

터널 안전관리를 위한 정밀 계측시스템 적용 연구

김 영 근¹⁾, 최 양 진²⁾, 안 명 윤³⁾

¹⁾ : (주)대우건설기술연구소 토목연구팀, 책임연구원(공학박사, 기술사)

²⁾ : (주)아주지오엔지니어링 조사진단부, 과장

³⁾ : (주)아주지오엔지니어링, 대표이사

개요 : 본 연구에서는 터널구조물의 안전상태를 평가하기 위하여 터널라이닝에 광변위센서 계측시스템을 적용하였다. 먼저 터널 라이닝 모델실험을 실시하여 광변위 계측시스템의 신뢰성을 검증하였고, 터널 현장적용을 통하여 계측시스템의 적용성을 검토하였다. 본 계측시스템은 터널구조물의 상시적인 안전관리측면에서 효과적이라 할 수 있으며, 계측결과와 평가와 정밀안전진단에의 활용에 대한 연구가 필요하다.

1. 서 론

최근 터널, 교량과 같은 대형구조물에 대한 체계적인 안전유지관리가 중요한 문제로 부각되고 있다. 특히 터널의 경우 지반중에 건설되는 복합구조물로서 건전도, 상태평가와 같은 정밀안전진단에 상당한 어려움을 겪고 있으며, 구조물의 변상여부를 판단할 수 있는 효율적인 안전관리시스템이 요구되고 있다.

또한 구조물이 대형화 되고, 복잡성이 증가함에 따라 구조물에 대해 안정성을 정확히 파악하는 기술도 발전하고 있다. 광변위센서 계측기술은 구조물의 계측관리를 보다 효율적으로 판단할 수 있는 기술의 하나이다. 이 기술은 선상으로 분포한 센서가 측정부위를 폭 넓게 측정 가능하게 됨으로 구조물의 변형거동을 정확히 파악할 수 있고, 장기적 변형에 대해 상시적으로 감시할 수 있다.

본 연구에서는 터널구조물의 유지관리측면에서 일차적인 관찰대상인 터널 라이닝의 변형상태를 평가하기 위하여 광변위센서 계측시스템을 적용하고자 하였다. 먼저 터널라이닝의 1/10인 축소모델시험체에 대하여 실험장치를 이용 모형실험을 실시하여 광변위 계측시스템의 신뢰성을 검증하고자 하였으며, 터널 현장적용을 통하여 시스템의 현장적용성을 검토하고자 하였다.

2. 광변위센서 계측시스템

광섬유는 광섬유 통신시스템의 근간을 이루며 지속적인 발전이 이루어지고 있다. 광변위센서 또한 광섬유의 응용분야로써 온도와 압력에 따른 구조물의 변형을 측정하기 위해 개발되고 상용화되고 있다.

2.1 광섬유의 구조

광섬유의 구조는 그림 1에서 보는 바와 같다. 광섬유는 외경이 10~200 (μm)정도로써 아주 가늘다. 광섬유는 굴절률이 다른 재질을 이층으로 사용하여 굴절률이 큰 내부의 Core와 작은 외부 Clad로 구성되어 있다.

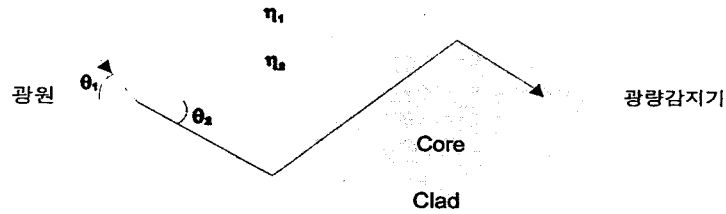


그림 1. 광섬유의 구조

또한 유전체 평판에서와 같이 완벽한 반사조건은 반사각이 임계각 θ 와 같거나 커야한다. 비굴절률 차 Δ 은 중요한 광섬유 파라미터로 다음식과 같다.

$$\Delta = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1} \quad (1)$$

이 파라미터는 임계각이 존재하기 위해 η_1 이 η_2 보다 커야한다. (그림 2)



그림 2. 광섬유 굴절을

2.2 측정 원리 - 광량감쇠법 (LAM, Light Attenuation Method)

광섬유에 빛을 입사시킨 후 종단에서 방출되는 빛의 세기를 측정하면 입사시켰을 때의 빛의 세기보다 약해진다. 감쇠량은 길이에 따라 손실의 크기가 달라지는데 특히 광센서는 외력에 의해 센서가 신장되면서 광섬유의 단면적이 감소하게 되고 이로 인한 빛의 통과량이 감소된다. 이러한 빛의 감소량을 비교하여 신장량을 측정하는 방법이다.

Core와 Clad의 변형부분에 전송되는 빛이 다른 전파모드로 변환하는가 하면 방사모드로 되어 손실을 가져온다. 이러한 원인은 외력이나 불균일한 축압에 의해 Micro Bending 손실을 가져오게 된다.(그림 3)

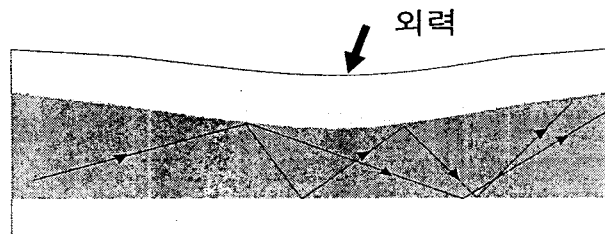


그림 3. 구조의 불안전

θ 가 임계각을 초과하면 Core와 Clad의 경계면에서 굴절하여 Clad로 투과되어 방사모드가 되는데 방

사모드가 생기면 Core내의 에너지가 소실되어 방사손실을 가져온다.(그림 4) 표 1에는 광섬유의 손실종류와 그 원인이 정리되어 있다.

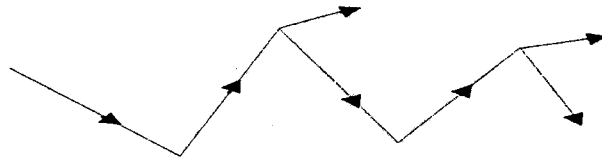


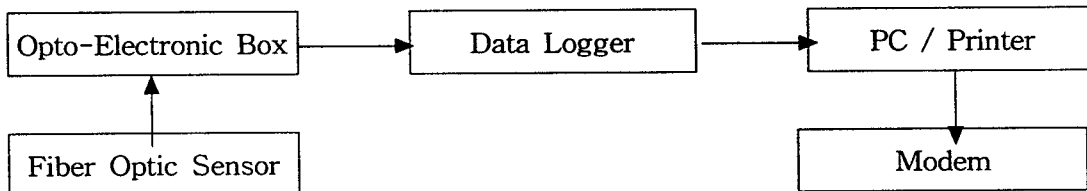
그림 4. 외력에 의한 만곡

표 1. 광섬유의 손실

종 류	원 인
광센서의 고유한 손실	흡수손실, 산란손실, 구조의 불안전에 의한 구조
외력으로부터 받은 힘에 의한 손상	광섬유의 찌그러짐, 굴곡에 의해 손실
인위적 원인에 의한 손실	접속에 의한 손실

2.3 계측시스템

① 광변위센서를 이용한 데이터 저장과정



② Opto-Electronic Box

- ◇ 전기적신호를 광신호로 전환
- ◇ 센서로부터 나온 광신호를 전기적신호로 전환
- ◇ 한 개의 모듈은 4개의 채널을 포함 (온도센서 포함)

③ Data Logger System

- ◇ 각각의 설계 소프트웨어가 내장
- ◇ 계측을 수행하고 결과를 저장
- ◇ 조절수치와 계측수치를 비교
- ◇ 필요시 경보음 발생

④ 선택사양

- ◇ 모뎀이나 네트워크를 이용하여 원거리에 위치한 사무실에 전송

⑤ 광변위센서의 장점

- ◇ 측정대상체의 거동을 전체적 및 구간 분할하여 측정할 수 있다.
- ◇ 순간적인 변형의 감지도가 높다.
- ◇ 외부잡음 (무선, 고압전류시설, 낙뢰 등)에 영향이 없다.
- ◇ 재질이 석영이므로 부식이 되지 않아 장기계측에 적합하다.
- ◇ 전압형성(전기 신호)이 없다.
- ◇ 센서설치후 더 이상 접근 불가능한 위치의 측정이 가능하다.
- ◇ 센서의 국부적인 변화는 광시간영역반사법 (OTDR Optical Time Domain Reflection Method)을 이용하여 측정가능하다.

3. 터널 라이닝 모델실험

프랑스 DEHA사로부터 도입된 광변위 센서시스템을 터널 라이닝 정밀계측에 이용하였다. 본 모형시험을 통하여 기존의 계측센서와 비교·검증하고 그 효율성을 파악함은 물론 도입 초기인 광변위센서 계측시스템의 기술개발을 향상 시키는데 그 목적이 있다.

3.1 광변위센서 설치

광변위 센서의 케이블은 광섬유심신을 3가닥으로 묶어서 하나의 단위로 구성되어 있는데 외부 여러 환경에 따라 광의 전송특성 및 신뢰성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 교량,터널과 같은 구조물에 센서를 설치할 때 주위의 환경영향으로부터 센서를 보호하는 것이 중요하다. 본 실험에서는 그림 5에서 보는 바와 같이 광변위센서를 설치하였다.

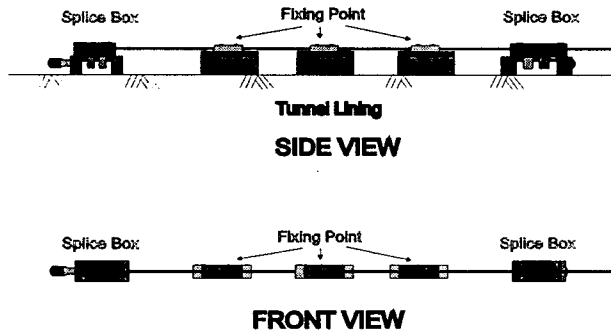


그림 5. 광변위 센서 설치 상세도

사진 1은 광변위센서와 측정된 데이터를 수집처리하는 데이터로거와 광량감지기를 보여주고 있다
사진 2는 본 실험에 사용된 광변위센서 계측시스템을 보여주고 있다.

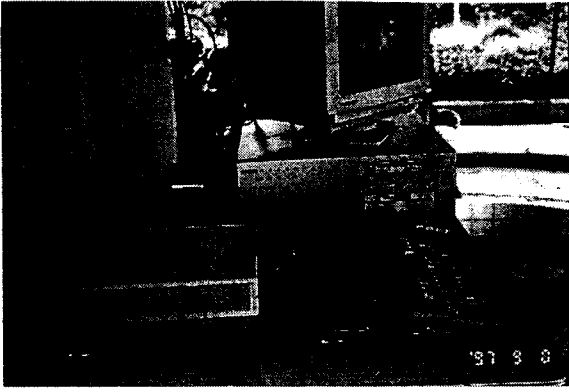


사진 1. 광변위센서와 데이터로거

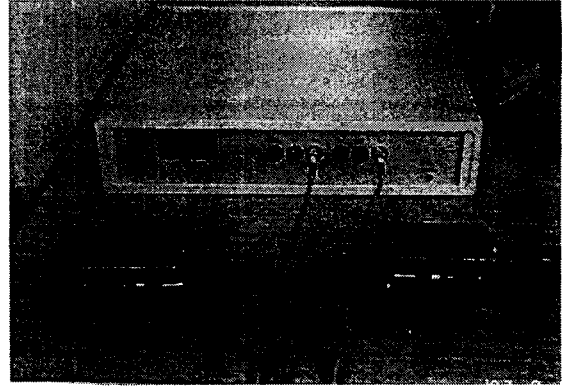


사진 2. 광변위센서 계측시스템

3.2 모델시험

터널 라이닝모형은 경부고속철도 표준지보패턴 TYPE V의 축소형으로 축적계수 1/10로 제작되었다. 내경 71cm, 외경 77cm, 두께 9cm로 완성된 라이닝을 사진 3에서 보는 바와 같은 터널 라이닝 시험장치를 이용하여 천단부에서 등분포 하중을 가하였다. 하중조건으로는 3개의 유압실린더를 0.05ton씩 증가하도록 하였으며 계측자료의 비교·검증을 위해 다이얼게이지와 스트레인 게이지를 설치하였다(그림 6). 본 실험에서는 하중증가에 따른 변위량을 측정하였으며, 하중감소시 또는 반복하중시의 변화양상을 측정하므로써 하중형태에 따른 변화양상을 측정하였다.

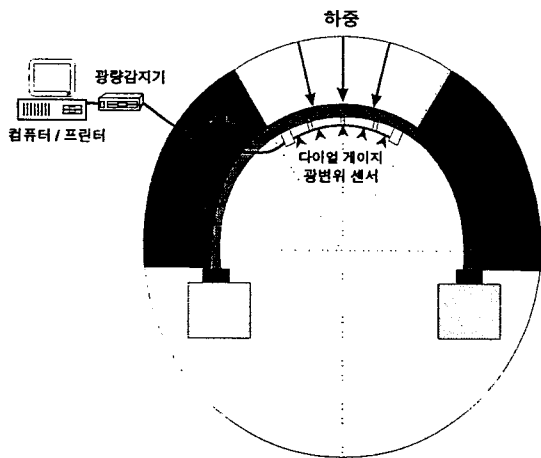


사진 3. 터널 라이닝 시험장치

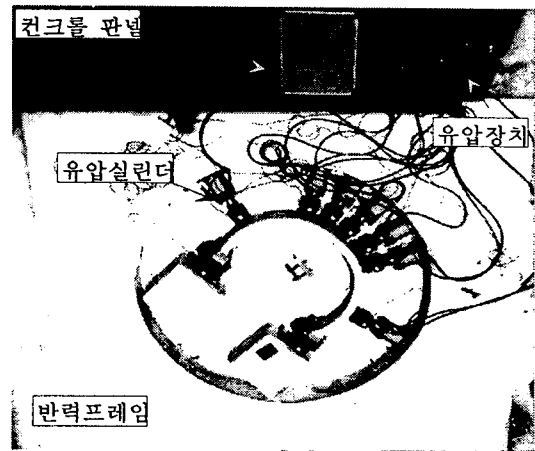


그림 6. 광변위센서 계측단면

사진 4는 터널 라이닝 모델시험체에 광변위센서가 설치된 모습이고, 사진 5는 다이얼 게이지와 하중이 증가함에 따라 변화되는 광량감지기를 보여주고 있다.

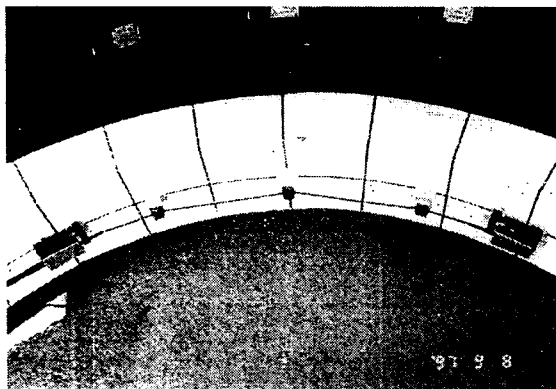


사진 4. 광변위센서 설치모습

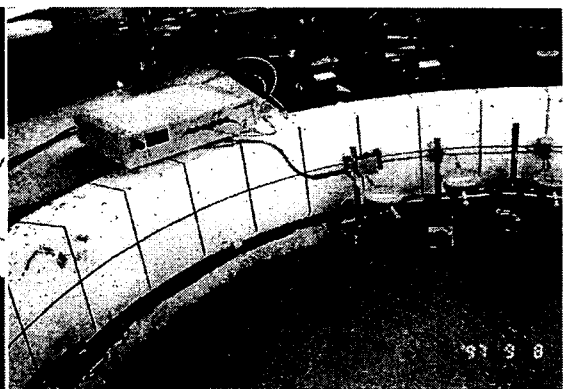
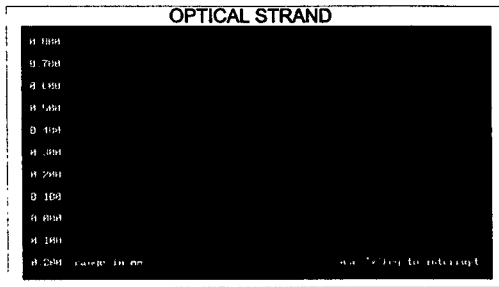


사진 5. 터널 라이닝 모델시험 장면

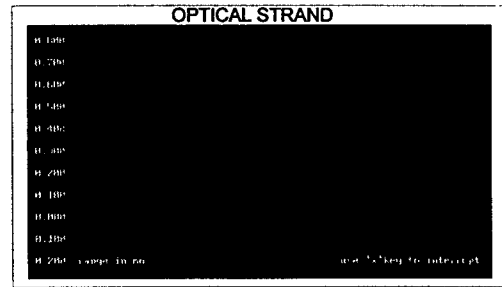
3.3 측정결과 및 분석

터널 라이닝 모델시험에서 광변위센서를 이용하여 라이닝의 변형거동을 측정한 결과가 그림 7에 나타나 있다. 그림에서 가로축은 시간, 세로축은 변위량을 보여주고 있다. 그림에서 보는바와 같이 광변위 센서는 시간에 따른 변위의 변화양상을 잘 나타내고 있으며, 라이닝 천단

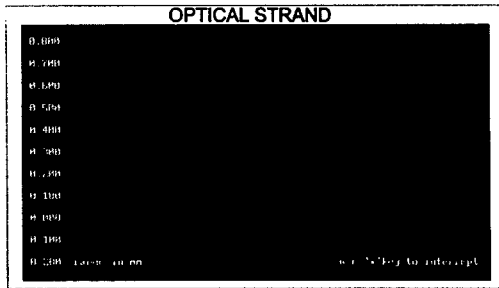
부에 작용하는 하중이 증가함에 따라 변위량이 증가함을 알 수 있다. 또한 일정한 하중이 유지됨에 따라 변위는 일정한 값을 보이지만, 급격한 하중증가나 하중감소와 같은 경우와 반복하중의 경우 시간에 따른 변위의 변화양상이 잘 나타남을 알 수 있다. 따라서 광변위센서는 터널 라이닝의 변형거동을 측정할 수 있을 것으로 판단된다.



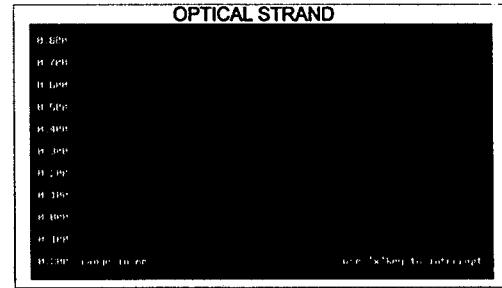
(a) 0.10 ton



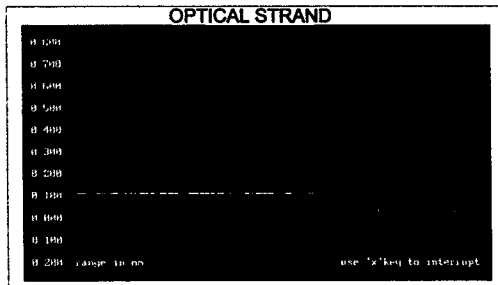
(b) 0.40 ton



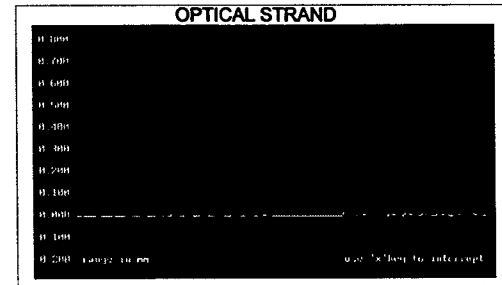
(d) 1.00 ton



(c) 0.80 ton



(e) 하중감소



(f) 반복하중

그림 7. 하중형태에 따른 광변위 측정결과

하중증가에 따른 광변위센서의 변위를 표 2에 정리하였으며, 이를 그림 8에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 하중이 증가함에 따라 광변위센서의 변위량이 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

표 2. 하중변화에 따른 광변위센서 측정변위

하중 (TON)	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
변위 (MM)	0	0.006	0.012	0.018	0.025	0.031	0.037	0.043	0.050	0.056	0.062

하중 (TON)	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1.0
변위 (MM)	0.065	0.068	0.073	0.750	0.081	0.087	0.093	0.097	0.105	0.112

하중변화에 따른 광변위센서의 변위변화량

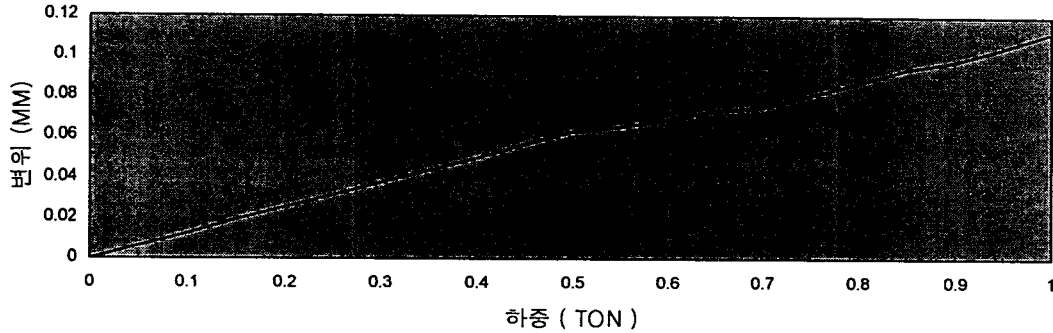


그림 8. 하중변화에 따른 광변위센서 변위

또한 광변위센서에 의해 측정된 변위를 검증하기 위하여 다이알게이지에 의한 터널라이닝의 변위와 터널 라이닝 내외측 벽면에서 발생하는 변형율을 스트레인 게이지를 이용하여 측정하였다.

이상의 측정결과로부터 광변위센서를 이용한 정밀계측시스템은 터널라이닝에 대한 변형상태 및 시간 및 하중변화에 따른 변형거동을 비교적 정확히 계측할 수 있으며, 상시적인 감시시스템을 적용함으로써 터널 구조물의 안전관리에 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 보다 다양한 시험을 통하여 계측된 변위값 및 터널 각부위에서의 변형거동과의 관계를 정량적으로 규명함으로써 측정된 변위량으로부터 터널 구조물의 안정상태를 평가할 수 있도록 해야할 것으로 판단된다.

4. 터널 현장적용

본 연구에서는 광변위센서 계측기술의 터널에서의 적용성을 검증하기 위하여 터널현장적용을 실시하였다. 또한 광변위센서로부터 측정된 변위로부터 터널의 안정성을 확인하고자 하였으며, 본 계측기술의 운용상의 문제점을 개선하여 터널의 안전 및 유지관리에 효율적으로 사용하고자 하였다.

4.1 대상터널

- 터널명 : 지하철 5호선 5-18공구 건설공사 (한강하저터널, 그림 9)
- 위 치 : 영등포구 여의도동 - 마포구 도화동
- 총연장 : 1580m (터널 1370m, 개착 45m, 한강하저 터널 1280m, 단선병렬터널)
- 기본 설계 : NATM 터널

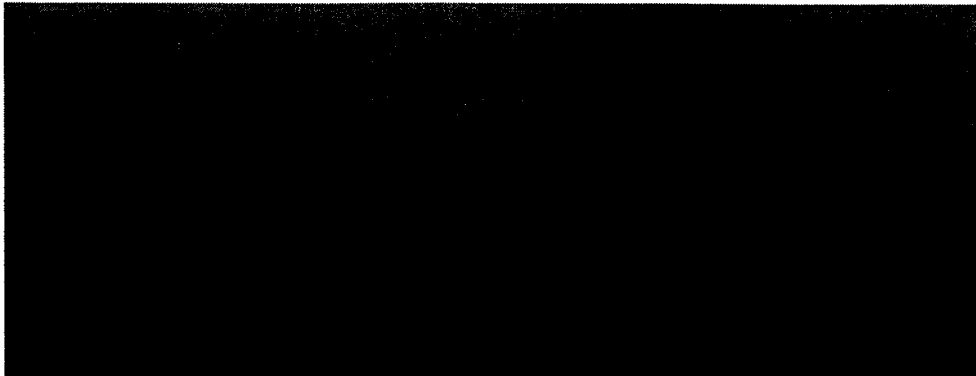


그림 9. 현장적용 대상터널(한강하저터널)

4.2 광변위센서 설치

본 터널에서는 터널 굴착시 지반의 조건이 열악하여 지반보강을 실시하여 터널의 안정성을 확보하여 지속적인 관찰이 요구되는 7개의 구간을 선정하여 표 3에서 나타낸 바와 같이 광변위센서를 설치하였다.

광변위센서를 설치하기 위해서는 터널에서 주로 관찰하고자하는 부분을 선정하여 한다. 그 다음 일정한 길이로 광변위센서를 잘라 원하는 부분(천단부, 측벽부 등)에 설치하여야 한다. 본 현장에서는 터널에서의 전체적인 변형거동을 확인하기 위하여 라이닝 전부분에 걸쳐 광변위센서를 설치하였다.

표 3. 광변위센서 설치 위치

구간	설치위치
상행선 21K 380	외벽부, 천단부, 내벽부, 인버트
하행선 20K 550	외벽부, 천단부, 내벽부, 인버트
상행선 21K 462	외벽부, 천단부, 내벽부, 인버트
21K 462	외벽부, 천단부, 내벽부, 인버트
21K 415	외벽부, 천단부, 내벽부, 인버트
21K 147	외벽부, 천단부, 내벽부, 인버트
21K 367	외벽부, 천단부, 내벽부, 인버트

사진 6은 터널 측벽부와 아치부에서 라이닝벽면에 광변위센서를 부착하는 모습을 보여주고 있다. 터널 라이닝 곡률을 유지하기 위하여 많은 수의 고정점이 필요하며, 라이닝의 미소한 변형을 감지하기 위해서는 광변위센서가 완전하게 고정되도록 주의해야만 한다. 사진 7은 광변위센서가 설치된 터널의 모습으로 설치가 완료되면 광변위 감지기 및 데이터로거를 설치해 초기치를 설정하고 터널 라이닝의 변형상태를 측정하도록 한다.



(a) 터널라이닝 측벽부



(b) 터널라이닝 아치부

사진 6. 터널 라이닝에서의 광변위센서 설치

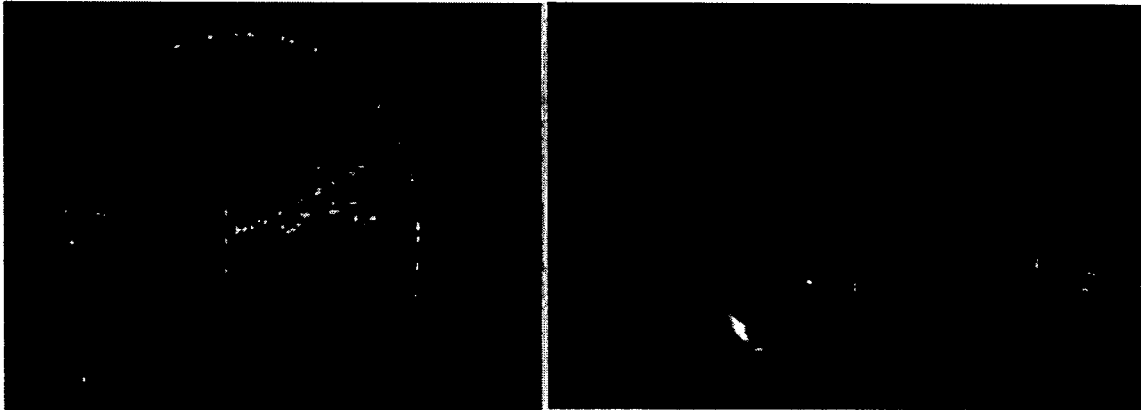


사진 7. 광변위 센서가 설치된 터널 전경

4.3 측정결과 및 분석

그림 10은 한강하저터널에서 광변위센서를 이용하여 측정된 결과를 보여주고 있다. 그림에서는 일별 측정변위를 나타낸 것으로 시간에 따른 변위량은 거의 나타나고 있지 않다. 이는 터널의 변형이 없는 매우 안정한 상태를 보여주고 있다.

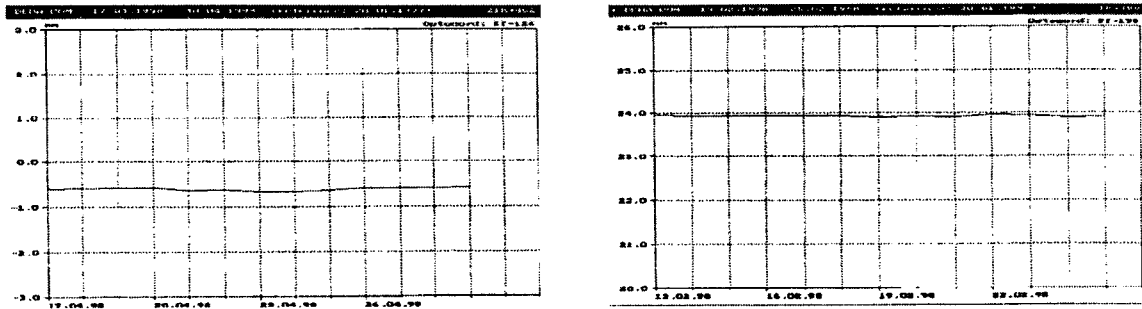


그림 10. 터널라이닝에서의 광변위센서 계측결과

지하구조물인 터널은 굴착후 적절한 지보에 의해 안정한 평형상태를 유지하고 있으나, 오랜 기간 계속되어 나타나는 지반의 변형에 의한 이완하중, 지진에 의한 지진하중, 열차 및 차량운행에 의한 진동하중에 의해 터널라이닝에 변형을 일으키게 된다.

이러한 터널의 변형이 계속적으로 누적된다면 터널의 안정성에 심각한 문제를 일으킬 수 있다. 그러나 기존의 터널 유지관리방법은 주로 사람에 의한 육안검사에 의존하여 지반의 하중 변화에 대한 급격한 터널의 변형을 효과적으로 파악할 수가 없었다. 따라서 터널구조물의 안전 관리를 위해서는 터널 라이닝의 변형상태를 정확히 감지하고 이에 대한 적절한 대책을 수립해야만 한다.

본 계측기술은 터널주변의 변동에 의한 하중변화, 지진과 같은 급격한 하중, 계속적으로 누적되는 차량의 진동하중에 의한 터널의 변형상태를 계측하므로써 터널의 안정성을 판단할 수 있고, On-line 상태로 터널의 변형 및 안전상태를 감시할 수 있으며, 시간별, 일별, 계절별에 따른 터널의 변형상태를 비교하며 터널의 안전관리에 활용할 수 있다.

5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 터널구조물의 안전성을 평가하기 위하여 광변위센서를 이용 터널 라이닝 모델실험을 실시하였고, 광변위 계측시스템을 터널현장에 적용하였다. 그 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 터널 라이닝 모형실험결과, 광변위센서를 이용한 계측시스템은 터널라이닝에 대한 변형상태 및 시간 및 하중변화에 따른 변형거동을 비교적 정확히 계측할 수 있었다.
- 2) 터널 현장적용결과, 터널 라이닝의 변형상태를 상시적으로 감시할 수 있었으며, 무선 송수신 시스템을 이용하므로써 터널의 효율적인 유지관리에 활용할 수 있다.
- 3) 광변위센서로부터의 계측결과로부터 터널 변형거동과의 관계를 정량적으로 규명하므로써 터널 구조물의 안정상태를 평가할 수 있도록 해야할 것으로 판단된다.
- 4) 터널구조물에서의 적용성을 확보하기 위해서는 광변위센서의 라이닝 부착위치, 계측방법, 계측자료의 저장 및 송신, 계측결과의 평가등에 관한 연구가 이루어져야 한다.

참고문헌

1. トソネル補強・補修マニュアル, (財)鐵道總合技術研究所, 1990
2. 變狀トソネル對策工設計マニュアル,(財)鐵道總合技術研究所, 1998
3. 道路トソネル維持管理便覽, (社)日本道路協會, 1993
4. 猪態明, 道路トソネルの緊急點檢とす今後の維持管理, トソネルと地下, 1990
5. Piede, Liu, *Model test study on double lining of tunnels*, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.1 No.1, pp. 53-58, 1986
6. 터널 안전관리를 위한 정밀 안전진진단시스템 개발, 과학기술부, 1998