

# 광섬유센서를 이용한 철도구조물의 모니터링

## Fiber Optic Smart Monitoring of Railway Structures

김기수†·조성규\*·김명세\*·김학연\*·서기원\*

Ki Soo Kim, Sung Gyu Cho, Myeong Se Kim, Hak Yeon Kim and Ki Won Seo

**Key Words** : Fiber optic sensors (광섬유센서), Railway Structures (철도구조물), Monitoring (모니터링), Subway (지하철), Express railway (고속철도), Safety observation (안전감시)

### ABSTRACT

For monitoring of railway structures, optical fiber sensors are very convenient. The fiber sensors are very small and do not disturb the structural properties. They also have several merits such as electro-magnetic immunity, long signal transmission, good accuracy and multiplicity of one sensor line. Strain measurement technologies with fiber optic sensors have been investigated as a part of smart structure. In this paper, we investigated the possibilities of fiber optic sensor application to the monitoring of railway structures. We expect that the fiber optic sensors have much less noises than electrical strain gauges because of electro-magnetic immunity while railways operate electric power of 22000 volts. Fiber optic sensors showed good durability and long term stability for continuous monitoring of the railway structures as well as good response to the structural behaviors during construction.

## 1. 서 론

구조물의 안전성과 잔존수명을 예측하기 위해서 변형률, 온도 등을 측정하는 것이 중요하다. 변형률은 구조물의 외부, 내부의 결점 혹은 Smart Structure의 형태까지도 수정할 수 있는 요소이다. 철도구조물에서는 지금까지 전자식 스트레인 게이지 등을 통하여 구조물 외부의 변형률을 측정해 오고 있다.

그러나 이러한 센서들은 분해능이 떨어지고, 내구성능이 좋지 않으며, 전자기파에 영향을 받아 특히 철도구조물에는 적합치 않은 것으로 알려져 있다. 전자식 스트레인 게이지를 구조물 내에 삽입(embedding)하는 경우, 구조물의 잔존기간동안 전자식 스트레인 게이지와 리드선 사이에 부식에 의한 결함이 생길 수 있으며 또한 전자식 스트레인 게이지는 병렬 즉, 하나의 센서에 두개의 리드선이 필요하다는

단점 때문에 구조물의 장기 계측용 시스템(On-Line system)에는 문제가 있는 것으로 판단되고 있다.

더욱 높은 정확성과 신뢰성을 바탕으로 구조물의 상태를 파악 또는 예측 할 수 있는 기술적인 체제가 대두되고 있는 시점에서, 점차 세계적으로 부식이 되지 않아 반영구적이며, 분해능이 우수하고, 전자기파의 영향을 받지 않으며, 다중화가 가능한 광섬유 센서를 이용한 시스템이 철도구조물의 안정성과 잔존수명을 판단하는 기준으로 중요한 역할을 할 것으로 기대되고 있다.

## 2. 광섬유격자센서의 특성과 작동 원리

### 2.1 광섬유격자 센서의 특성

광섬유격자 센서는, 한 가닥의 광섬유에 여러 개의 광섬유 브래그 격자를 일정한 길이에 따라 새긴 후, 온도나 강도 등의 외부의 조건변화에 따라 각 격자에서 반사되는 빛의 파장이 달라지는 특성을 이용한 센서이며, 광섬유센서 중 약 70%이상 사용되는 센서이다.

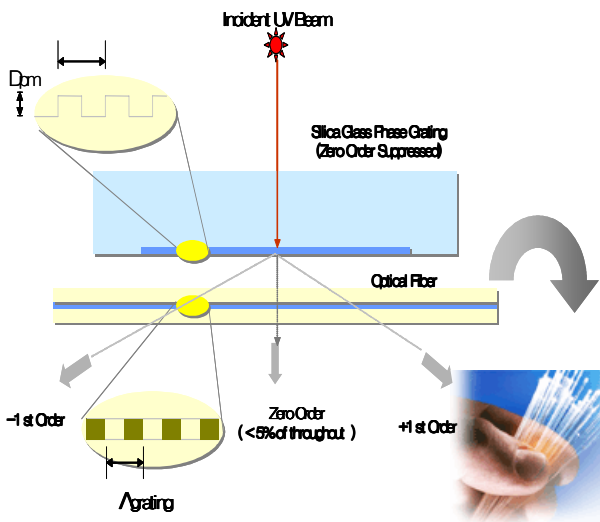
일반적으로 사용되는 광섬유의 중심(Core)에는 클래딩(Cladding)보다 굴절률을 높이기 위하여 보통 게르마늄(Ge)

† 교신저자; 홍익대학교 재료공학부  
E-mail : kisookim55@paran.com  
Tel : (041) 860-2209 Fax : (041) 867-5897

\* (주)아이세스 부설연구소

물질이 첨가되는데, 이 물질이 실리카 유리에 안착하는 과정에서 구조 결합이 생길 수 있다. 이 경우 광섬유 코어에 강한 자외선을 쬐어주면, 게르마늄의 결합구조가 변형되면서 광섬유의 굴절률이 변화된다. 광섬유격자 센서는 이러한 현상을 이용하여 광섬유 코어의 굴절률을 주기적으로 변화시킨 것을 말한다.

광섬유격자 센서의 제조 방법에는 여러 가지가 있으나, <그림 1>과 같이 자외선 레이저를 이용하는 방법이 가장 많이 사용된다.



<그림 1> Manufacturing method of FBG sensor use ultraviolet-rays laser

## 2.2 광섬유격자 센서의 동작원리

광섬유격자 센서에는 한 가닥의 광섬유에 여러 개의 격자가 사용되는데, 이 경우 각 격자의 반사 파장을 모두 다르게 함으로써, 반사된 빛의 스펙트럼으로부터 특정 격자가 겪는 물리량을 쉽게 구분할 수 있다. 이러한 방법을 파장분할방식이라 하는데, 이 방법에서는 광원의 한정된 선폭에 의하여 동시에 측정할 수 있는 격자의 개수에 제약이 받는다. 일반적으로 1개의 섬유에 약 10개 정도 사용한다.

브래그 격자 센서 어레이의 가장 큰 응용 중에 하나는 철도구조물을 포함하여 구조물의 상태를 진단하는 스마트 구조(Smart Structure)가 있다. 철도, 교량, 댐, 건축물 등의 제작 시에 콘크리트 안 등에 광섬유 격자 어레이를 포설하고, 구조물 내부의 인장 분포나 구부림 정도를 감지하여 구조물의 안전 상태를 진단할 수 있다. 항공기나 헬리콥터 등의 날개 상태 진단 등에도 응용되고 있다.

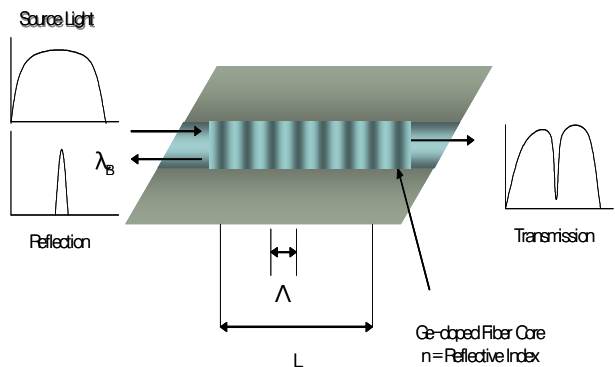
<그림 2>의 격자에서 반사되는 브래그 파장은 식 (1)와 같이 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이며, 광섬유격자 센서의 온도나 압력 등의 외부 물리량을 인가할 경우 브래그

파장이 달라진다. 이에 브래그 파장의 변화를 측정한다면 광섬유격자 센서에 인가된 물리량을 구할 수 있다.

먼저 스트레인 변화( $\epsilon$ )에 대한 브래그 중심파장  $\lambda_B$ 의 변화량  $\Delta\lambda_B$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\epsilon \quad (1)$$

이며, 여기서,  $P_e$ 는 광탄성상수(Photo-elastic Constant)로 게르마늄 실리카 유리(Germano-silicate Glass)의 경우 대략 0.22의 값을 가지며,  $\epsilon$ 은 광섬유 격자에 가해진 변형률이다.



<그림 2> Structure of FBG sensor

광섬유격자 센서는 광섬유 측면에 조사하여 광섬유의 특정 부위에 원하는 파장에 대해서 반사 특성을 보이는 브래그 격자를 새길 수 있음을 보인 이후 광섬유 센서의 연구가 괄목할만한 발전을 이루었다. 보고된 바에 의하면 광섬유의 강도를 저하 시키지 않고 1% 변형률에 의해 12nm 영역에 걸친 브래그 파장의 가변이 이루어질 수 있으며, 압축력에 의해 약 32nm의 파장 가변이 이루어졌으며, 또한 100℃ 정도의 주위 온도 변화로 1.1 nm의 파장 가변이 이루어졌다. 예를 들면 약 0.01nm Bragg 파장을 정확히 이동시키기 위해서는 변형률과 온도의 분해능은 각각 대략  $8 \times 10^{-6} \epsilon$ , 0.9 ℃이며, 다른 실험 장치를 통해 더 큰 분해능을 갖도록 하여 더 작은 브래그 파장의 이동을 측정할 수 있다.

이런 파장의 이동은 다른 광섬유 격자 소자와 광섬유 패브리 페로(Fabry-Perot) 공진기 형태의 광학 필터나 비대칭 Mach-Zehnder 간섭계로 관찰할 수 있었고, 또한 간단한 장치로 온도 변화에 무관한 스트레인 측정 장치를 구성할 수도 있다. 또한 다중점(Multi-point) 센서로의 확장이 용이하며 이를 이용하면 교량 및 건축물의 사전 감시 시스템을 구성할 수 있고, 또한 복합 구조물에 대한 진단이나 음향센서 어레이(Array)로서 성공적으로 시험되었다.

### 3. 고속철도 터널 구조물의 계측

#### 3.1 개요

경부고속철도 노반신설공사 13-4공구 원효터널 종점부 378km070~400단면에 광섬유 센서를 설치하여 의 2006년 04월 26부터 최근까지 지속적으로 계측하였다. 이 현장은 시공 중 계측이라는 매우 열악한 작업현장에서 계측 작업이 수행되었지만 상당량의 센서가 처음부터 끝까지 좋은 데이터를 보이고 있으며, 기존에 설치되었던 터널이나 지하철현장의 전자식 센서의 계측데이터에 비해 계측 데이터의 신뢰성이 대단히 우수한 것으로 판단된다.

#### 3.2 경부고속철도(KTX) 천성산 통과공사 구간

공사위치는 경상남도 양산시 웅상읍 주남리 - 경상남도 양산시 동면 법기리이고, 공사 중 원효터널의 총 굴착 길이는

13.270km로 그 연장이 매우 길다. 이에 따라 13-3공구와 13-4공구로 분할하여 공사가 진행되고 있다. 13-4공구에 속한 원효터널 굴착 길이는 4.835km이며, 당 연구팀에서는 원효터널 종점부인 378km400 ~ 378km070 구간에 대하여 광섬유센서를 설치하여, 자동계측을 실시하였다.

#### 가. 광섬유 센서 설치 현황

본 연구팀의 광섬유센서는 경부고속철도(KTX) 13-4공구 원효터널 종점부 노반신설공사의 378km400 단면부터 378km070 단면까지 총 13단면에 대하여 자동화 계측이 실시되었다. 또한 원효터널 종점 갱구부 입구에 사면붕괴감지 시스템인 Tension Wire 센서를 설치하여 붕괴에 대한 자동화 계측이 이루어졌다. 각 단면에 설치된 광섬유 센서의 종류는 내공변위센서, 지중변위센서, 락볼트 축력계, 슛크리트 응력계가 터널공사 계측 설계에 포함되어 설치되었으며, 각 단면에 설치된 센서의 종류와 설치된 센서 수는 <표 1>과 같다.

<표 1> KXT 13-4공구 원효터널 종점부 광섬유센서 설치 현황

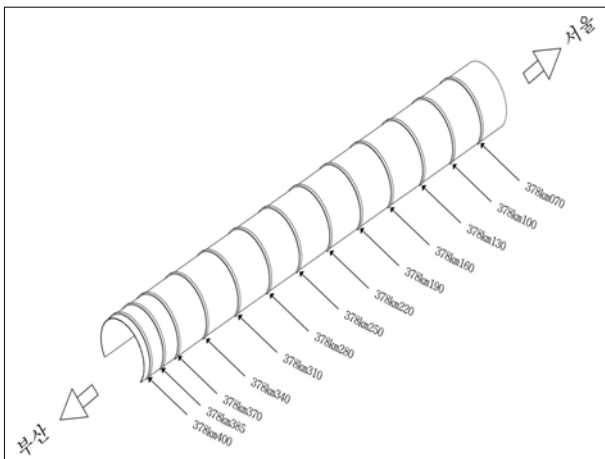
설치단면	내공 변위계		지중변위계						락볼트 축력계						스�크리트 응력계				비고
	상반	하반	상반			하반			상반			하반			상반		하반		
			L	T	R	L	R	L	T	R	L	R	L	T	R	L	R		
378km400	6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	
378km385	12	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	
378km370	12	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	
378km340	12	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
378km310	12	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
378km280	6	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
378km250	6	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
378km220	6	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
378km190	6	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
378km160	6	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
378km130	6	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
378km100	6	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
378km070	6	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
합계	102	52	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	6	6	6	6	6	304

원효터널 굴착시 상부와 하부로 나뉘어 굴착이 진행된 관계로, 센서의 설치위치는 상반과 하반으로 나뉘어 설치되었다.

원효터널 종점 갱구부 부근의 암석 및 토양의 상태가 매우 연약한 378km370, 385, 400단면에는 지중변위계, 락볼트 축력계, 숏크리트 응력계를 설치하여, 터널 내공의 안정성을 관찰하였다.

<표 1>에 나타난 센서 이외에 원효터널 갱구부 입구 사면에 광섬유 Tension wire 4개를 설치하여 사면의 안정성을 관찰하였다. 이와 같이 설치된 광섬유 센서의 총 개수는 308개이다.

<그림 3>은 KTX 13-4공구 원효터널 종점부에서 광섬유 센서의 설치위치를 나타낸다. 기본적으로 30m 간격으로 센서를 배치하는 것으로 설계되었으며, 안정성이 취약한 갱구부 부근에 센서 설치 단면을 15m로 하여 정밀한 터널 내공의 변형을 관찰하였다.

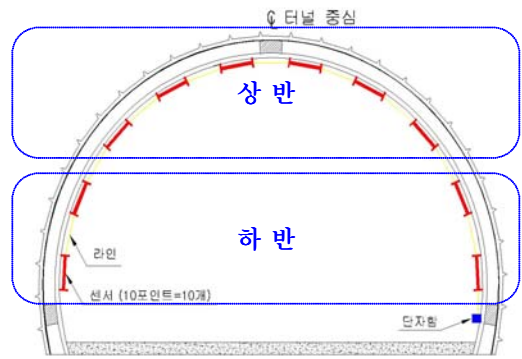


<그림 3> KTX 13-4공구 원효터널 종점부 광섬유 센서 설치 단면 위치도

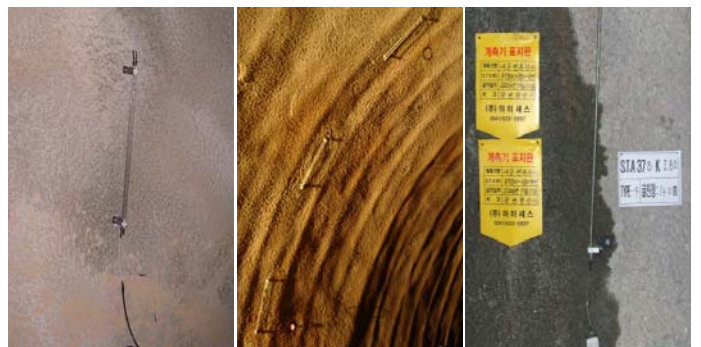
① 광섬유 내공변위 센서

<그림 4>는 광섬유 내공변위계 설치도이고, <그림 5>는 설치 사진이다. 상반 내공변위계의 경우 378km385, 370, 340, 310단면은 각 설치 포인트(위치)에 <그림 5>의 왼쪽 그림과 같이 내공변위 센서 2개씩 설치되었다. 이는 2개의 내공변위계를 압축과 인장을 판별하여 터널 내공의 형상변화를 살펴보기 위한 조치라고 할 수 있다.

위에서 설명한 내공변위 상반에서 12개의 센서를 설치한 단면을 제외한 다른 단면에는 각각의 포인트에서 1개의 내공변위 센서가 설치되었으며, 내공변위 하반부에 설치된 센서는 모든 단면에서 각각의 포인트에서 1개의 내공변위 센서가 설치되었다.



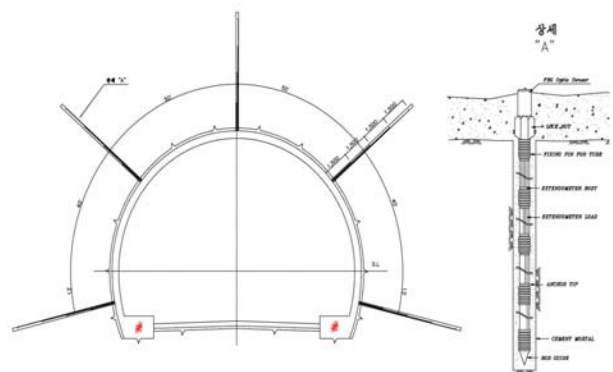
<그림 4> 광섬유 내공변위 센서 설치도



<그림 5> 광섬유 내공변위 센서 설치 사진

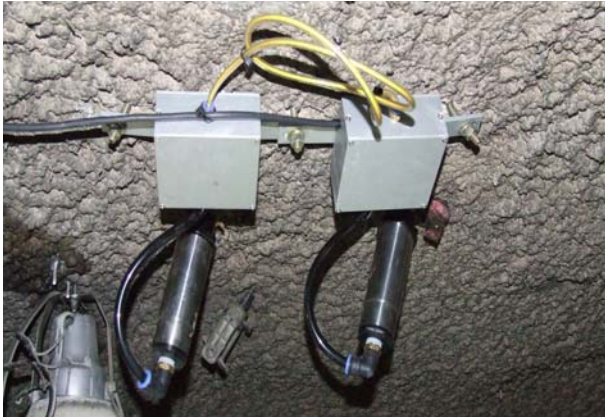
② 광섬유 지중변위 센서

광섬유 지중변위 센서는 <그림 6>와 같이 각 설치 위치(point)에서 1.5m의 길이차이로 4개의 센서가 삽입되어 있다. 설치된 포인트의 위치는 터널 상반의 왼쪽(Left, 이하 L), 천단(Top, 이하 T), 오른쪽 (Right, 이하 R)과 터널하반의 L과 R의 위치에 터널 내공 단면에 대하여 직각으로 설치되어 있다.



<그림 6> 광섬유 지중변위계 설치 위치 및 센서 상세도

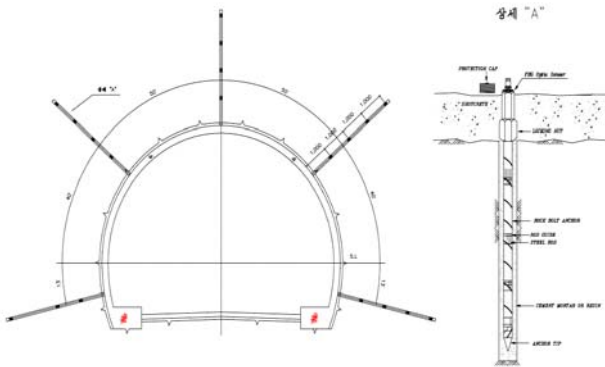




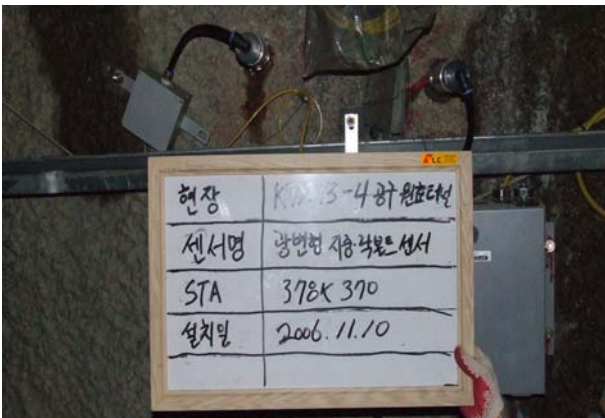
<그림 7> 광섬유 지중변위계 및 락볼트 축력계 설치 사진 (상부 천단)

③ 광섬유 락볼트 축력계

광섬유 지중변위 센서는 <그림 8>과 같이 각 설치 위치 (point)에서 1m의 길이차이로 4개의 센서가 삽입되어 있다. 설치된 포인트의 위치는 터널 상반의 왼쪽(Left, 이하 L), 천단(Top, 이하 T), 오른쪽 (Right, 이하 R)과 터널하반의 L과 R의 위치에 터널 내공 단면의 직각으로 설치되어 있다.



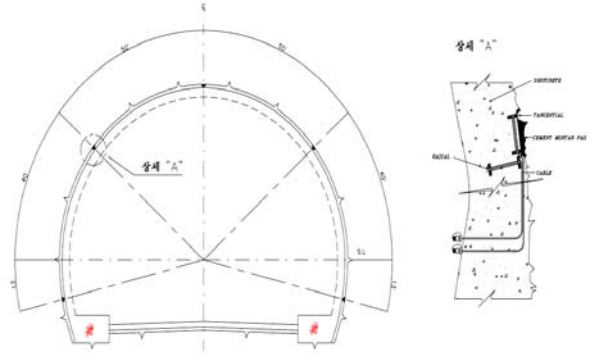
<그림 8> 광섬유 락볼트 축력계 설치 위치 및 센서 상세도



<그림 9> 광섬유 지중변위계 및 락볼트 축력계 설치 사진 (상부 오른쪽)

④ 광섬유 슛크리트 응력계

광섬유 슛크리트응력계는 <그림 10>과 같이 설치되었으며, 설치된 포인트의 위치는 터널 상반의 왼쪽(Left, 이하 L), 천단(Top, 이하 T), 오른쪽 (Right, 이하 R)과 터널하반의 L과 R의 위치에 설치되었다.



<그림 10> 광섬유 슛크리트 응력계 설치 위치 및 센서 상세도

⑤ 광섬유 Tension Wire Sensor

광섬유 Tension Wire Sensor(이하 T/W Sensor)는 13-4공구 원호터널 종점 갱구부 상단면에 설치하였다. 총 4개의 T/W Sensor가 설치되었으며, 총 5m의 철근 Wire를 이용하여 사면의 거동에 대한 관찰을 실시하였다.



<그림 11> 광섬유 Tension Wire 설치 사진

3.3 계측 데이터

가. 광섬유 내공변위 센서

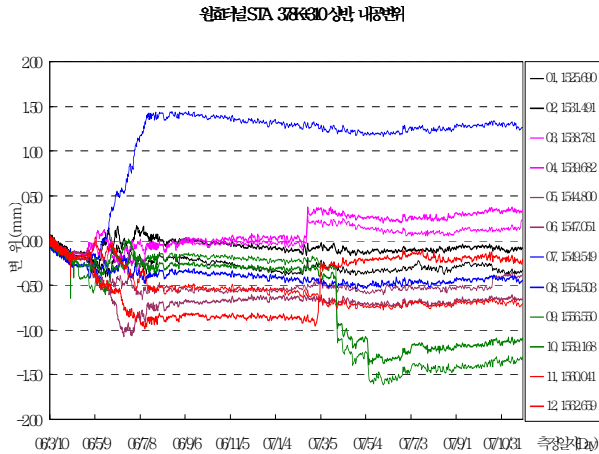
원호터널 종점 갱구부에 근접할수록 터널의 내부 응력이 크게 발생된다. 이러한 터널의 내공 변화에 대한 관찰이

378km310 단면부터 378km400 단면 사이의 5개 단면에 대하여 계측 데이터 정리와 결과 분석을 실시하였다.

① 378km310 단면

378km310 단면 상반에는 센서 설치 위치(포인트)에 2개의 내공변위 센서가 설치되어 있다. 센서번호 01번부터 12번순으로 터널 내부의 좌측에서 우측으로 2개씩 설치되어 계측되었다. 천단에 설치된 07번 센서는 최대 1.71mm로 가장 큰 변위차를 보였다. 센서 설치 후 약 2개월간 터널 내공의 단면 변화가 비교적 크게 발생하였으나, 그 후로 약 6개월간 단면 변화는 거의 나타나지 않았다. 2007년 02월 14일 이후로 내공변위의 현저한 변화가 나타남을 알 수 있다. 이는 2007년 02월 14일에 378km310 단면 하반부 굴착이 시작됨에 따라 터널 상반의 내공단면 변화가 발생된 것으로 추측이 가능하다.

<그림 12>에 나타난 것과 같이 현저한 계측 데이터의 변화가 발생된 시점이 각 계측 위치(포인트)마다 차이를 보이는 것은 작업 차량의 통행을 위한 도로 확보를 위해 터널 중앙으로부터 반절씩 나누어 공사를 진행한 결과라고 설명이 가능하겠다. 단면의 하부 굴착 후 터널의 안정화되면서 현저한 변위차를 보이지 않았다.

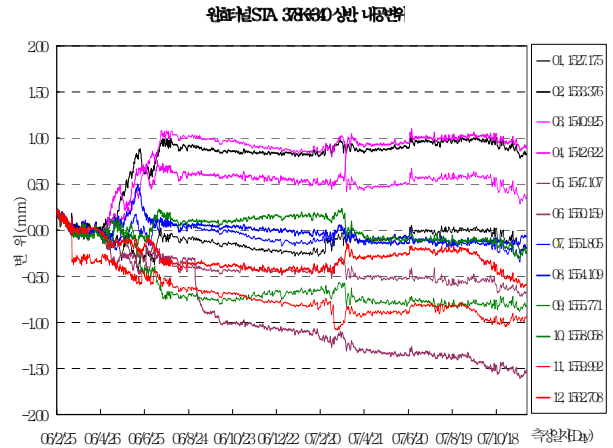


<그림 12> 378km310 단면 상반 내공변위 계측데이터

② 378km340 단면

378km340 단면 상반 내공변위 센서도 378km310 단면과 같이 센서 설치 위치(포인트)에 2개의 센서가 설치되어 있다. 같은 위치에 설치된 2개 센서끼리의 거동을 비교하면 유사한 경향을 나타내고 있다. 설치된 12개 센서는 약 2개월간 터널 내공의 거동에 의해 현저한 변위를 보였으며, 그 이후 거동은 매우 작은 것을 알 수 있다. 2007년 3월 13일에 378km340 단면의 하반 굴착이 시작되어 378km340

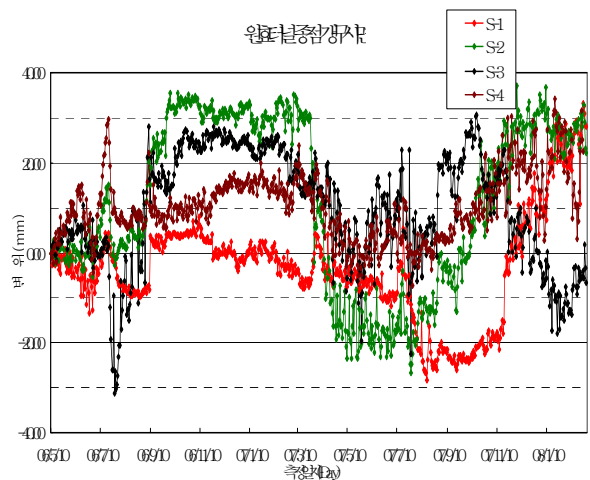
단면에서의 터널 내공의 변화가 크게 나타나고 있으나 378km310 단면에 비하여 크지 않음을 알 수 있다. 천단에 설치된 06번 센서가 설치 초기에 큰 변위량을 보이고 있으나, 현장에서의 관리기준치에 크게 미치지 못하고 있는 것으로 나타났다.



<그림 13> 378km340 단면 상반 내공변위 계측데이터

나. 광섬유 Tension Wire 센서

경부고속철도 13-4공구 원호터널 중점 갱구부에 설치한 광섬유 Tension Wire 센서의 계측 결과는 <그림 14>과 같다. 사면 계측용 Tension Wire 센서의 측정 길이는 5m로 설계되어 설치되었다. 사면 계측용 Tension Wire 센서는 앞서 설명한 내공변위와는 달리 계절변화에 따라 그 결과가 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 계절의 온도변화는 사면부의 토질 및 암석 등의 상태를 변화시키고, 그 변화의 계측결과가 확연하게 드러나고 있다.



<그림 14> 광섬유 Tension Wire 센서 계측 데이터

#### 4. 결론

경부고속철도 노반신설공사 13-4공구 원효터널 중점부 378km070 ~ 378km400 단면에 설치된 광섬유 센서의 2006년 04월 26부터 2007년 11월 19일까지의 계측 데이터를 분석하였다. 이 현장은 시공 중 계측이라는 매우 열악한 작업 현장에서 계측 작업이 수행되었지만 상당량의 센서가 처음부터 끝까지 좋은 데이터를 보이고 있으며, 기존에 설치되었던 터널이나 지하철 현장의 전자식 센서의 계측 데이터에 비해 계측 데이터의 신뢰성이 대단히 우수한 것으로 판단된다.

따라서 본 연구팀에서 설치한 광섬유 센서는 발파 시 비산된 암석 조각에 의한 타격이나 건설장비로 부터의 충격 등, 현장 작업으로 인해 설치된 센서의 약간의 망실을 제외하면 우수한 내구성을 바탕으로 정밀한 계측이 가능할 것으로 판단된다. 그리고 광섬유센서의 좋은 내부식성에 의한 반영구적 수명과 정밀성, 전자기파 무간섭성과 낙뢰와 무관한 특성, 센서의 다중화 특성 등 여러 가지 장점을 고려하면 2만 2천 볼트의 고전압이 흐르게 되는 철도 구조물에 있어서 가장 바람직한 계측 시스템이라고 할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 건설교통부 “사회기반시설 평가 중점 연구단”의 지원, “국가 주요 기반시설물 안전관리 네트워크 연구단”의 지원 그리고 2007학년도 “홍익대학교 학술연구진흥비”의 지원으로 이루어진 것입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

[1] Andreas Othonos and Kyriacos Kalli, "Fiber Bragg Gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing", Artech House, (1999)  
[2] K. P. Koo and A. D. Kersey, "Bragg Grating-Based Laser Sensors Systems with Interferometric Interrogation and Wavelength Division Multiplexing", Journal of Lightwave Technology, Vol. 13, NO. 7, pp. 1243-1248, (1995)  
[3] "Mine operating accurate stability control with Optical Fiber Sensing and Bragg Grating Technology" Journal of Lightwave Technology, Vol. 13, NO. 7, pp. 1303-1311, (1995)  
[4] A. D. Kersey, K. P. Koo and M. A. Davis, "Fiber Optic Bragg Grating Laser Sensors", SPIE, Vol. 2292 Fiber Optic and Laser Sensors XII, pp. 102-112, (1994)  
[5] W. W. Morey, J.R. Dunphy, and G. Meltz, "Multiplexing Fiber Bragg Grating Sensor", SPIE, Vol. 1586, Paper #22, Boston, pp. 216-224. (1994)

[6] Kim, K. S., L. Kollar and G. S. Springer, "A Model of Embedded Fiber Optic Fabry-Perot Temperature and Strain Sensors", J. of Composite Materials Vol. 27, pp. 1618-1662, (1993)  
[7] A. D. Kersey, T. A. Berkoff and W. W. Morey, "High-Resolution Fiber-Grating Based Strain Sensor with Interferometric Wavelength-Shift Detection", ELECTRONICS LETTERS, 30th, Vol. 28, No. 3, pp. 516-518, (1992)  
[8] Kim, K. S., M. Breslauer and G. S. Springer, "The Effect of Embedded Sensor on the Strength of Composite Laminates" J. of Reinforced Plast and Comp, Vol. 2, pp. 949-958, (1992)  
[9] M. Melle, Kexing Liu, and Raymond M, "A Passive Wavelength Demodulation System for Guided-Wave Bragg Grating Sensors", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, Vol. 4, NO. 5, pp. 516-518, (1992)  
[10] R. M. Measures, "Fiber optic sensor considerations and developments for smart structures", Proc. SPIE, Vol. 1588, pp. 282, (1991)  
[11] Meltz, G., W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg grating in optical fibers by a transverse holographic method," Optics Letters, Vol. 14, pp. 823-825, (1989)  
[12] W. W. Morey, G. Meltz, and W. H. Glenn, "Fiber Optic Bragg Grating Sensors", SPIE, Vol. 1169, pp. 98-106, (1989)  
[13] J. stone and L. W. Stulz, "Pigtailed high-finesse tunable fiber Fabry-Perot Interferometer with large, medium and small free spectral range", Elect. Lett., 23-15, pp. 781-783, (1987)  
[14] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B.S. Kawasaki, "Photosensitivity in Optical Fiber Waveguides. Application to Reflection Filter Fabrication", Appl. Phys. Lett., Vol. 32, No. 10, pp. 647-649, (1978)