

부분탈피 고정방식 프리스트레인 가변형 광섬유격자센서를 이용한 지하철 구조물 변위 모니터링시스템

Monitoring System For The Subway Structures Using Prestrained FBG Sensors Fixed With Partially Stripped Fibers

김 기 수†

Kim, Ki-Soo

(논문접수일 : 2008년 11월 11일 ; 심사종료일 : 2008년 12월 12일)

요지

광섬유의 클래딩 부분을 별도의 고정구에 직접 부착하는 방식으로 고정하여, 변형발생시 광케이블을 구성하는 재료들 사이에서 발생하는 미끄러짐(Slip)현상을 방지하고, 외력에 의해 발생하는 변형을 정확하게 측정이 가능하도록 함과 기존 광섬유격자센서가 자체적으로 압축변형의 측정이 곤란한 점을 개선하기 위해 미리 긴장(Pre-Strain)상태를 유지하기 위하여 두 개의 접점사이를 볼트와 너트로 조절하여 프리스트레인 가변이 가능하도록 하여 인장/압축변형 측정을 가능하게 한 광섬유격자센서 패키지를 사용하는 지하구조물 변위 모니터링시스템이 본 연구에 의해 개발되었다.

이러한 광섬유격자센서 패키지는 콘크리트 라이닝구조물에 콘크리트의 불균일성을 극복하고 대표성을 가지기 위해 1미터 케이지길이를 갖도록 하여 모니터링시스템에 적용되었으며, 대구 지하철 지하구조물에 현재 운영 중인 이 시스템은 한국전력 공동구 설치공사가 진행되면서 구조물에 미치는 영향을 판단하기 위한 모니터링시스템으로 적용되었다.

핵심용어 : 광섬유격자센서, 패키징, 구조 모니터링, 부분탈피 광섬유, 프리스트레인 가변형 센서, 지하철구조

Abstract

A monitoring system for the subway structures using prestrained FBG sensors fixed with partially stripped fibers was developed. The sensor packages had pre-strain controllable fixtures. Tensile and compressive strain of the structure could be measured without slip. The FBG sensor system was applied to the concrete lining structure in Taegu subway. Near the structure, the narrow tunnel construction, for the electric power cables and telecommunication cables, started. We wanted to measure the deformations of the subway structures due to the construction by the FBG sensor. The applied sensors had the gauge length of 1 meter to overcome the inhomogeneity of the concrete material with enough length. In order to fix tightly to the structure, the partially stripped parts of the sensor glued to the package and slip phenomenon between fiber and acrylate jacket was prevented. Prestrain of the sensor was imposed by controlling the two fixed points with bolts and nuts in order to measure compressive strain as well as tensile strain. The behavior of subway lining structure could be monitored very well.

Keywords : fiber bragg grating sensors, packaging, structural health monitoring, partially stripped fiber, prestrain controllable fiber sensor, subway structures

1. 서 론

광섬유센서는 부식이 되지 않아 내구성이 좋고, 전자기파의 영향을 받지 않으며, 다중화가 가능하여 많은 연구자들에 의해 연구 되었으며, 특히 광섬유센서의 대표적인 방식인 광섬유격자센서(FBG센서)는 포인트 센서의 개념의 센서로써

측정하고자 하는 지점에 설치되는 반영구적이며, 분해능이 우수한 센서이다(Koo 등, 1995; Kersey 등, 1992; 1994; Morey 등, 1989; 1994; Kim 등, 1992; 1993; Melle 등, 1992; Measures, 1991; Meltz 등, 1989; Stone 등, 1987).

대형구조물에 대해서는 국내에서도 각종 비파괴 계측장비

† 책임저자, 홍익대학교 재료공학부 교수
Tel: 041-860-2209 ; Fax: 041-867-5897
E-mail: kisookim55@paran.com

• 이 논문에 대한 토론을 2008년 2월 28일까지 본 학회에 보내주시면 2009년 4월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

와 이를 바탕으로 구조물의 안전도를 분석하는 이론과 시뮬레이션이 성행하고 있으나, 광섬유센서를 이용한 시설물 유지관리 시스템은 선진국의 일부에서 잠수함이나 항공기에 일부 시도되고 있는 실정이며, 국내에서는 최근들어 광섬유 계측기술에 대한 인식을 넓혀가고는 있지만 아직도 계측시스템을 전자식 또는 기계식 계측시스템에 대부분 의존하고 있는 실정이다(김기수 2003).

최근들이 광섬유센서가 많이 사용되고는 있으나, 광섬유는 케이블을 구성할 때, 유리섬유의 코어(Core)/클래딩(Cladding) 부분과 유리섬유를 보호하기 위한 코팅(Coating) (일반적으로 아크릴코팅)부와 피복재킷(Jacket)으로 이루어져있는데, 이와 같이 구성된 광섬유에 외력이 작용할 경우 코어/클래딩 부분과 코팅/피복재킷부분 사이에서 미끄러짐(Slip)현상이 쉽게 발생하는 단점이 있어 광섬유센서를 패키징을 한 후 테이터에 오류가 생기는 경우가 있었다.

본 연구에서는 두 재료 간에 발생하는 미끄러짐현상을 방지하기 위해서 광섬유의 코팅(일반적으로 아크릴코팅)부와 피복인 재킷을 유리섬유의 코어/클래딩부분에서 부분적으로 탈피한 후 유리섬유부분을 직접 특정한 고정구로 고정하는 방식을 적용함으로서, 외력에 의해 발생하는 변형을 정밀하게 측정이 가능하도록 하였다. 이러한 방법은 미리 인장력을 가하여 프리스트레인을 부가한 신뢰성 있는 광섬유격자센서 패키지의 개발을 가능하게 함으로서 광섬유센서의 장점을 더욱 높여 대상물의 인장 및 압축 거동을 정밀하고도 장기간 지속적으로 측정할 수 있게 하였다.

2. 광섬유 FBG센서의 구성 및 작동원리

2.1 광섬유의 구성

광섬유의 구성은 3가지로 나뉘며, 코어와 클래딩 그리고 코어와 클래딩을 보호하는 피복인 자켓으로 구분되며, 그림 1과 같다. 표 1은 광섬유 각 부분의 구성 물질을 나타낸 것이다.

광섬유에서 빛의 전달은 코어부와 클래딩부에서 이루어지며, 이를 구성하는 물질은 유리질이다. 빛(광)의 전송은 굴절률이 높은 유리질의 코어부를 통해 전달되며, 굴절률이 낮은 유리질의 클래딩부에서는 코어부로 전달되는 빛(광)의 손실을 막는 역할을 한다. 코어부와 클래딩부의 직경은 125 μm 의

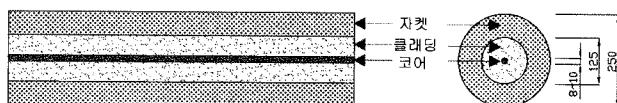


그림 1 광섬유의 구성(단위 μm)

표 1 광섬유의 구성 재료 및 물성

구분	구성 재료	직경(μm)	비고
코어	SiO_2 와 GeO_2	8~10	굴절률 높은 유리질
클래딩	SiO_2	125	굴절률 낮은 유리질
자켓	Polymer, Acrylate	250	코어 및 클래딩 보호

크기로 매우 작으며, 외부에서 가해지는 충격에 약하기 때문에 폴리머(Polymer)또는 아크릴레이트(Acrylate)와 같은 피복 자켓을 이용하여 보호한다.

2.2 광섬유격자(FBG)센서의 구성

광섬유격자센서(FBG센서)는 Ge가 첨가된 광섬유 코어에 자외선 영역의 레이저를 주기적으로 주사함으로써 굴절률 변화를 유도하여 격자(Grating)를 생성하며, 이 격자의 간격에 의해 결정되는 특정 파장의 빛을 반사시키는 광소자이다. 그림 2는 FBG의 구조를 나타낸다. 그림과 같이 광대역의 스펙트럼을 광섬유에 입사시킬 경우, 아래에 주어진 식 (1)과 같은 조건식에 만족하는 파장 성분이 광섬유 격자에서 반사되며, 나머지 파장 성분은 그대로 통과하여 광 스펙트럼 분석기에 나타난다.

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

위의 식 (1)에서 n 은 광섬유 코어의 유효 굴절률(Effective Refractive Index)이며, Λ 는 격자와 격자 사이의 간격(Grating Period)이다.

격자에서 반사되는 브래그(Bragg) 파장은 위의 식 (1)과 같이 유효 굴절률과 격자간격의 함수이며, 광섬유격자(FBG)에 온도나 압력 등의 외부 물리량을 인가할 경우 브래그(Bragg) 파장이 달라진다. 그러므로 브래그(Bragg) 파장의 변화를 측정한다면 FBG에 가해진 물리량을 구할 수 있다. 변형률(Strain) 변화에 대한 브래그(Bragg) 중심 파장의 변화는 아래의 식 (2)와 같으며,

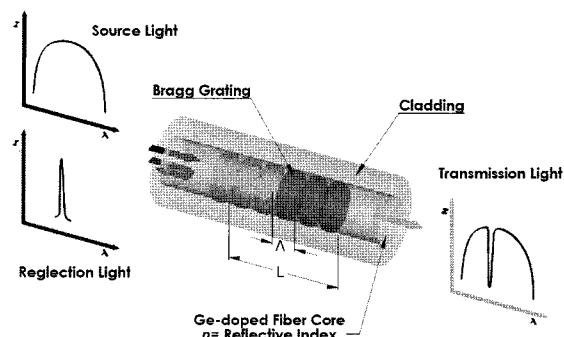


그림 2 광섬유격자센서(FBG센서)의 원리

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B (1 - P_e) \varepsilon \quad (2)$$

위의 식 (2)에서 P_e 는 광탄성 상수(Photo-elastic Constant)이며, 주로 사용되는 게르마늄 실리카 유리(Germano-silicate Glass)의 경우 대략 0.22의 값을 가지며, ε 은 광섬유격자에 가해진 변형률이다.

3. 광섬유센서 고정방법 및 패키징 방법

3.1 부분탈피 후 광섬유격자센서의 고정방법

광섬유는 아래의 그림 3과 같이 일반적으로 8-10μm의 코어부분과 굴절률이 다른 125μm정도의 클래딩으로 이루어진 유리섬유이다. 광섬유격자센서는 이런 광섬유에 특수한 방법으로 격자를 생성하여 센서로 사용한다. 격자는 코어와 클래딩부분에 형성하게 되며, 이 격자가 센싱 소자로서 사용된다. 또한 유리재질로 되어 있는 광섬유는 자체적 파손의 위험 때문에 245-250μm정도의 피복 재킷으로 코팅되어 있으며, 대부분 아크릴레이트 코팅(Acrylate Coating)으로 되어 있다.

이는 피복 재킷은 광섬유를 보호하는 장점이 있다. 그러나 광섬유를 부분 탈피하지 않고 그림 4와 같은 피복 재킷 표면

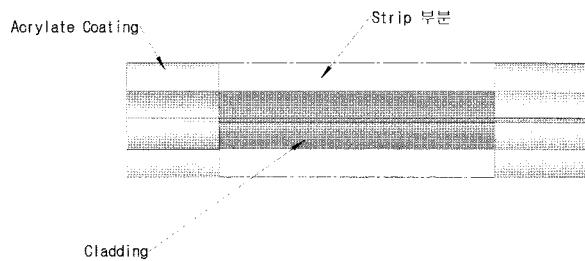


그림 5 보호 재킷이 제거된 광섬유

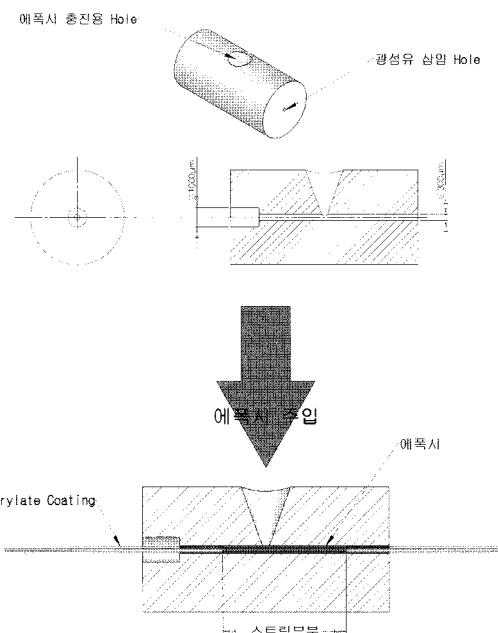


그림 6 광섬유의 탈피 및 고정자에 접착

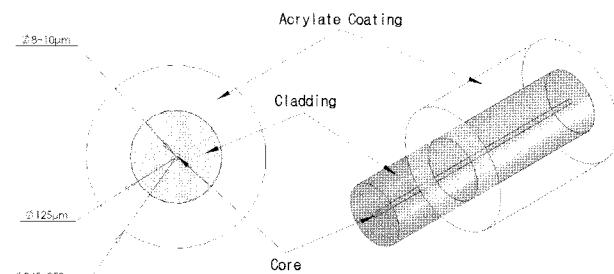


그림 3 광섬유의 코어 및 클래딩 구성도

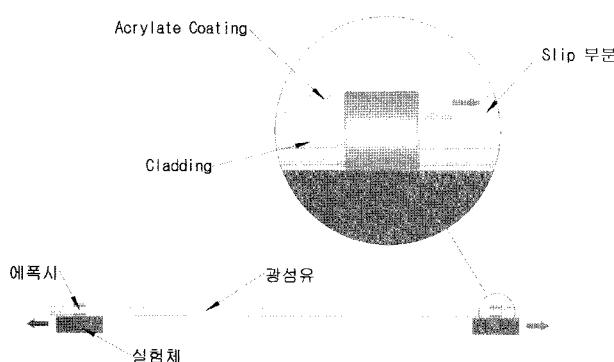


그림 4 광섬유의 일반적인 부착 방법

과 실험체에 직접 부착하게 되면 재킷(또는 코팅)과 클래딩 사이의 미끄러짐현상이 발생하여 인장력에 의한 인장거동과 장기 변형에 대한 거동을 정확하게 측정하는 것이 불가능해진다.

따라서 인장력, 압축거동 및 장기적인 변형의 정확한 측정을 위해서는 그림 5와 같이 클래딩을 보호하고 있는 아크릴레이트 코팅이 되어 있는 피복 재킷을 부분 탈피한 후, 측정하고자 하는 부분에 부착해야 한다.

탈피(Strip)된 광섬유는 탈피하지 않은 광섬유에 비하여 강도가 떨어지기 때문에 변형이 발생하게 되면 쉽게 끊어질 수 있으며, 광섬유격자센서의 다양한 목적으로 사용하기 위한 패키지(Package) 제작할 때 다루기가 매우 어려워진다. 이를 보안하기 위해 다음의 그림 6과 같은 부분탈피된 광섬유 보호용 고정자(Fixture)를 사용하게 되었다. 고정자의 모양이나 크기는 패키지의 형태 및 부착방법이나 실험체의 표면모양 및 용도에 따라 다양하게 제작하여 광섬유를 보호할 수 있다. 이러한 고정자를 사용하는 가장 큰 장점은 고정자

에 광섬유격자센서를 고정 할 때 광섬유격자센서의 표면 코팅 부분이 스트레인을 받아 미끄러짐 현상을 방지할 수 있다. 위의 그림 5의 고정자와 유사한 용도의 보조장치 없이 광섬유의 부착할 부분을 탈피(Strip)하여 접착제로 부착할 경우, 탈피(Strip) 한 부분만 급격히 강도가 떨어져 끊어질 위험성이 매우 높아지지만, 이와 같은 고정자를 사용하면 탈피한 부분을 보호하는 역할을 할 수 있으며, 고정자에 에폭시 충진용 구멍(Hole)를 두어 에폭시 주입을 용이하게 하여 탈피된 부분을 보강하여 광섬유 단락을 안전하게 보호할 수 있다.

3.2 광섬유 센서의 프리스트레인 가변형 패키징 방법

광섬유의 피복 채킷을 부분탈피하여 고정자(Fixture)에 접착하게 되면, 접착부에서의 미끄러짐현상은 더 이상 발생하지 않게 된다. 이와 같이 그림 7의 광섬유격자센서를 이용한 변형률계를 제작하였다. 고정자(Fixture)를 이용하여 광섬유를 고정한 후 고정자의 이동이 발생하지 않도록 볼트를 이용하여 고정한다. 일반적으로 콘크리트는 스트레인이 0.003 ($3,000\mu\epsilon$)이하에서 파괴되므로, 압축력에 의한 변형률의 발생을 정확하게 계측할 수 있도록 최소 $3,000\mu\epsilon$ 이상의 프리스트레인이 가해져야 한다.

프리스트레인을 자유자재로 부가하기 위해 센서패키지 고정장치의 앞뒤에 있는 Strain조절 너트의 이동에 따라 스트레인 조절 볼트가 이동하게 되면서 변형이 발생하게 되는 원리이다.

모든 계측 분야에서는 인장과 압축이 발생하는게 일반적이다. 결론적으로 정확한 측정을 위해서는 설치된 계측기(센서)의 설치된 지점의 변동이 발생하지 않아야 하며, 압축 거동을 살펴보기 위해 프리스트레인의 방법과 같은 조치를 통해 최대 인장 범위에서 발생되는 압축 거동을 측정할 수 있어야 한다.

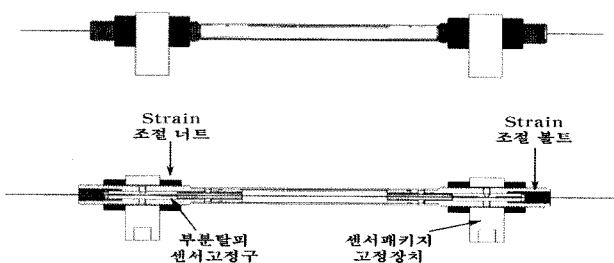


그림 7 부분탈피하여 고정한 프리스트레인 가변형 광섬유격자센서 패키지

4. 제작된 센서 패키지의 성능평가

4.1 실내 성능평가 실험

그림 8, 9와 같이 부분탈피하여 고정하고, 프리스트레인을 부가한 광섬유격자센서의 검증을 위해서 다음과 같은 실내 성능평가 실험이 실시되었다.

아래의 그림10과 같이, 광섬유격자센서를 이용한 변위센서 패키지를 제작하였으며, 부분탈피하여 고정하는 방식의 미끄러짐 현상에 대한 검증을 위해 탈피 후 고정한 변위센서 패키지 2개와 탈피하지 않고 고정시킨 변위센서 패키지 2개를 각각 제작하여 실험을 실시하였으며, 다음과 같은 절차를 통해 시행되었다.

- 광섬유격자 변위센서 제작(탈피한 것과 하지 않은 것 각각 2개)
- 인장시험기 장착부 광섬유격자 변위센서 고정
- 변위센서의 길이가 1m가 되도록 패키징 한 후 고정
- 인장시험기에 설치된 마이크로미터를 이용하여 광섬유 센서 인장
- 미끄러짐현상 발생한 데이터 비교

위와 같이 탈피하여 제작한 패키지 2set와 탈피하지 않고

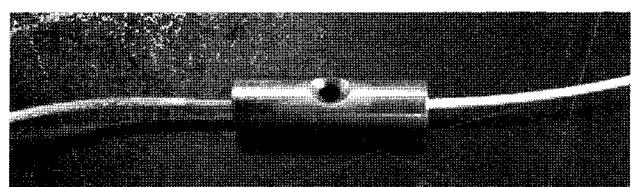


그림 8 탈피 후 고정장치(fixture)에 부착한 광섬유센서

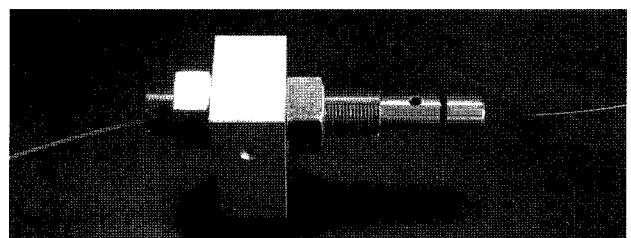


그림 9 고정지그(스트레인 조정 볼트)에 조립 및 fixture 고정

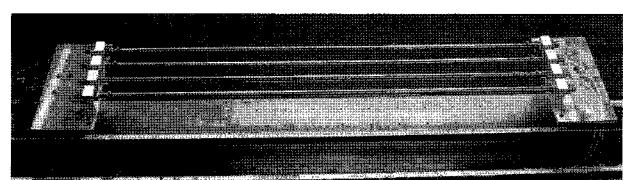


그림 10 제작된 광섬유격자 변위센서 패키지의 인장시험

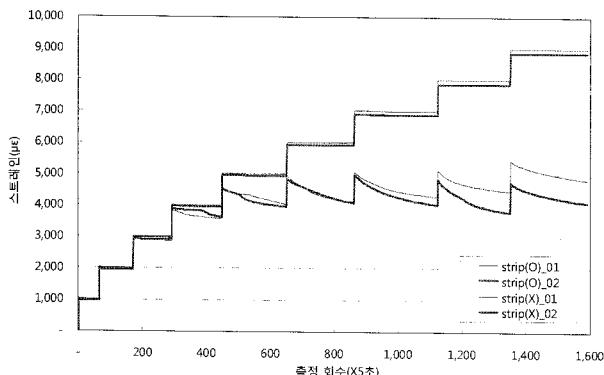


그림 11 광섬유센서 미끄러짐현상 검증 테스트 결과

제작한 패키지 2set를 광섬유센서 미끄러짐현상의 검증을 위한 실내 테스트를 실시하였다. 이 실내실험은 패키지에 프리스트레인을 부가하지 않은 상태에서 패키지에 $1,000\mu\epsilon$ 의 스트레인을 가하고, 최대 20분 유지하는 것을 단계적으로 적용했을때 발생되는 미끄러짐 현상을 검증하고자 하였다. 탈피하여 고정한 방식은 strip(O)이며, strip(X)는 탈피를 하지 않고 고정한 방식을 의미한다. 아래 그림과 같이 탈피하여 고정하는 방식을 이용하는 사용한 2개의 패키지는 $9,000\mu\epsilon$ 에서도 미끄러짐현상이 발생하지 않고, 각 단계에서 스트레인이 지속적으로 유지되고 있는 것을 쉽게 알 수 있다.

이해 비해 탈피를 하지 않고 제작된 strip(X)_01에서 $3,000\mu\epsilon$ 단계에서부터 서서히 미끄러짐 현상이 발생하였고, $4,000\mu\epsilon$ 단계에서는 탈피하지 않고 부착된 모든 패키지에서 미끄러짐현상이 뚜렷하게 발생하여 스트레인 값이 현저하게 줄어들고 있는 것이 확인되었다. 미끄러짐현상이 발생한 이후에 단계적으로 스트레인을 변화시키게 되면, 탈피하여 고정한 변위센서와 비슷한 정도로 스트레인이 증가한 이후에 스트레인을 유지하지 못하고 광섬유가 미끄러짐이 발생하여 재차 스트레인 값이 줄어들었다. 일반적으로 콘크리트는 $E_c = 0.003(3,000\mu\epsilon)$ 이하에서 파괴되며, 실제 계측에 의한 터널과 같은 지하 구조물의 변위 발생량은 약 2mm정도 이므로, 1m 기준의 변위 센서일 경우 $2,000\mu\epsilon$ 정도의 스트레인이 발생할 수 있다. 따라서 압축력에 의한 변형률의 발생을 정확하게 계측할 수 있도록 최소 $3,000\mu\epsilon$ 이상의 프리스트레인이 가해진 상태가 초기값으로 계측이 시작되어야 한다. 그러나 실험결과에서 $3,000\mu\epsilon$ 에서부터 미끄러짐 현상이 발생하고 있으므로, 미끄러짐 현상이 발생하여 초기값의 변동이 발생하기 때문에 정확하지 못한 계측 데이터가 취득될 수 있다.

4.2 현장 적용성 평가를 위한 현장실험

부분탈피 고정방식을 이용한 프리스트레인 가변형 광섬유

격자센서의 현장 적용성을 평가하기 위하여 대구지하철 1호선 현충로역 구간에 적용하였다. 현재 운영 중인 대구지하철 1호선 현충로역 부근에 한국전력 공동구 설치를 위한 터파기 공사가 진행되면서 지하철 지하구조물에 영향을 줄 수 있기 때문에, 개발된 광섬유격자센서를 이용하여 지하철 지하구조물의 안전을 감시하는데 활용하였다.

대구지하철 현충로역 부근의 7K160, 7K440, 6K985단면에 그림 12와 같이 설치되었으며, 지하철 터널의 길이방향을 기준으로 할 때, 횡방향의 1단면에 광섬유격자 변위센서 10개와 종방향으로 3개 단면에 각각 10EA의 광섬유격자 변위센서를 설치하여, 지하철 지하구조물의 변위의 변화를 계측하였다. 2006년 3월 9일부터 2007년 7월 2일까지, 지하철 지하구조물 변위의 모니터링이 이루어졌다.

계측 기간 동안의 대구지하철 현충로역 STA. 6K985단면에 터널 길이방향으로 종방향에 설치된 광섬유격자센서 측정데이터는 그림 13과 같은 결과를 나타내었다. 총 10개의 광섬유격자 변위센서가 센서의 망설 없이 계측기간(약 16개월) 동안 지하철 지하구조물의 내공을 모니터링하였다. 또한 그림 14는 그림 13과 동일한 단면에 터널의 길이방향에 횡방향으로 설치된 광섬유격자센서의 계측 데이터이며, 센서의 망설 없이 지하철 터널의 횡방향에 대한 변위를 모니터링하였다.

횡방향으로 설치한 것에 비하여 종방향으로 설치된 광섬유격자 변위센서 데이터의 변위가 많이 발생하였다. 이와 같은 결과는 계절변화가 터널의 종방향에서 변위의 발생을 크게 한 것으로 판단된다. 또한, 2006년 7월 14일 정도에 종방향 및 횡방향에서 동일하게 변위차가 발생하는 것을 알 수 있으며, 이는 한국전력 공동구 설치를 위한 터파기 공사에 의한 영향이라고 판단된다. 설치된 광섬유격자 변위센서의 시간길이는 1m이다. STA. 6K985단면의 종방향으로 설치된 광섬유격자 변위센서의 압축에 의하여 $285\mu\epsilon$ 의 변형이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 그리고, 7K440단면과 7K160단면에서도 광섬유격자 변위센서의 망설 없이 지하구조물의 변위를 모니터링 하였다.

프리스트레인이 가능한 센서를 제작하기 어려운 계측기기(방식)에서는 외부에서 작용하는 압축력에 의한 변위의 거동을 정확하게 측정하는 것이 불가능하다. 그에 비하여, 본 연구에서는 부분탈피하여 고정하는 방식을 이용한 프리스트레인 가변형 광섬유격자센서를 제작하여 압축력에 의한 변위의 거동을 측정할 수 있었으며, 지하구조물 변위의 모니터링이 가능하였다.

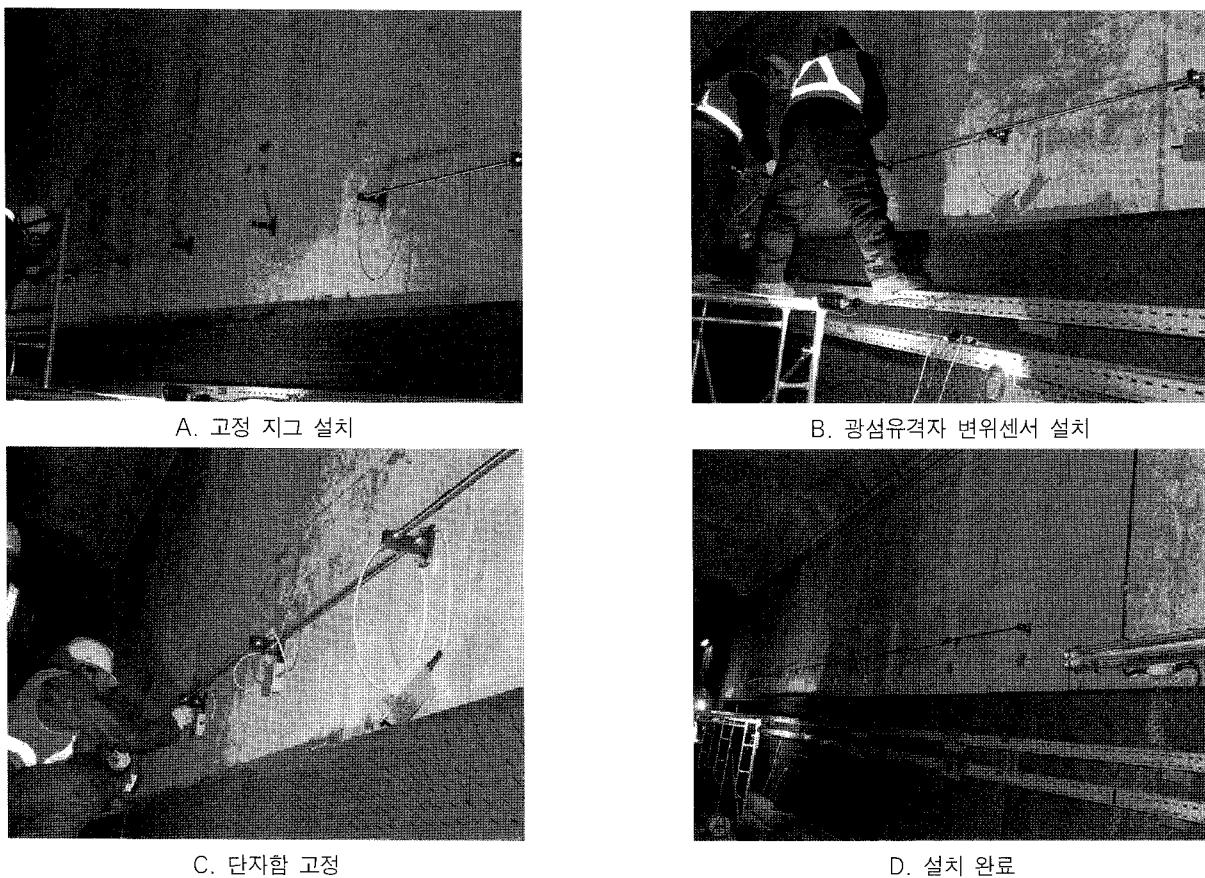


그림 12 대구지하철 광섬유격자 변위센서 설치(종방향)

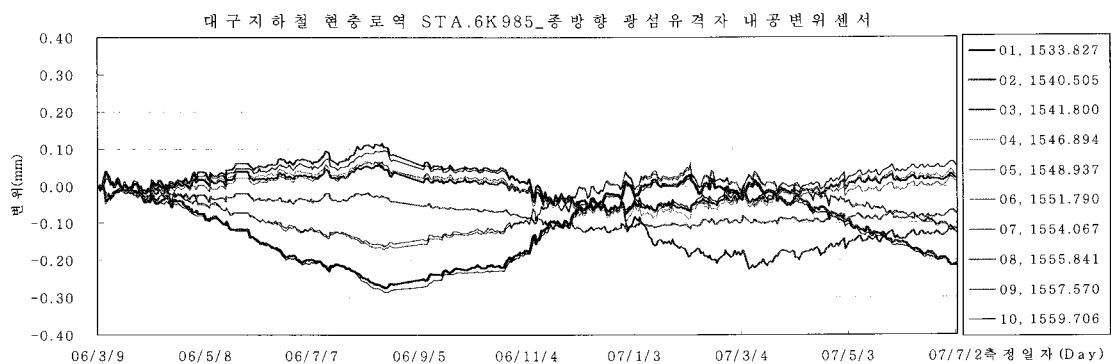


그림 13 대구지하철 현충로역 STA. 6K985단면 종방향 계측 결과

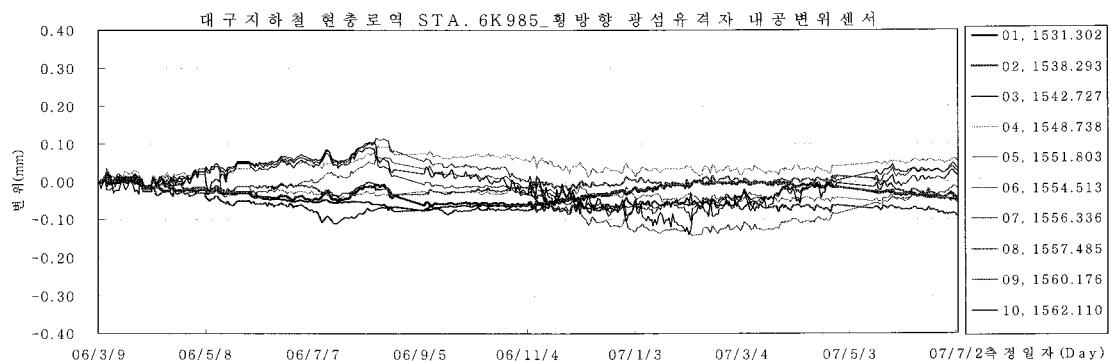


그림 14 대구지하철 현충로역 STA. 6K985단면 횡방향 계측 결과

5. 결 론

본 연구에서는 광섬유를 탈피하여 고정하고 프리스트레인을 부가한 광섬유격자센서 패키지를 개발하였으며, 실험실 시험과 현장시험을 통하여 지하구조물 현장의 시공 중 계측 및 시공 후 유지관리 계측에 적용이 가능함을 보여 주었다.

광섬유 케이블의 유리섬유부분(코어와 클래딩)을 보호하는 재킷과 코팅을 탈피하여 광섬유의 클래딩 부분을 별도의 고정구에 직접 부착하는 방식으로 고정하여, 변형발생시 광케이블을 구성하는 재료들 사이에서 발생하는 미끄러짐현상을 방지하고, 외력에 의해 발생하는 변형을 정확하게 측정이 가능하도록 합과 기존 광섬유격자센서가 자체적으로 압축변형의 측정이 곤란한 점을 개선하기 위해 미리 긴장상태를 유지하기 위한 프리스트레인 가변이 가능한 광섬유격자센서 패키지를 개발하여 구조물에 발생되는 인장/압축변형 측정을 가능하게 하였다.

광섬유격자센서에 Strain을 자유롭게 조절할 수 있는 이러한 패키징 방법을 이용한 광섬유격자센서에서 측정이 어려운 압축에 대한 측정이 가능하여 구조물의 시공 중 계측뿐만 아니라 장기간 유지관리 계측의 경우에도 적용이 가능하다는 것을 실내 실험과 대구지하철 현장 시험을 통해 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 과학재단 우수연구센터인 “스마트사회기반 시설 연구센터”와 국토해양부 과제인 “도시철도표준화사업단”과 “국가시설물 안전관리 네트워크 연구단”的 부분적인 지원에 의하여 이루어졌습니다. 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 김기수 (2003) System Identification에 활용할 수 있는 광섬유 센서 계측 시스템, 전산구조공학, 16(1), pp.39~43.
- Hill, K. O., Fujii, Y., Johnson, D. C., Kawasaki, B. S. (1978) Photosensitivity in Optical Fiber Waveguides. Application to Reflection Filter Fabrication, *Appl. Phys. Lett.*, 32(10), pp.647~649.
- Kersey, A. D., Berkoff, T. A., Morey, W. W. (1992)

High-Resolution Fiber-Grating Based Strain Sensor with Interferometric Wavelength-Shift Detection, *ELECTRONICS LETTERS*, 30th, 28(3), pp.516~518.

Kersey, A. D., Koo, K. P., Davis, M. A. (1994) Fiber Optic Bragg Grating Laser Sensors, *SPIE*, 2292, pp.102~112.

Kim, K. S., Breslauer, M., Springer, G. S. (1992) The Effect of Embedded Sensor on the Strength of Composite Laminates, *J. of Reinforced Plast and Comp.*, 2, pp.949~958.

Kim, K. S., Kollar, L., Springer, G. S. (1993) A Model of Embedded Fiber Optic Fabry-Perot Temperature and Strain Sensors, *J. of Composite Materials*, 27, pp.1618~1662.

Koo, K. P., Kersey, A. D. (1995) Bragg Grating-Based Laser Sensors Systems with Interferometric Interrogation and Wavelength Division Multiplexing, *Journal of Lightwave Technology*, 13(7), pp.1243~1248.

Measures, R. M. (1991) Fiber optic sensor considerations and developments for smart structures, *Proc. SPIE*, 1588, p.282.

Melle, M., Kexing Liu, Raymond M. (1992) A Passive Wavelength Demodulation System for Guided-Wave Bragg Grating Sensors, *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, 4(5), pp.516~518

Meltz, G., Morey, W. W., Glenn, W. H. (1989) Formation of Bragg grating in optical fibers by a transverse holographic method, *Optics Letters*, 14, pp.823~825.

Morey, W. W., Dunphy, J. R., Meltz, G. (1994) Multiplexing Fiber Bragg Grating Sensor, *SPIE*, Vol. 1586, Paper #22, Boston, pp.216~224.

Morey, W. W., Meltz, G., Glenn, W. H. (1989) Fiber Optic Bragg Grating Sensors, *SPIE*, 1169, pp.98~106.

Stone, J., Stulz, L. W. (1987) Pigtailed high-finesse tunable fiber Fabry-Perot Interferometer with large, medium and small free spectral range, *Elect. Lett.*, 23(15), pp.781~783.