

분포형 광섬유센서를 이용한 터널 내공변위 측정에 관한 연구

심현진, 한일영 (SK건설(주))

김경태 ((주)지엠지)

장기태 (금오공과대학교)

1. 서론

최근 국내에서 추진되고 있는 고속철도 및 도시고속도로 건설 등의 대규모 프로젝트로 인해 다수의 중장대터널의 건설이 이루어지고 있는데, 터널 구조물의 붕괴나 사고시에 산업 피해 및 인명 피해를 포함한 대형참사를 일으킬 수 있기 때문에 터널 시공중 안정성을 효과적으로 판단하고, 터널 운용 중에 적절한 유지보수를 취하기 위한 터널 계측기술의 필요성이 날로 증가되고 있다.

이러한 터널 계측에서의 계측항목 중 내공변위는 터널굴착으로 인한 응력해방 및 지반/암반의 시간 의존적 거동, 외력조건의 변화 등에 의해 발생하기 때문에 반드시 측정되어야 하는 값으로서(김호영 외, 1993), 터널 내공변위 계측을 위한 기존 방법으로는 테잎 익스텐소미터(Tape extensometer)를 이용하는 계측방법과 광파기(Total station)를 이용한 계측방법이 있다. 그러나 테잎 익스텐소미터와 광파기를 이용한 계측방법은 수동으로 이루어지기 때문에 계측자료 수집을 위해 상당한 시간과 인력을 필요로 하게 되고, 3~5개 지점의 국한된 내공변위 측정으로 인해 내공변위 측정의 정도가 떨어진다. 또한 시공중 발파 비석으로 인한 내공변위 핀의 망실을 피하기 위해 막장에서 약 5~10m 후방의 벽면에 핀을 설치하게 되어 굴착 후의 초기변위 측정이 불가능하다. 계측기 설치 시점에 따라 측정되는 내공변위 값은 큰 차이를 보이며, 이는 터널 안정성 판단에 큰 영향을 미친다(Volkman 외, 2004).

이의 문제점 보완을 위해 고안된 것이 분포형 광섬유센서를 활용한 터널 내공변위 상시 계측기술이다. 기존의 포인트 개념의 내공변위 관리와 달리 분포형 광케이블 전구간에서의 내공변위 변화를 감지함으로써 밀도 높은 데이터 획득을 통해 내공변위 형상의 변화이력을 지속적으로 관리할 수 있으며, 센서가 터널 굴착후 설치되는 강지보에 부착되기 때문에 계측 센서 설치시간이 단축되고, 강지보 설치 이후 타설되는 슛크리트에 매설되므로 발파로 인한 망실우려가 없어 막장에 근접 설치 및 신속한 계측이 가능하므로 굴착후 발생하는 초기변위의 측정이 가능하게 된다. 또한 자동화계측을 통해 수동계측시 소요되는 각 계측 단면별 측정시간 및 인력을 절감할 수 있으며, 많은 계측단면을 동시에 관리할 수 있을 뿐만 아니라, 시공중 설치된 계측 단면을 터널 완공 후 유지관리시까지 별도의 계측설비 추가 없이 계측 관리할 수 있는 장점이 있다.

이에 본 연구에서는 분포형 광섬유센서의 변형률 센서로서의 적정성을 검증하기 위해 1, 2차 피복된 광섬유센서의 인장시험, 변위추적시험 및 실내 모형터널 변위측정시험 등을 수행하였으며, 시공중인 터널 현장에 분포형 광섬유센서를 설치하여 분포형 광섬유센서 계측의 시공성 및 효용성을 검증하였다.

2. 이론적 배경

2.1 광섬유의 종류 및 원리

광섬유는 크게 Core, Cladding, Jacket으로 구성되며, 주구성재료는 유리의 주성분인 실리카(SiO_2)로서, 직경이 $250\mu\text{m}$ 로 매우 작고, 유연하다. Core는 광원(빛)의 전송로이며, Cladding은 Core로부터 빠져나오는 광원을 반사시켜 손실을 막게 되고, Jacket은 유리성분인 광섬유를 보호하는 피복제 역할을 하게 된다.

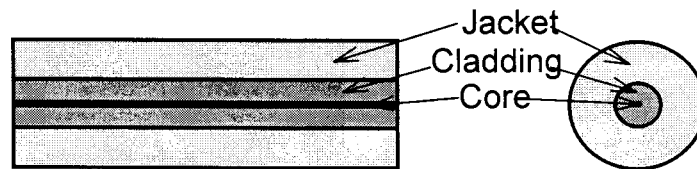


그림 1. 광섬유의 구성

표 1. 광섬유의 구성 및 직경

구분	Material	Diameter(μm)
Core	SiO_2 GeO_2	4/50
Cladding	SiO_2	125
Jacket	Polymer, Acrylate	250

국내에서 토목구조물에 사용되고 있는 광섬유의 종류는 광섬유격자센서와 광섬유산란파센서 두 가지로 나눌 수 있다. 광섬유격자센서(FBG Sensor)의 경우는 포인트 개념의 센서이며, 광섬유산란파센서는 본 연구에 적용되는 센서로서, 광섬유 전구간에 걸쳐 변형을 측정할 수 있어 분포형 광섬유센서로 일컫는다(Chang, 2002, Chang 외, 2003).

광섬유격자센서가 화학적 처리공정을 거쳐 격자가 생성되는 반면, 분포형 광섬유센서는 매질 내에 존재하는 탄성파에 의해 Bragg 조건을 만족하는 방향으로 입사파가 산란됨으로써 자동으로 격자가 형성된다. 매질(광섬유)을 통해 전달되는 파장은 매질된 광케이블 전구간에 걸쳐 특정 부위에서 외적인 요인으로 인한 변화를 감지할 수 있는 것으로 이는 빛의 산란으로 인해 생성되는 Acoustic wave의 Back Scattering(후방산란)에 의해 구해진다. 온도 및 외력에 의한 물리적인 변형은 매질의 산란에 의해 그림 2에서와 같이 Brillouin 파장의 shift를 유발하게 되어 그 변화된 양을 통해 광섬유 전구간에서 변형률로 환산이 된다.

그림 3은 Brillouin 파장의 생성 및 측정 원리를 나타내는 것으로 센터에 있는 Rayleigh로부터 측정하고자 하는 최소 측정 간격별 매질에서 반사되어 오는 빛의 산란 정도에 따라 Brillouin 파장이 생성되며, 이의 shift를 통해 온도 및 변형률의 변화를 감지하는 것이다. 온도 측정용으로만 가능한 스펙트럼 역시 생성이 되는데 이를 나타내는 것이 그림 3에 있는 Raman 스펙트럼이다.

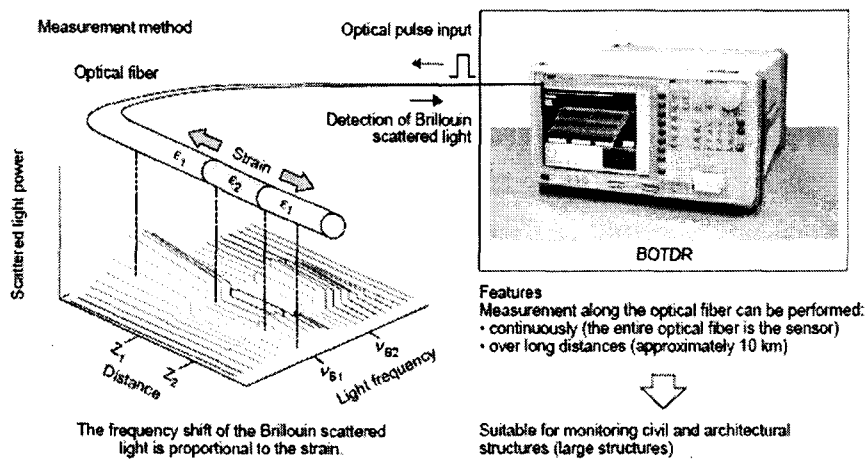


그림 2. 측정 원리

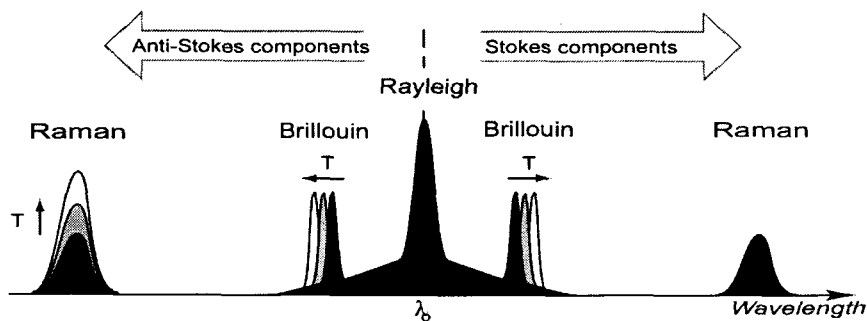


그림 3. Brillouin 스펙트럼

2.2 분포형 광섬유 변형률 데이터의 변위 환산 알고리즘

측정된 변형률로부터 구해지는 Curvature와 이로부터 Curve를 계산하는 방법은 다음과 같다.

○ Tangent vector

어떤 curve의 Tangent vector(혹은 velocity vector)라 함은 곡선에 접하는 vector로서 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{t} = \frac{d\vec{r}(s)}{ds} = \frac{dx}{ds} e_1 + \frac{dy}{ds} e_2 \quad (\text{식 1})$$

여기서 $\vec{r}(s) = x(s)e_1 + y(s)e_2$ 으로 곡선의 어떤 점의 위치를 나타내는 위치벡터이다. 여기에서 s 는 곡선을 따라서 잰 곡선의 길이이다(그림 4 참조, e_1, e_2 는 각각 x 축, y 축을 향하는 단위 vector).

○ Curvature

Curvature라는 것은 이 tangent vector의 각이 곡선을 따라가면서 어떻게 변하는가에 대한 정보를 주는 것이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 s 에서의 tangent vector를 t_1 이라고 하고 $s+ds$ 에서의 tangent vector를 t_2 라고 하면, t_1 과 t_2 의 각의 변화는 $\delta\theta$ 가 된다.

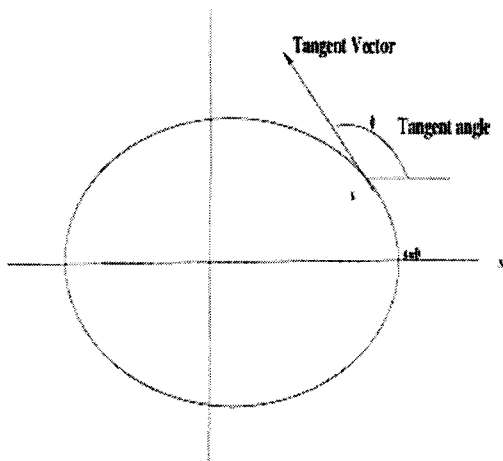


그림 4. Tangent vector의 정의

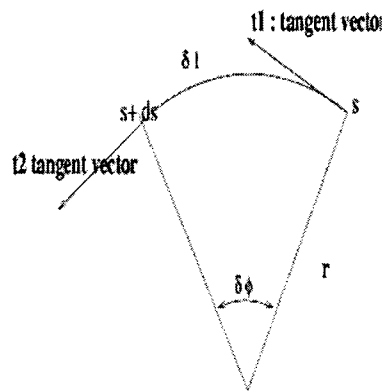


그림 5. Tangent vector의 변화

$\delta\theta$ 가 아주 작다고 하면 곡선은 원의 일부로 간주할 수 있다. 그러므로 호의 각 사이의 관계로부터(r 은 원의 반지름)

$$\delta s = \delta l = r\delta\theta \quad (\text{식 2})$$

를 얻고, $k = 1/r$ 임을 이용하면 다음과 같은 Curvature에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$k(s) = \frac{d\theta}{ds} \quad (\text{식 3})$$

여기서 θ 는 곡선의 tangent vector의 x 축에 대한(반시계방향으로 잰) 각도(tangent angle)이다.

○ 주어진 curvature로부터 curve의 계산

$k(s)$ 를 구했다고 가정했을 때, tangent angle은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\vartheta(s) = \vartheta(0) + \int_0^s k(s') ds' \quad (\text{식 4})$$

물론 위의 식을 구할 때 k가 몇 개의 점에서만 주어져 있으므로 k를 내삽하여 위의 적분을 하는 것이 좋으며, 단지 curvature의 정보로부터는 $\vartheta(0)$ 는 결정이 안된다는 점에 주목해야 한다.

실제 계산에서는 $\vartheta(0) = 0$ 으로 계산하는데, 이 $\vartheta(0)$ 의 임의성 때문에 Curve의 전체 모양만 결정할 수 있게 된다(rotation에 대한 자유도가 남게 된다).

이 tangent angle에서, tangent vector의 크기가 1 이므로 $\vec{t}(s) = (\cos(\vartheta(s)), \sin(\vartheta(s)))$ 라고 쓸 수 있으므로 곡선의 좌표는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_x = \frac{dx}{ds} = \cos(\vartheta(s)) \quad (\text{식 5})$$

$$t_y = \frac{dy}{ds} = \sin(\vartheta(s)) \quad (\text{식 6})$$

를 얻게 되므로, 다음과 같이 x(s), y(s)를 구할 수 있게 된다(여기서 (x_0, y_0) 는 $s=0$ 에서의 곡선의 좌표임).

$$x(s) = x_0 + \int_0^s \cos(\vartheta(s')) ds' \quad (\text{식 7})$$

$$y(s) = y_0 + \int_0^s \sin(\vartheta(s')) ds' \quad (\text{식 8})$$

3. 실내 성능평가실험 결과

3.1 실험 개요

분포형 광섬유센서는 1, 2차 피복 보호 처리된 후(그림 6~8), 터널 굴착시 설치되는 격자 지보에 부착되어 지보재 전단면에서 내공변위 분포를 측정하게 된다.

본 실내 성능평가실험에서는 1, 2차 피복된 분포형 광섬유센서의 인장시험을 통해 변형 실측치와 계산치를 비교·보정함으로써 변형률 센서로서의 정밀도를 측정하였으며, 강제 변위추적시험 및 실내 터널모형시험을 수행하여 변형 유발을 통해 발생하는 변형률을 2차원 변위 환산 알고리즘을 통해 변위로 산정하여 실제 변형 형상과 변위 환산에 의해 계산된 형상을 비교하였다.

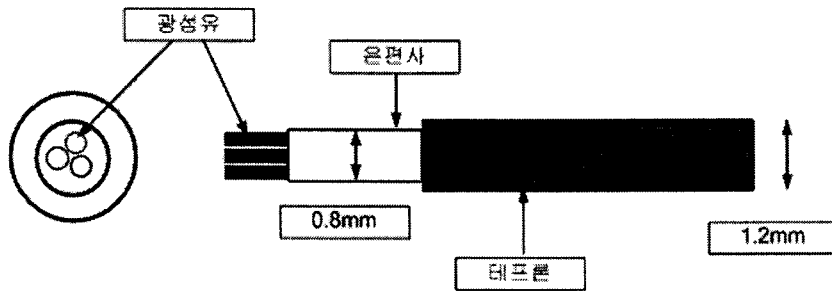


그림 6. 1차 피복 분포형 광섬유센서 ($\phi 1.2\text{mm}$)

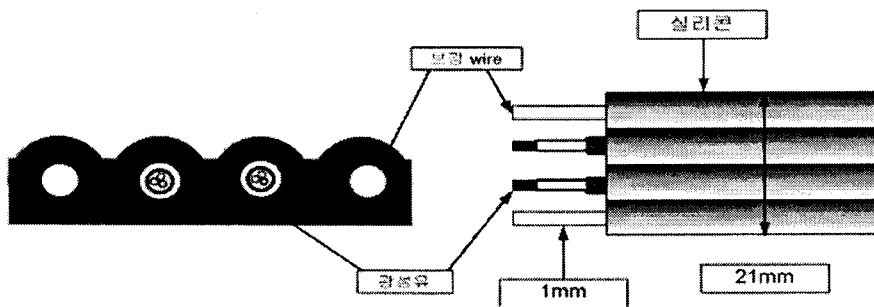
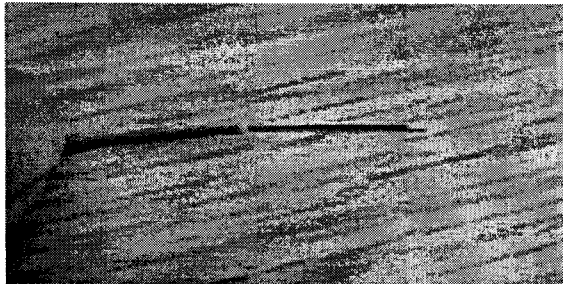
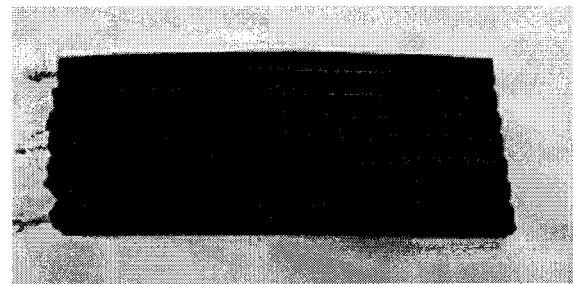


그림 7. 2차 피복 분포형 광섬유센서 ($21\text{mm} \times 5.2\text{mm}$)



(a) 1차 피복 분포형 광섬유센서 케이블



(b) 2차 피복 분포형 광섬유센서 케이블

그림 8. 분포형 광섬유센서 케이블

3.2 실험 절차

각 실내 성능평가실험에 대한 실험 절차는 다음과 같다.

○ 인장시험

- a. 광섬유센서케이블 인장시험기(가로×세로×높이 : $280 \times 1,050 \times 350\text{mm}$, 정밀도 : 0.01mm , 그림 9)에 분포형 광섬유센서 부착

- b. 인장시험기는 1/100mm의 정밀도를 갖는 버니어캘리퍼스를 사용
- c. 일정간격(0.2mm)으로 인장을 가하면서 단계적으로 측정
- d. 광섬유센서케이블을 통한 데이터와 각 단계별 실제 변형률 값을 비교검증
- e. 실제 변형률 값과 광섬유센서케이블의 변형률 값의 비교검증을 통한 보정계수 산정

○ 2m 강재의 변위추적시험

- a. 2m 강재를 평행하게 놓은 상태에서 광섬유센서를 에폭시를 사용하여 부착하여 초기치를 측정
- b. 이를 U 커브 또는 S 커브로 변형시켜 결과치를 비교 분석

○ 모형터널 변위측정시험

- a. 터널 모형실험장치(그림 10, 11)에 1.2mm 분포형 광섬유센서 부착
- b. 터널 모형실험장치의 천단부 및 어깨부에 변형을 유발하면서 변형단계별 데이터 측정
- c. 측정된 데이터의 자료 분석

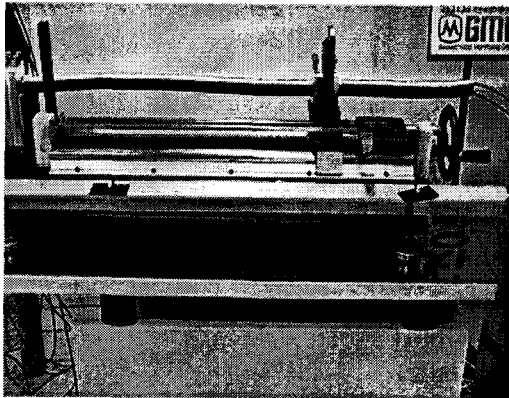


그림 9. 광섬유센서 케이블 인장시험기

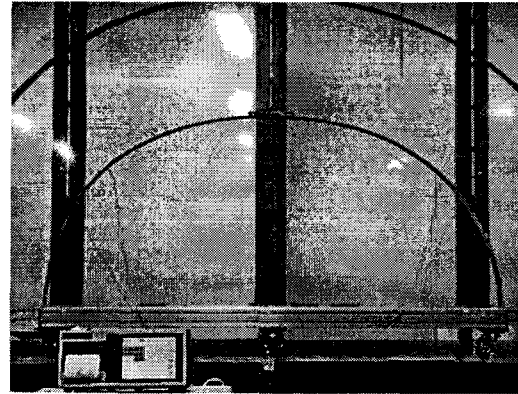


그림 10. 실내 터널모형시험장치

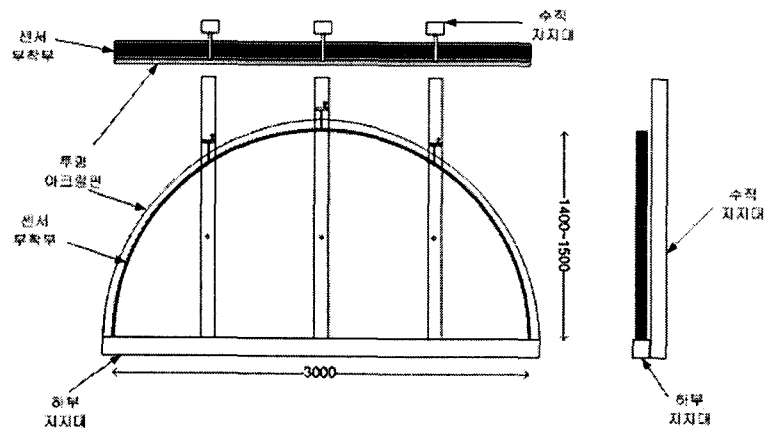


그림 11. 실내 터널모형시험장치 모식도 (폭 : 3,000mm, 높이 : 1,400~1,500mm)

3.3 실험 결과

○ 인장시험

그림 12는 1, 2차 피복 분포형 광섬유센서 케이블의 인장시험 결과를 나타낸 그래프이다. 이 그래프에서와 같이 계산치(인장시험기의 버니어캘리퍼스로 발생변위를 측정된 후 변형률 계산)와 광섬유센서의 변형률 측정치가 모두 선형 분포를 보이며, 일정 상관관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 2차 피복 광섬유센서 케이블의 발생 변위에 따른 변형률 측정치가 1차 피복 상태의 변형률 측정치보다 다소 작게 나오는 경향이 있으나, 그림 13과 같이 보정해보면 계산치와 광섬유센서의 변형률 측정치가 거의 일치하게 나타남을 알 수 있다. 이때 2차 피복 광섬유센서의 변형률 측정치를 X, 보정된 변형률 값을 Y라 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = aX + b \quad (a : 2.50901, b : -84.68769) \quad (식 9)$$

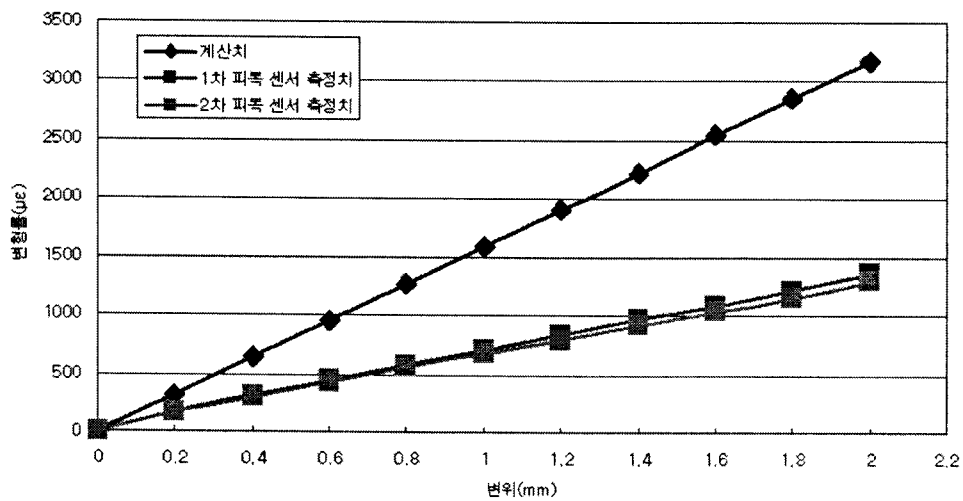


그림 12. 1, 2차 피복 센서 인장시험 결과

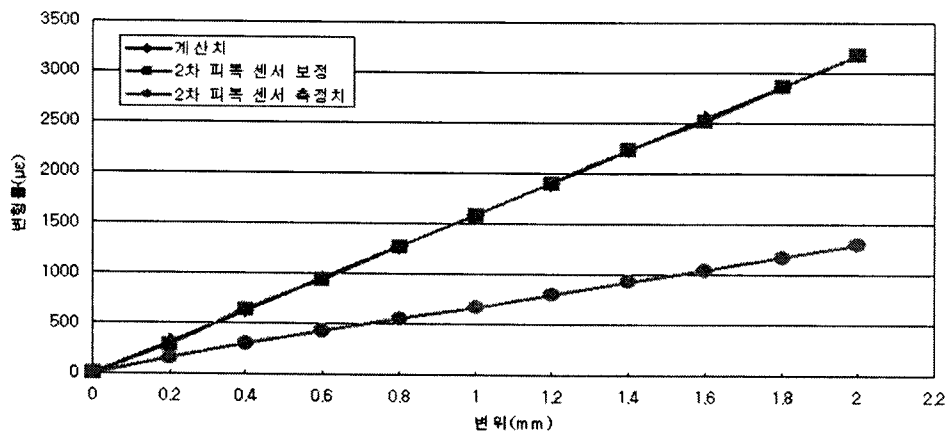


그림 13. 2차 피복 분포형 광섬유센서 인장시험 결과 보정

○ 강재 변위추적시험

2m 강재에 광섬유센서를 부착하여 아래 그림 14와 같이 U형, S형으로 변형을 가하여 광섬유센서로 측정된 변형률 값을 2차원 변위 환산 알고리즘을 통해 변위로 환산한 값을 비교한 결과 U형과 S형 Curve 모두 실측치와 거의 일치하게 나타남을 확인하였으며, U형 Curve의 중앙부에서 최대 0.8mm의 오차가 발생되었다.

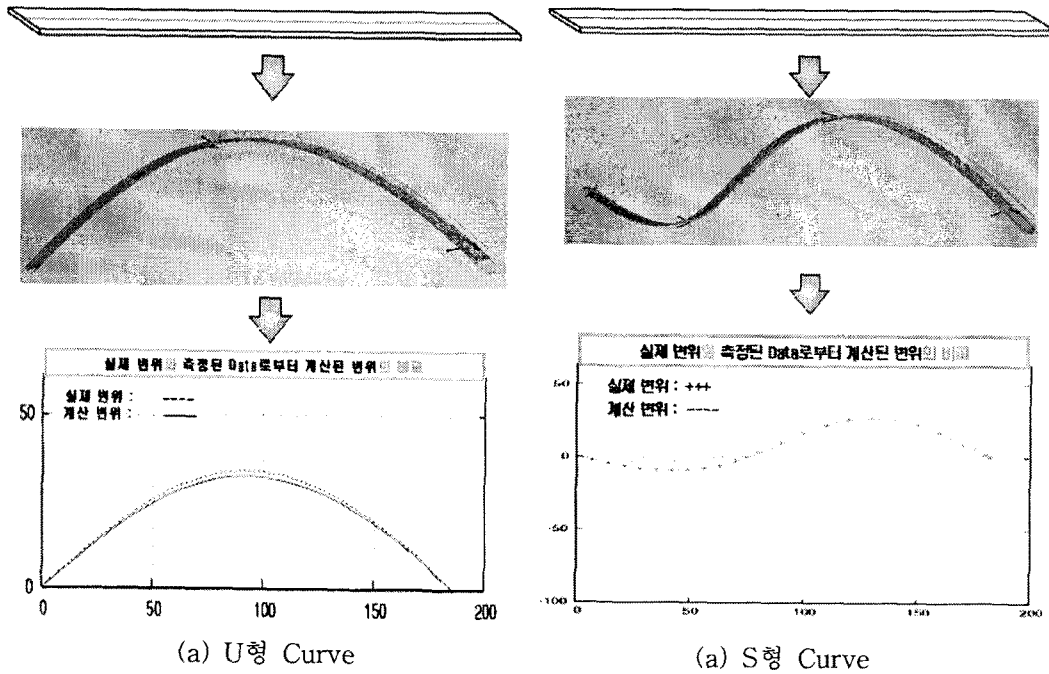
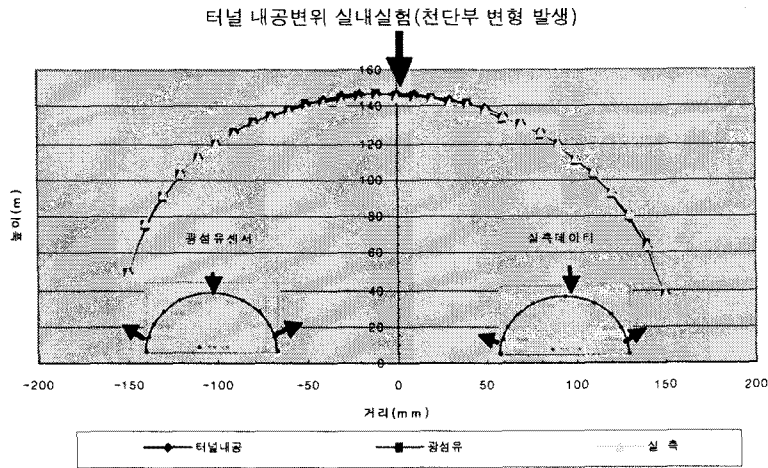


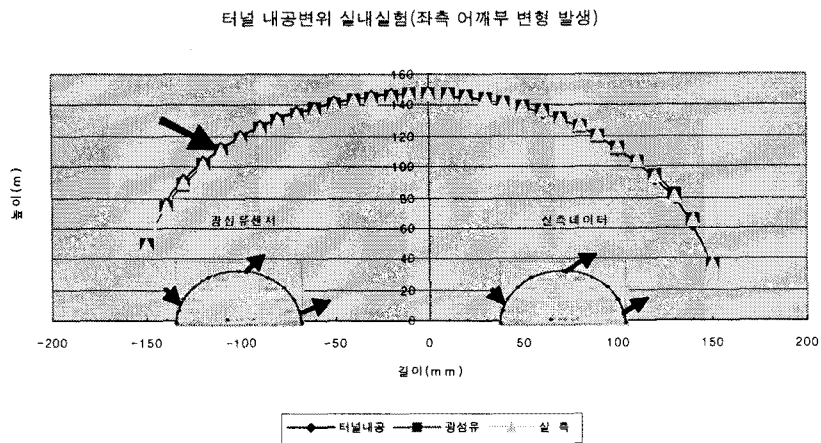
그림 14. 강재 변위추적시험 결과

○ 모형터널 변위측정시험

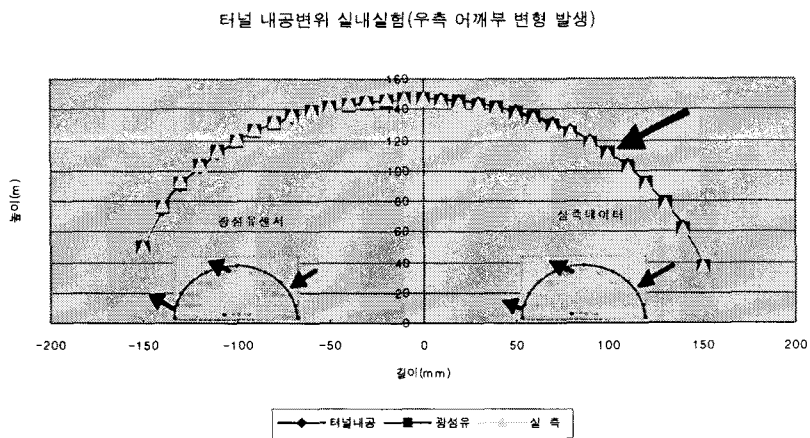
분포형 광섬유센서를 터널 내공변위 모형시험기에 설치후 모형터널의 천단부 및 좌우 측 어깨부에 변형을 유발시킨 후 광섬유센서로 측정된 변형률 값을 2차원 변위 환산 알고리즘을 통해 변위로 환산한 값과 변형 형상과 비교한 결과는 그림 15와 같다. 그림과 같이 변형률로부터 2차원 변위로 환산된 값은 실제 발생한 변형을 잘 나타내주고 있으며, 터널 천단부에 변형을 유발시킨 경우에서 최대 1.2mm의 오차가 발생되었다.



(a) 천단부 변형 유발시



(b) 좌측 어깨부 변형 유발시



(c) 우측 어깨부 변형 유발시

그림 15. 실내 터널모형시험 결과

4. 현장 계측실험 결과

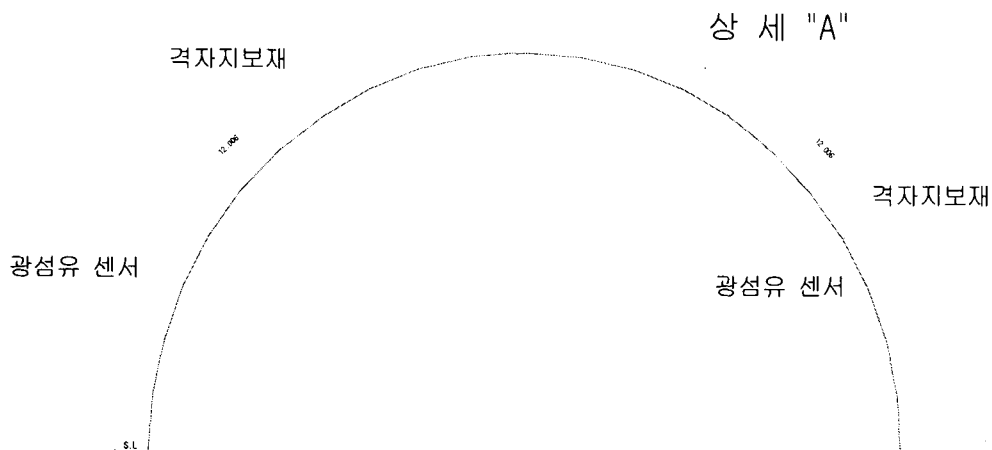
4.1 실험 개요

분포형 광섬유센서의 현장 시공성 및 효용성을 파악하기 위해 ○○터널 시공현장의 격자지보를 적용하는 구간에 대표단면을 지정하여 현장 계측실험을 수행하였다. 막장에 시공된 격자지보에 분포형 광섬유센서를 설치하였으며, 슛크리트 타설 후 초기치를 측정하고 이후 변위 수렴때까지 매 발파 후에 광섬유센서에 의한 변위를 측정하였다.

4.2 실험 절차

현장 계측실험 절차는 다음과 같으며, 그림 16과 17은 광섬유센서 현장설치 모식도 및 사진을 나타낸다.

- 격자지보 시공
- 터널 측벽에 광섬유센서와 측정장비를 연결하는 케이블 포설
- 격자지보에 계측센서를 설치
- 계측센서와 측벽에 설치된 케이블 연결
- 1차 슛크리트 타설 (광섬유센서 매설) 후 초기치 측정
- 이후 변위 수렴시까지 적정 간격으로 변위 측정 수행



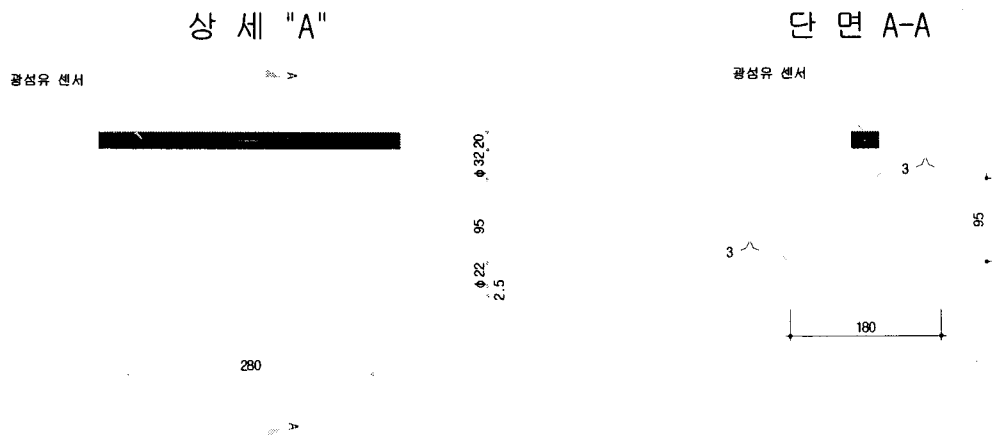
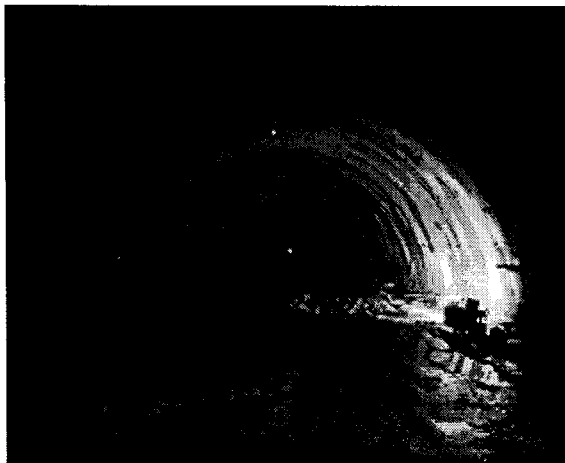
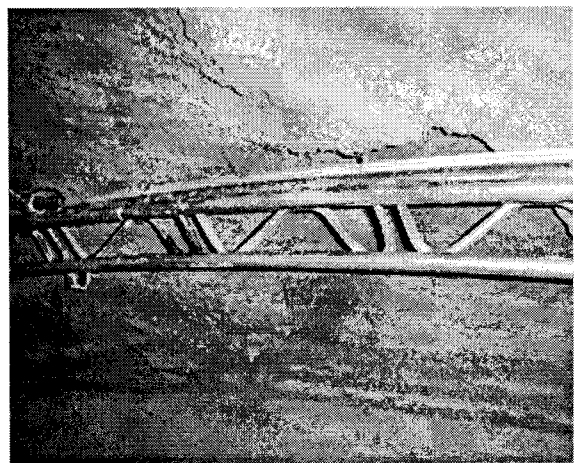


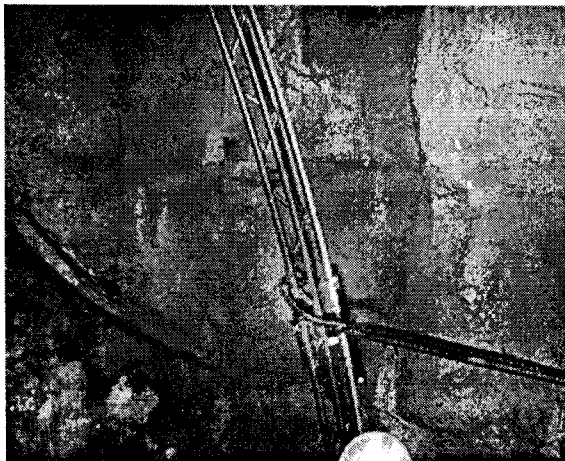
그림 16. 분포형 광섬유센서 현장설치 모식도



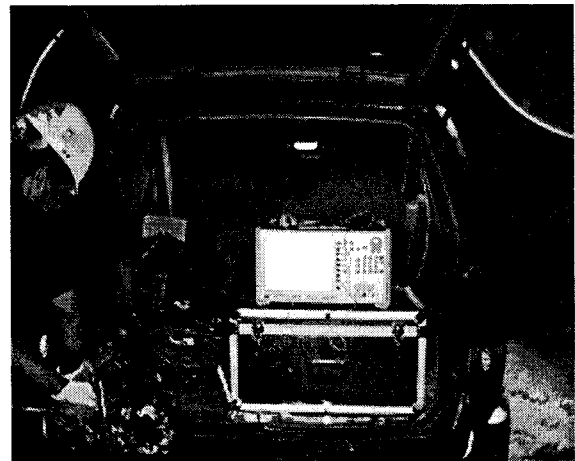
(a) 현장 설치 전경



(b) 현장 설치사진(센서부)



(c) 현장 설치사진(접속부)



(d) 발파후 계측 사진

그림 17. 분포형 광섬유센서 현장설치 사진

4.3 실험 결과

분포형 광섬유센서의 현장 설치공정은 크게 격자지보에 계측센서를 설치하는 공정과 센서와 측정장비를 연결하는 케이블을 터널 측벽에 포설하는 공정으로 나누어지는데, 공사 수행시 케이블을 터널 측벽에 포설하는 공정은 굴착공기에 지장을 주지 않도록 기타 굴착공정과 병행작업이 가능하며, 격자지보에 센서를 설치하는 공정은 약 15분 정도 소요되었다. 또한 측정은 측벽에 포설된 케이블로 연결된 막장 후방의 측정장비를 통해서 이루어지므로 설치 및 측정이 굴착공기에 영향을 미치지 않고, 대차 이외의 별도의 장비가 필요하지 않아 시공성이 우수하다고 할 수 있다.

발파로 인한 센서 망실 여부를 파악하기 위해 분포형광섬유센서를 설치한 이후 막장면에서의 첫 발파 후(막장이격거리 2m)의 계측 결과, 내공단면 전 구간에서 변형률 값이 측정되었다. 따라서 발파로 인해 센서가 파손되지 않아 굴착에 따른 초기변위 측정이 가능함을 확인하였으며, 센서 전 구간에서의 밀도 높은 내공변위 측정이 이루어지므로 3~5개의 국부적인 내공변위 측정이 이루어지는 기존 광파기 계측방법에 비해 보다 신뢰성 있는 터널 변형거동 파악이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 분포형 광섬유센서의 변형률 센서로서의 적정성을 검증하기 위해 1, 2차 피복된 광섬유센서의 인장시험, 변위추적시험 및 실내 모형터널시험 등을 수행하였으며, 분포형 광섬유센서의 시공성 및 효용성을 검증하기 위하여 시공중인 터널 현장에서 현장 계측 실험을 수행하였다. 실내 및 현장실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 1, 2차 피복 분포형 광섬유센서 케이블의 인장시험 결과 정밀 버니어캘리퍼스에 의한 변형률 측정치와 광섬유센서의 변형률 측정치가 모두 선형 분포를 보이며, 보정해보면 계산치와 광섬유센서의 변형률 측정치가 거의 일치하게 나타나므로 분포형 광섬유센서가 변형률 센서로 적정함을 확인할 수 있었다.
- 2) 강재 변위추적시험 및 실내 터널모형 변위측정시험을 통해 강재와 모형터널에서의 변형 발생시 광섬유센서로 측정된 변형률 값을 2차원 변위 환산 알고리즘을 통해 변위로 환산한 값을 실측치와 비교한 결과 모두 실측치와 거의 일치하게 나타남을 확인할 수 있었으며, 실측치와 광섬유센서의 변위환산치의 최대 오차는 1.2mm로 나타났다.
- 3) 분포형 광섬유센서의 현장 계측실험은 센서를 현장에 설치하는데 약 15분 정도 소요되었으며, 센서는 터널측벽에 케이블로 막장 후방의 측정장비에 연결되어 측정되므로 전체 굴착공기에 지장을 주지 않고, 대차 이외의 별도의 장비가 필요하지 않아 시공성이 우수하다고 할 수 있다.
- 4) 분포형 광섬유센서는 현장 설치 후 슛크리트로 매설되므로 막장에 근접한 설치가 가능하였으며, 이를 통해 굴착 후 발생하는 초기변위를 측정할 수 있다. 또한 기존 광파기는 3~5개의 국부적인 내공변위 측정이 이루어지지만 분포형 광섬유센서의 경우 센서 전구간에서의 밀도 높은 내공변위 측정이 이루어지므로 보다 신뢰성 있는 터널 변형거동 파

악이 가능하다.

이와 같이 분포형 광섬유센서에 의한 터널 내공변위 측정은 밀도 높은 내공변위 자료의 신속한 측정으로 터널 안정성 향상에 기여할 뿐만 아니라 측정장비(BOTDR)를 통한 자동화측정으로 인해 수동측측시 소요되는 각 계측 단면별 측정시간 및 인력을 절감할 수 있으며, 시공중 설치된 계측 단면을 터널 완공 후 유지관리시까지 별도의 계측설비 추가 없이 계측 관리할 수 있는 장점이 있으므로 그 활용성은 매우 클 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김호영, 박의섭, 1993, 터널 내공변위의 이론과 계측결과 분석, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, Vol.3, pp.80-95
2. Volkmann,G.M., Button,E.A., Schubert,W, 2004, Influence of the Zero Reading Time and Position On Geodetical Measurements, Geotechnical Measurements and Modelling. Proc. int. symp., pp.101-104
3. Chang, Ki-Tae, 2002, A Study of Slope Movements using Fiber Optic Distributed Deformation Sensor, KGS Fall '02 National Conference
4. Chang, Ki-Tae, Han, Heui Soo, Yoo, Byung Sun, Lee, Hak Moo, 2003, Real-time Measurement of Tunnel by Fiber Optic Sensor