

特輯

광섬유센서를 이용한 경부고속철도 터널의 시공중 계측

홍익대학교 재료공학부
김기수

요 약

지금까지 광섬유센서를 활용한 구조물의 모니터링에 대하여 다양하게 연구되어지고 있다. 그러나 현재 광섬유센서는 다루기 어렵다는 문제점을 가지고 있어 실제 현장에 적용하는데 많은 어려움을 겪고 있다. 이에 본 논문에서는 광섬유 격자 센서를 고속도로 터널공사의 시공중 계측에 활용하여 시공시 지속적인 모니터링을 시행하여 공사를 안전하게 수행하고, 구조안전성을 지속적으로 확인하였다. 광섬유 격자 센서를 실제의 고속철도 터널공사에 적용하여 터널의 거동을 2년에 걸쳐 측정된 결과를 정리하여 시공 중 터널구조물이 보여주는 데이터를 확인할 수 있도록 하였다.

ABSTRACT

Recently structural monitoring using fiber optic sensors became popular, but the fiber sensors are very difficult to apply to the real structure due to difficulty of handling. In this research, we developed the fiber sensor packages easy to attach or fasten to the structures like ordinary electric sensors. We apply the fiber sensors to the real tunnel structure for measuring the strains and shape changes. The applied fiber optics sensors show the behavior of the tunnel structures. We summarize the data from tunnel for 2 year construction period and confirm the structural behavior of tunnel.

1. 공사 개요

하여 광섬유 센서를 설치하여, 자동계측을 실시하였다.

가. 경부고속철도(KTX) 천성산 통과공사 구간

경부고속철도(KTX) 천성산 통과공사 구간의 공사개요는 다음과 같다.

- ◆공사위치: 경상남도 양산시 웅상읍 주남리 - 경상남도 양산시 동면 법기리
- ◆터널길이: 7.5 km
- ◆공사기간: 2003. 11. 27 - 2008. 02. 26 (51개월)
- ◆공사금액: 약 1500억원

나. 원효터널

경부고속철도(KTX) 노선신설공사 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 굴착길이는 4.835km이며, (주)아이세스는 원효터널 중점부인 378km400 ~ 378km070 구간에 대

2. 광섬유 센서 설치

가. 광섬유 센서 설치 현황

(주)아이세스의 광섬유센서는 경부고속철도(KTX) 13-4공구 원효터널 중점부 노반신설공사의 378km400단면부터 378km070단면까지 총 13단면에 대하여 자동화 계측이 실시되었다. 또한 원효터널 중점 갱구부 입구에 사면붕괴감지 시스템인 Tension Wire 센서를 설치하여 붕괴에 대한 자동화 계측이 이루어졌다. 각 단면에 설치된 광섬유 센서의 종류는 내공변위센서, 지중변위센서, 락볼트축력계, 슛크리트 응력계가 터널공사 계측설계에 포함되어 설치되었으며, 각 단면에 설치된 센서의 종류와 설치된 센서 수는 <Table 1>과 같다. 원효터널 굴착시 상부와 하부로 나뉘어 굴착이 진행된 관계로, 센서의 설치위치는 상반과 하반으로 나뉘어 설치가 되었다. 원효터널 중점 갱구부 부근의 암석

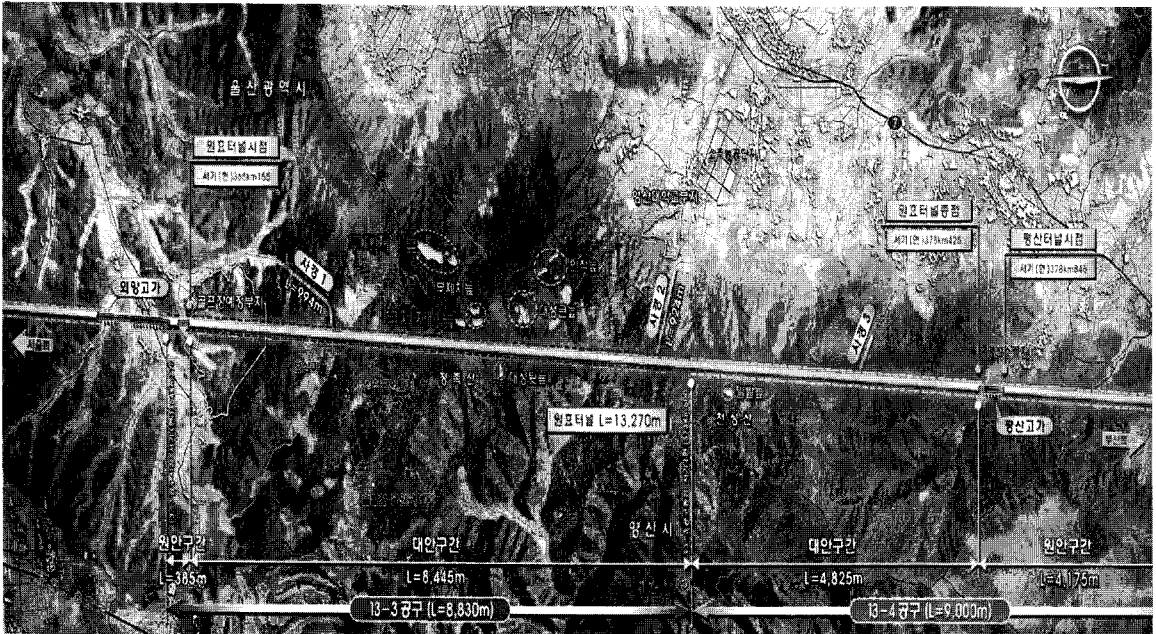


Fig. 1 경부고속철도(KTX) 천성산 통과공사 현장 현황도.

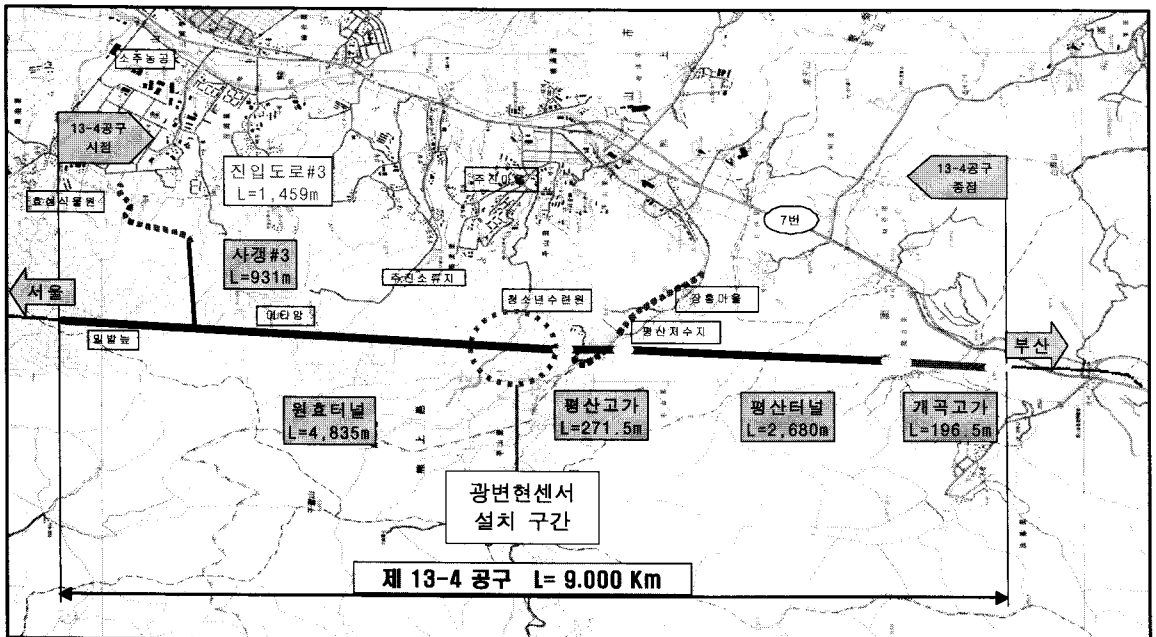


Fig. 2 경부고속철도(KTX) 13-4공구.

및 토양의 상태가 매우 연약한 378km370, 385, 400단면에는 지중변위계, 락볼트 축력계, 슛크리트응력계를 설치하여, 터널 내공의 안정성을 관찰하였다. <Table 1>에 나타난 센서 이외

에 원호터널 갱구부 입구 사면에 광섬유 Tension wire 4개를 설치하여 사면의 안정성을 관찰하였다. 이와 같이 설치된 광섬유 센서의 총 개수는 308개이다.

Table 1 KXT 13-4공구 원호터널 종점부 광섬유센서 설치 현황

설치단면	내공 변위계		지중 변위계						라볼트 축력계						숫크리트 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		

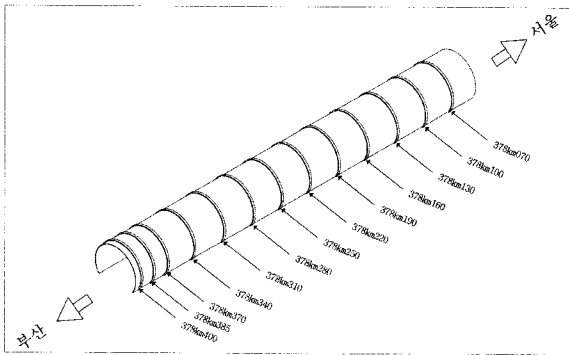


Fig. 3 KTX 13-4공구 원호터널 종점부 광섬유 센서 설치단면 위치도.

Fig. 3은 KTX 13-4공구 원호터널 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.

① 광섬유 내공변위 센서

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

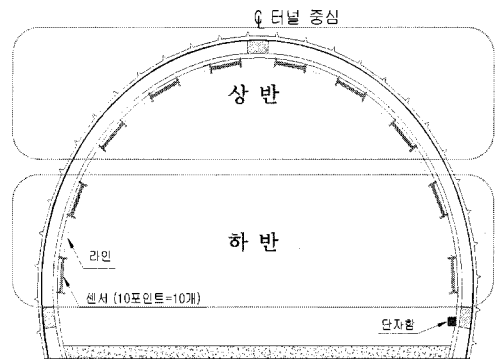


Fig. 4 광섬유 내공변위 센서 설치도.

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

② 광섬유 지중변위 센서

광섬유 지중변위 센서는 <Fig. 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.

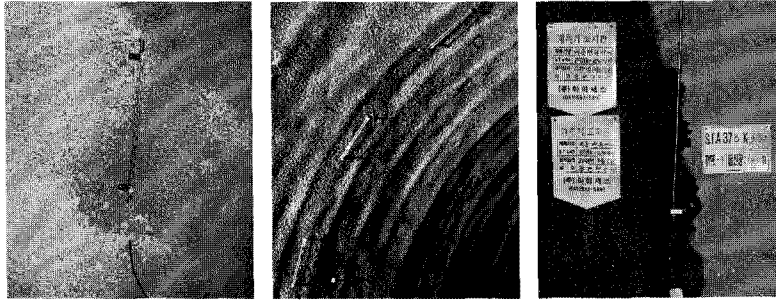


Fig. 5 광섬유 내공변위 센서 설치 사진.

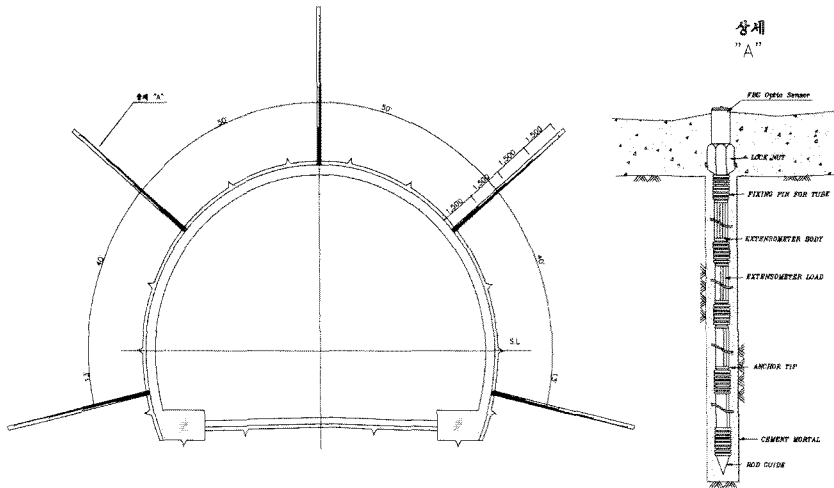


Fig. 6 광섬유 지중변위계 설치 위치 및 센서 상세도.

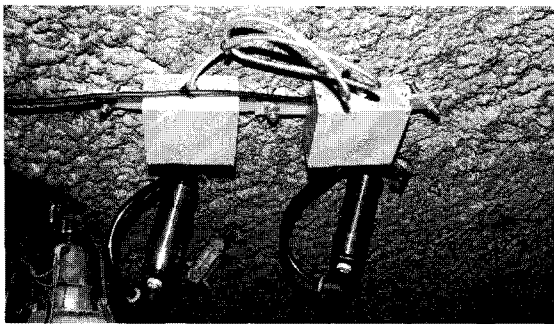


Fig. 7 광섬유 지중변위계 및 락볼트 축력계 설치 사진(상부 천단).

③ 광섬유 락볼트축력계

광섬유 지중변위 센서는 <Fig. 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 단면에 대하여 직각으로 설치되어 있다.

④ 광섬유 슛크리트응력계

광섬유 슛크리트응력계는 <Fig. 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.

3. 계측 데이터

가. 광섬유 내공변위 센서

원효터널 종전 갱구부에 근접할수록 터널의 내부 응력이 크게 발생된다. 이러한 터널의 내공변화에 대한 관찰이 378km310단면부터 378km400단면 사이의 5개 단면에 대하여 계측 데이터 정리와 결과분석을 실시하였다.

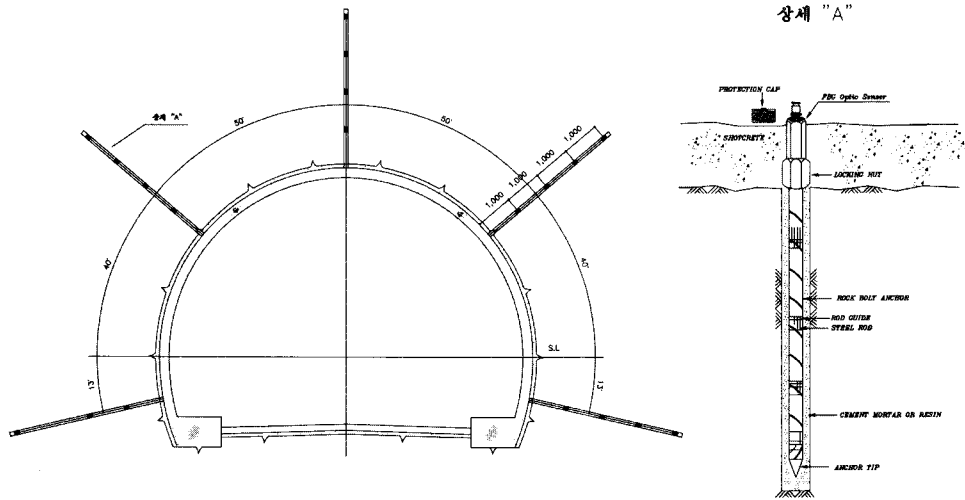


Fig. 8 광섬유 락볼트축력계 설치 위치 및 센서 상세도.

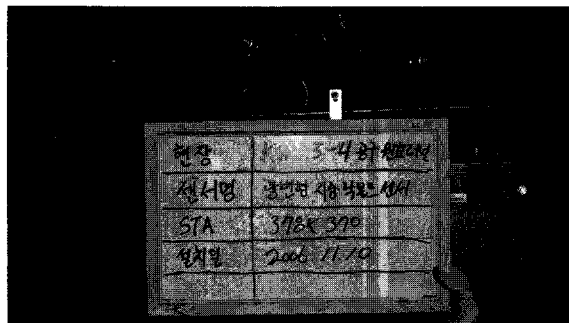


Fig. 9 광섬유 지중변위계 및 락볼트 축력계 설치 사진(상부 오른쪽).

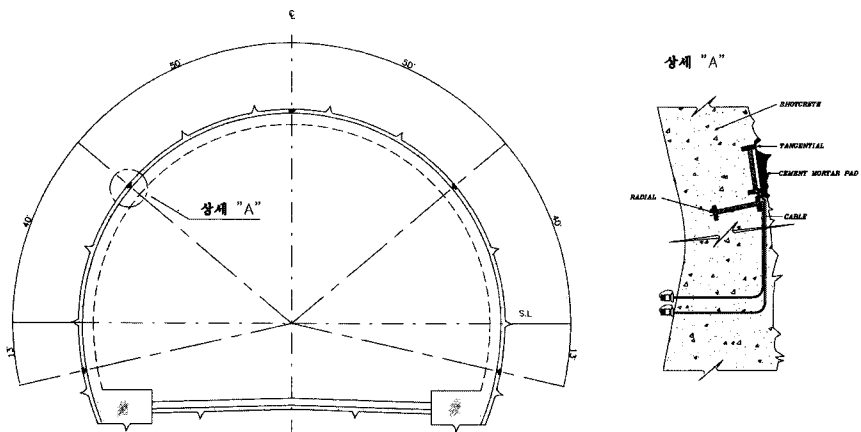


Fig. 10 광섬유 슛크리트응력계 설치 위치 및 센서 상세도.

원효터널 STA. 378K+310 상반, 내공변위

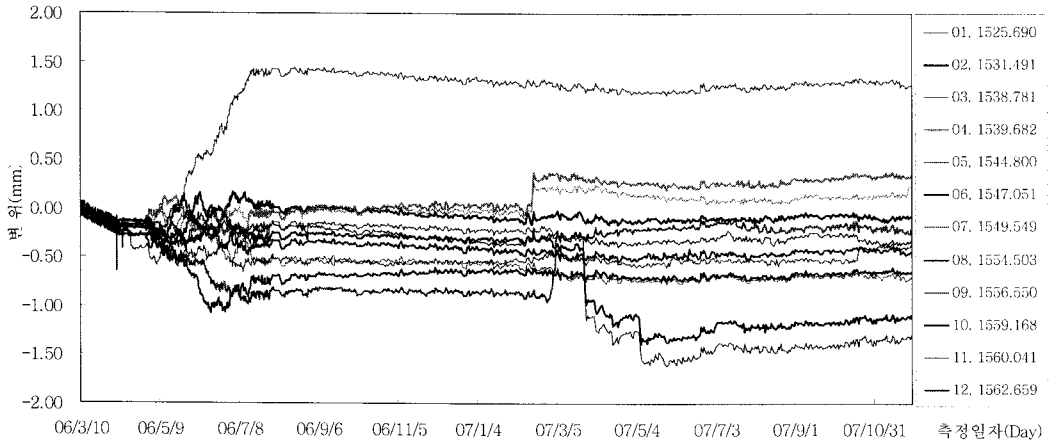


Fig. 11 378km310단면 상반 내공변위 계측데이터.

원효터널 STA. 378K+340 상반, 내공변위

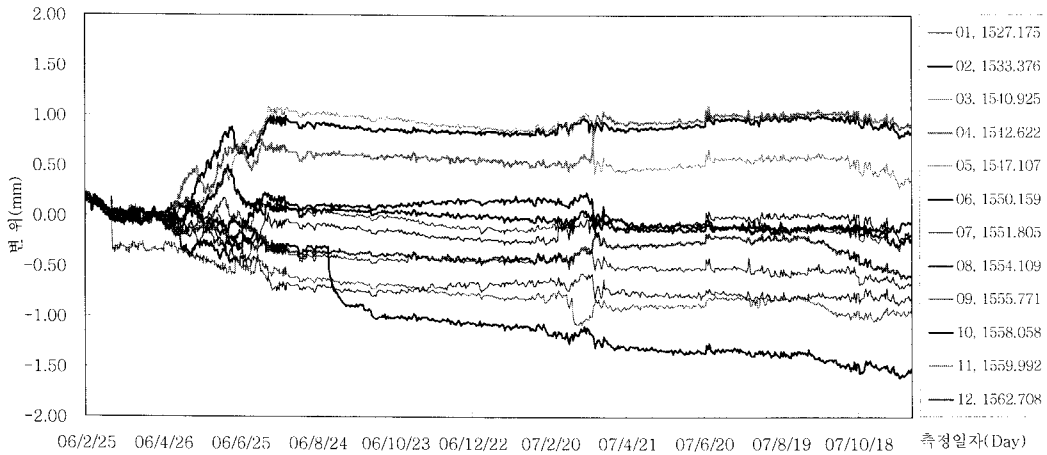


Fig. 12 378km340단면 상반 내공변위 계측데이터.

① 378km310단면

378km310단면 상반에는 센서설치 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 터널내공의 단면 변화가 비교적 크게 발생하였으나, 그 후로 약 6개월간 단면 변화는 거의 나타나지 않았다. 2007년 02월 14일 이후로 내

공변위의 현저한 변화가 나타남을 알 수 있다. 이는 2007년 02월 14일에 378km310단면 하반부 굴착이 시작됨에 따라 터널 상반의 내공단면 변화가 발생된 것으로 추측이 가능하다. <Fig. 11>에 나타난 것과 같이 현저한 계측데이터의 변화가 발생된 시점이 각 계측 위치(포인트)마다 차이를 보이는 것은 작업차량의 통행을 위한 도로 확보를 위해 터널 중앙으로부터 반절씩 나누어 공사를 진행한 결과라고 설명이 가능하겠다. 단면의 하부 굴착 후 터널의 안정화

되면서 현저한 변위차를 보이지 않았다.

② 378km340단면

378km340단면 상반 내공변위센서도 310단면과 같이 센서 설치 위치(포인트)에 2개의 센서가 설치되어 있다. <Fig. 12>에서 보이는 바와 같이, 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 340단면의 하반 굴착이 시작되어 378km340단면에서의 터널 내공의 변화가 크게 나타나고 있으나 310단면에 비하여 크지 않음을 알 수 있다. 천단에 설치된 06번 센서가 설치 초기에 큰 변위량을 보이고 있으나, 현장에서의 관리기준치에 크게 미치지 못하고 있는 것으로 나타났다.

4. 결론

경부고속철도 노반신설공사 13-4공구 원효터널 종점부 378km070~400단면에 설치된 광섬유 센서의 2006년 04월 26일부터 2007년 11월 19일까지의 계측데이터를 분석하였다. 터널공사가 진행되면서 지속적인 굴착에 의하여 천단부는 인장을 받고, 하부는 압축을 받고 있음을 확인할 수 있었으며, 일정기간이 지나면 안정화되는 터널의 거동을 확인할 수 있었다.

이 현장은 시공 중 계측이라는 매우 열악한 작업현장에서 계측 작업이 수행된 관계로 많은 센서가 망실이 되어, 잦은 보수와 재설치가 실시되었다. 그러나, 시공이 완료된 터널이나 지하철 현장에 설치한 센서의 계측데이터를 비교하면 시공 중 계측 데이터의 신뢰성이 우수한 것으로 판단된다.

따라서 본 논문에서 사용한 광섬유 센서의 거동은 우수한 내구성을 바탕으로 정밀한 계측이 가능한 좋은 사례인 것으로 보여진다. 그리고 시공 중 계측 시에는 센서 망실의 발생을 최소화하기 위한 센서 보호 방안의 강구가 필요한 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 과제인 “사회기반시설물 안전네트워크 연구단”의 지원과 “도시철도 표준화사업단”의 지원, 그리고 2009학년도 “홍익대학교 학술연구진흥비”의 지원으로 이루어진 것입니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Kim, K. S., Y. Ismail and G. S. Springer, “Measurement of Strain and Temperature with Embedded Intrinsic Fabry-Perot Optical Fiber Sensors,” *J. of Composite Materials*, Vol. 27, 1993, pp. 1663-1667.
- 2) 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, 1993, pp. 1618-1662.
- 3) Kim, K. S., J. Ryu, S. J. Lee and L. Choi, “In-situ Monitoring of Sungsan Bridge in Han River with Optical Fiber Sensor System,” *Proceedings of SPIE*, Vol. 3043, 1997, pp. 72-76.
- 4) Lee, S. E., D. Han, H. Lee and K. S. Kim, “Signal Processing System of Mult-Fiber Bragg Grating Strain Sensors using Wavelength Scanning-Locking of a Fabry-Perot Tunable Filter,” 한국통신학회논문지, Vol. 24, 1999, pp. 1472-1479.
- 5) 박홍신, 김기수 외 “고층건축물 구조안정성 및 사용성 장기계측시스템을 이용한 상시 안전진단기술 개발,” 2002년 건설교통개발과제 보고서, 시설안전기술공단.
- 6) 김기수, “광섬유센서를 이용한 Beam-Column 조인트의 하중에 따른 변위 계측” 소음진동공학회 논문집 제15권 1호, 2004. 9, pp. 3.
- 7) 김기수, 조성규 “광섬유센서패키지 개발과 이를 이용한 교량구조 계측”, 한국복합재료학회지 제21권 2호, 2008. 4, pp. 36.