

장대 광변형 센서의 건설 구조물 적용

Application of Long Gauge Fiber Optic Sensors to Construction Engineering Structures

로드 테니슨¹⁾, R.C.Tennyson, 안 명운²⁾, Myung W. Ahn, 김 상환³⁾, Sang H. Kim

¹⁾ 토론토 대학교 우주공학과 교수, Professor, Dept of Aero Space. Toronto Univ.

²⁾ (주) 아주지오 엔지니어링 사장, President, Ah Joo Geo-Engineering Co.,Ltd.

³⁾ (주) 바우컨설턴트 상무, Managing Director, Bau Consultant Co.,Ltd.

Abstract

Various kind of fiber optic gauge sensors are available that can be bonded to civil engineering structures such as bridges, dams, tunnels and pipelines. A new fiber optic long gauge has significant advantages over other fiber optic sensors. These gauges can vary in length from less than 10 cm up to 30 m and provide the structural engineer with accurate measurements of displacement. These displacements can be converted to strains by dividing the measurement by the long gauge length. Using new optical technology, the long gauge instrument developed by FOX-TEK can choose max. 30 meters of gauge length so as to measure the very early stress/strain correlation curve. And this gauge length to be extended up to 100 meter in 2002.

1. 서론

최근에 교량, 댐, 터널, 압력관 같은 대형 토목구조물에 부착하여 사용할 수 있는 여러 형식의 광변형 센서가 개발되었다. 장대 광변형센서(이하 장광센서)를 개발된 여러 다른 형식의 광변형 센서와 상대비교를 통하여 설명 하고자 한다. 이 광변형 센서들은 구조 기술자에게 센서의 길이를 10센티미터(cm)이하에서 최대 수십미터(m)까지 사용자의 요구에 따라 선택할 수 있다. 구조물의 변위는 부착된 장광센서의 측정값을 변환하여 구조물의 변형상태를 파악할 수 있다. FOX-TEK사가 개발한 장광센서 계측 시스템은 새로운 광처리 기술을 이용하여 센서 길이를 최대 30미터까지 선택할 수 있어 매우 적은 응력에도 이의 상관변형의 초기발생부터 측정이 가능하다. 이 센서길이는 내년에 최대 100미터까지 연장될 예정이다.

2. 광변형 센서의 형태

광변형센서는 그림 1에서 보는 바와 같이 다양한 광섬유 보호 자켓으로 싸여져 일반적으로 중심직경

~0.007 mm로 생산 된다. 토목 구조물에 쓰이는 광섬유 센서는 Fabry-Perot 게이지와 Bragg 회절격자 두가지 형태가 있다. Fabry-Perot 센서는 그림 2에서 보여주는 것처럼 유리질 모세관을 포함하는 두개의 광섬유 끝부분 사이의 길이변화를 측정하므로 구조물의 틈이나 공동의 측정이 가능하다. 이 게이지는 1차원적인 간극 변화(응력)의 간섭파장 측정에 기초하고 백색 빛의 광대역 소스를 사용한다. 다른 형태의 센서인 Bragg 회절격자는 UV 방사선을 사용하여 국부적인 굴절률의 변화를 광섬유에 만들어 냄으로 제작되었다. 회절격자는 전송된 스펙트럼이 남아 있는 동안 매우 좁은 스펙트럼 중심에서 Bragg 파장에 대한 광대역 빛을 반사한다.

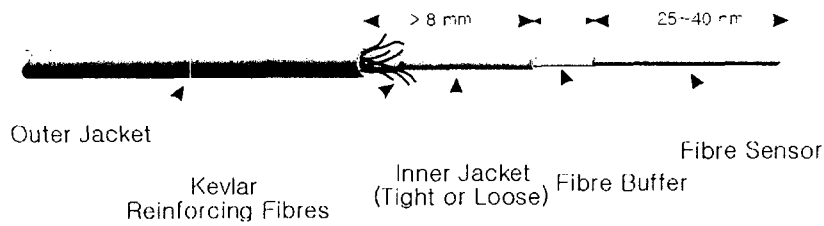


그림 1. 일반적인 광섬유 케이블.

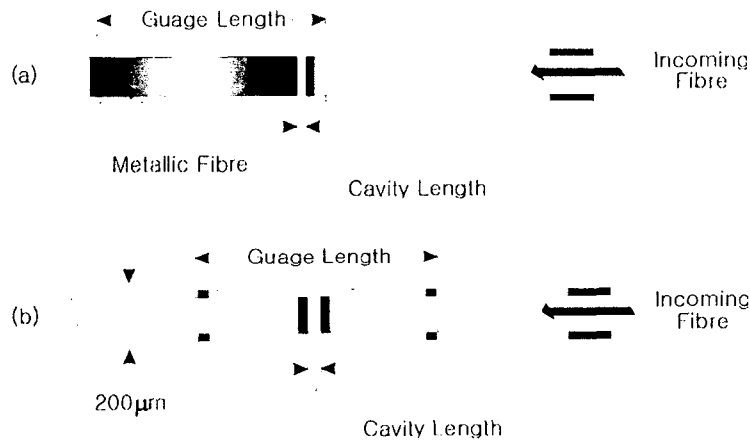


그림 2. Fabry-Perot 광변형 센서 (a) 자동보정 센서 (b) 무보정 센서.

3. 광변형 센서의 종류

표 1과 2는 다른 형식의 광변형센서를 비교하고 있다.

표 1. 광변형센서의 형식에 따른 비교.

| 광변형센서 | 게이지 길이 | 정적계측 | 동적계측 | 연속 다중 설치 |
|------------------------------------|--------------------|------|------|----------|
| 파브리-페로 (Fabry-Perot) | < 1 mm | 가능 | 가능 | 가능 |
| 브래그 격자 (Bragg Grating) | < 1.5 cm | 가능 | 가능 | 가능 |
| 브릴로우닌 분산 (Brillouin Scattering) | ~ 1 km | 가능 | 불가능 | 불가능 |
| 장광센서 (Long Gauge) | 5 cm > 100 m 이하 | 가능 | 가능 | 가능 |

표 2. 총길이 1 m 구간의 응력 측정을 위한 각 광변형센서의 비교.

| 광변형센서 | 게이지 길이 | 센서의 간격 | 센서의 수 | 특별 준비사항 |
|------------------------------------|--------------------|---------|-------|--------------------------|
| 파브리-페로 (Fabry-Perot) | < 1 mm | ~ 10 cm | 10 | 시간과 주파수 사전분할 설정 필요 |
| 브래그 격자 (Bragg Grating) | < 1.5 cm | ~ 10 cm | 10 | 시간과 주파수 사전분할 설정 필요 |
| 브릴로우닌 분산 (Brillouin Scattering) | ~ 1 km | 없음 | 없음 | 없음 |
| 장대 광변형센서 (Long Gauge) | 5 cm > 100 m 이하 | 1 m | 1 | 없음 |

광변형센서는 온도변형이나 물리적인 하중 등에 의한 변형을 빛 에너지를 이용하여 측정한다. 이것은 기존 전기식 스트레인 게이지에서 발생할 수 있는 전자기적 잡음과 전자유도 현상에 의한 전기자장의 간섭을 받지 않는 장점이 있다. 광섬유 자체는 실리카 재질로 가볍고 부식이 되지 않는 안정된 물질로 콘크리트나 화학제품에 설치할 수 있으며 측정 자료 전송을 위한 광섬유 및 기존 통신선을 사용할 수 있다. 현재까지 개발된 광변형센서들의 측정할 수 있는 영역으로 구분할 경우 크게 2가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 2cm이하의 국부적인 변형을 측정하는 센서이고, 다른 하나는 이보다 큰 범위를 측정하는 제품이다. 국부적인 변형과 온도를 측정할 수 있는 센서로는 Fiber Bragg Grating(이하 FBG)과 Fiber-Perot(이하FP)센서가 사용된다. 온도와 변형율을 측정하기 위하여 FBG센서는 빛이 센서를 통과할 때 생기는 파장의 변화를 이용한 것이며, 이를 측정하기 위하여 주파수 변환기를 필요로 한다. 이 센서들은 광섬유내에서 빛의 손실을 최소화할 수 있는 빛의 파장대인 1310nm~1550nm

사이의 각기 다른 빛의 파장을 선택하여 제작한다. 광신호를 이용하는 이유는 장거리에서의 전기식 전송 방식보다 전송 손실이 적기 때문에 센서가 설치된 구조물로부터 수 km까지 원격 측정이 가능하여 주변 환경에 제한 없이 능동적으로 설치할 수 있기 때문이다. 그리고 광변환기와 연결할 수 있는 광접속기구들도 현재 많은 종류가 가능하여 쉽게 구할 수 있다. FP센서 또한 국부적인 온도와 변형율을 측정 후 온도에 대한 보정치를 적용하여 측정값을 계산한다. 센서의 기본 원리는 얇은 튜브관에 두 광섬유를 나란히 삽입하여 각 광섬유 내 각인된 간격의 차이를 감지하여 변위량을 측정한다. 센서가 변형하게 되면 튜브관내의 간격의 길이가 변화되어 이에 따라 광신호들이 다르게 반사되어 측정된다.

FBG센서의 최대 장점중의 하나는 한 가닥의 광섬유에 여러 광변형센서를 중복하여 연속 제작할 수 있다는 것이다. 다시 말하면 한 가닥의 광섬유에 많은 회절격자를 각인하여 비교적 먼 거리에서 여러 지점의 변형율을 측정할 수 있다. 측정 방법은 주파수 측정 방법에 따라 주파수 분할법(WDM)과 시간 분할법(TDM)이라는 두 가지 방법으로 구분할 수 있다. 주파수 분할법(WDM)은 각 센서에 서로 다른 주파수를 반사할 수 있는 회절격자를 제작하여 각 지점의 파장변화를 측정하는 방법이다. 이는 센서가 증가할 경우 분석 장비의 구성비용이 증가하며, 각 센서가 측정할 수 있는 변형율의 범위가 제한된다. 반면 시분할법(TDM)은 각 센서에 같은 주파수를 반사할 수 있는 회절격자를 제작하고 구조물에 설치된 각 지점의 센서의 신호 전달시간으로 측정하는 방법이다. 이 방법은 현재의 기술력을 감안하면 레이저를 광원으로 사용해야 하기 때문에 LED를 사용하는 전자의 방법보다는 시스템 구성 비용이 높아지는 단점이 있다.

기존 통신용 광섬유를 사용하여 동일 광섬유의 여러 측정점을 연결하여 측정길이가 긴 광변형센서(20cm~수미터)를 만들 수 있다. 이는 Brillouin 산란효과(Brillouin Scattering)를 이용한 방식으로 대상 구조물에서 몇 킬로미터 떨어진 지점에서도 원격 계측을 직접 할 수 있다.

DeMerchant et al의 최근 보고서에 의하면 긴 구간에서도 10~20센티미터의 최소단위(Resolution) 측정이 가능하였으며 각각의 다른 지점의 센서길이마다의 평균 열 팽창계수도 가능하였다고 한다. 이 측정법은 반사계를 이용한 시간영역 분석법이다. 현재의 기술력으로 이 계측 시스템은 동원장비가 많으며 광원을 레이저로 사용해야 하므로 고가이다.

기존의 통신용 일반광섬유를 사용한 또 다른 광변형 측정 시스템은 초기에 ISIS (Intelligent Sensing for Innovative Structures) Canada 연구소에서 고안되었으며 현재는 Fox-Tek사에서 구조물의 형상과 분해능의 요구에 따라 최소 10센티에서 최대 30미터까지 센서의 길의 조절이 가능하도록 재 개발 되었다. 이 장광센서에 관해서 아래에 언급하였다.

3.1 장광센서 (Long Gauge Sensor)

이 새로운 방식의 센서는 일반 통신용 광섬유로 제작되며 구조물에 접착하여 사용한다. 구조물에 부착된 광변형센서는 구조물의 변형 즉 수축 또는 팽창에 따라 광섬유도 같이 거동한다. 이 변위 거동은 그림 2의 도해와 같은 방법으로 측정된다. 센서의 핵심부분은 광섬유의 끝단에 각인된 회절격자이며, 이 회절격자로 매우 정밀하게 인장값(센서가 Pre-tension의 경우 수축값)을 측정할 수 있다. 이 시스템은 LED의 빛과 같이 짧은 간섭 파장을 이용한 빛의 저 간섭계의 원리를 이용하고 있다. 광원은 두개의 작은 다이오드에서 방출된 빛을 사용하며, 각기 다 길이인 두 개의 경로를 거쳐 광검출기에서 다시 합쳐진다. 만약 각기 다른 광 경로의 차이가 10micron 이내 일 때는 합쳐진 두 개의 빛이 간섭

현상이 시작된다. 이는 LED광원의 저간섭효과 때문이다. 이 간섭패턴은 가변형 반사경을 내장한 광분출기에서 두 경로가 같아지는 지점까지 이동한 후 그 값을 기록한다. 두 개의 빛의 경로가 같은 위상일 경우 최대의 간섭패턴이 발생한다. 이때 측정된 변형값은 센서의 길이만큼의 계측대상 부재에 발생한 총량 이다.

이 센서는 최소 10cm이상에서 최대 30m까지에서 제한없이 사용할 수 있다. 이 센서는 구조물 또는 계측 대상물에 접촉되어 광섬유내에 레이저로 각인된 반사경사이의 길이변화를 측정한다. 이 측정값은 센서의 길이(반사경과 또 다른 반사경의 간격)에 발생한 변형율의 평균값을 측정한 것이다.

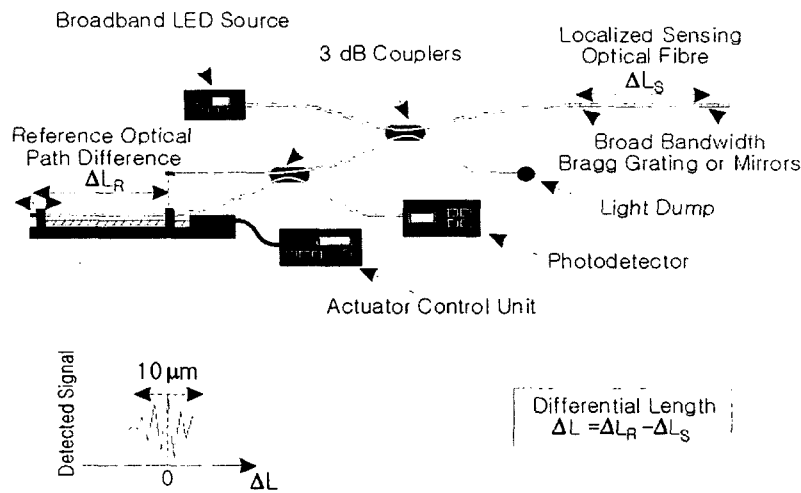


그림 3. 장대 광변형센서의 구성도.

그리고 이 장광센서는 재질이 통신용 광섬유로써 매우 유연하여 계측 대상물의 형상에 구애받지 않고 설치할 수 있다. 예로 그림 4과 같이 파이프 주위에 센서를 감아서 설치하여 파이프의 수축·팽창(내압 변화등의 원인에 기인한)을 측정할 수 있고 또는 자체 균열, 부식 발생 등으로 인한 팽창효과와 그 추이를 측정하여 구조 손상의 진행을 계측할 수 있다. 이 장광센서는 그 재질과 높은 재현성능으로 온도변화에 의한 열팽창이나 기계적인 하중변화에 의한 정적 변형을 영구적 및 장기적으로 측정하는데 가장 알맞다.



그림 4. 파이프 외경에 설치.

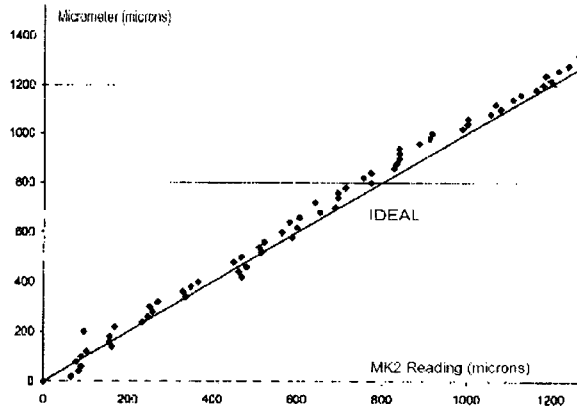


그림 5. 장광센서 (LFOS) 1M의 마이크로미터와 하중 비교시험(정도 높은 직진성 입증).

변위측정을 위한 센서의 일반적인 분해능은 10 micron이며, 변형율의 감도는 센서의 길이에 따라 결정된다.(변형율=센서에서 측정된 변위/센서의 원래길이) 그림 6에서 나타난 도표를 보면 변형율의 분해능은 센서의 길이에 따라 반비례하는 것을 알 수 있다.

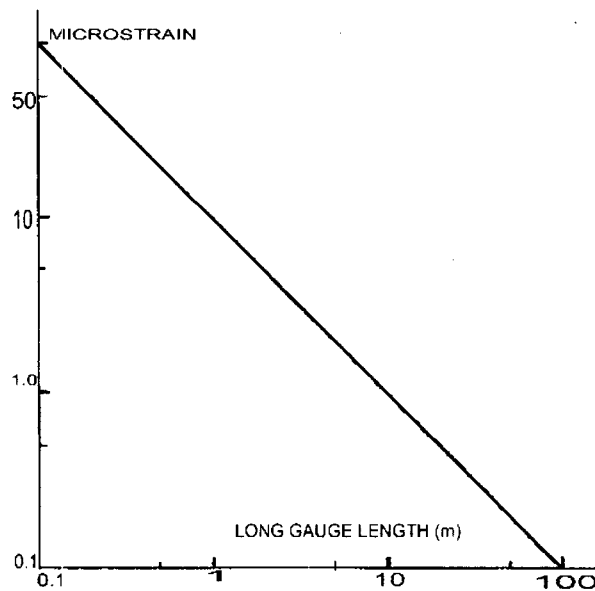


그림 6. 센서의 길이와 변형율 분해능과의 관계.

그림 7의 사진은 간섭과장을 측정하는 시스템으로 아래의 장비는 측정된 과장의 형상을 화면에 표시하고 있다.



그림 7. 간섭파장을 측정하는 시스템.

4. 공사사례 및 제안

4.1 교량의 교각

교량 상판을 지지하고 있는 콘크리트 교각이 철근의 부식진행등과 같이 노후화로 인한 변형율을 측정하기 위하여 광변형센서를 적용하였다. 그림 8의 측정자료는 노후화로 인한 콘크리트 교각 원주의 변형율 증가를 장기간 계측한 결과이다.

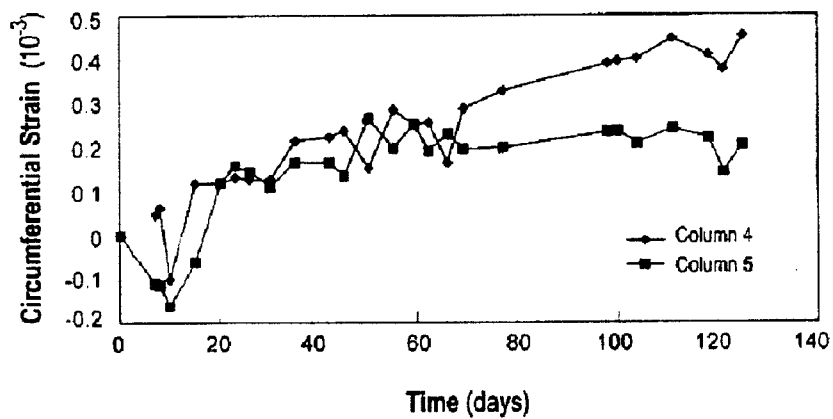


그림 8. 콘크리트 교각 원주의 변형률 측정.

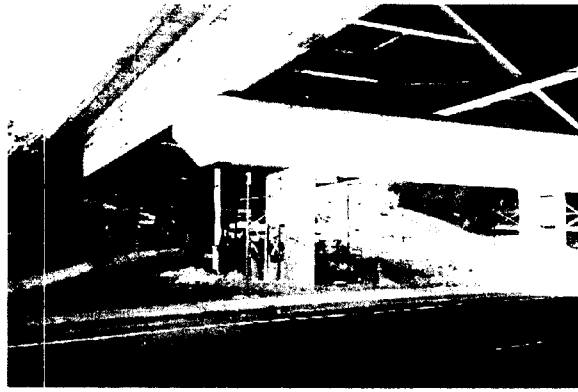


그림 9. 보수공사중인 Portage 교량의 교각.

캐나다 British Columbia, Victoria에 위치한 Portage 교량(그림 9)을 교각 둘레에 FRP를 사용하여 보강 보수 효과를 감시하기 위하여 장광센서를 적용하였다.

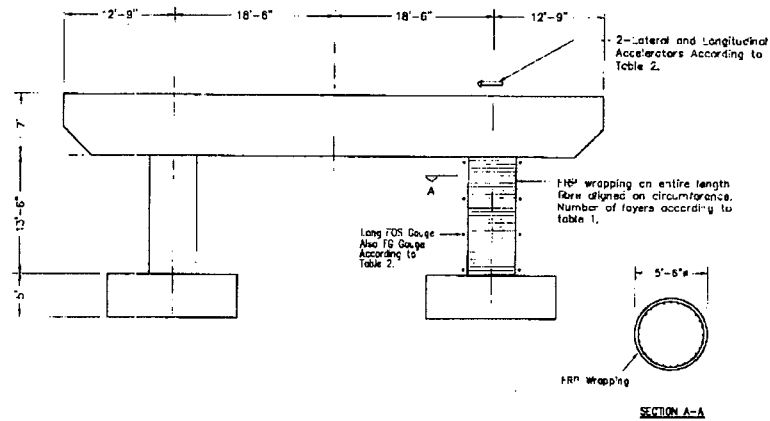


그림 10. FRP 보강재를 이용한 콘크리트 교각에서 보수공사 계획도와 장광센서의 배치도.

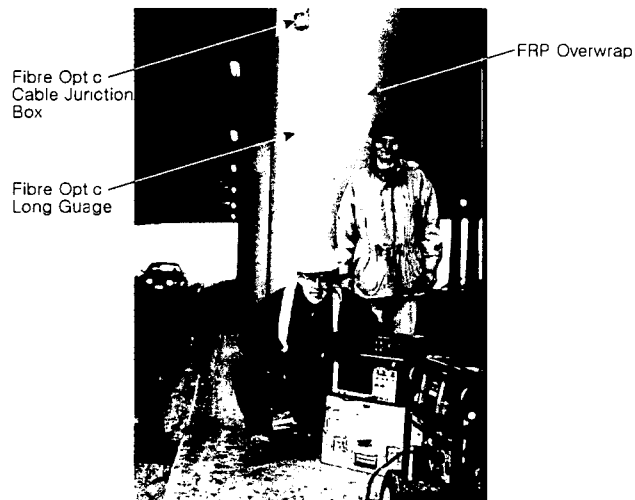


그림 11. Leslie Street Bridge 교각에 장대 광변형센서를 설치하는 모습.

4.2 압력관의 유지관리

장광센서는 pipeline의 유지관리에도 효과가 높다. 이는 파이프 자체에 비록 매우 적은 변위가 발생하여도 그 발생확인과 추이의 기록이 가능하기 때문이다. 알래스카에서 북미를 연결하는 pipeline에 장광센서가 설치될 예정이다. 장광센서를 이용한 pipeline의 유지관리 목적상 기대 효과는 그 설치방식에 따라 아래와 같다.

A. 운영관리목적 - 나선형으로 pipeline에 시공

- 내압력의 변화 - pipeline 표면 변화 측정
- 부식 - pipeline 외벽 두께의 변화, 테두리의 변화 측정
- 누출 - pipeline 테두리 응력의 변화에 의한 압력 감소 측정

B. 지반침하 등 외부조건 변화의 측정 - 두개 이상의 장광센서를 종단 방향으로 나란히 설치

- 비틀림 - 국부적 구부러짐에 의한 축 응력의 변화 측정
- 구부러짐 - 축 응력의 변화 측정
- 균열 - 표면 응력의 변화 측정
- 선형이탈 - 축 응력의 변화 측정

장광센서의 길이는 파이프의 예상 변위량에 의하여 선정(적은 변위량이 예상될수록 긴 센서 선정)하고 파이프가 압력 또는 부식에 의해 표면이 팽창되거나 누출과 균열에 의해 수축함을 측정한다. 대개의 경우 오랜 세월동안 서서히 진행되는 변위는 부식에 의한 경우가 많으며, 짧은 경과 기간 중 비교적 급격한 변위로 균열이나 유류누출 등으로 인한 주변 지반의 침하 등의 영향이 발생된 경우이다. 그림 13의 도표는 부식의 진행으로 두께의 감소 현상을 감지하기위해 나선형으로 감은 장광센서의 경과 추이를 보여준다.

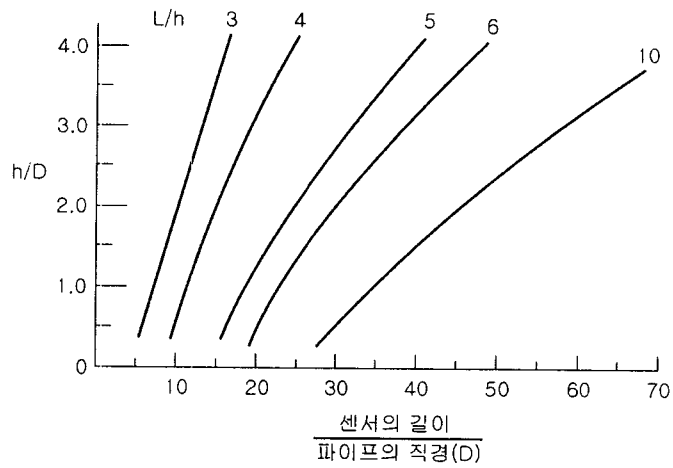


그림 12. Pipe 직경(D)과 Pipe 길이(L) 상관의 장광센서의 간격(h).

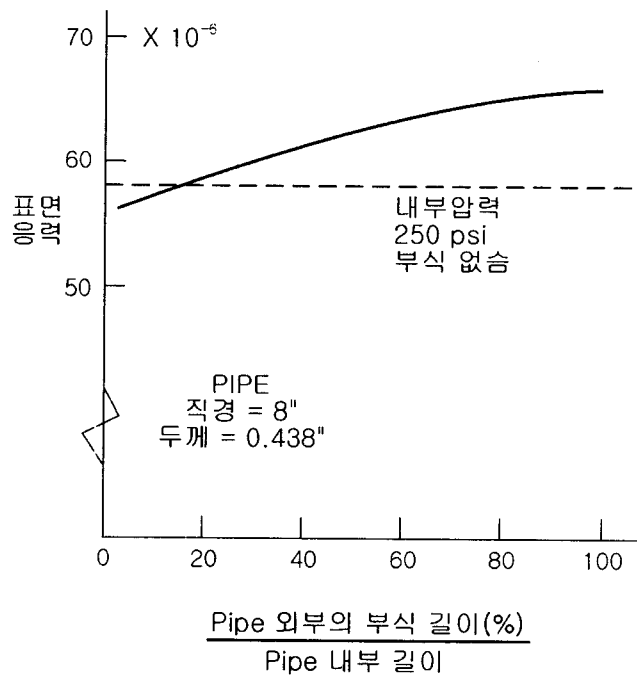


그림 13. 벽체의 두께가 10% 감소될 때 부식된 길이에 관한 테두리 응력

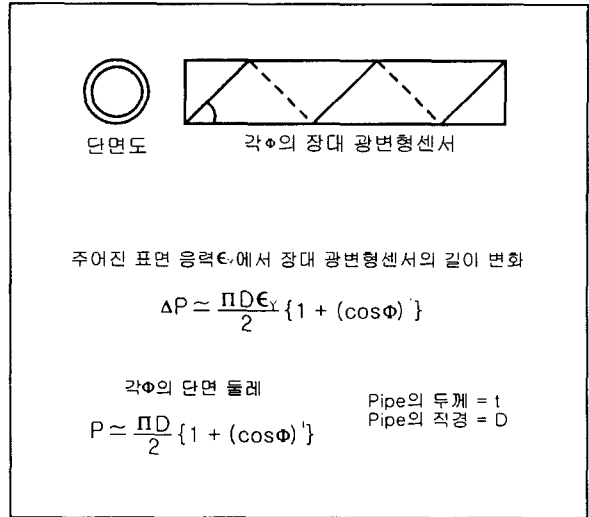


그림 14. Pipe의 지름과 표면 응력에 관련된 장광센서 길이의 계산.

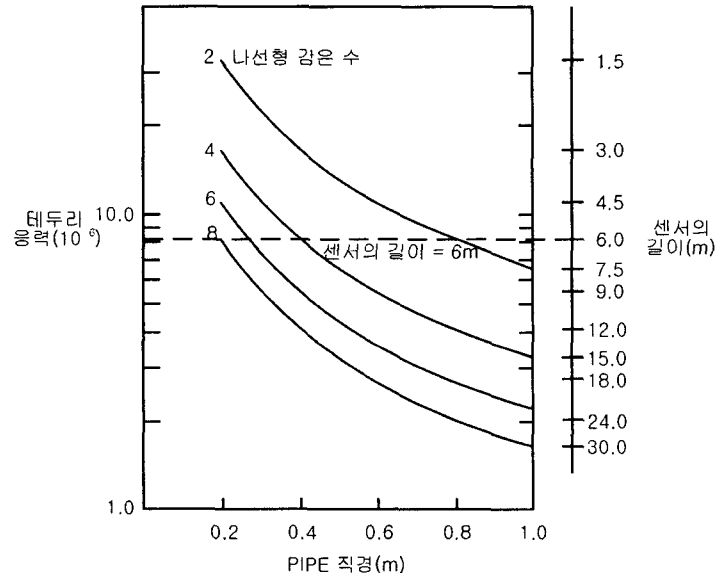


그림 15. 표면 응력과 Pipe 직경에 관련된 적정 장광센서의 길이 사전 선정을 위한 도표.

비틀림 센서의 설계 방법은 그림 16에서 나타나는 비틀림 곡선은 철($\nu = 0.3$) Pipe를 위한 모델이고, 부득이한 형태의 결합 때문에 $k = 1/2$ 에 의해 기존 축의 압력에 의한 비틀림 응력은 감소된다고 가정된다. 주어진 Pipe 직경과 두께의 비율(D/t)에서, 축의 응력은 광센서의 길이/ 센서의 길이에서 변환되어진 변화를 포함하여 얻어진다. 최소 축 변화의 기간 동안 주어진 장대 광변형형 센서의 감도를 알므로써 측정이 가능하고 필요한 센서의 길이는 Pipe에 적용하기에 따라 결정되어진다.

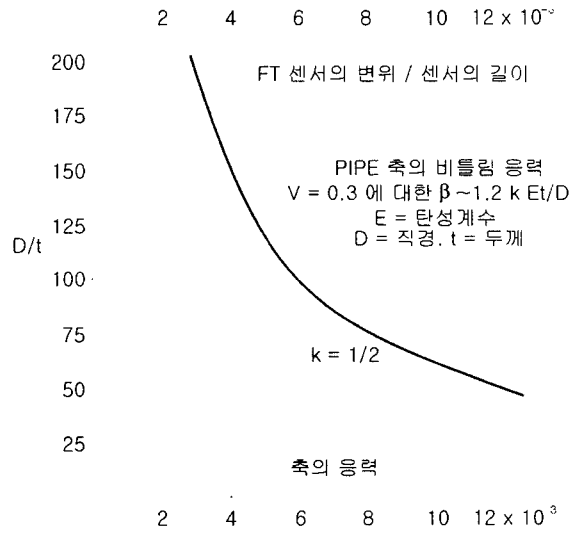


그림 16. Pipe 비틀림의 검출을 위한 적정 장광센서의 길이 계산.

4.3 교량 보수공사

그림 17과 같이 캐나다 Albert Calgary에 위치한 Centre St. 교량을 보수하는 과정에서 그림 18과 같이 부식이 되지 않고 고강도인 합성 Rebar로 대체한 후 그 성능의 검증을 겸하여 장광센서를 설치 사용하였다.

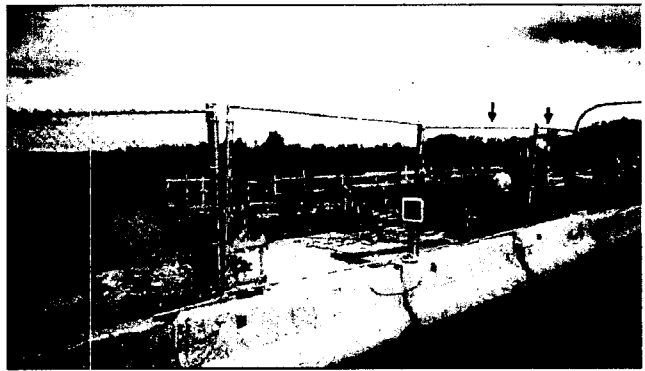


그림 17. 보수공사중인 Centre St. Bridge.

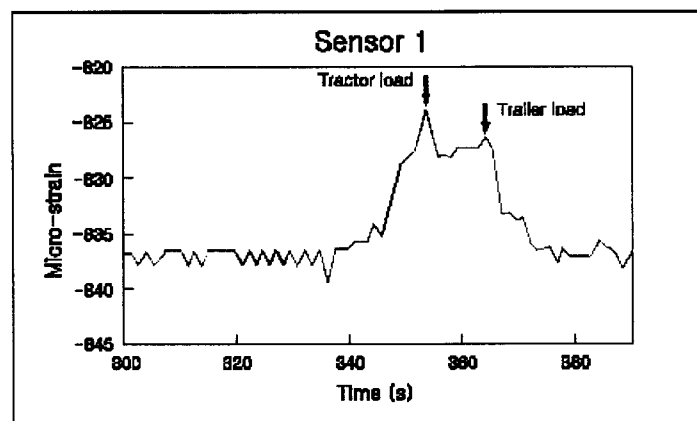


그림 18. 장광센서의 합성 Rebar에 설치.

4.4 교량교판의 거동 계측

교량에 광변형센서를 사용하는 주 목적은 변형센서의 2단 배열로 설치하여 차량이 지날 때 처침, 교통량, 극한 하중 그리고 시간 경과에 따른 하중의 변화에 의해서 발생하는 구조물의 움직임을 점검한다. 획득한 자료는 실제 하중과 상재 하중을 비교하여, 교량성능 평가시 유용하며 이의 추이 거동에 따라 손상정도 판단에 활용할 수 있다.

DYNAMIC TRAFFIC MONITORING



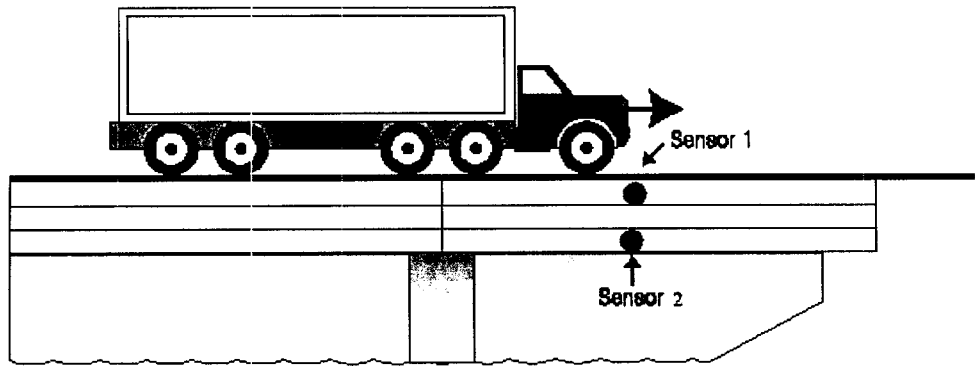


그림 19. 트랙터가 장광센서가 설치된 교량을 통과할 때의 측정값.

4.5 원자로 격납고 구조물

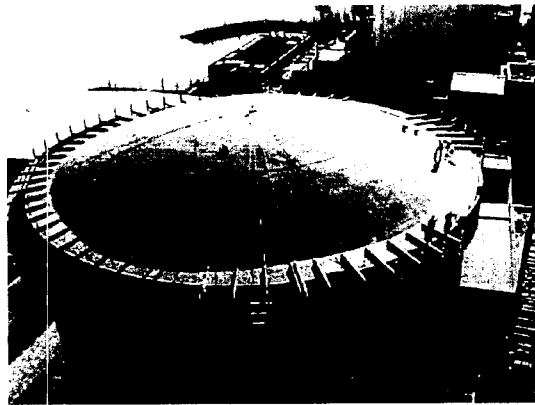
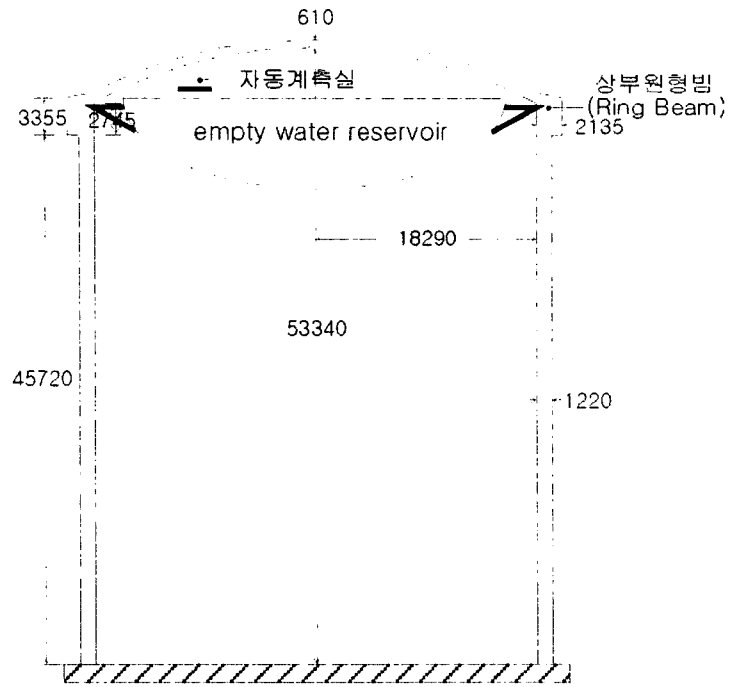


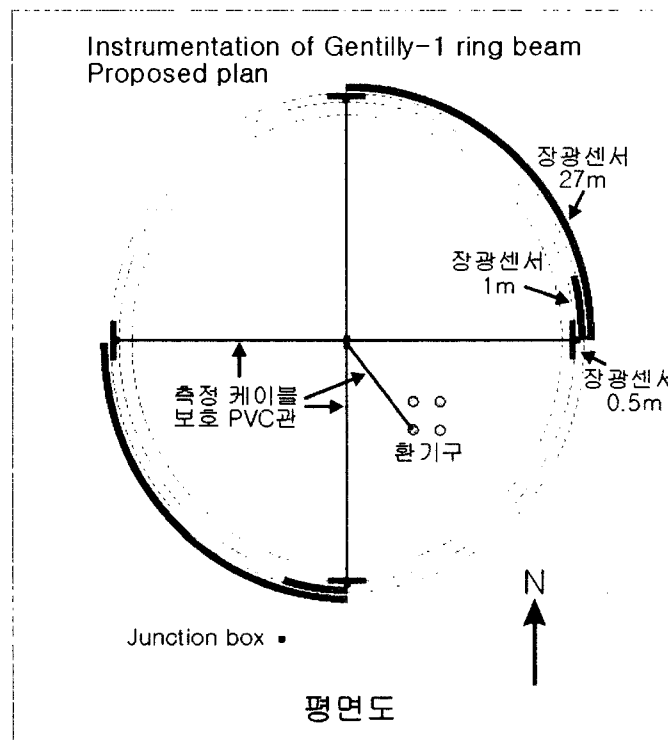
그림 20. 원형 콘크리트 빔(Beam)의 보강 공사 장광센서 설치 장면.



그림 21. GRP 보강판 위에 장광센서 설치 장면.



단면도



평면도

그림 22. Gentilly 계측 계획도.

장광센서를 사용이 일시 정지된 Gentilly(캐나다 퀘벡 소재)원자로 상부 원형빔 보강 공사용으로 설치하였다. 이 격납고 상부구조물에 콘크리트 분리현상 발생으로 GRP 보강판을 사용하여 시공하였다.

이 보강효과 관리를 위하여 사용된 장광센서의 길이는 각각 0.5, 1.0과 27미터로 외벽보호 GRP 보강판 위에 설치되었다. 이 장광센서는 상부 원형빔을 따라 설치되어 장기간 영구적으로 일교차 온도와 바람, 기온 등 여타 다른 주변 환경 효과에 연계한 변형 계측을 목적으로 하였다.

4.6 유류저장 탱크

유류저장 탱크의 건전도 계측을 위하여 장광센서를 압력 또는 체적의 변화에 따라 탱크 원주는 수축, 팽창 관리와 구조안정을 위하여 사용할 수 있다. 그 적용은 파이프라인 관리와 유사하다고 할 수 있으며 측정값과 내부 용량의 수위와의 상관관계를 보정한다면 수위관리도 가능하다.

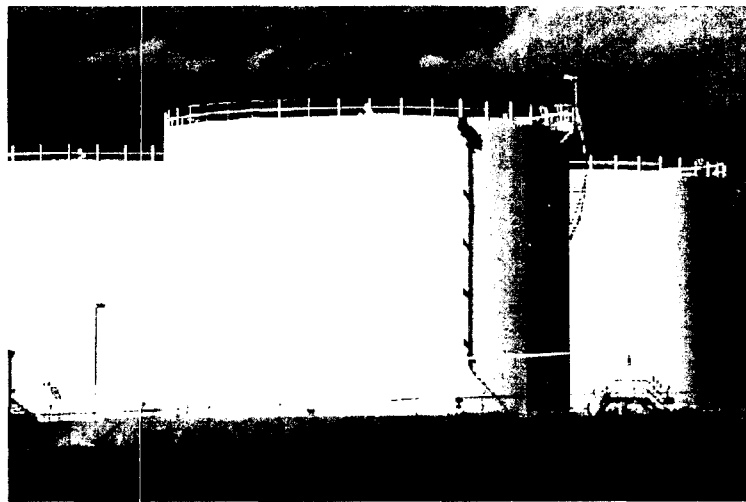


그림 23. 액체 연료 저장 탱크.

4.7 터널 구조물

터널 인버트에 설치하여 통과 철도 하중에 의한 처짐현상이나 주변 라이닝의 변위를 계측할 수 있다. 또 터널에 인접한 빌딩공사 등의 굴착효과에 의한 손상을 방지할 수도 있으며, 무엇보다 중요한 것은 센서의 길이가 길어 미소한 변위를 미리 감지할 수 있으므로, 사전에 구조물의 크립현상 등 손상이 되지 않은 상태로 관리가 가능하다는 점이다. 지진파 등의 구조물에 작용된 영향을 감시할 수 있다.

전 세계적으로 지하철등 주요 시설물은 그 대체가 거의 불가능하여 지속적인 보수공사로 사용하고 있으며 계측값도 매우 엄격히 적용하고 있는 상황이다. 계측은 중앙계측실에서 원격으로 계측되며 계측 지점에서 먼 거리라도 가능하다.

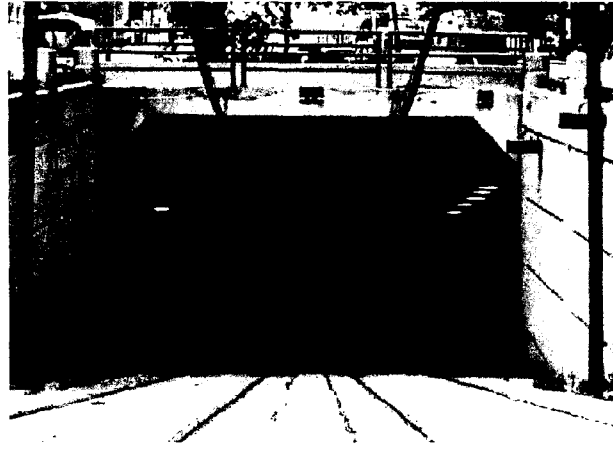


그림 24. 지하철과 지하도 터널 단면.

4.8 고압 송전탑이나 Tower

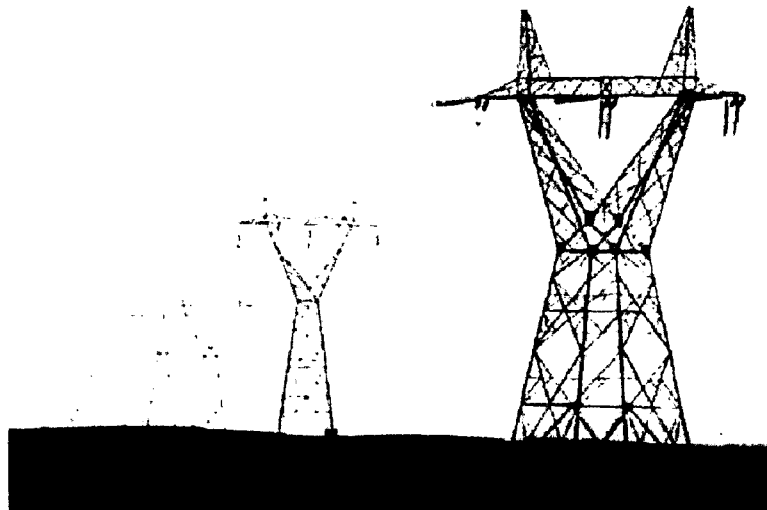


그림 25. 고압선과 고압 송전탑.

장광센서는 전자기파나 전자유도현상에 영향을 받지 않기 때문에 고압 송전탑 또는 통신탑의 결빙으로 인한 편하중이나 풍하중에 의한 구조영향을 측정할 수 있다. 수직부재인 기둥에 센서를 설치하여 각 지주에서 발생하는 응력의 차이를 계산하면 기울기를 얻을 수 있으며 이의 반복효과로 기울음의 방향과 그 크기와 횟수 그리고 이 발생의 원인인 태양조도각도, 풍압 또는 구조적 결함문제 등의 요인을 판단할 수 있다.

5. 결 론

현대의 구조물은 그 기능의 다양성과 대용량의 필요로 대형화되어 있다. 이의 자체 자산가치는 이미 높거니와, 사회에 미치는 중요성은 금전적인 가치로만 따질 수 없는 그 이상의 것이다. 이의 효과적인 관리를 할 때 전기식 스트레인센서와 같이 오직 국부적인 계측값은, 구조물의 미소한 초기변형을 감지할 수 없는 한계가 있어 사전대응이 불가능하며 또 구조물 전체거동에 대한 대표성이 적어 즉각적인 보수나 보강 등의 행정조치를 집행할 근거로 활용하기가 어렵다.

구조물의 건전도 관리를 위한 계측은 이제껏 지속적으로 행하여지지 않거나 또는 기술발달의 미비로 정확성이 낮은 형식이 채택되어 결국 신뢰성이 적은 계측 사례가 많은 상태라고 할 수 있다. 현재 유럽이나 동남아 지역과 같이 인구밀도가 조밀한 지역은 신규시설물 공사를 위한 입지부족으로 기존 시설물에 근접하여 시공할 수밖에 없으므로, 기존 구조물의 관리가 공사현장보다 중요한 사안이다. 기존 시설물을 운영하면서 건전도 관리를 같이 수행하여야 하므로 신뢰성이 높고 정확한 계측기가 필요하다. 또 각 구조물은 여러 가정 조건 즉, 지반의 상태, 교통량, 사용기간의 차이나 기후영향 등으로 각각 다른 상황에 처하여 있어 그 해석은 다를 수 있다. 이에, 이 다른 상황에서 계측기가 최대의 변위 발생시점과 요인을 판단할 수 있다면 매우 효과 높은 계측이 될 것이다.

장광센서는 센서의 길이가 최소 10cm에서 최대 30m까지 선택의 폭이 넓어 각 구조물이 어떤 원인이 되더라도 최대변위 발생시점 즉 원인을 규명할 수 있어 사전에 대책강구와 방비가 가능하다.