

구조물 모니터링을 위한 헤테로 코어형 광센싱 시스템

김영복* · 이권순** · 와타나베카즈히로*** · 사사키히로유키*** · 최용운***

*부경대학교 공과대학 기계공학부

**동아대학교 공과대학 전기공학과

***SOKA대학 공학부

Hetero-core Spliced Fiber Optical Sensing System for an Environment Monitoring

YOUNG-BOK KIM*, KWON-SOON LEE**, KAZUHIRO WATANABE***, HIROYUKI SASAKI*** AND YONG-WOON CHOI***

*Faculty of Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**Dept. of Electric Engineering, Dong-A University, Busan, Korea

***Faculty of Engineering, Soka University, Tokyo, Japan

KEY WORDS: Hetero-core 헤테로코어, Optic fiber sensor 광파이버 센서, Optical time domain reflectometer(OTDR), Environment monitoring 환경 모니터링

ABSTRACT: A multi-purpose environmental monitoring system has been developed as a commercially available standard using the technique of hetero-core spliced fiber optic sensors, for the purposes of monitoring large-scale structures and preserving natural environments. The monitoring system has been tested and evaluated in a possible outdoor condition, in view of the full-scale operation at actual sites to be monitored. Additionally, the developed system in this work conveniently provides us with various options of sensor modules intended for monitoring such physical quantities as displacement, distortion, pressure, binary states, and liquid adhesion. Two channels of optical fiber line were monitored in each channel, three displacement sensor modules were connected in series, in order to examine the performance to a pseudo-cracking experiment in the outdoor situation and to clarify temperature influences on the system, in terms of the coupling of optical connectors and the OTDR stability. The results from the pseudo-cracking experiment agreed with the actual cracks, by means of calculation, based on the detected displacement values and their geometrical arrangement of the used sensor modules. The temperature change, ranging from 10 to 20 °C, resulting from the 10-days free running operation, was found to influence the system stability of $\pm 10\mu\text{m}$, primarily due to the coupling instability of the used optical connectors. It was found that fusion splicing, rather than the use of connectors, reduced the fluctuation down to $\pm 2\mu\text{m}$. The specification and performance of various option modules have been demonstrated to show the capability of inspecting various physical quantities by use of the single system, which would be suitable for multi-purpose environmental monitoring.

1. 서 론

최근 건축물이나 구조물의 노후화 및 자연재해에 따른 붕괴 등이 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 예를 들어 지진이나 태풍 등에 의해 발생하는 건물의 파괴 및 산사태 등은 우리 사회에 커다란 경제적 손실을 가져올 뿐 만 아니라 인간에게도 심각한 피해를 주게 된다. 이러한 문제를 사전에 예방하기 위한 환경모니터링 시스템은 이제 우리 사회에 필요불가결한 요소가 되었다. 지금까지는 전기식 스트레인 게이지가 건설현장주위 등의 환경모니터링을 위해 사용되어져 왔지만 수년 또는 수십년의 장기간에 걸친 환경모니터링에는 금속부식 및 전력손실 등의 이유로 적합하지 않다. 이와 달리 광파이버 센서는 내부식성은 말할 것도 없고 전자장 등에 대해서도 거의 영향

을 받지 않을 뿐 만 아니라 가볍고 신호의 왜곡이 적다는 이점이 있다. 또한 광파이버 자체를 센서 망으로 이용하면 원격 및 다점으로 분포계측이 가능하며 전력을 사용하지 않기 때문에 케이블 및 에너지 절약에도 기여하게 된다.

광파이버 자체가 센서기능을 하는 것으로는 BOTDR (Brillouin optical time domain reflectometer)나 FBG(Fiber bragg grating)등이 있다(권일범 등, 1999; 건설교통부, 1998; 이원재 등, 2001). 이와 같은 센서도 각각 장단점을 갖고 있지만 정도, 시공조건, 가격 등의 면에서 아직 어느 것 하나 시장을 확보하고 있지는 못하다.

예를 들어 BOTDR은 광파이버선상에 가해지는 변형을 분포적으로 계측할 수 있는 계측기술이지만 미약한 산란광의 파장 변화를 검출해야 할 뿐만 아니라 계측시스템 전체가 상당히 고가이다. 또한 광파이버 선 전체에 일정한 장력을 가해야 하며 측정대상에 센서를 고정하기가 상당히 곤란하다.

FBG는 미소변화도 민감하게 계측할 수 있는 반면 일정 장

교신저자 김영복: 부산광역시 남구 용당동 산100

051-620-1584 kpijwoo@pknu.ac.kr

력이 광파이버 자체에 가해지기 때문에 BODTR과 마찬가지로 광파이버가 끊어지는 등의 문제가 발생한다. 또한 센서자체가 온도변화에 극도로 민감하기 때문에 온도변화에 대한 보상 고도의 기술이 요구된다. 온도보상문제는 실험실 수준이 아닌 실외의 가혹한 계측환경을 고려한다면 이를 극복하기 위한 상당한 보상회로 및 알고리즘이 필요하게 된다. 이것은 결국 시스템구성을 위한 가격상승의 원인이 된다.

저자 등은 이와 같은 문제점을 해결하고자 헤테로코어형(Hetero-core type) 광파이버센서를 처음으로 개발하여 수년간에 걸쳐 다양한 연구를 수행해 오고 있다(Iga et al., 2003; 2004; Sasaki et al., 2004; Watanabe et al., 1999; 2000). 헤테로 코어형 광파이버센서는 간단하면서도 큰 곡률 반경에 있어서도 전달손실이 발생하여 민감한 광 손실특성을 나타낸다. 또한 원리상 온도의존성이 거의 없어 온도보상이 필요 없는 것도 가장 큰 장점 중의 하나이다.

본 논문에서는 헤테로코어형 광파이버센서를 이용하여 각종 환경정보를 모니터링하는 광네트워크형 멀티환경 모니터링 시스템을 제품모델로 개발하여 실제 환경에서의 사용을 전제로 종합적인 평가를 수행하였다. 지금까지 저자 등이 수행한 실험실 환경에서의 단독 모듈에 대한 평가와는 달리 센서 모듈의 접속 및 배치를 포함한 실용적 관점에서 계측시스템 전체의 환경변화에 대한 종합적인 평가를 수행하였다. 그 결과를 본 논문에서 소개한다.

2. 기반기술로서의 헤테로코어형 광파이버센서

우선 변위계측센서로서의 헤테로코어형 광파이버센서의 원리, 변위센서나 액체검출센서의 특성 등에 대한 개략적인 내용을 기술한다. 그리고 멀티환경 모니터링시스템의 성능평가에 대한 이해를 돕는 수준에서 헤테로코어형 광파이버센서에 대해 개략적으로 설명한다.

헤테로코어형 광파이버센서는 전송로 역할을 하는 광파이버를 임의의 위치에서 절단하고 그 사이에 전송로보다 작은 직경의 광파이버를 삽입하여 융착한 것이다. 이 헤테로코어부가 구부러지게 되면 광누설이 생기게 되며 변형정도에 따른 광누설량이 선형적인 특성을 갖는 것이 가장 중요한 특징이며 이것은 Fig. 1에 나타난 것과 같다(Fig. 1 참조). 이와 같은 변형과 광누설량과의 선형적인 관계를 이용하면 변위 센서 등 각종 센서로 이용할 수 있게 된다.

광파이버센서를 이용한 액체감지는 헤테로코어부에 금속박막을 증착시켜 얻을 수 있는 SPR(Surface plasmon resonance)의 원리를 이용한 것이다. 이 원리를 이용하면 헤테로코어부에 부착되는 액체의 굴절률을 계측할 수 있게 된다. 액체감지에 사용되는 헤테로코어형 광파이버센서는 코어직경 $50\mu\text{m}$ 의 멀티모드 광파이버를 전송로로 하여 헤테로코어부에 코어직경 $3\mu\text{m}$ 의 싱글모드 광파이버를 사용하는 50-3-50형 헤테로코어 센서로, 백색광원과 스펙트럼 분석기를 사용한 실험에서는 고정도 굴절률 감지결과를 얻을 수 있었다(Iga et al., 2003; 2004; Sasaki et al., 2004; Watanabe et al., 1999; 2000). 본 연구에서

는 액체의 부착으로 발생하는 손실량을 파장 850nm 의 OTDR를 사용하여 액체감지기능을 실현하고 있다.

예를 들어 Fig. 1은 변위에 대한 광변화량과의 관계를 나타낸 것이다. 이것은 Fig. 2와 같이 개발된 센서를 센서 한쪽이 고정되고 다른 쪽은 임의로 이동 가능하도록 설치하여 수행한 실험결과를 나타낸 것이다. 센서의 이동은 센서계측범위를 고려하여 5mm 까지로 하였고 이때 계측정도는 $0.5\mu\text{m}$ 이었다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 변위에 대한 광누설량의 관계가 선형적임을 알 수 있으며 결과적으로 광누설량을 계측함으로써 변위를 계측할 수 있음을 의미한다.

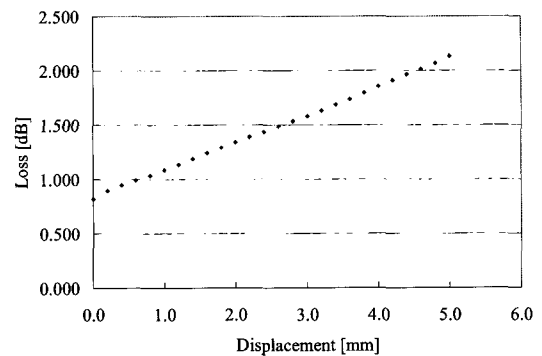
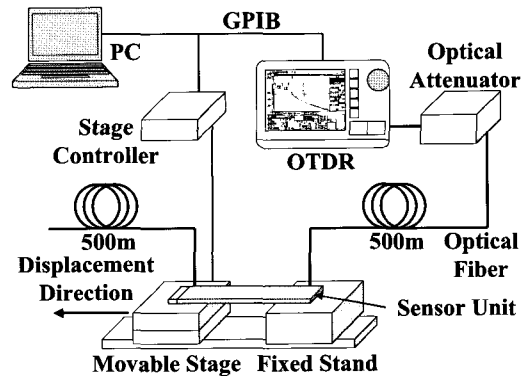
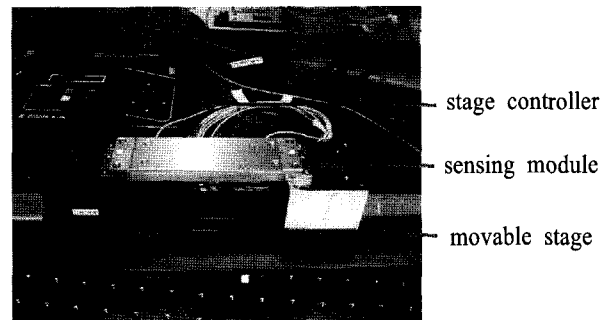


Fig. 1 Experiment result(loss to displacement)

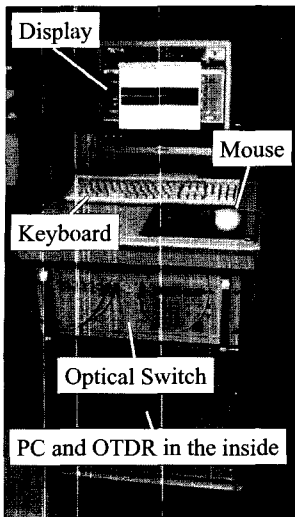


(b) Schematic diagram for experiment

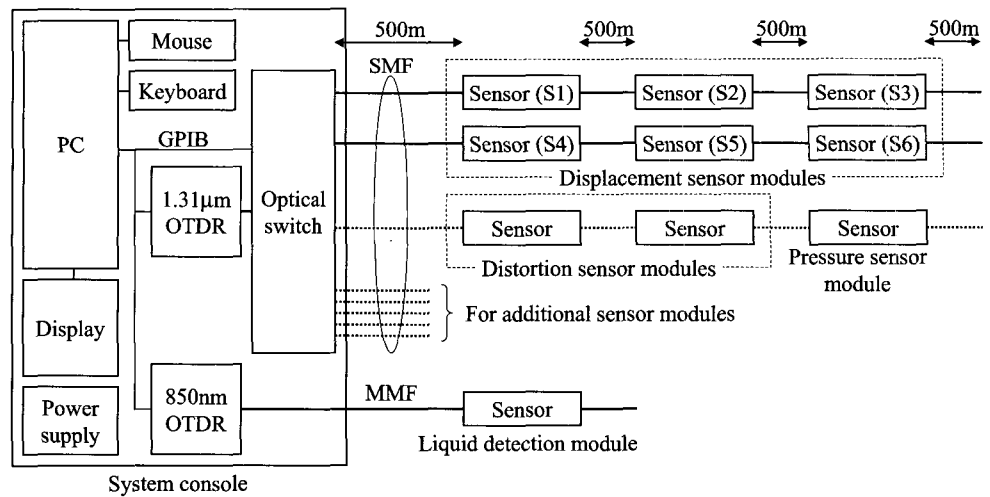


(a) Photo of experimental set

Fig. 2 Schematic diagram for experiment



(a) System console



(b) Schematic drawing of monitoring system

Fig. 3 Developed multi environment monitoring system

3. 멀티환경 모니터링 시스템의 개요와 환경 실험

3.1 시스템의 구성과 개요

Fig. 3에 본 연구에서 개발한 멀티환경모니터링시스템의 구성을 나타내고 있다. 계측된 데이터는 GPIB를 통하여 PC로 전송된다. 광스위치는 채널 수 8개로 각 채널의 삽입손실은 1dB 이하이고 각 채널간의 절환시간은 1초이다. 본 시스템으로는 각 채널당 1개의 광파이버에 3개의 센싱모듈을 접속하면 최대 24개의 다점 계측이 가능하다.

각 채널을 통해 계측되어진 손실량으로부터 변위량을 계산하기 위해 계측용 소프트웨어에는 손실-변위특성곡선에 대한 보간 연산용 프로그램이 추가되어져 있다. 예를 들어 Fig. 1의 손실-변위 특성곡선은 변위 0mm로부터 최대 변위량 5mm까지 0.1mm 간격으로 51점의 손실량을 획득하고 이렇게 구한 근사화 곡선을 이용하여 OTDR의 최소분해능인 0.001dB 간격으로 보간한 것이다. 1.31µm 선에는 표준변위센싱모듈 외 고성능의 변형센싱모듈, 압력센싱모듈, Binary-스위칭 모듈 등을 직렬 및 병렬로 접속하여 계측하는 것도 가능하다.

3.2 표준변위 센싱모듈의 다점계측 실험

본 연구에서는 멀티환경모니터링시스템의 2채널을 이용하여 표준변위 센싱모듈을 광파이버 1개 선상에 3개를 직렬로 접속하여 광파이버를 절환하는 다점 계측시스템의 계측실험을 수행하였다. 표준변위 센싱모듈은 알루미늄케이스 및 변위곡률변환기로 구성된다. 길이 140mm, 폭 40mm, 두께 10mm, 무게 130g으로 특별한 방수기능을 갖고 있지는 않다.

이러한 준비아래 본 연구에서는 다점의 표준변위센싱모듈을 균열발생장치에 가설하여 실험실의 환경에서 10일간 모니터링을 수행하였다.

Fig. 4는 실험에 사용한 유사균열발생장치를 나타내고 있다.

Fig. 4 (a)는 균열발생 전, Fig. 4 (b)는 임의의 균열이 발생한 경우를 나타내고 있다. Fig. 4에 나타난 것과 같이 균열발생 방향에 수직으로 표준변위센싱모듈 1~5(센서 S1~S5)를 배치하였다. 센서 S6은 균열발생과는 상관없이 베이스 플레이트 A의 한쪽에 균열과는 상관없이 변위가 일정하게 되도록 고정하였다. 센서 S6의 계측값이 변동하는 경우는 센서 및 센서고정판의 온도변화나 OTDR의 계측오차가 변한 경우를 생각할 수 있다.

OTDR의 계측시간은 평균화 회수에 거의 비례한다. 또한 샘플링 수, GPIB (General Purpose interface bus) 통신 등 기기 고유의 계측조건에도 관계가 있다. 예를 들어 본 연구에서 이용한 OTDR에서는 평균화 횟수를 2¹⁵으로 설정하고 Fig. 3에 나타난 것과 같이 계측거리 2km에 걸쳐 3점을 직렬로 센싱모듈을 설치하여 계측을 수행하였다. 이 경우 1개 선당 계측시간은 약 26초였다. 평균화처리횟수를 감소시키면 계측시간은 10초 전후로 떨어뜨릴 수 있게 된다. 다소의 정도저하를 허용하는 용도에서는 계측시간 단축도 가능하다.

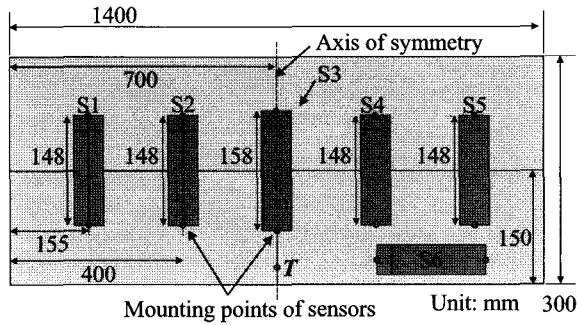
3.3 실외의 계측에 있어서의 동작특성

유사균열발생측정실험에 앞서 실외에 설치한 유사균열발생 장치의 주위온도 및 기상변화에 의한 시스템의 변동을 검토하였다.

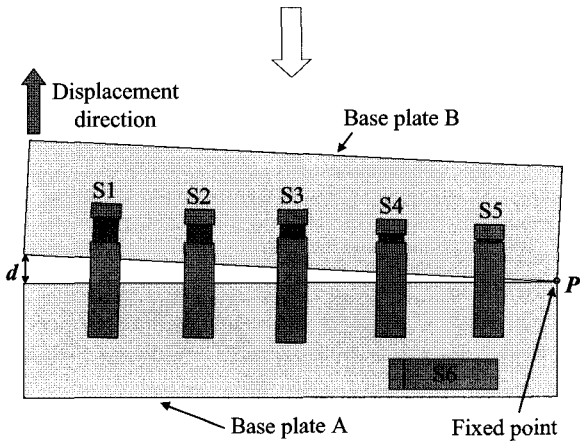
여기서는 균열이 발생하지 않은 상태(Fig. 4 (a))의 균열발생 장치는 실외에 설치하였고, 시스템 콘솔 등은 실내에 설치하여 온도변화에 대한 시스템의 안정성 등을 검토하였다.

Fig. 5는 10일간에 걸쳐 실외환경에서 계측한 OTDR 및 고정판의 온도변화와 센서 S1, S2 및 S4의 측정값 변동을 나타내고 있다.

이때 OTDR의 온도변화는 광원 유니트 광출력용 파이버 컨넥터부의 온도변화를 계측한 값으로 대체하였다.



(a) General view of arrangement with no cracking



(b) Case with displacement d

Fig. 4 General view of the experiment setup for each displacement sensor modules on the pseudo-cracking plate

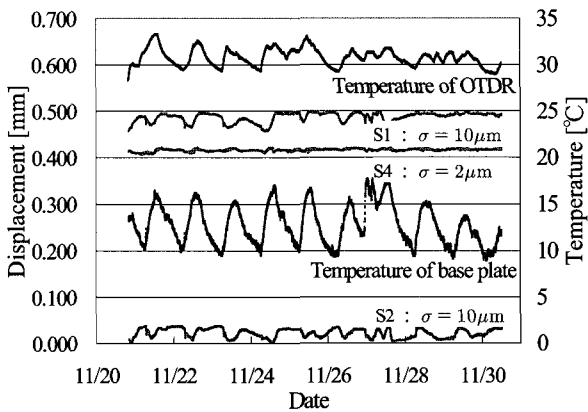


Fig. 5 Variations of displacements and temperatures of OTDR and base plate as a function of the date

또한 고정판의 온도는 점 T에서 계측하였다. 각 변위센서 모듈에는 임의의 적당량의 오프셋 변위량이 주어진다. 여기서 S1은 약 0.48mm, S4는 약 0.42mm, S2는 약 0.02mm 정도로 설정하였다. 또한 파이버 컨넥터부의 온도영향을 명확하게 하기 위해 센서 S4는 광파이버선과 융착하는 방법으로 접속하였고 나머지는 컨넥터를 이용하여 접속하였다. 실외온도는 낮과 밤의

기온차 때문에 고정판은 약 10 ~ 20 °C에 걸쳐 반복하여 변하고 있다. 이와 같은 온도변화에 대해 융착하여 접속한 센서 S4의 계측오차는 임의로 부여한 오프셋 변위를 중심으로 $\pm 2\mu\text{m}$ 였다. 한편 컨넥터를 이용하여 접속한 센서 S1 및 S2는 $\pm 10\mu\text{m}$ 정도의 오차를 갖고 변동하였다. 이것은 헤테로코어형 광파이버센서의 원리상 온도변화에 대해서는 거의 영향을 받지 않으며 단지 접속에 있어 사용한 컨넥터의 영향이 오차발생의 주된 요인이 된다는 사실을 확인할 수 있다. 물론 센서 소자인 헤테로코어부를 고정하는 부분의 열적변화가 커지게 되면 이에 대한 영향도 클 수밖에 없으나 FBG등에 비하면 그 영향은 극단적으로 미미하다. 전술한 것과 같이 OTDR의 계측오차로부터 연산되어지는 센싱모듈의 계측오차는 거의 $\pm 1\mu\text{m}$ 이기 때문에 실외에 있어서도 융착하는 방법으로 접속하게 되면 OTDR의 계측오차 한계까지 계측할 수 있게 된다. 본 실험에서는 S6의 변화는 S1 또는 S2와 같은 정도이고 주어진 온도변화에 대한 고정판 금속의 열팽창은 그렇게 크지 않았다. 이것은 센싱모듈과 고정판을 같은 재질의 금속을 사용하였고, 또한 팽창방향이 서로 상쇄되는 관계 때문이기도 하다. 상쇄되지 않는 열적변화는 센싱모듈고정용 나사 등에 의해 흡수되어 단순한 열팽창계수로부터 계산되는 열적변화량 보다 작은 값이 관측된다고 볼 수 있다.

4. Multi 모니터링용 센서모듈의 사양

4.1 고성능 변형 센서

고성능 변형 센싱 모듈의 개관을 Fig. 6에 나타내었다. 전술한 표준변위센싱모듈을 이용한 실험에서도 센서의 온도의존성이 지극히 낮다는 것을 확인하였다. 보다 열악한 환경에서도 온도 등의 환경에 대해 계측정도가 보장될 수 있도록 변형센서모듈의 내부 재료를 열팽창성이 낮은 재료로 제작하였다. 단순히 열팽창계수만으로 표준센싱모듈과 비교할 경우 Fig. 6의 변형센싱모듈이 1/20정도로 작았다. 또한 본 모듈은 관통형의 로드를 이용하여 압축 및 팽창형의 변위에 대해서도 계측이 가능하다. 'O' 링 및 패킹재료를 사용하여 완전 방수형으로 제작하였다.

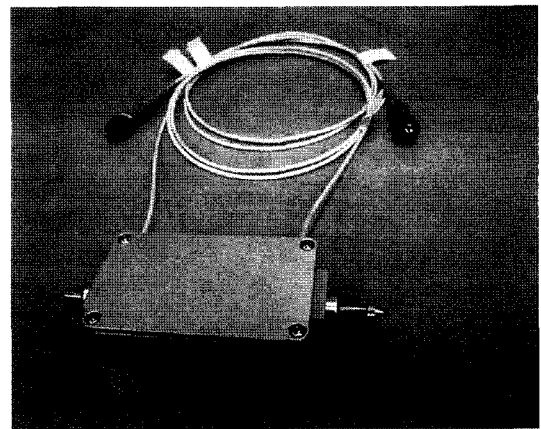


Fig. 6 View of the developed high performance distortion sensor module

4.2 압력센서

압력센싱모듈의 개관을 Fig. 7에 나타내었다. 넓은 범위에서의 Multi 환경모니터링 피측정대상으로는 하천, 댐 등의 수위 및 지하수위 등을 들 수 있다. Fig. 7의 압력센서는 압력의 변화에 따른 벨로우즈의 변위를 헤테로코어부의 광변화량으로 변환하여 계측하는 것이다. (a)는 압력센서의 구성도를 나타내며 (b)는 제작된 실물사진이다. 크기는 직경 80mm, 높이 190mm로 무게는 1150g 정도이다. 압력계측범위는 0~100kPa이지만 내부 벨로우즈 구조를 바꾸게 되면 다양한 범위의 압력을 계측할 수 있게

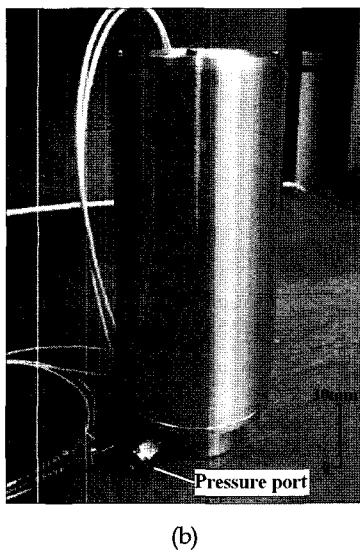
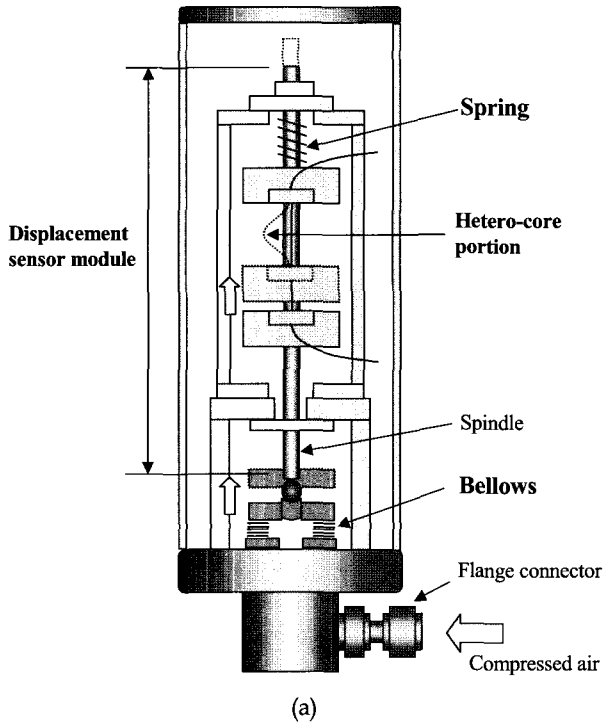


Fig. 7 View of the developed pressure sensor module

된다. 계측정도는 Full-scale이 100kPa일때 0.3%FS로 비교적 높은 정도를 얻을 수 있었다. 압력증가 및 감소의 반복적인 계측에서는 약 2%FS의 히스테리시스 특성을 나타내었다. 이것은 벨로우즈, 스프링 등의 탄성체 고유의 탄성히스테리시스가 지배적으로 영향을 미치고 있기 때문이다.

5. 결 론

본 연구에서는 각종 환경정보를 하나의 시스템으로 모니터링 하는 시스템을 제품모델로 개발하여 실용적 관점으로부터 계측 시스템 전체의 환경변화에 대한 종합적 평가를 수행하였다. 2채널의 광파이버선 각각에 3개의 표준변위 센싱모듈을 직렬로 접속한 시스템을 유사 균열발생장치에 설치하여 실외환경에서의 온도변화, 균열상황에 대한 성능을 콘넥터 접속이나 OTDR성능, 계측시간, 계측오차의 관점에서 검토하였다. 계측시스템 전체의 환경변화에 대한 평가결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 용착하여 접속한 센서모듈의 경우 10일간에 걸친 실제 환경에서의 계측에서는 주야에 걸친 10~20 °C 온도변화에 대해 계측오차는 ± 2µm 정도였다.

(2) 광콘넥터 접속의 경우 계측오차는 ± 10µm 정도였다. 광콘넥터 접속의 경우 온도에 대한 영향이 상당히 크다는 것을 알 수 있으며 이것을 용착접속으로 하게 되면 OTDR의 계측한 계까지의 정도로 계측이 가능하게 된다.

결국 모니터링 대상의 온도변화가 큰 경우에는 온도변화를 고려한 구조의 고성능 센싱모듈을 사용하면 된다. 즉, 필요로 하는 정도에 따라 콘넥터 접속방법을 적절하게 채택하면 목표로 하는 정도로 계측이 가능하게 된다.

본 연구에서는 Multi 환경모니터링을 위한 상용화 모델 수준의 센싱모듈을 소개하였다. 환경모니터링 뿐 만 아니라 다양한 형태의 물리적 특성을 계측할 수 있는 센싱모듈로의 확장이 가능함을 실험결과 및 개발된 센서를 통해 확인 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부 과학재단 목적기초연구(R01-2005-000-10418-0) 지원으로 연구되었습니다.

참 고 문 헌

건설교통부 (1998). 광섬유 Frating 을 이용한 시설물 사전 감시 시스템 개발, 한국과학기술원주관연구기관, pp 1-60.
 권일범, 최만용, 김민수 (1999). “광섬유 브래그 격자 센서의 변형을 감지도”, 한국구조물진단학회 제3권, pp 237-242.
 이원재, 김대규, 이우진 (2001). “광섬유 격자센서를 이용한 매입 말뚝의 하중전이 측정”, 대한토목학회논문집 제21권, 제3-C 호, pp 311-319.

- Iga, M., Seki, A., Kubata, Y. and Watanabe, K. (2003). "Acidity measurements based on a hetero-core structured fiber sensor", *Sensors and Actuators*, B96, pp 234-238.
- Iga, M., Seki, A. and Watanabe, K. (2004). "Hetero-core structured fiber optic surface plasmon resonance sensor with silver film", *Sensors and Actuators*, B101, pp 368-372.
- Sasaki, H., Watanabe, K., Kubota, Y. (2004). "A hetero-core splice fiber optic displacement sensor and the accuracy evaluation", *Trans. SICE*, Vol 40, No 10, pp 981-987.
- Watanabe, K., Matubara, S. and Kubota, Y. (1999). "A hetero-core fiber sensor using ODTR", *Trans. SICE*, Vol 35, No 1, pp 32-37.
- Watanabe, K., Tajima, K. and Kubota, Y. (2000). "Macrobending characteristic of a hetero-core splice fiber optic sensor for displacement and liquid detection", *IEICE Trans.*, 83-C-3.
-

2007년 3월 17일 원고 접수

2007년 5월 28일 최종 수정본 채택