

헤테로코어형 광파이버 압력센서개발을 위한 기초연구

A Basic Study on Development of the Hetero-core Type Fiber Optic Pressure Sensor

김 영 복
Y. B. Kim

Key Words : Hetero-core(헤테로 코어), Fiber optic sensor(광파이버 센서), OTDR(광 펄스 측정기), Displacement and distortion(변위 및 변형), Pressure sensor(압력센서)

Abstract: A new type fiber optic sensing system has been developed as a commercially available standard using the technique of hetero-core spliced fiber optic sensor, for the purposes of monitoring large scaled structures, preserving natural environments and measuring physical phenomena. The sensing system has been tested and evaluated in a possible outdoor condition in view of the full scaled operation at actual sites to be monitored. Additionally, the developed system in this work conveniently provides us with various options of sensor modules intended to measure such physical quantities as displacement, distortion, pressure, binary states and liquid adhesion. The experiment study has been performed to examine the performance to a pseudo-cracking experiment in the outdoor situation, and to clarify temperature influences to the system in terms of the coupling of optical connectors and the OTDR stability. It has been verified that the sensing system is robust to the temperature change ranging from the general condition to the hard condition. Especially, in this study, the specification and performances of the pressure sensor have been demonstrated to show the capability of inspecting various physical quantities.

1. 서 론

파이버 센서는 원거리 다점계측이 가능하고 전자장노이즈에 강하기 때문에 주로 건축물이나 구조물의 노후화 및 자연재해에 따른 붕괴 등을 실시간으로 감시하기 위한 환경모니터링 시스템 구축용으로 주목 받고 있다. 일반적으로 전기식 스트레인 게이지가 건설현장을 비롯한 자연환경모니터링시스템 구축에 주로 사용되어지고 있지만, 수년 또는 수십년의 장기간에 걸친 환경모니터링에는 금속부식 및 전력손실 등의 문제 때문에 적합하지 않다. 이와는 달리 광파이버센서는 내부식성은 물론 전자장 등에 대해서도 거의 영향을 받지 않을 뿐 만 아니라, 가볍고 신호왜곡이 적어 장기수명이 요구되거나 고전압에 노출되어 있는 지하철 환경 등에서도 아무런 문제없이 사용할 수 있다. 그리고 광파이버선 자체를 센서

망으로 이용하면 원격 및 다점으로 분포계측이 가능하다.

광파이버선 자체가 센서기능을 하는 것으로는 BOTDR(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)나 FBG(Fiber Bragg Grating)등이 있다.^{1~4)} 이와 같은 센서는 각각 장단점을 갖고 있지만 정도, 시스템 구성조건, 가격 등의 면에서 아직 어느 것 하나 시장을 확보하고 있지는 못하다. 저자 등은 이와 같은 문제점을 해결하고자 헤테로코어형 광파이버센서를 처음으로 개발하여 수년간에 걸쳐 다양한 연구를 수행해 오고 있다.^{5~11)} 헤테로코어(Hetero-core)형 광파이버센서는 비교적 간단하고 큰 곡률 반경에 있어서도 전달손실이 발생하며 민감한 손실특성을 나타낸다. 또한 원리상 온도의존성이 거의 없어 온도보상이 필요 없는 것도 가장 큰 장점 중의 하나이다. 따라서 이러한 광파이버센서의 특징을 잘 이용하면 기존의 환경모니터링시스템 구축을 위한 목적뿐만 아니라 다양한 분야로의 적용도 가능하다. 예를 들어 압력센서 및 네트워크기반의 보안시스템으로의 확장

접수일 : 2010년 월 일, 게재확정일 : 2010년 월 일
김영복(책임저자) : 부경대학교 기계공학부, (주)코어시스템
E-mail : core@pknu.ac.kr, Tel : (051)629-6197

도 가능하지만 기존의 광파이버센서가 갖는 여러 가지 단점을 보완하지 않으면 안 되는 문제도 다양하게 존재한다.

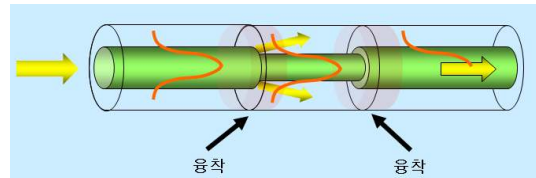
토목·건축분야 외 다른 목적으로 광파이버센서를 응용하고자 하는 연구개발 노력도 진행되어 적용된 예도 있다. 그 대표적인 것이 FBG이며 압력 및 온도 계측용 센서가 개발되어 상용화 되어 있기도 하다. FBG는 물리적 변형 혹은 변위가 센서부에 가해지게 되면 광파이버를 통해 입력된 광신호의 후방산란광을 검출하고 변형이 가해지기 전의 파장과 비교분석하여 변위와 변형정도를 계측한다. 그러나 센서부의 최대 허용변위는 수 μm 로 워낙 미소하기 때문에 변형에 따른 파장변화 또한 지극히 작다. 이러한 파장변화를 분석하기 위해서는 고가의 데이터로거가 반드시 필요하게 된다. 따라서 상용화 되어 있는 기존의 압력센싱시스템과 같이, 센서하나에 하나의 앰프로 이루어지는 단품형태의 시스템 구성은 가격 등 여러 가지 이유로 사실상 불가능하다는 것을 의미한다. 광파이버센서가 갖는 우수성에도 불구하고 특정한 분야 외는 아직 이렇다 할 적용 예를 찾아볼 수 없는 원인 중 하나가 이러한 이유 때문이기도 하다. 이와 달리 본 논문에서 소개하는 헤테로코어형 광파이버센서는 기존의 광파이버센서가 갖는 기술적인 우수성은 그대로 유지하면서, 압력센서 등의 단일 모듈형태의 센서개발에도 지극히 용이한 특성을 가지고 있다. 즉, 각종 새로운 센싱모듈 개발이 용이하고 신호처리상에서의 어려움이 없으며 기존 스트레인지지와 같은 수준의 주의와 지식만으로도 충분한 이용이 가능하다. 따라서 본 논문에서는 헤테로코어형 광파이버센서의 센싱원리와 물리적 특성을 검토하고 응용 예를 통해 압력센서를 비롯한 다양한 목적으로의 응용기술개발 가능성을 검토하고자 한다.

2. 기반기술로서의 헤테로코어형 광파이버 센서

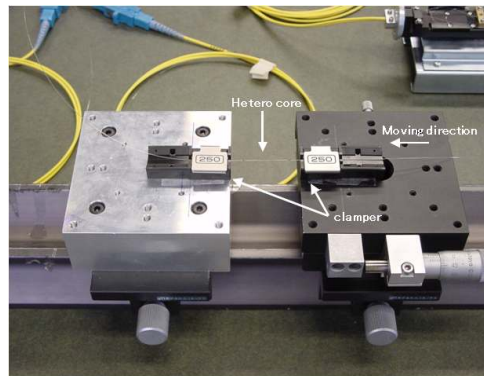
우선 변위계측센서로서의 헤테로코어형 광파이버 센서의 원리에 대한 개략적인 내용을 기술한다. 그리고 멀티환경 모니터링시스템의 성능평가를 통해 헤테로코어형 광파이버센서의 유용한 특성에 대해서도 설명한다.

헤테로코어형 광파이버센서는 Fig. 1 (a)에 나타난 것과 같이 신호전송로 역할을 하는 직경 $9\mu\text{m}$ 광파이버를 절단하고 그 사이에 신호전송로보다 작은 직경 $5\mu\text{m}$ 의 광파이버를 삽입하여 용착기로 접합한 것

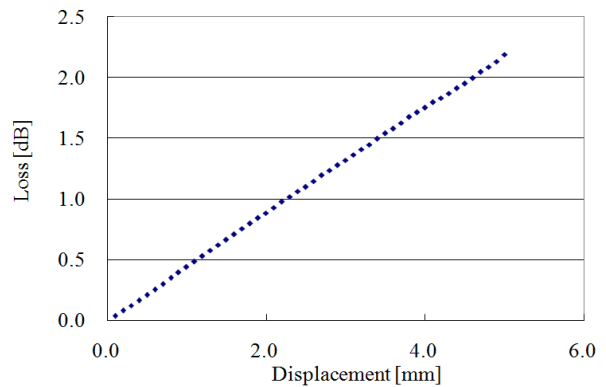
이다. 직경이 다른 광파이버가 접합된 부분을 특히 헤테로코어부(Hetero-core Portion)라 한다. 헤테로코어부에서는 직경이 다른 광파이버선이 접합되어 있기 때문에 변형(구부러짐)이 발생하지 않은 상태에서도 광전달 손실(광누설)이 발생하게 된다. 그런데 이 부분이 어떠한 변형으로 구부러지게 되면 광누설량은 더욱 증가하게 된다. 따라서 물리적 변형에 대해 코어부가 구부러지는 구조로 센서를 설계하면 변위 또는 변형센서로 사용할 수 있고, 다양한 목적의 센서로도 응용이 가능하게 된다. 이러한 것이 가능한 것은 헤테로코어부의 변형(구부러짐)에 대한 광누설량이 선형적으로 변하는 특성 때문이다. 선형성을 확인하기 위해 Fig. 1의 (b)와 같은 고정도 이송장치를 이용하였으며 실험결과를 Fig. 1 (c)에 나타내었다. 이때 변위는 5mm로 설정하였는데 계측정도



(a) Hetero-core portion



(b) Photo of the experiment apparatus



(c) Test result (loss vs. displacement)

Fig. 1 Test equipment and result

는 $0.5\mu\text{m}$ 이었다. Fig. 1로부터 알 수 있듯이 변위에 대한 광누설량의 관계가 지극히 선형적이다. 따라서 광누설량을 계측함으로써 변위를 고정도로 계측할 수 있음을 알 수 있다.

3. 내환경 평가실험을 통한 센서 특성 분석

3.1 표준변위 센싱모듈의 다점계측 실험

여기에서는 광센서 기반 변위계측시스템의 내환경 실험결과를 통해 센서로서 갖추어야 할 기본적인 특성을 평가하도록 한다. 여기서 사용한 변위센서 모듈은 알루미늄케이스 및 변위곡률변환기(즉, 센서 직선 변위가 헤테로코어부에 벤딩이 발생되도록 하는 구조)로 구성되며, 길이 140mm, 폭 40mm, 두께 10mm, 무게 130g으로 특별한 방수기능을 갖고 있지는 않다. 이러한 준비아래 다점의 변위센서 모듈을 균열발생장치에 설치하여 실외 환경에서 10일간 모니터링을 수행하였다.

Fig. 2는 실험에 사용한 유사균열발생장치를 나타내고 있다. Fig. 2 (a)는 균열발생 전, Fig. 2 (b)는 임의의 균열이 발생한 경우를 나타내고 있다. Fig. 2

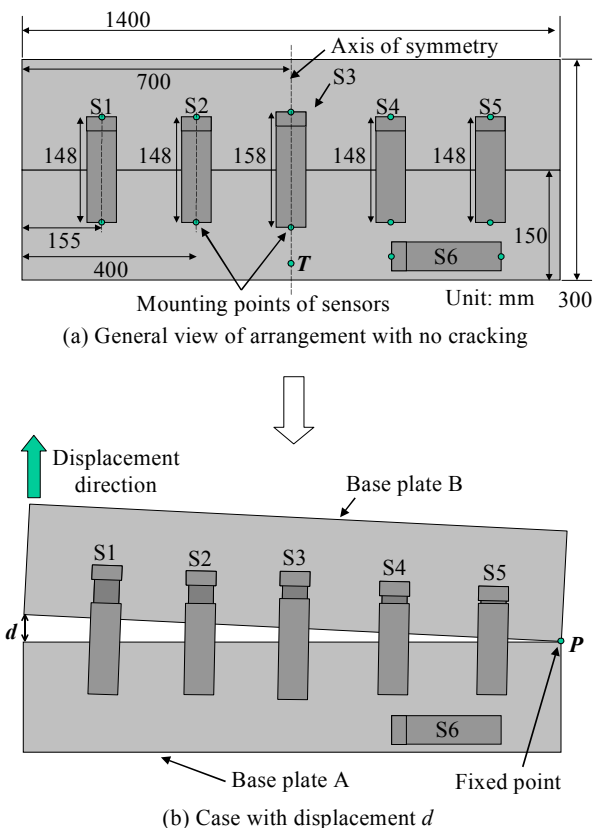


Fig. 2 General view of the experiment setup for each displacement sensor modules on the pseudo-cracking plate

에 나타난 것과 같이 균열발생 방향에 수직으로 변위센서 모듈 1~5(센서 S1~S5)를 배치하였다. 센서 S6은 균열발생과는 상관없이 베이스 플레이트 A의 한쪽에 변위가 일정하도록 고정하였다. 센서 S6의 계측값이 변동하는 경우는 센서 및 센서고정판의 온도변화나 OTDR의 계측오차가 변한 경우라 생각할 수 있다.

3.2 실외 환경에서의 계측실험

균열이 발생하지 않은 상태(Fig. 2 (a))로 하여 균열발생장치를 실외에 설치하였고, 시스템 콘솔 등은 실내에 설치하여 온도변화에 대한 시스템의 안정성 등을 검토하였다.

Fig. 3은 10일간에 걸쳐 실외환경에서 계측한 OTDR 및 고정판의 온도변화와 센서 S1, S2 및 S4의 측정값 변동을 나타내고 있다. 이때 OTDR의 온도변화는 광출력용 광파이버 컨넥터부의 온도변화를 계측한 값으로 대치하였다. 또한 고정판의 온도는 점 T에서 계측하였다. 편의상 각 변위센서모듈에는 임의의 적당량의 오프셋 변위량을 설정하였다. 여기서 S1은 약 0.48mm , S4는 약 0.42mm , S2는 약 0.02mm 정도로 설정하였다. 또한 광파이버 컨넥터부의 온도영향을 명확히 파악하기 위해 센서 S4는 광파이버선과 용착하는 방법으로 접속하였고 나머지는 컨넥터를 이용하여 접속하였다. 실외온도는 낮과 밤의 기온차 때문에 고정판은 약 $10\sim 20^\circ\text{C}$ 에 걸쳐 반복하여 변하고 있음을 그림으로부터 확인할 수 있다.

이와 같은 온도변화에 대해 용착하여 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.

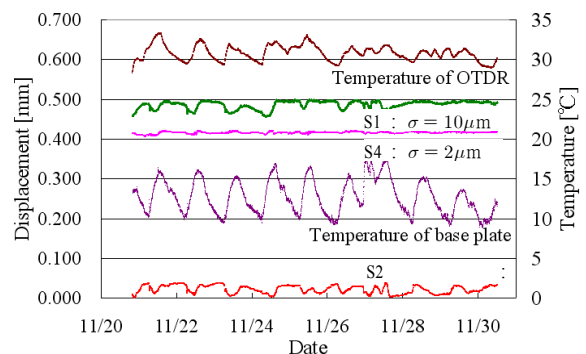


Fig. 3 Variations of displacements and temperatures of OTDR and base plate as a function of the date

이것은 헤테로코어형 광파이버센서의 원리상 온도 변화에 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 센싱 모듈 고정용 나사 등에 의해 흡수되어 단순한 열팽창계수로부터 계산되는 열적변화량보다 작은 값이 관측되었다고 볼 수 있다.

3.3 광범위한 온도변화에 대한 영향 검토

3.1 및 3.2절에 소개한 실험보다 열악한 환경에 노출되었을 경우의 센서특성을 알아보았다.

방수형으로 제작된 센서를 온수조에 넣고 온도를 $30^{\circ}\text{C}\sim 90^{\circ}\text{C}$ 영역에서 변화시킬 때의 센서가 받는 영향을 평가하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 계단상으로 나타난 선은 온도변화를 나타내며 크게 두 개의 직선으로 나타난 선은 OTDR로 계측한 센서의 광량변화를 나타내고 있다. 온도는 10°C 에서 90°C 까지 변화시켰으며 이때 광량변화는 0.01[dB] 이었다. 이것은 OTDR의 분해능에 해당하는 변화량으로 온도변화에 대해 센서특성이 거의 영

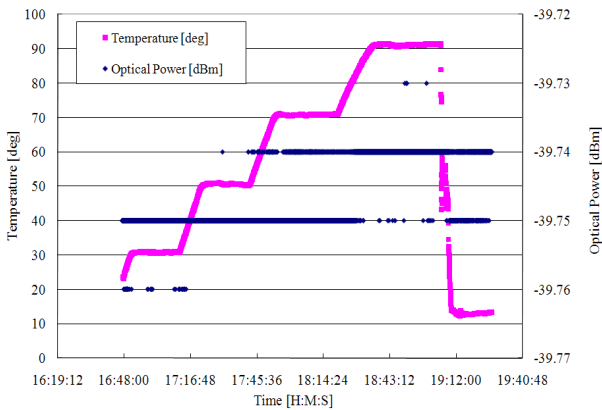
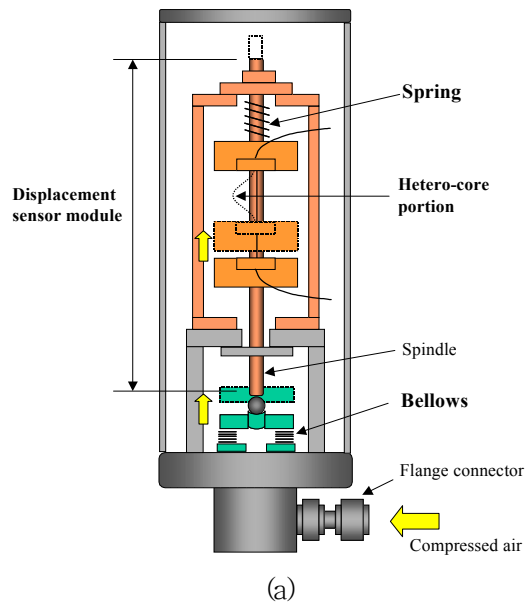


Fig. 4 Temperature change vs. optical power loss

향을 받지 않음을 의미한다. 이것으로부터 헤테로코어형 광파이버 센서의 온도변화에 대한 강인성이 실험으로 검증되었다고 할 수 있다.

4. 압력 센서 특성

시험용으로 개발한 압력센싱모듈의 사진과 개략도를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에 나타낸 압력센서는 앞서 기술한 변위센서를 기반으로 제작한 것이며, 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 $0\sim 100\text{kPa}$ 이지만 내부 벨로우즈 구조를 바꾸게 되면 다양한 범위의 압력을 계측할 수 있게 된다. 센서의 성능테스트를 위한 실험장치 구성도는 Fig. 6과 같다. 이것을 이용



(a)



(b)

Fig. 5 View of the developed pressure sensor module

하여 압력센서 특성실험을 수행하였으며 실험결과를 Fig. 7에 나타내었다. 실험은 가압과 감압을 반복하는 형태로 5회에 걸쳐 실행하였다. 실험결과로부터 계측정도는 Full-scale이 100kPa일 때 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 때문으로 확인되었다. 그럼에도 불구하고 반복적으로 수행한 실험결과가 중첩되어 나타날 정도로 계측신호의 재현성이 뛰어나 고정도 센서로서의 충분한 신뢰성이 보장됨을 알 수 있다.

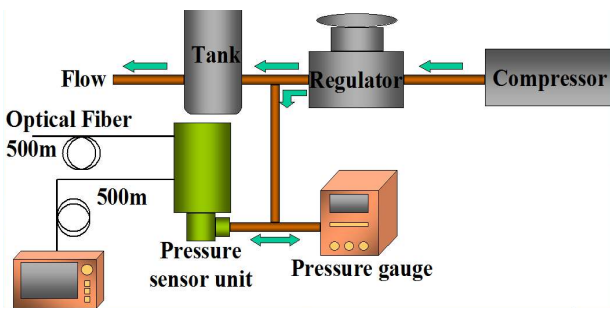


Fig. 6 Schematic diagram for the pressure sensor performance test

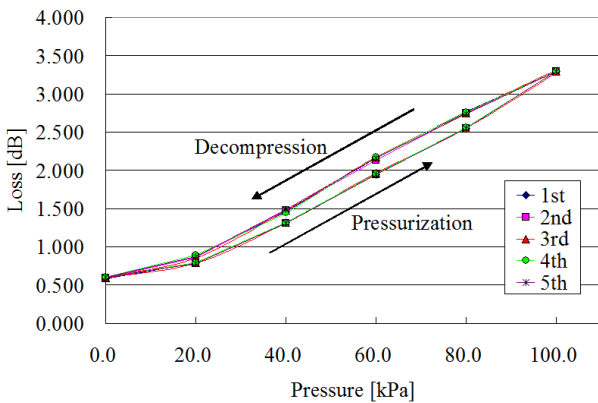


Fig. 7 Experiment results (loss vs. pressure)

5. 결 론

본 연구에서는 각종 물리특성을 하나의 시스템으로 모니터링하는 광파이버 계측장치를 제품모델로 개발하고, 실용적 관점으로부터 시스템 전체의 환경변화에 대한 종합적 평가를 수행하였다. 개발된 센서의 특성을 알아보기 위해 표준변위 센싱모듈을 직렬로 접속한 시스템을 유사 균열발생장치에 설치하고, 실외환경에서의 온도변화, 균열상황에 대한 성능을

컨넥터 접속이나 OTDR성능, 계측시간, 계측오차의 관점으로부터 검토하였다. 특히 개발된 헤테로코어형 광파이버센서는 양호한 선형성 뿐 만 아니라 온도영향을 거의 받지 않기 때문에 열악한 환경에서도 우수한 센싱성능을 확보할 수 있게 된다. 즉 환경모니터링 뿐 만 아니라 다양한 형태의 물리적 특성을 계측할 수 있는 센싱모듈로의 확장이 가능함을 실험결과로부터 확인하였다. 특히 시작품형태로 제작된 광파이버 압력센서에 대한 성능분석과 평가를 통해 그 유용성을 충분히 검증하였다.

참고 문헌

- 1) Andreas Othonos and Kyriacos Kalli, "Fiber Bragg Gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing", Artech House, 1999.
- 2) K. P. Koo and A. D. Kersey, "Bragg Grating-Based laser sensors systems with interferometric interrogation and wavelength division multiplexing", Journal of Lightwave Technology, Vol. 13, No. 7, pp. 1243-1248, 1995.
- 3) Kim, K. S., L. Kollar and G. S. Springer, "A model of embedded fiber optic Fabry-Perot temperature and strain sensors", J. of Composite Materials Vol. 27, pp. 1618-1662, 1993.
- 4) Kim, K. S., M. Breslauer and G. S. Springer, "The effect of embedded sensor on the strength of composite laminates" J. of Reinforced Plast and Comp, Vol. 2, pp. 949-958, 1992.
- 5) K. Watanabe, S. Matsubara and Y. Kubota, "A hetero-core fiber sensor using OTDR", Trans. SICE, Vol. 35, No. 1, pp 32-37, 1992.
- 6) K. Watanabe, K. Tajima and Y. Kubota, "Macrobending characteristic of a hetero-core splice fiber optic sensor for displacement and liquid detection", IEICE Trans., 83-C-3, 2000.
- 7) M. Iga, A. Seki, Y. Kubata and K. Watanabe, "Acidity measurements based on a hetero-core structured fiber sensor", Sensors and Actuators, B96, pp. 234-238, 2003.
- 8) M. Iga, A. Seki and K. Watanabe, "Hetero-core structured fiber optic surface plasmon resonance sensor with silver film", Sensors and Actuators, B101, pp. 368-372, 2004.

- 9) H. Sasaki, K. Watanabe, Y. Kubota, A hetero-core splice fiber optic displacement sensor and the accuracy evaluation”, Trans. SICE, Vol. 40, No. 10, pp. 981-987, 2004.
- 10) 김영복, 이환우, 김창용, 김영배, 헤테로코어형 광파이버 센싱 시스템”, 대한토목학회지, 제56권 12호, pp. 46-52, 2008.
- 11) 김영복, 장지성, 헤테로코어형 광파이버 압력센서 개발 기초연구”, 2009년도 유공압시스템학회 춘계학술대회 논문집, pp. 152-156, 2009.