

광섬유 격자 센서를 활용한 사면거동 실시간 안전 진단 시스템

장기태* · 정경선** · 김성환***

*금오공과대학교 토목공학과

**한국도로공사

***한국도로공사 도로연구소

An Experimental Study on Density Tool Calibration

Ki-Tae Chang* · Kyung-Sun Chung** · Sung-Hwan Kim***

*Kum-Oh National University

**KHYC

***Highway Research Center, KHYC

ABSTRACT

Early detection in real-time response of slope movements ensures tremendous saving of lives and repair costs from catastrophic disaster. Therefore, it is essential to constantly monitor the performance and integrity of slope-stabilizing structures such as Rock bolt, Nail and Pile during or after installation. We developed a novel monitoring system using Fiber Bragg Grating (FBG) sensor. It's advantages are highly sensitivity, small dimension and electro-magnetic immunity. capability of multiplexing, system integrity, remote sensing - these serve real-time health monitoring of the structures. Real-time strain measurement by the signal processing program is shown graphically and it gives a warning sound when the monitored strain state exceeds a given threshold level so that any sign of abnormal disturbance on the spot can be easily perceived.

Key words

real-time monitoring, early detection, fibre bragg grating sensor, multiplexing, built-in assessment, field application, slope movement

1. 개요

Nailing 이나 rock-bolt, 억지말뚝 등과 같은 사면 보강 구조물의 시공 중·후, 지속적인 안전 유지관리를 위해서는 정기점검 및 안전진단 이외에도 구조응답 Monitoring을 통한 상시 감시 및 진단이 요구된다. 이를 위한 대안으로 광섬유 센서와 같은 Smart 계측기술을 적용함으로써 보강 구조물의 안전상태와 거동을 실시간으로 감지해 경고할 수 있는 광섬유센서 안전 진단 시스템을 구현하였다. 또한 구조물 파손에 따른 붕괴운동을 원격 감시함과 동시에 측정, 해석, 도화까지 자동적으로 처리하고 사면붕괴의 발생조짐을 조기에 현지에서 예측함으로써 재해의 경감이나 공사의 안전시공에 큰 효과를 기대할 수 있는 자동관측·감시 시스템이다.

2. 광섬유 센서

인간의 신경조직과 같은 역할을 통해 구조물 곳곳에서 발생할 수 있는 문제들을 실시간에 발견할 수 있는 획기적인 기술을 'Smart Technology'로 일컫는다. 이러한 Smart Technology의 감지제로 사용되는 광섬유 센서는 유리의 주성분인 실리카(SiO_2)로 구성되어 있으므로 전자기파의 영향을 받지 않고, 작동 온도 범위가 매우 넓으며, 광섬유의 직경($250 \mu\text{m}$)이 매우 작고 유연하여 설계자가 원하는 크기의 센서를 쉽게 구성할 수 있으며 높은 해상도와 다량의 정보 수송 능력이 있는 등 많은 장점과 잠재적 가능성을 가지고 있다. 현재 통신망이 점차 광섬유로 대체 되어가는 상황이므로, 광섬유 센서를 실제 구조물에 적용 시 여러 다른 외부 구조물과의

연계 측면에서 통합된 안전진단과 관련된 사회기반구조물(infra-structure)을 다른 센서에 비해 용이하게 구성할 수 있다.

2.1 센서의 종류와 기본원리

광섬유 센서는 광섬유를 이용하여 센서를 구성하는 방법에 따라 여러종류가 있는데 광섬유의 파단으로 인한 빛의 전달 유무를 이용하는 방법과 빛의 편광을 이용하는 방법 및 간섭을 이용하는 방법으로 구성된 센서 등이 있다. 이 중 일반적으로 구조물의 변형측정에 많이 사용되었던 빛의 간섭을 이용한 광섬유 센서는 변형율에 기인한 경로차에 의한 간섭신호로부터 변형율을 측정하며, 이와 같은 간섭형 광섬유 센서들은 동시에 여러 지점을 측정하는 Multi-plexing의 적용에 효율적이지 않고 센서로부터의 출력신호 처리 과정에도 많은 문제점을 내포하고 있었다. 최근에 새롭게 개발된 광섬유 브래그 격자 센서(Fiber Bragg grating sensor, FBG sensor)는 변형율과 온도 등의 외란을 반사 파장의 변이 측정을 통해 간단히 측정할 수 있고, 광대역 광원으로 하여 구성된 이 센서 시스템은 광섬유 한 라인 상에 여러 개의 센서를 배열하여, 통신상에 이용되던 파장분할 다중화(Wavelength - division multiplexing, WDM) 기법을 사용함으로써 실제 구조물의 변형 상태를 배열된 여러 개의 센서로 동시에 다점 측정 기술을 쉽게 구현할 수

있다(그림 1 참조).

이러한 광섬유 브래그 격자 센서는 변형의 절대량 측정이 가능하고, 출력신호가 빛의 파장에만 관계하므로 광강도의 변화에 무관하여 시스템 구성이 용이하다. 또한 출력 신호가 변형에 대하여 선형적이며 센서가 광섬유 자체의 강도를 거의 유지하므로 강도 특성이 우수하다는 장점이 있다. 이런 점에서 현재 개발된 광섬유 센서 중 브래그 격자 센서는 다점 측정에 가장 효율적으로 사용될 수 있는 센서이다.

2.2 FBG 센서와 작동원리

FBG 센서는 광케이블의 표면에 자외선 광(Excimer laser)을 투과시켜 광섬유의 화학적 결합을 변화시킴으로써 굴절지수에 변화를 주어, 광섬유 격자가 생성되는 것이 FBG이다(그림 2 참조). 광섬유에 UV 레이저 광원에 의한 에너지 펄스로 광섬유 측면을 비추어 주기적인 굴절률 변화를 갖는 격자를 형성하면 격자에서 파장을 빛의 반대 방향으로 반사한다는 사실이 1989년에 G. Meltz를 포함한 연구그룹에 의하여 발견되었다. 마이켈슨 센서와 EFP 센서는 구조물의 상태를 계측하기 위하여 많이 사용되고 있지만 신호의 불명확성, 그리고 생산 자동화와 다중 측정이 어렵다는 단점이 있다. 이에 비하여 광섬유 브래그 격자 센서는 절대량 측정과 대량생산이 가능할 뿐만 아니라 구조물에 따라 특별한 네트워크,

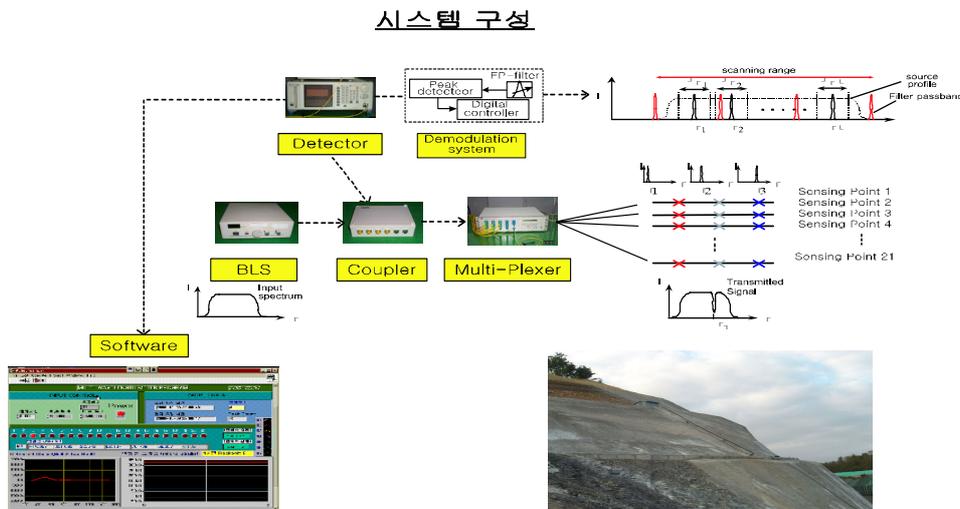


그림 1 광대역 광원(BLS)를 이용한 시스템 구성.

즉 선형, 직렬, 병렬, 뼈대형, 복합형태의 다양한 네트워크를 구성할 수 있는 것이 기존의 광섬유센서와 크게 다르다. 그림 3 FBG의 원리를 도시한 것으로, 광원을 광섬유에 입사시킬 경우, 브래그 조건에 의한 파장성분은 광섬유 브래그 격자에서 반사되고 나머지 파장 성분은 그대로 통과한다. 광섬유에 전달된 광원의 스펙트럼, 브래그 격자를 통과한 광신호의 스펙트럼, 그리고 브래그 격자에서 반사된 광신호의 스펙트럼이 그림 3와 같이 나타난다. 반사신호의 스펙트럼에는 파장 λ_b 에서 강한 반사가 발생하는 것으로 나타나며 파장 λ_b 와 FBG의 격자간격은 다음 관계가 있다.

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

여기서 n: 광섬유격자의 유효 굴절률
 Λ : 격자의 간격
 λ_B : 브래그 파장

따라서 격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이며, 광섬유 격자에 온도나 스트레인 등의 외부 물리량을 가할 경우 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다. 브래그 파장의 변화를 정밀하게 측정한다면, 광섬유 격자에 가해진 미지의 물리량(온도, 스트레인)을 다음 식(2)를 통하여 역으로 계산할 수 있으며, 이것이 광섬유격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\epsilon_N + (1 - p_e)\alpha_T\Delta T + \xi\Delta T \quad (2)$$

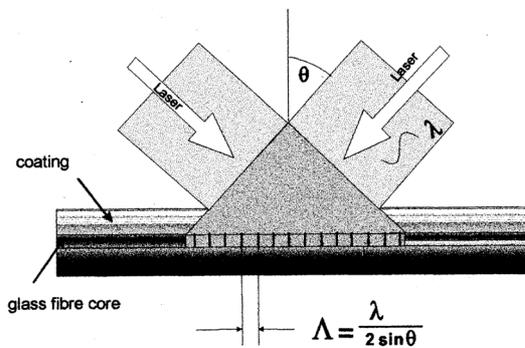


그림 2 자외선 광(Excimer laser)을 투과하여 광섬유에 격자생성.

$$\epsilon = \frac{1}{(1 - p_e)} \left[\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} - \xi\Delta T \right] \quad (3) \quad \epsilon_N^{appl} = \frac{1}{(1 - p_e)} \left[\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} - [(1 - p_e)\alpha_T^{appl} + \xi]\Delta T \right] \quad (3)$$

(2)식에서 온도의 변화량을 '0'로 두면 구하고자 하는 변형률이 구해진다.

$$\epsilon = \frac{1}{(1 - p_e)} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (4)$$

여기서, α : 광섬유의 온도에 따른 팽창계수
 ξ : 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수
 p_e : 광탄성 상수
 n : 코어의 굴절률

광섬유 격자의 온도 및 스트레인의 변화에 대한 브래그 파장의 변화는 광섬유로 측정 가능한 범위 내에서는 대체로 선형적이다. 광섬유 브래그 격자 센서는 측정량이 브래그 반사파장의 변화량이기 때문에 측정이 간편하며, 광섬유 격자의 광 반사파장의 선폰이 좁기 때문에 분해능이 높은 센서를 구성할 수 있다. 또한 브래그 반사 파장이 서로 다른 광섬유 격자들은 서로 영향을 받지 않으므로, 하나의 광섬유를 이용한 다중점 측정이 가능하다.

3. 시스템 구성 요소

시스템 구성을 위해 필요한 요소들은 아래와 같이 크게 4가지로 대별 할 수 있다.

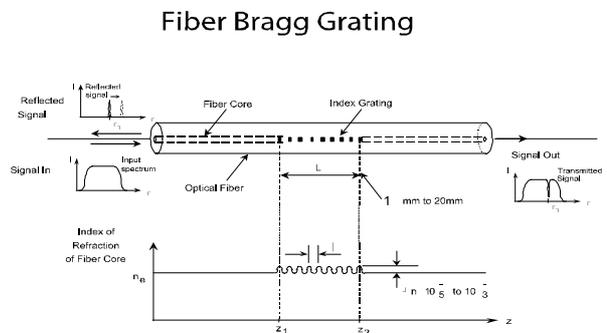


그림 3 FBG 센서의 원리.

4. 실내 및 현장시험

사용된 광섬유 격자센서(FBG Sensors)의 현장 적용 시 측정 데이터 신뢰성 검증을 위해 11 종류의 다양한 실내 및 현장시험(그림 5)을 수행하였다. 시험 결과분석은 본 논문 범주 외의 내용으로서 여기에서는 상세한 설명을 생략하고 개괄적인 항목만을 아래에 소개한다.

첫째, Calibration과 관계된 격자 센서의 고유 특성치 파악을 위한 실험으로서

- a. 하중-변형률 특성, b. 중심파장 변이-변형율, c. 온도-변형률 시험 등을,

둘째, 센서 부착 특성에 관계되는 시험으로,

- d. 시멘트 수축/팽창 변형률 측정, e. 온도변화에 따른 사용 접착제 영향,

셋째, 재래식 센서(진동현식, 전기 저항식)와의 변형률 측정 편차 비교하기 위한 시험으로,

- f. 인장시험, g. 철근 굴곡시험, h. 보의 휨 거동 시험,

넷째, 광 센서 매설 방법에 변형률 응답 특성을 파악하기 위한 것으로,

- i. 유리섬유 매설 실내 인발 시험, j. FRP 매설 현장 인발

시험, k. 현장적용 등을 수행하였다. 관련된 시험 장치와 측정 데이터는 부록에 첨부하였다. 또한 현장 확인 시험으로서 억지말뚝, 네일, 록볼트, FRP 등에 전부 121 개의 광섬유 격자 센서를 다양한 방법으로 부착, 매설(도표 1 참조)하여 2000. 3월 18일부터 현재까지 약 8 개월간 측정해왔다.

5. 현장 적용 사례

본 진단 시스템은 동대구-구미간 고속도로 8차선 확장공사 보강사면 계측에 활용되고 있으며, 대상 사면 단면과 센서 배치 현황 및 내역은 표 1, 그림 5와 같다.

5.1 모니터링 프로그램(서버용)

모니터링 프로그램은 현장 사면에 설치된 광센서로부터 관할사무소에 설치된 데이터 로거 장치까지 광케

표 1 계측에 사용된 FBG Sensor 세부 현황.

	억지말뚝 (4ea)	Nailing & Rockbolt (10ea)	FRP (5ea)
B사면	10ea	32ea	-
N사면	16ea	30ea	29ea

· 센서 배치 사항

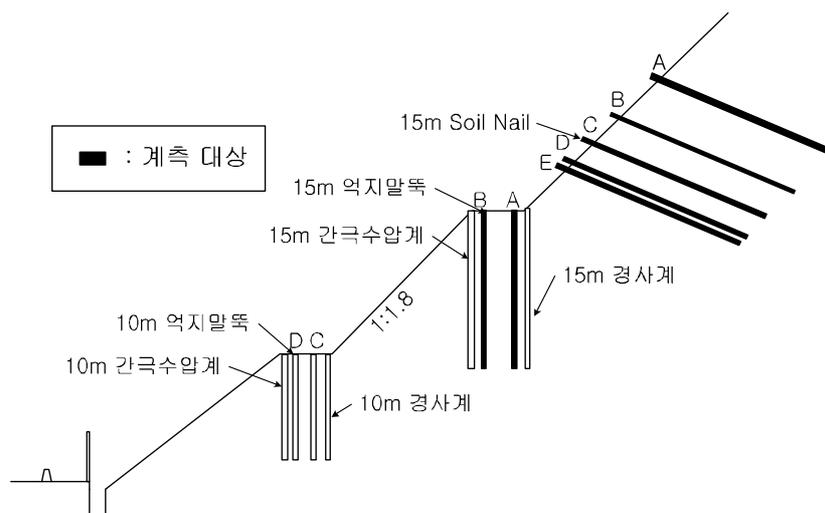


그림 5 동대구-구미간 8차선 확장공사 보강사면 연화재, 신동재구간 사면 단면도.

이블을 통하여 데이터를 실시간으로 수집하는 프로그램으로, TCP/IP 네트워킹, 측정기 인터페이스(GPIB), MUX 제어(RS232C), 실시간 데이터 저장과 같은 기능을 수행한다.

모니터링 프로그램의 구성은 계측부분, MUX 제어 부분, TCP/IP 네트워크 전송부분, 파일 I/O 부분, 데이터 베이스 처리 및 실시간 분석 부분으로 구성된다.

그림 6-1, 6-2, 6-3은 본 사면 계측 모니터링 프로그램의 화면으로써, 프로그램의 구성은 위의 그림 6-1, 6-2, 6-3에서 보는 바와 같은 순서로 진행된다.

그림 6-1은 사면 계측 프로그램의 주 화면에 앞서, 현재 측정하고자 하는 사면의 위치를 도식하고 있으며, 그

림 6-2는 사면 계측 프로그램의 주 화면으로써 측정장비와 GPIB통신을 하며, 실시간으로 계측 데이터를 수집하는 역할을 수행한다.

우선 자동/수동으로 프로그램 전환, 시간 간격 및 측정구간을 설정 할 수 있는 부분이 좌측 상단부분에 표현되며, 우측 상단 부분의 경우는 현재 측정 위치 및 관리기준치 이상의 변형률이 발생시 경고등 및 도로공사 감독관실과 사업소 당직실에 위험상황을 알리기 위한 경고음을 발생시키는 부분이다. 좌측 중·하단 부분은 각 센서의 변형률 분포 및 변형률을 표현하고 있으며, 우측 중·하단 부분은 현재 측정위치의 세부도면을 도식하고 있다.



그림 6-1 현재 측정 위치.

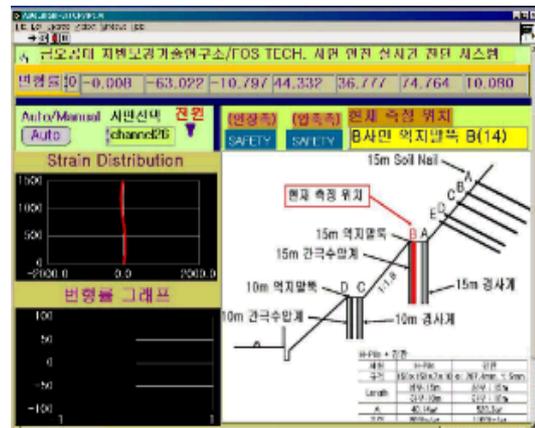


그림 6-2 실시간 데이터 수집.

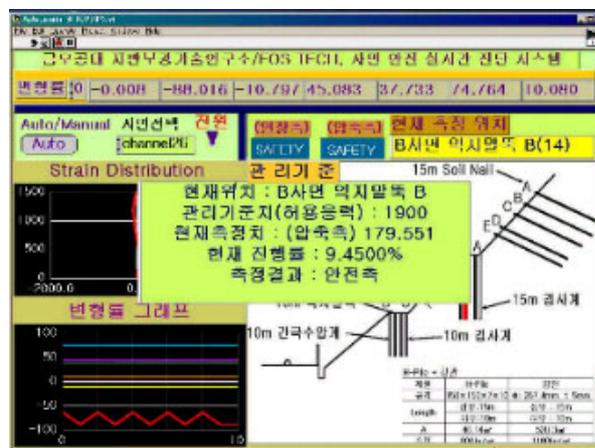


그림 6-3 관리기준치와의 비교 분석.

또한 네트워크에 연결된 클라이언트 프로그램에 측정된 데이터를 실시간 전송하는 기능도 수행하도록 되어 있어, 도로공사내 어느 지역에서나 실시간으로 데이터를 받을 수 있다.

그림 6-3은 그림 6-2에서 수집된 각 데이터를 관리 기준치와 비교하여, 현재 진행 정도와 측정결과가 관리기준치에 비해 안전측인지, 위험수준인지를 판단하는 실시간 분석 기능을 수행한다.

5.2 클라이언트 프로그램

클라이언트 프로그램은 도로공사 내부네트워크를 통하여, 관할사무소에서 실시간으로 수집된 데이터를 도로공사 본사 및 어느 지역에서나, 실시간으로 모니터링할 수 있도록 개발되었으며, 관할 사무소에서 운영되고 있는 서버용 프로그램으로부터 실시간으로 데이터 획득 및 분석이 이루어지도록 되어있으며, 관리 한계치에 대한 Triggering 기능도 포함되어 있다.

6. 결론

- 1) 측정, 도화, 해석을 자동적으로 실시간에 해결함으로써 상황에 적절한 조치를 신속히 수행 할 수 있다. 국내사면 붕괴의 주요 원인이 집중호우인 것으로 확인되고 있으며, 이러한 악천후 조건하에서 붕괴에 대한 사전 예측은 기존의 계측 방법으로는 사실상 불가능하다. 본 안전 진단 시스템은 이러한 악조건 하에서도 실제 구조물의 변형상태를 실시간에 관측 가능케 함으로서, 자연 재해로만 인식되어온 사면 붕괴에 대한 공학적인 사전 대비책을 마련할 수 있을 것으로 보여진다.
- 2) 광케이블로 연결된 통합 Network 구성을 통해, 중앙 통제 방식의 상시 감시체제를 구축함으로써 여러 개소의 현장을 동시에 체계적이며, 효율적으로 관리할 수 있다. 이런 관점에서 보면 계측 시스템의 경제성이 뛰어나다 할 것이다.
- 3) 사용 계측기기에 따른 서로간의 오차와 기술자 개개인의 경험적 판단에 의거한 주관적 오류를 줄이고 데이터의 과학적 처리 및 정량화를 통한 계측의 신뢰성을 확보할 수 있다.

- 4) 지반거동의 실시간 자동계측 시스템을 도입하므로써 실제적 의미의 정보화시공 개념인 “Real time construction control”이 가능토록 하였다.

참고문헌

- Ken-An Lou, Gershon Yaniv, Dirk Hhardtman. “Fiber Optic Strain Monitoring of Bridge Column Retrofitted with Composite jacket Under Flexural Loads”, SPIE Vol. 2446, 1995, pp.16-24
- Richaed W. Griffiths. “Structural Integrity Monitoring of Bridges Using Fiber Optics”, SPIE Vol. 2446, 1995, pp. 127-138
- Jean-Marie Caussignac, Mohamed Barbachi, Alain Chabert. “Bridge Bearings Equipped with Optical Fiber Sensor for Measuring Vertical Load through the Support”, SPIE Vol. 2719, 1996, pp.220-228
- Whitten L. Schulz, Eric Udd, John M. Seim, and Galen E. McGill. “Advanced Fiber Grating Strain Sensor Systems for Bridges, Structures, and Highways”, SPIE Vol. 3325, 1998, pp.212-221
- Daniele Inaudi, Nicoletta Casanova, “Embedded and Surface Mounted Fiber Optic Sensors for Civil Structural Monitoring” SPIE Vol. 3044, 1997, pp.236-243
- Whitten L. Schulw, Eric Udd, John M. Seim, and Galen E. McGill, “Advanced Fiber Grating Strain Sensor Systems for Bridges, Structures, and High-ways”, SPIE Vol. 3325, 1998, pp.212-221
- I. B. Kwon *et al*, “Real-Time Health Monitoring of a Scaled-down Steel Truss Bridge by Passive - Quadrature 3*3 Fiber Optic Michelson Sensors, and High-ways”, SPIE Vol. 3325, 1998, pp.253-261
- Whitten Daniele Inaudi, Nicoletta Casanova, “Geo-structural monitoring with long-gauge interferometric Sensors”, SPIE Conference on “Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aging Infrastructure”, Newport Beach, USA, 5-9 March 2000.
- Philipp M. Nellen, Rolf Bronnimann, Andreas Frank, Pascal Mauron, and Urs Sennhauser, “Structurally Embedded Fiber Bragg Gratings: Civil Engineering Applications”, Photonics East, SPIE’s International Conferences on Fiber Optic Technology, ES14: Fiber Optic Sensor Technology and Application, Boston Massachusetts, USA, 19-22 Sep. 1999
- Philipp M. Nellen, Andreas Frank, Rolf Broonimann, and Urs Sennhauser, “Optical Fiber Bragg Gratings for Tunnel Surveillance”, SPIE’s 7th International Symposium on Smart

Structures and Materials, Conference on Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials, Newport Beach, California, USA, Mar 5-9, 2000.

Ph. M. Nellen, P. Mauron, A. Frank, P. Pequignot, K. Bohnert, H. Brandle, U. Sennhauser, "Mechanical and Optical Reliability of Fiber Bragg Grating Strain and Temperature Sensors at High Temperature"

Philipp M. Nellen, Andreas Frank, Rolf Bronnimann, Urs Sennhauser, "Fiber Optical Bragg Grating Sensors Embedded in CFRP Wires", SPIE's 6th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Conference on Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials, Newport Beach, California, USA, March 1-5, 1999.

Andreas Frank, Philipp M. Nellen, and Urs Sennhauser, "Novel Methods for Simultaneous Strain and Temperature Measure-

ments with Optical Fiber Bragg Gratings", Photonics East, SPIE's International Conferences on Fiber Optic Technology, ES14: Fiber Optic Sensor Technology and Application, Boston Massachusetts, USA, 19-22 Sep. 1999

P. Mauron, Ph. M. Nellen, U. Sennhauser, M.N. Trutzel, D. Betz, L. Staudigel, V. Hagemann, M. Rothhardt, "Lifetime of Fiber Bragg Gratings Under Cyclic Fatigue", SPIE's International Symposium on Voice, Video, and Data Communications, Program on Optical Fiber Devices and Systems, VV12: Conference on Optical Fiber Reliability and Testing, Boston, Massachusetts, USA, 19-22 September 1999.

Barry G. Grossman, Li-Tien Huang, Paul J. Cosentino, and Wulf von Eckroth, "Three-Dimensional Structural Strain Measurement with the Use of Fiber-Optic Sensors", Transportation Research Record 1596, 45-50