

선체의 변형을 감지하기 위한 새로운 형태의 장주기 광섬유 격자 소자

손 경 략*

(원고접수일 : 2007년 4월 17일, 심사완료일 : 2007년 7월 11일)

Novel Long-period Fiber Grating devices for Monitoring the Deformation of Ship Hull

Kyung-Rak Sohn*

Abstract : We have developed novel optical-fiber sensors based on strain-induced long-period fiber gratings for monitoring the deformation of a hull. They have no external pressure for sustaining the mechanical formed gratings. The pressure, which provides a force to form the periodic grating along the single mode fiber, was realized by the bonding strength of a photopolymer. To reduce the polarization dependency of the sensors caused by the asymmetry structure of gratings, a Faraday Rotator Mirror (FRM) was utilized in this experiment. We have realized the polarization-insensitive function of the proposed sensors. The change of an external strain are measured by an optical spectrum analyzer. When the external stain increases, the attenuation at the resonant wavelength decreases and the loss peak was slightly shifted to the shorter wavelength.

Key words : Fiber optic sensors(광섬유센서), Long-period fiber gratings(장주기 광섬유 격자), Pressure sensors(압력센서), Strain-induced gratings(응력유기 격자)

1. 서 론

최근 선박의 선체 구조물에 대한 건전도 감시 시스템 개발에 대한 많은 연구 결과들이 보고되고 있다^{[1], [2]}. 선체의 응력을 측정하는 장비들은 일부 개발이 되어 있거나 또는 부분적으로 적용되고 있다. 이러한 선박의 선체 감시 시스템은 건축물이나 교량, 항공기의 구조물 건전도 감시를 위해 개발된 다양한 연구결과를 응용할 수 있는 이점이 있다.

여기에서 사용하는 센서 기술은 대부분이 광섬유 격자이다. 광섬유 격자는 광통신용 소자뿐만 아니라 압력, 온도, 응력, 변형률, 굴절률 등의 가공 물리량 또는 화학적인 변화를 측정할 수 있는 다양한 센서의 기본 동작 소자로 응용될 수 있기 때문에 많은 분야에서 다양하게 연구되어 지고 있다. 특히 자외선 조사에 의해서 형성된 브래그 격자형 광섬유형 센서는 nm 단위의 격자 주기를 가지는 포인터 센서의 구조이며, 설치가 용이하고, 한 가닥의 광섬유로 여러 지점의 물리량 변화를 동시에 측정

* 교신저자(한국해양대학교 컴퓨터제어전자통신공학부), E-mail:krsohn@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4312

할 수 있는 장점으로 주목받고 있다. 또한 전자파의 장애와 무관하고, 화재 발생의 가능성이 없기 때문에 위험에 노출된 시설물이나 선박을 포함한 첨단 구조물의 안전도 모니터링을 위한 해결책으로 채택되고 있다. 그러나 제작조건이 까다롭고 고가의 제작시스템 및 정밀제어 장비가 필요하다^[3].

장주기 광섬유 격자는 격자 주기가 수백 μm 단위이기 때문에 다양한 제작 방법이 개발되어 보고되고 있다^[4]. 장주기 격자는 단일 모드 광섬유 상에 동일방향으로 진행하는 코어 모드와 클래딩 모드의 결합을 제공하는 수단으로 이용되며 대역제거 필터 특성을 얻을 수 있으므로 광통신용 필터, 센서, 광섬유 증폭기의 이득 평탄화 등에 사용된다. 격자 간격이 상대적으로 넓기 때문에 자외선 레이저와 진폭 마스크를 사용하여 단일모드 광섬유의 코어에 굴절률 변화를 유도하여 격자를 제작할 수 있을 뿐만 아니라, 광섬유의 클래딩에 주기적인 외부 섭동을 기계적으로 가하여 형성할 수도 있다. 자외선을 이용하지 않고 장주기 격자를 제작할 경우 소자의 제작이 간단하고 저비용으로 다양한 기능을 가진 구조로 변환이 가능한 장점이 있다. C. Y. Lin 등은 광섬유의 클래딩을 주기적으로 식각하여 장주기 격자를 형성할 수 있음을 보고하였고^[5], Y-J Rao 등은 CO_2 레이저 펄스를 광섬유 클래딩에 조사하여 장주기 격자를 형성하고 응력센서로 활용할 수 있음을 보고하였다^[6]. 이러한 제작 방법은 클래딩을 외부에 노출시켜 클래딩에 직접적으로 물리적인 변화를 가해야 하므로 기계적인 구조가 취약하여 실제 응용에는 내구성이 문제가 된다. H. J. Show 등은 광섬유에 기계적으로 주기적인 압력을 수직방향으로 가하여 장주기 격자를 형성할 수 있음을 보고하였다^[7]. 그러나 외부에서 가해지는 압력을 소자 스스로가 유지하여 격자를 형성할 수 있도록 하는 패키지의 문제로 연구단계에 머물고 있다.

본 연구에서는 기존에 발표된 마이크로밴딩 장주기 격자의 단점인 광섬유 코어에 응력을 유지하기 위한 외부 압력 유도 구조물을 없앤 새로운 형태의 응력 센서를 개발하였다. 주기적인 금속선을 배열하여 단일모드 상에 장주기 격자가 형성될 수 있도록 하였으며 형성된 격자가 외부의 압력 없이도 유

지될 수 있도록 상부와 하부 평판 사이에 포토폴리머를 주입하여 집착되도록 하였다. 이때 포토폴리머의 집착력은 광섬유에 대한 금속선의 압력을 유지할 수 있도록 제작되어진다. 제작된 소자의 편광 의존성을 없애기 위하여 파라데이 회전 미러(Faraday rotator mirror: FRM)를 적용하였고, 입력신호와 출력신호를 구분하기 위하여 아이솔레이터(Isolator)를 사용하여 시스템을 구성하였다. 두 개의 지지대 위에 제작된 센서를 설치하고 상부의 중앙부에 압력을 가함에 따라 반응하는 투과스펙트럼을 측정하여 비교하였다. 이는 선체 표면에 설치되어 구조물의 변형을 감시하는 센서로 적용할 수 있다.

2. 동작원리

마이크로밴딩 장주기 광섬유 격자는 클래딩의 외부에서 가해지는 주기적인 압력에 의해서 굴절률 변조가 유도된다. 광섬유와 같은 원기둥 구조의 도파로 외부에서 압력을 가하게 되면 수축응력과 인장응력이 동시에 발생하는데 96% 이상의 응력은 광섬유 직경의 1/10에 해당하는 중심축 부근에 집중하는 것으로 알려져 있다^[8]. 일반적으로 단일모드 광섬유 코어의 직경은 클래딩 직경의 1/10 내외이므로 외부 응력에 의한 굴절률 변조가 코어에 집중적으로 나타남을 알 수 있다. 장주기 격자에 의한 공진파장은 식 (1)과 같다.

$$\lambda_m = (n_{co}^{01} - n_{cl}^{0m})\Lambda \quad (1)$$

여기서 λ_m 는 m차 모드의 공진파장, n_{co}^{01} 와 n_{cl}^{0m} 는 각각 코어와 클래딩의 유효 굴절률, Λ 는 격자의 주기이다.

LP_{01} 코어 모드에 포함되어진 초기의 광 전력이 m번째 클래딩 모드로 전달되는 정도는 식 (2)와 같이 주어진다^[9].

$$\frac{P_{cl}^{0m}(L)}{P_{co}^{01}(0)} = \frac{\sin^2[k_g L \sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{k_g}\right)^2}]}{1 + \left(\frac{\delta}{k_g}\right)^2} \quad (2)$$

δ 는 어긋남의 매개변수이며 식 (3)으로 표현된다.

$$\delta = \frac{1}{2} (\beta_{co}^{01} - \beta_{cl}^{0m}) - \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (3)$$

k_g 는 격자에 대한 결합 상수, L 은 격자길이이다. β_{co}^{01} 과 β_{cl}^{0m} 은 코어와 클래딩 모드의 전파상수를 의미한다. 결합상수 k_g 는 마이크로밴딩에 의해서 유기되는 굴절률 변화에 비례하는 것으로 굴절률이 증가하면 일반적으로 클래딩 모드로 전달되는 광전력이 증가한다. 그러므로 금속선의 상하부 가해지는 압력을 변화시키면 출력 스펙트럼의 공진파장의 결합 깊이가 변함을 알 수 있다. 본 연구에서 제안하는 마이크로밴딩을 이용한 광섬유형 응력센서도 이러한 원리를 적용하고 있다. 위험이 발생할 수 있거나 진단하려고 하는 구조물에 센서를 설치한 후 변형이 발생하면 센서의 전체적인 구조에도 변형이 발생하게 된다. 이는 격자모양과 격자에 가해지고 있는 압력에도 영향을 주게 되므로 문제가 발생한 부분을 감시할 수 있게 된다.

3. 소자 설계 및 제작

그림 1은 포토폴리머를 이용한 제안된 장주기 광섬유 격자 응력 센서의 개략도와 실험 구성도를 보여주고 있다. 그림 1(a)에서 상하부 평판은 외부 응력에 대하여 적당한 굽힘성을 가질 수 있는 아크릴 판(2.5× 15× 0.2 [cm³])을 사용하였다. 하부 평판위에 두개의 광섬유를 나란히 위치시킨다. 장주기 격자 형성을 위한 금속선 배열은 단일모드 광섬유 상부에 놓여지게 되는데 이때 금속선이 비대칭적으로 위치하게 되면 특정 방향으로 기울어지게 된다. 이를 방지하기 위하여 더미 광섬유를 추가하였다. 단일모드 광섬유에 주기적인 굴절률 변조를 유도하기 위한 금속선의 직경은 250 μm이며 격자의 주기는 550 μm이고 총 80개의 금속선으로 구성되어진다. 일정한 주기를 유지하기 위하여 금속선의 양 끝단을 광 접착제로 고정시켰다. 이를 광섬유 상부에 위치시킨 후 Norland사의 NOA65를 도포하고 상부 평판을 덮게 된다. NOA65는 포토

폴리머의 일종으로 자외선에서 경화되는 성질을 가지는 광 접착제이다.

본 실험에서는 상하부 평판을 서로 고정시키는 접착제의 접착력이 금속선을 통해 광섬유에 기계적인 마이크로밴딩을 유기할 수 있도록 초기에 2.45N/cm의 압력으로 누른 상태에서 자외선을 조사하였으며 완전히 경화된 후 압력을 제거하였다.

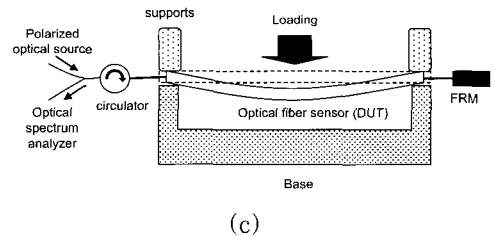
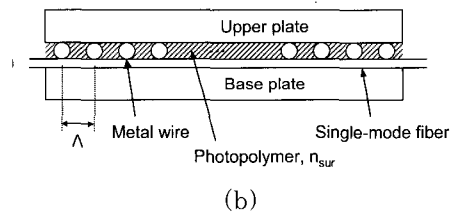
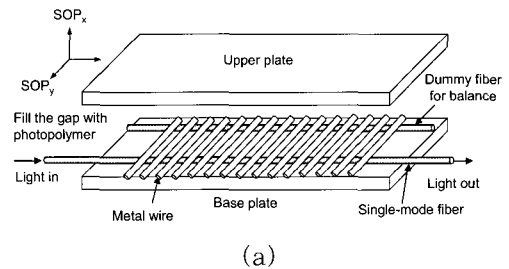


Fig. 1 (a) Schematic of sensors. (b) Cross-section view of (a). (c) Experimental set-up.

그림 1(b)는 그림 1(a)의 단면도를 보여주고 있다. 상하부 평판 사이에 도포된 NOA65에 의한 접착력으로 외부 압력이 필요하지 않는 장주기 격자가 제작되어진다. 그림 1(c)는 응력에 대한 응답 특성을 측정하기 위한 실험 구성도이다. 제작된 소자는 두개의 지지대 위에 놓여지고 그 상부에 적당한 압력을 가함으로써 아크릴 판이 휘어지게 한다. 이때의 변화되는 응력이 장주기 격자에 영향을 미

치도록 하였다. 입력 광원은 백색광원과 편광기로 구성되었고 출력 특성은 광 스펙트럼 분석기를 사용하여 투과도를 볼 수 있도록 하였다. 소자의 구조상 응력이 광섬유의 상하로만 작용하기 때문에 구조적인 비대칭성에 의한 복굴절이 발생하고 이는 소자의 편광 의존성을 유발하게 된다. 수직 방향으로 가해지는 압력에 대한 복굴절은 다음의 식으로부터 구해진다⁽¹⁰⁾.

$$B_s = \frac{2\pi}{\lambda_m} \cdot \frac{2n_{co}^3(p_{12} - p_{11})(1 + \sigma)}{\pi \cdot Y \cdot r_{cl}} \cdot \frac{F_y}{L} \text{ (rad/m)} \tag{4}$$

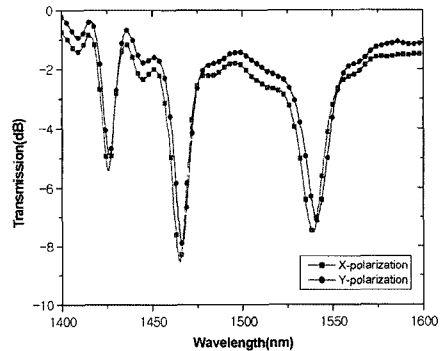
여기서 r_{cl} 은 클래딩의 반경, p_{11} 과 p_{12} 는 광탄성 상수, Y 는 영의 계수이며 σ 는 Poisson의 비이다. F_y 는 수직방향으로 가해지는 압력을 나타내므로 복굴절은 압력에 비례함을 알 수 있다. 본 연구에서는 구조적인 비대칭성에 의한 복굴절을 보상할 수 있는 방법으로 FRM를 사용하였다. 반사되어 오는 출력 신호는 아이솔레이터를 통해 광 스펙트럼 분석기로 가게 된다.

4. 실험결과 및 토의

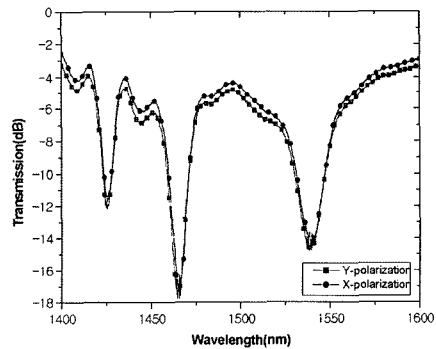
NOA65에 의한 접착력이 금속선을 통해 광섬유에 대하여 상하로 작용하기 때문에 복굴절이 발생함을 식 (3)으로부터 알 수 있다. 그림 2 (a)는 제작된 소자에 대하여 두 개의 직교편광에 대한 편광 특성을 보여주는 투과 스펙트럼이다. 1540 nm 부근의 공진파장을 비교해보면 두 편광에 대하여 동일한 공진파장을 가지지 못하고 3 nm 정도 분리되어짐을 알 수 있다. 이는 마이크로밴딩으로 인하여 광섬유에 비대칭적인 격자가 형성되었음을 보여준다. 이러한 편광 의존성은 센서의 신뢰성을 저하시키는 원인을 제공하므로 반드시 개선되어야 한다. 그림 2(b)는 제작된 소자의 편광 의존성을 제거하기 위하여 그림 1(c)와 같이 소자의 끝단에 FRM을 사용하여 측정된 투과 스펙트럼이다. 두 직교 편광에 대한 공진파장의 위치가 일치하고 있다. FRM은 진행하는 편광에 대하여 90°로 위상이 회전한 반사파를 만들기 때문에 제작된 소자는 90°

위상이 다른 진행파와 반사파를 동시에 경험하게 되고 비대칭적 구조로 인한 구조적인 복굴절 상태가 보상되어 편광 의존성이 억제된다. 또한 진행파에 대하여 장주기 격자를 경험하면서 클래딩 모드와 광 결합을 한 후 다시 FRM으로 인한 반사파도 동일한 격자를 경험하여 광 결합을 하므로 필터의 각각의 공진모드에 대한 결합효율이 개선되어진다. FRM이 있는 경우 공진 파장의 깊이는 그렇지 않은 경우와 비교하여 두 배 정도 깊어짐을 알 수 있다. 그러나 소자의 삽입손실 또한 두 배로 증가하는 단점이 나타나므로 소자 제작 시 삽입손실을 줄이는 것이 고려되어야 한다.

제작된 소자의 응력에 대한 응답특성은 그림 1(c)와 같이 12cm 간격으로 떨어진 두 개의 지지서를 위치시키고 그 중심에 압력을 가하여 센서가



(a)



(b)

Fig. 2 Polarization dependence (a) without and (b) with FRM.

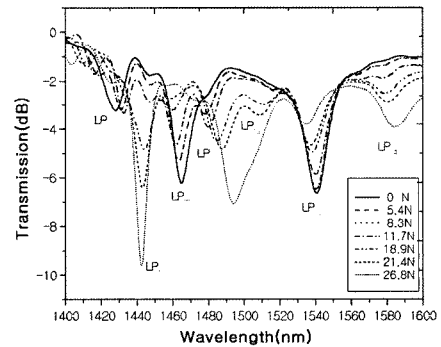
구조적으로 휘어지게 하였다. 선박의 경우 외부 압력에 대한 선체의 휘어지는 정도를 실시간으로 검출해야 하므로 이러한 구조물과 유사한 형태의 실험을 수행하기 위한 모의실험이다. 제작된 소자의 상부에서 힘이 가해져 아크릴 평판이 휘어지게 되면 광섬유의 굽힘으로 인한 코어 모드의 형태가 변하게 되고 공진파장의 모드 분리현상이 발생하게 된다⁽¹¹⁾. 그리고 내부에 위치하고 있는 금속선의 격자주기에 변화가 생길 뿐만 아니라 NOA65의 접착력에 의해서 광섬유 상에 가해지는 압력도 변하게 된다.

그림 3은 FRM의 유무에 따라 상부 응력의 변화에 대한 투과 스펙트럼이다. 그림 3(a)는 FRM을 사용하지 않은 실험 장치도에서 센서에 응력이 가해졌을 때 처음 3개의 공진파장 (LP₀₁, LP₀₂, LP₀₃)에 대한 스펙트럼의 변화를 보여주고 있다. 상부에 가해지는 압력이 커질수록 공진파장의 깊이가 알아지고 있다. 그러나 소자의 휘어짐이 커질수록 공진파장의 모드 분리로 인하여 각각의 모드 오른쪽 파장에서 새로운 공진파장(LP₁₁, LP₁₂, LP₁₃, LP₁₄)이 발생하게 된다. 실험 결과로부터 압력이 증가함에 따라 공진파장의 결합 깊이가 낮아지다가 18.9N의 압력 이후에는 공진파장의 분리와 더불어 새로운 모드에서의 결합 깊이가 다시 증가함을 알 수 있다. LP₀₃ 모드의 경우 1540 nm 부근의 파장에서 위상 정합조건을 만족하여 공진이 일어나고 있으며 26.8N의 상부 압력이 가해질 때까지 일정하게 결합 깊이가 낮아짐을 보인다. 그러나 LP₁₃ 모드의 경우 굽힘이 커질수록 공진파장에서의 광 결합 정도가 증가한다.

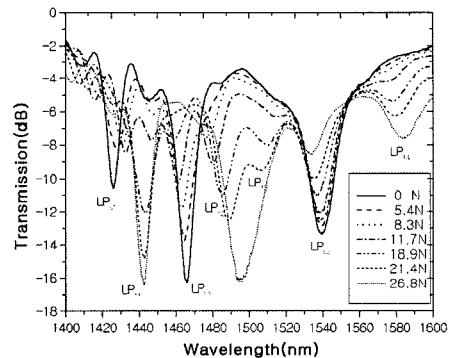
그림 3(b)는 제작된 소자의 다른 쪽 끝단에 FRM을 부착하여 진행파 방향으로 신호가 되돌아갈 수 있도록 한 실험 장치도에서 측정한 투과 스펙트럼이다. FRM은 진행파와 반사파의 위상이 서로 직교하기 때문에 비대칭적 격자로 인한 복굴절 효과를 최소화할 수 있다. 또한 동일한 격자를 입력 광이 왕복하여 진행하게 되므로 두 번의 광 결합이 발생한다. 그러므로 동일한 소자 조건임에도 불구하고 결합 깊이가 그림 3(a) 보다 훨씬 증가함을 알 수 있다. 여기서 FRM은 편광 의존성을 최소화함과 동시에 응력에 대한 민감도를 높일 수 있

는 방법을 제공한다.

그림 4 (a)는 그림 3(b)의 LP₀₃ 모드에 대한 투과 스펙트럼을 외부에서 가해진 힘의 함수로 분석한 그래프이다. 센서의 굽힘이 커질수록 공진파장은 단파장으로 이동하고 공진파장에서의 광 결합 정도는 감소함을 알 수 있다. 그러나 응답특성이 비선형적으로 나타남에 따라 굽힘 정도나 변형률을 측정하는데 바람직하지 않다. 선형 응답특성을 얻기 위하여 1500 nm 부근의 공진파장인 LP₁₃ 모드의 스펙트럼을 분석하였으며 그림 4(b)에 그 결과를 나타내었다. 외부에서 가해진 힘에 대하여 공진파장에서의 광 결합 정도는 비선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 공진파장은 장파장으로 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있으며 LP₀₃ 모드와 반대의 특성을 보인다. 이러한 특징으



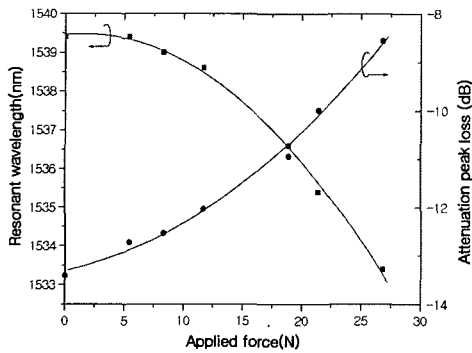
(a)



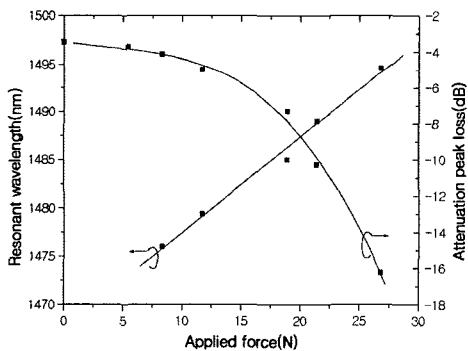
(b)

Fig. 3 Measured transmission spectra as a function of a applied force (a) without and (b) with FRM.

로부터 마이크로밴딩으로 형성된 장주기 격자소자에서 클래딩의 굽힘에 의한 공진 파장의 분리는 제작된 센서를 선체의 변형정도를 측정할 수 있는 새로운 방법으로 적용될 수 있음을 보여준다. 측정하고자 하는 특정부위에 센서를 부착하여 공진파장의 이동정도나 공진파장에서의 광 결합의 깊이 정도를 분석함으로써 선체의 이상 유무를 판단할 수 있는 정보를 얻을 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 4 Shift in resonant wavelength and attenuation peak loss versus applied force for (a) LP₀₃ mode and (b) LP₁₃ mode.

5. 결 론

선박의 선체 응력 또는 토목/건축 구조물의 응력 측정에 활용할 수 있는 새로운 형태의 광섬유형 격자 센서를 제안하였다. 마이크로밴딩 장주기 격자를 형성하기 위한 압력을 포토폴리머의 접착력을

이용하여 구현하였으며 소자 자체적으로 7dB 정도의 광 결합을 유지할 수 있었다. 소자의 편광 의존성을 제거하고 응력에 대한 센서의 민감도를 향상하기 위하여 FRM를 사용하였다. FRM으로 인하여 편광 의존 손실은 거의 나타나지 않았으며 결합 깊이는 두 배 정도 증가하였다. 소자의 상부에 가해지는 압력이 증가함에 따라 공진 파장에서의 결합 깊이가 얕아짐을 밝혔으며 LP₀₃ 모드 또는 LP₁₃ 모드를 이용할 경우 공진파장의 이동 정도와 결합 깊이를 이용하여 선체 또는 구조물의 응력 변화에 대한 굽힘이나 변형률에 대한 정보를 추출할 수 있는 소자 구현이 가능함을 제시하였다.

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2006-611-D00019)이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] G. Wang, K. Pran, G. Sagvolden, G. B. Havsgard, A. E. Jensen, G. A. Johnson, and S. T. Vohra, "Ship hull structure monitoring using fiber optic sensors," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 10, pp. 472-478, 2001.
- [2] K. Kageyama, I. Kimpara, Toshio Suzuki, I. Ohsawa, H. Murayama, and K. Ito, "Smart marine structure: an approach to the monitoring of ship structures with fiber-optic sensors," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 7, pp. 472-478, 1998.
- [3] 손경락, 최영길, 장세인, 최재윤, 심준환, "마이크로밴딩 장주기 광섬유 격자를 이용한 다중위치 압력 감지센서," *한국마린엔지니어링학회지*, Vol. 30, No. 3, pp. 449-454, 2005.
- [4] K. R. Sohn and K. T. Kim, "Thermo-optically tunable band-rejection filters using mechanically formed long-period fiber gratings," *Opt. Lett.*, Vol. 30, No. 20, pp. 2688-2690, 2005.

- [5] C. Y. Lin and Lon A. Wang, "A wavelength- and loss-tunable band-rejection filter based on corrugated long-period fiber grating," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 13, No. 4, pp. 332-334, 2001.
- [6] Y-J Rao, Y-P Wang, Z-L Ran, and T. Zhu, "Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 21, No. 5, pp. 1320-1327, 2003.
- [7] S. Savin, M. J.F. Digonnet, G. S. Kino, and H. J. Show, "Tunable mechanically induced long-period fiber gratings," Vol. 25, No. 10, pp. 710-712, 2000.
- [8] A. M. Smith, "Single-mode fiber sensitivity," *Electron. Lett.*, Vol. 16, pp. 773-774, 1980.
- [9] A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan, and J. E. Sipe, "Long-period fiber gratings as band-rejection filters," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 14, No. 1, pp. 58-65, 1996.
- [10] Y. Tang and Y. Liao, "Stress-induced birefringence in all-fiber white-light interferometers," *Opt. Fiber Technol.*, Vol. 4, pp. 304-315, 1998.
- [11] U. L. Block, V. Dangui, M. J. F. Digonnet, and M. M. Fejer, "Origin of apparent resonance mode splitting in bent long-period fiber gratings," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 24, No. 2, pp. 1027-1034, 2006.

저 자 소 개



손경락(孫慶洛)

1992년 경북대학교 전자공학과 졸업, 1995년 경북대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학석사), 2002년 경북대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학박사), 1992년~1993년 현대전자 산업전자연구소, 1995년~1999년 현대자동차 울산연구소, 2003년~현재 한국해양대학교 컴퓨터제어전자통신공학부 조교수, 2007년~현재 University of New South Wales Visiting Fellow