 진폭의 변화를 비교하는 연구와 케이블에 인장응력이 작용되었을 때 신장량을 측정하여 케이블의 내력상태를 평가하는 실험적인 방법, 그리고 수치해석을 이용한 손상평가 방법에 대한 연구가 대부분이었다.

3. 센서 및 케이블 시험체

압전부저는 전류의 변화에 따라서 길이가 변화하는 압전물질을 이용하여 소리를 발생시키는 전자부품으로 압전소자(Piezo Disk)는 박판의 압전세라믹을 얇은 금속 진동판에 접합한 복합진동자이다.

압전부저는 금속 진동판(Metal Plate)이 압전체에 부착되어 있으므로 종과 횡방향으로의 길이변형이 고정된 형태의 센서이고, 압전체의 분극방향은 직각이 된다.⁵⁾

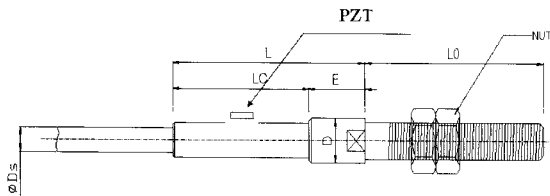


〈그림 1〉 압전부저

〈표 1〉 압전소자의 제원

Resonant Frequency	6.5 ± 0.5 kHz
Resonant Impedance	250 Ω max
Electric Capacity	12000 ± 30%
Operating Temperature	-20°C ~ +70°C

이러한 압전센서는 케이블 구속부와 강선 케이블 간에 발생하는 두께방향의 진동을 측정하기 위해 이용하였다. 〈그림 2〉는 케이블의 단부를 나타내며, 압전소자의 부착위치를 나타낸다. 케이블의 단부는 강선 다발의 케이블을 고정하는 형태이다.



〈그림 2〉 케이블 단부와 압전부저의 부착위치

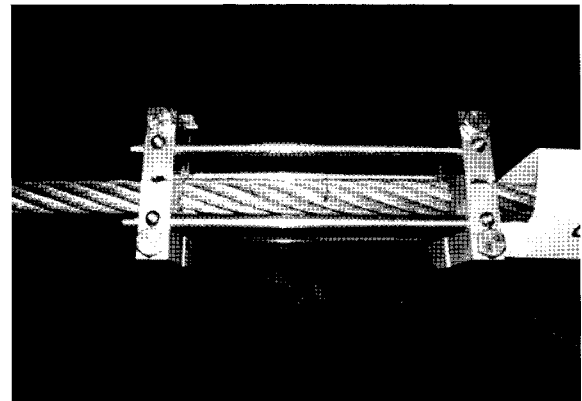
〈표 2〉 케이블의 제원

Size	No	øDs	D	NUT	E	LC	L(=LC+E)	LO	TOTAL L
		(mm)	(mm)	(")	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
ø 12	1	12	22	M22	30	110	140	150	290
ø 16	2	16	30	M30	30	150	180	140	320
ø 22	5	22	45	M45	40	200	240	170	410

〈표 2〉는 케이블 실험에 사용된 케이블의 종류 및 제원을 나타낸다. 〈그림 2〉에서와 같이 케이블이 단부 구속부 내에서 케이블이 파단되어 파괴되는 경우, 압전부저가 부착된 구속봉은 내부에서 진동이 발생하므로 정상상태의 압전부저 전압에 비해 증가한다고 가정하였고, 케이블이 중앙부에서 파단파괴가 발생하는 경우도 케이블이 인장력으로 인하여 풀림이나 파

단이 발생되므로 이로 인해 진동이 발생하면 케이블의 단부 구속부에 부착되어 있는 압전부저에 가진력으로 작용하기 때문에 강선 다발로 구성된 중앙부보다는 강봉으로 이루어진 양단 구속부에 압전센서의 부착 위치로 결정하였다.

광섬유 센서는 케이블에 직접 부착하게 되면 케이블의 양단에 인장력이 작용하면서 센서의 직선성을 유지할 수 없기 때문에 이를 해결하기 위해 케이블의 단면에 적합한 U자 형태(U Type)로 제작하였으며 하우징의 재료는 두랄루민(Duralumin)이다.



〈그림 3〉 두랄루민 하우징을 이용한 광섬유 센서의 정착

〈표 3〉 광섬유 센서의 제원

Center Wavelength Range	1530~1570nm
Center Wavelength Tolerance	+/- 0.5nm
Reflectivity	>90%
FWHM	0.2~0.4nm
Strain Range	5000 με (Pre-strain 1000 με)
Strain Sensitivity	1.20 pm/με
Operating Temperature	-20~80 °C
Weight	50g

시공된 케이블 시스템에 발생하는 손상을 검토하기 위해 압전부저를 이용하는 경우에 실시간 자료 전송방법으로 측정하면 자료수가 증가되어 장기측정 시 자료 전송 및 이로 인한 자료 전송상의 병목현상 등으로 부가적인 문제점이 발생한다.

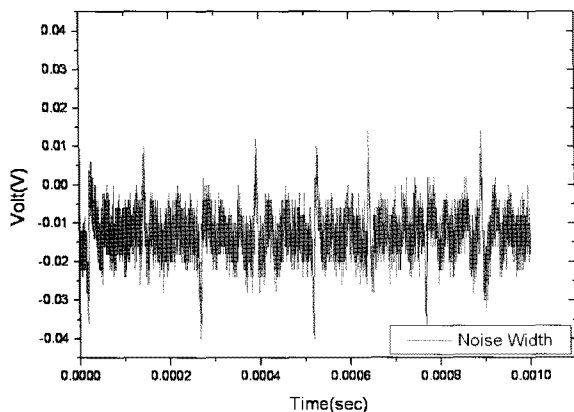
따라서, 케이블의 진동에 의해 발생하는 압전부저의 전압측정은 평균치(Root Mean Square) 정리를 이용하여 계측하였다.⁶⁾ 압전부저(Piezo Buzzer)형태의 압전센서는 일본 MURATA 사의 제품을 사용하였

으며, 데이터 로거(Data Logger)는 Tokyo Sokkisa의 TDS-301을 이용하였다.

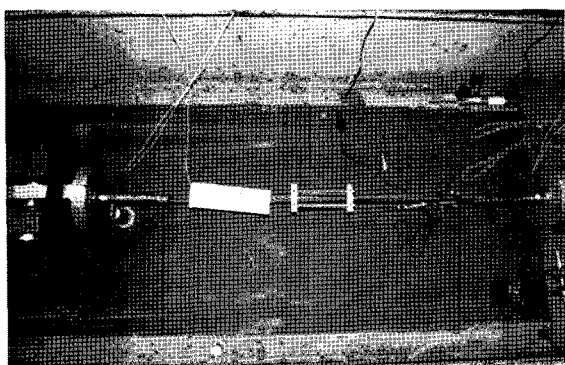
4. 압전소자를 이용한 케이블의 손상비교

케이블의 단부에 압전부저를 부착하여 양단에 인장력을 작용시키면서 발생하는 전압을 케이블의 하중-변위선도와 비교하였고, 케이블에 인장력을 작용될 때 발생하는 저잡음 대역의 영향을 파악하였다.

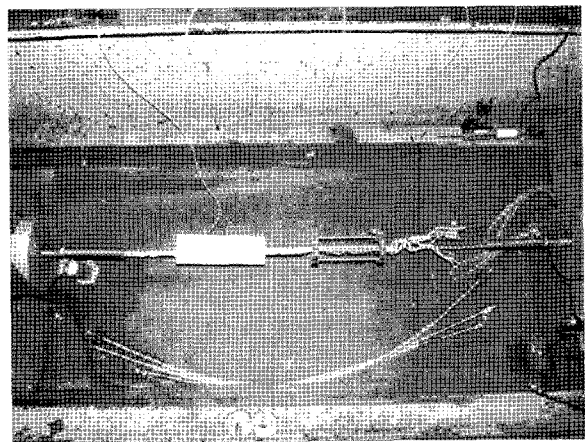
〈그림 4〉는 케이블 인장시험 시 실험실 주위에 진동영향 등으로 케이블 양단부에 부착된 압전부저에서 발생하는 잡음(Noise)대역이다. 케이블의 풀림과 파단 시 발생하는 진동의 영향이 크기 때문에 압전부저의 발생 전압을 진폭(Amplitude)과 주기(Frequency)구간 내의 평균치(Root Mean Square)를 측정하여 정상상태와 손상상태를 비교하였다. 〈그림 5〉는 케이블을 인장시험하기 위해 정지된 상태를 나타내며, 〈그림 6〉은 인장력으로 인해 케이블의 강재 구속부내에 케이블이 파단된 인장시험의 결과를 나타내고 있다.



〈그림 4〉 압전소자를 이용한 실험실의 잡음대역의 측정



〈그림 5〉 케이블 인장시험



〈그림 6〉 케이블의 파단

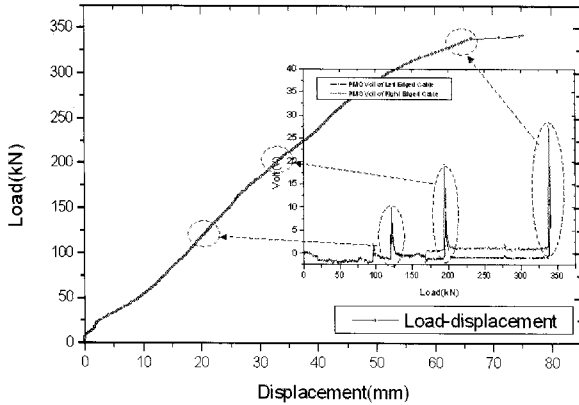
케이블의 인장시험을 하는 실험실의 잡음(Noise)대역 분석하기 위해 독일의 Witting Technology사의 2채널 오실로스코프인 BenchScope를 이용하여 측정하였다. 오실로스코프(Oscilloscope)를 이용하여 실험실 조건하에서 발생하는 잡음대역을 실시간으로 측정하였다. 케이블 시험체를 인장시험기에 정착하고 인장력을 작용시키기 전의 잡음대역을 평균치(Root

〈표 4〉 오실로스코프의 제원

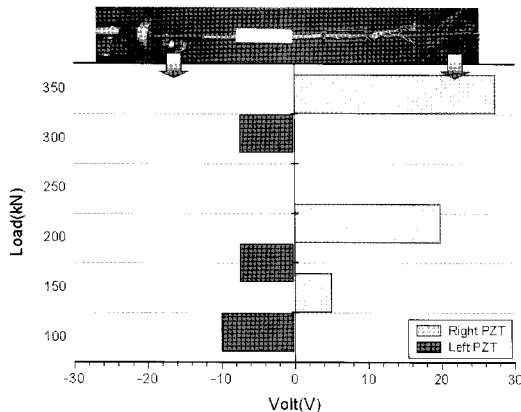
Analog Bandwidth	DC:0~20Mhz, AC:100Hz~20MHz
Sampling Rate	100Msa/s Real-time on each channel (200MS/s Single Channel Mode)
Sensitivity	0.5mV(10mV/div) to 4V/div
Coupling	AC/DC/GND
Input Impedance	1MW/60pF(1:1), 10MW/30pF(10:1)
Max. Input Voltage	Max. 400Vpk/DC
ADC Resolution	2× 8Bit
Vertical Accuracy	±2%
Max. Vertical Move	±5Divisions
True Sampling Rates	Normal Mode Single Shot Mode
0.1μs/div(200MSa/s) to 0.2 sec/div	Time Base Accuracy
>±0.5%	Trigger
Free Run or Triggered	Trigger Source
±CH I, ±CH II	Memory Depth/XY-mode
16K, 4K, 1K or 512 Samples/Channel	RS-232 Interface

Mean Square)로 측정된 압전부저의 최대전압은 0.015Volt로 케이블의 손상으로 발생한 압전부저의 전압을 측정할 경우, 잡음대역이상의 발생전압을 비교하기로 하였다.

ø22 Cable을 인장시험기에 정치하여 케이블의 양단에 인장력을 작용시켰을 때의 하중-변위선도는 다음과 같다.



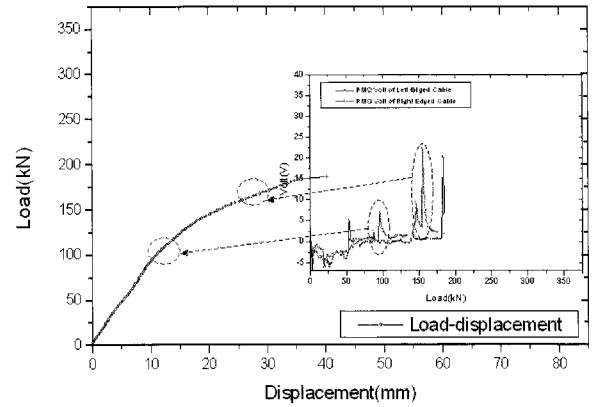
〈그림 7〉 ø22 Cable의 하중-변위선도



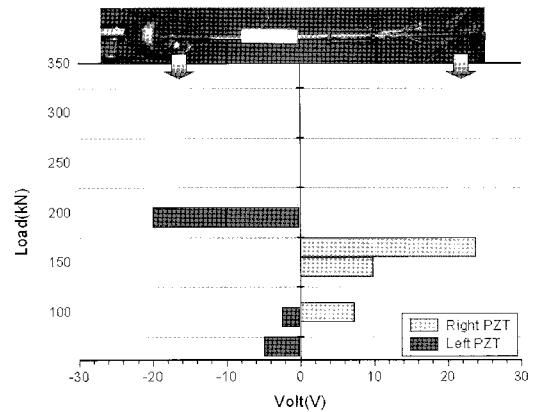
〈그림 8〉 ø22 Cable의 좌우 압전센서 전압비교

ø22 Cable의 인장시험결과, 케이블의 손상으로 발생한 양단 단부에 각각 부착된 압전부저의 전압은 케이블 내력의 27%, 58%, 100%에서 발생하였다. 케이블의 파단으로 오른쪽 단부의 압전부저는 케이블의 풀림과 파단에 따라 순차적으로 전압이 증가되는 것으로 나타났으며 케이블의 왼쪽 단부의 압전부저는 초기의 발생전압보다 저감되는 것으로 나타났다. ø16 Cable의 인장시험결과, 케이블의 손상으로 발생한 양단 단부에 각각 부착된 압전부저의 전압은 내력의 40%, 88%에서 발생하였다. 케이블의 파단으로 오른쪽 단부의 압전부저는 케이블의 풀림과 파단에 따라 순차적으로 전압이 증가되는 것으로 나타났으며

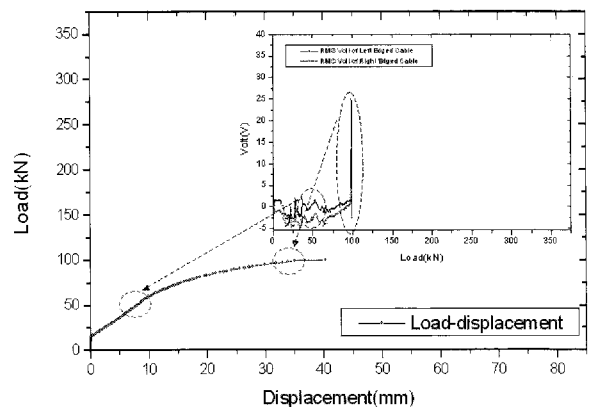
며, 케이블의 왼쪽 단부의 압전부저는 초기의 발생전압보다 저감되다가 케이블의 파단이 발생하는 내력 100%에서 최대 전압이 발생하였다.



〈그림 9〉 ø16 Cable의 하중-변위선도

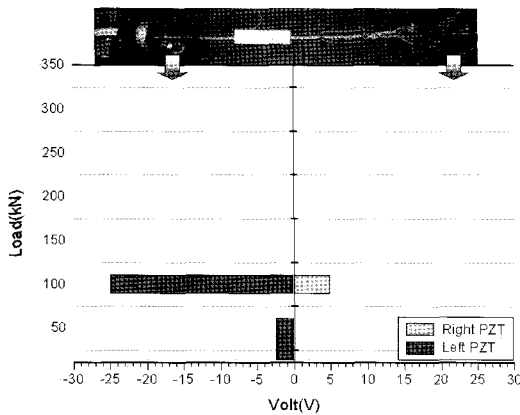


〈그림 10〉 ø16 Cable의 좌우 압전센서 전압비교



〈그림 11〉 ø12 Cable의 하중-변위선도

ø12 Cable의 인장시험결과, 케이블의 손상으로 발생한 양단 단부에 각각 부착된 압전부저의 전압은 내력의 100%에서 다른 구간에 비해 크게 발생하였다. 케이블의 파단으로 오른쪽 단부의 압전부저는 케이블의 풀림과 파단에 따라 케이블 내력의 100%에서



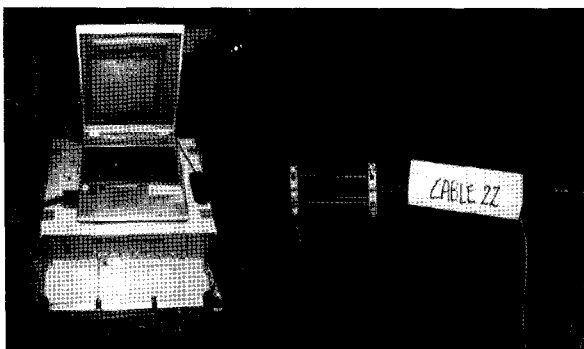
〈그림 12〉 $\phi 12$ Cable의 좌우 압전센서 전압비교

전압이 증가되는 것으로 나타났으며, 케이블의 왼쪽 단부의 압전부저는 케이블의 내력 35%, 50%, 100%에서 전압증가가 발생하는 것으로 나타났다.

$\phi 22$ Cable, $\phi 16$ Cable, $\phi 12$ Cable의 인장시험 결과, 케이블에 인장력이 작용하면 진동발생으로 인하여 케이블의 양단부에 부착된 압전센서의 전압을 증가되어 케이블의 파단과 파괴 시 발생하는 전압이 가장 크게 증가되는 것으로 나타났으며, 이를 이용하면 케이블에 발생하는 손상여부를 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 광섬유 센서를 이용한 케이블의 손상비교

케이블 중앙부에 광섬유 센서를 U자 형태의 두랄루민 하우징을 이용하여 부착한 다음 케이블에 인장력을 작용시켰을 때의 케이블 신장량을 측정하였다.

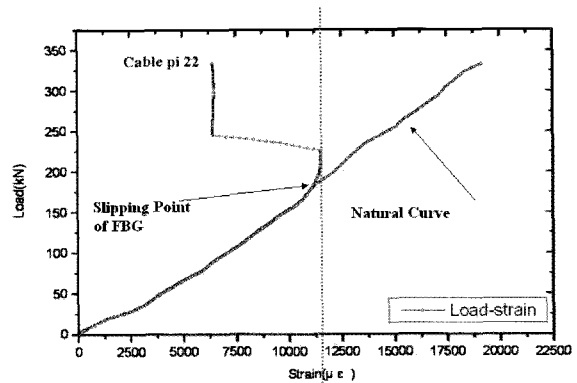


〈그림 13〉 FBG Data Logger와 U자 하우징

케이블에 인장력이 작용하면 일정 내력구간에서 케이블의 단면손실이 발생하여 광섬유 센서를 고정하는 하우징에 미끄러짐 현상이 발생할 수 있는 문제가 발

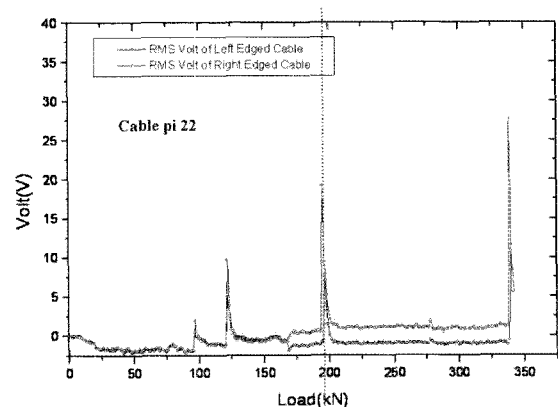
생하였다. 광섬유 센서는 광섬유에 길이변화가 발생하면 내부를 통과하는 빛의 굴절률이 변화하기 때문에 이를 이용하여 부재의 변형을 측정한다.

따라서 광섬유 센서의 직선성이 유지되지 않는다면 측정 시 측정값의 오차로 케이블의 신장량 측정실험에 많은 어려움이 발생하기 때문에 케이블과 하우징 간의 미끄러짐 현상이 발생하는 구간까지 측정하고 이때의 내력구간에 대해 압전부저의 전압발생 내력구간을 비교하였다.



〈그림 14〉 $\phi 22$ Cable의 하중-변형선도

광섬유 센서를 이용한 $\phi 22$ Cable의 인장시험 결과, 케이블 내력의 58%에서 케이블과 광섬유센서의 하우징 간의 미끄러짐 현상이 발생하는 것으로 나타났다. 이를 케이블의 양단에 부착된 압전소자의 발생전압과 어떠한 상관관계가 있는지에 대하여 검토하였다.

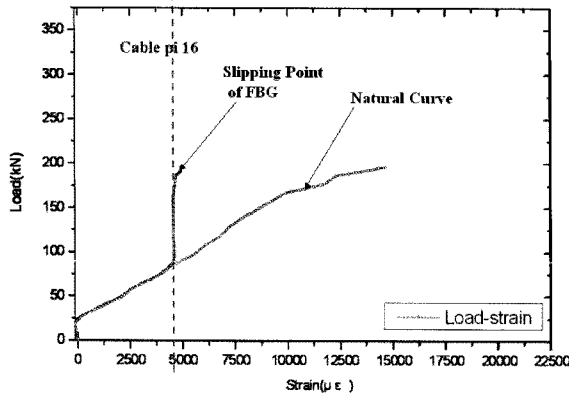


〈그림 15〉 $\phi 22$ Cable의 좌우 압전센서 발생전압

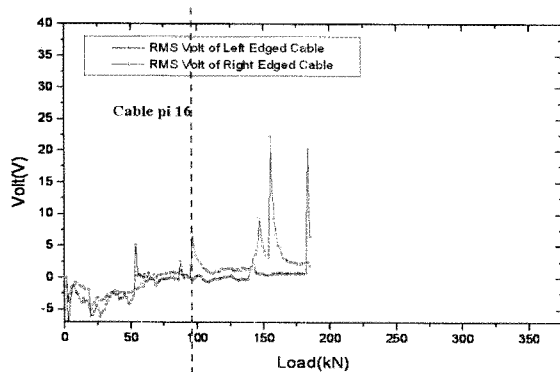
$\phi 22$ Cable의 케이블 내력 58%는 양단에 부착된 압전소자의 전압이 증가되는 구간으로 나타났다. 케이블 내력의 58%일 때 케이블의 중앙에 광섬유 센서를 고정하기 위해 정착된 U자 형태의 하우징에 발생한 미끄러짐 현상의 발생구간은 케이블의 파단으로

발생한 진동으로 야기된 압전부저의 전압증가구간 내에서 발생하는 것으로 나타났다.

광섬유 센서를 이용한 $\phi 16$ Cable의 인장시험결과, 케이블 내력의 40%에서 케이블과 광섬유센서의 하우징 간의 미끄러짐 현상이 발생하는 것으로 나타났다. 케이블의 양단에 부착된 압전소자의 전압증가구간으로 나타났다.



〈그림 16〉 $\phi 16$ Cable의 하중-변형선도

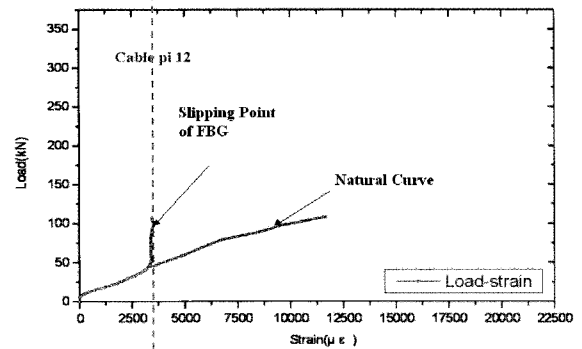


〈그림 17〉 $\phi 16$ Cable의 좌우 압전센서 발생전압

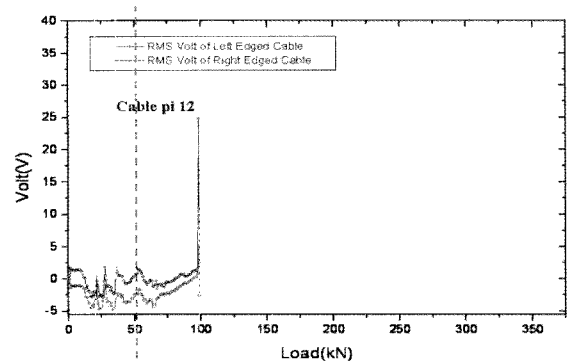
광섬유 센서를 이용한 $\phi 12$ Cable의 인장시험결과, 케이블 내력의 50%에서 케이블과 광섬유센서의 하우징 간의 미끄러짐 현상이 발생하는 것으로 나타났다. 케이블의 양단에 부착된 압전소자의 전압증가구간은 50%로 압전소자의 전압이 증가되는 구간으로 나타났다.

광섬유센서를 이용한 $\phi 22$ Cable, $\phi 16$ Cable, $\phi 12$ Cable의 인장시험결과, 케이블에 인장력이 작용하면 케이블의 중단부에 부착된 광섬유 센서가 케이블 내력의 50%까지 신장량을 측정하다가 케이블과 하우징 간의 미끄러짐 현상이 발생되어 케이블의 신장량을 측정하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 케이

블 양단에 작용되는 인장력으로 인하여 발생된 케이블 중앙부의 급격한 단면손실로 사료된다.



〈그림 18〉 $\phi 12$ Cable의 하중-변형선도



〈그림 19〉 $\phi 12$ Cable의 좌우 압전센서 발생전압

6. 결론

압전소자와 광섬유센서를 이용한 케이블의 손상평가에 대한 결론은 다음과 같다.

1) 인장 케이블 시스템에 압전소자를 부착하여 손상을 평가하는 경우, 케이블의 풀림이나 파단으로 발생하는 압전소자의 전압으로 케이블의 손상을 평가할 수 있을 것으로 나타났다.

2) 인장 케이블 시스템에 압전소자를 이용하여 케이블에 발생한 손상을 모니터링 할 경우, 복잡한 신호처리를 이용하지 않더라도 압전소자의 발생전압구간에 진폭과 주기 구간별 평균치 정리를 이용하여도 손상을 파악할 수 있는 것으로 나타났다.

3) 케이블에 광섬유센서를 부착하여 인장력이 작용될 때 내력의 50% 대역에서 케이블과 광섬유 센서를 위한 하우징 간의 미끄러짐 현상이 발생하였다. 이는 케이블 중앙부의 급격한 단면손실로 발생하는 것으로 장력 증가로 발생한 케이블 단면 손실이 케이

블의 단부에 부착된 압전소자의 전압크기가 증가되는 구간과 관련된 것으로 사료된다.

감사의 글

1. 본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호# '06 건설핵심 B03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. J. Dowd, M. Poser, K. H. Frank, S. L. Wood, and E. B. Williamson, "Bending Fatigue of Cable Stays." *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 6, No. 6, 2001, pp. 639-644.
2. Zhang Xu-she, Du Yan-liang, and Ning Chen-xiao, "A New Monitoring Method for the Cable Tension of a Cable-stayed Bridge: the Fiber Bragg Grating Method." *Journal of the Central South University of Technology*, Vol. 12, No. 2, 2005, pp. 261-263.

3. 권택진, 항가이야스히코, 최현식, 김승덕, 서삼열, "기하학적 비선형을 고려한 막형 케이블네트 구조물의 최적형상 및 응력 변형해석에 관한 연구", 대한건축학회, 대한건축학회 논문집 제11권 제1호, 1995, pp.153-159.
4. 한상을, 이상주, "탄성현수선요소와 일반화 알파법을 이용한 케이블 구조물의 비선형 동적해석에 관한 연구", 대한건축학회, 대한건축학회 논문집 제22권 제11호, 2006, pp.59-66.
5. 이상훈, 김재중, 장석원, 곽계달, "Piezo Buzzer(압전버저)의 가속수명시험", 대한기계학회 2006년도 추계학술대회 논문집, 2006, pp.7-12.
6. Emmanuel C. Ifeakor, Barrie W. Jervis, "Digital Signal Processing", Prentice Hall, 2002. pp.317-341,

접수일자 : 2009년 7월 16일

심사완료일자 : 2009년 8월 24일

게재확정일자 : 2009년 8월 28일