

論文99-36D-10-7

뿤뵁이 용융 부착된 FBG 온도 센서의 특성

(Characteristics of a Solder-Clad FBG Temperature Sensor)

平 裁 協 * , 李 相 培 ** , 辛 宗 德 ***

(Jae-Hyub Pyoung, Sang-Bae Lee, and Jong-Dug Shin)

요 약

본 논문에서는 열팽창 계수가 큰 뿤뿤을 광섬유 격자(FBG)에 용융 부착시킨 온도센서에 관한 연구 결과를 발표하고자 한다. 110℃ 이하의 온도에서는 브래그 파장의 변이가 0.04 nm/℃로써, 뿤뿤이 부착되지 않은 FBG보다 약 4배의 감도가 향상되었다. 그러나, 110℃ 이상의 온도에서는 파장 변이가 0.01 nm/℃로써, 뿤뿤이 부착되지 않은 FBG와 동일한 감도가 측정되었다. 뿤뿤을 고온에서 용융 부착하기 때문에 110℃ 이하의 온도에서는 브래그 파장이 단파장 쪽으로 이동되어 나타났다. 또한, 뿤뿤 부착 후, 뿤뿤과 FBG의 계면에서 발생한 스트레스를 열처리 과정을 통해 이완시켜 안정된 동작을 얻을 수 있었다.

Abstract

We report a solder-clad fiber Bragg grating(FBG) temperature sensor in order to obtain better Bragg wavelength sensitivity to temperature than a bare FBG sensor. The solder-clad FBG sensor shows a wavelength sensitivity improvement by a factor of four compared to the case of a bare FBG sensor at temperatures below 110℃. However, it has a sensitivity of 0.01 nm/oC at temperatures over 110oC, which is identical to that of a bare FBG sensor. Bragg wavelength of the sensor shows a blue-shift below 110oC because the sensor is fabricated above melting temperature of solder. The thermal stress at the FBG- solder interface has been relieved by annealing, which results in a stable operation.

I. 서 론

* 學生會員, 崇實大學校 情報通信電子工學部

(School of Electronic Engineering, Soongsil University)

** 正會員, 韓國科學技術研究院 光技術研究센터

(Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology)

*** 正會員, 崇實大學校 情報通信電子工學部

(School of Electronic Engineering, Soongsil university)

※ 본 논문은 1997년도 숭실대학교 교내연구비 지원에 의한 결과임.

接受日字:1999年6月28日, 수정완료일:1999年9月30日

1978년 Hill 등이 488 nm Ar⁺ 레이저 빛을 Ge가 첨가된 광섬유 코어 내로 입사시켰을 때, 브래그 격자가 형성됨을 최초 관측하였으나 격자 길이가 짧아지기 전인 1989년 초까지는 실용적인 측면에서 각광을 받지 못하였고, Meltz 등에 의해 제안된 홀로그래피 방법 이후 WDM(Wavelength Division Multiplexing) 광통신의 여러 분야에서 이용될 수 있는 가능성을 인식하면서 연구의 대상이 되었다. 뛰어난 파장 선택성을 갖는 FBG(Fiber Bragg Grating)는 OADM(Optical Add/Drop

Multiplexer), 이득 평탄화(gain flattening), 분산보상(dispersion compensation) 등에 응용되고 있으며^[11-13], 최근에는 온도와 인장 및 압력에 대해 중심파장이 변하는 특성을 이용하여 센서로 활용하기 위한 연구가 진행중이다^[5].

생명이 없는 구조물이 외부의 물리량에 대해 지능적으로 반응하는 것을 스마트 구조(smart structure)라 하며^[6], FBG는 이러한 스마트 구조에 부합한 핵심소자로 각광받고 있다. 기존의 광 센서 시스템은 복잡한 전자적 구조, 큰 부피, 고비용, 유지 보수의 어려움 등의 단점을 가지고 있다. 이에 비해, FBG 센서는 간단한 구조, 소형화, 고성능의 감지능력, 다중점 센서(multi-point sensor)로의 구현이 가능하며, 무엇보다도 파장 부호화 특성을 갖는다. 따라서, 광섬유의 연결상태, 결합기에서의 손실, 광원(source)의 파워 불안정과 같은 요인들에 의해 영향을 받지 않는다. 이러한 장점이 클래딩 직경의 변화없이 광섬유 자체에 격자를 형성하여 구현하는 FBG 센서의 중요성을 부각시키고 있다. FBG를 온도 센서로 사용할 경우, 온도에 대한 Bragg 파장 변이는 0.01 nm/°C이다. 실험실 내에서는 큰 값이 될 수 있지만, 실제 구조물에서 안전성을 확보하기 위한 값으로는 문제가 될 수 있다. FBG 센서가 앞서 언급한 스마트 구조의 역할을 수행하기 위해선 동일 물리량에 대해 두드러진 반응이 요구되며, 이에 따라 FBG가 외부 물리량에 대해 극대화된 감도를 갖게 하는 방향으로 연구가 진행되어져야 할 것이다.

본 논문에서는 연료 탱크의 안전성 감지 또는 전력 케이블의 누화 관찰과 같은 온도의 변동 감지를 필요로 하는 시스템에서 동시에 가해진 온도와 인장으로부터 온도에 대한 감도만 극대화하여 검출할 수 있는 땀납이 부착된 FBG 온도 센서를 제작하여, 그 특성을 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 FBG의 온도 특성에 대해 설명하였고, III장에서는 땀납이 부착된 FBG 온도 센서의 제작 및 측정된 결과를 분석하였고, 마지막으로, IV장에서 본 논문의 연구 결과를 요약하였다.

II. 광섬유 격자의 온도 특성

단주기 광섬유 격자(short-period fiber grating)는 일반적인 FBG로서 격자의 주기가 약 0.5 μm 내외이고

선폭이 1A내외로써, 광섬유 격자의 길이가 수 mm에서 10 mm 정도되는 FBG를 일컫는다. 파장은 광섬유 격자 주기와 코어의 유효 굴절률의 곱에 비례한다. 온도에 대한 감도는 약 0.01 nm/°C이며, 인장에 대한 감도는 0.001 nm/μstrain이다. 장주기 광섬유 격자(long-period fiber grating)는 한 주기가 약 300-800 μm로써 길이가 수 cm이며, 파장은 광섬유 격자의 주기와 코어와 클래딩 굴절률 차의 곱에 비례한다. 또한, 광섬유의 종류에 따라 온도 특성이 다르게 나타난다^[7]. 장주기 광섬유 격자는 중첩파장의 선폭이 30 nm 이상으로 센서로 사용시 측정에 어려움을 가지며, 다중점 센서로의 응용이 제한된다^[7,8].

FBG에 넓은 스펙트럼의 광원이 입사할 때 브래그 파장만을 반사시키고 이를 제외한 나머지는 전송된다. 브래그 조건(Bragg condition)에 따라 반사되는 브래그 파장은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, n 은 코어의 굴절률, Λ 는 FBG의 주기이다. 식 (1)은 FBG의 주기 Λ 와 브래그 파장 λ_B 와의 관계를 나타낸다. 식 (1)과 같이 FBG의 주기가 바뀌면 브래그 파장이 변화한다. 온도변화에 따른 FBG의 브래그 파장 변화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{BT} &= 2\Delta n\Lambda + 2n\epsilon_z\Lambda \\ &= \left[\left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_\rho \frac{1}{n} + \left(\frac{\partial n}{\partial n} \right) \frac{1}{\Delta T} \right] + \frac{\epsilon_z}{\Delta T} \\ &= \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_\rho \frac{1}{n} + \frac{1}{\Delta T} \\ &\quad \left\{ \epsilon_z - \frac{n^2}{2} [(P_{11} + P_{12})\epsilon_r + P_{12}\epsilon_z] \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

Δn 은 굴절률의 변화, ϵ_z 는 광섬유의 axial strain, ϵ_r 은 광섬유의 radial strain, P_{11} , P_{12} 는 광섬유의 포켈 계수(Pockels coefficient)이다. 식 (2)에서 ϵ_r 과 ϵ_z 는 열팽창 계수에 관여한다. 따라서, 식 (2)에 의해 FBG에 부착한 금속의 열팽창 계수가 다르면 동일한 온도에서도 다른 브래그 파장 변이를 발생하게 된다는 것을 알 수 있다.

금속이 부착된 광섬유의 코어의 열에 대한 인장 응답 계수는 고유의 광섬유 코어 값과 차이를 갖는다. 금속이 부착된 다층 구조를 갖는 광섬유 코어의 인장에 대한 응답은 다음 식으로부터 구한다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_i + 2\mu_i & \lambda_i & \lambda_i \\ \lambda_i & \lambda_i + 2\mu_i & \lambda_i \\ \lambda_i & \lambda_i & \lambda_i + 2\mu_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{rr} \\ \epsilon_{\theta\theta} \\ \epsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\lambda_i = \frac{\nu_i E_i}{(1 + \nu_i)(1 - 2\nu_i)} \quad (4)$$

$$\mu_i = \frac{E_i}{2(1 + \nu_i)} \quad (5)$$

여기서, i 는 다층 구조를 갖는 금속이 부착된 광섬유 층의 수를 나타내며, σ 는 극방향 스트레스(polar stress), λ 와 μ 는 식 (4)와 (5)처럼 Young's modulus E 와 Poisson 비 ν 에 의해 결정되는 Lamé 파라미터를 나타낸다. 식 (3)의 해는 경계조건을 이용하여 구할 수 있다^[9].

III. 실험 및 분석

본 실험에서는 코어의 직경이 10 μm , 클래딩의 직경이 125 μm , Ge 3 mol% 광섬유를 100 기압, 100°C에서 48시간 수소 처리한 후 KrF 엑시머 레이저와 위상 마스크를 이용하여 제작된 FBG를 사용하였다.

표 1로부터 알 수 있듯이 땀납은 SiO₂에 비해 약 43.64배 큰 열팽창 계수를 갖는다. 열팽창 계수가 큰 금속으로는 황동, 구리 등이 있으나 용융점이 높으므로 가공에 어려움이 따른다. 일반적으로 사용되는 광섬유 격자의 경우, 800°C에서 브래그 격자가 완전히 제거된다고 보고되었다^[10]. 따라서 재료를 구하기가 쉽고, 가공이 용이하며 큰 열팽창 계수를 갖는 땀납(solder)을 그림 1과 같이 FBG에 부착하였다.

표 1. 여러 물질의 열팽창 계수
Table 1. Thermal expansion coefficients.

물 질	열팽창계수(1/°C)
구리	17×10^{-6}
납	29.24×10^{-6}
황동	19×10^{-6}
땀납	24×10^{-6}
알루미늄	8×10^{-6}
SiO ₂	0.55×10^{-6}

우선, 길이 70 mm, 높이 10 mm, 폭 10 mm의 틀을 두꺼운 종이로 제작하였고, 그 위에 알루미늄 호일을

씩웠다. 이는 용융된 땀납과 틀과의 분리가 용이하게 하기 위함이다. 제작한 틀의 길이는 땀납 부착을 용이하게 하기 위해 충분히 길게 하였다. FBG가 틀의 중심을 지나가게 위치시킨 다음, 땀납을 녹여 FBG 센서 헤드를 완성하였다.

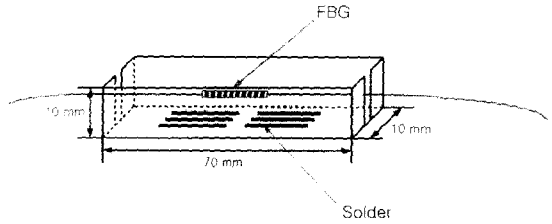


그림 1. FBG 온도센서의 제작 방법
Fig. 1. Fabrication of the FBG temperature sensor.

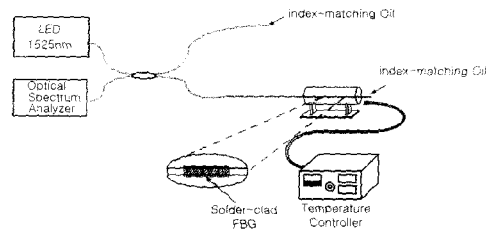


그림 2. 실험의 구성도
Fig. 2. Experimental setup.

그림 2에 실험의 구성도를 도시하였다. 첨두 파장이 1525 nm이고 3 dB 대역폭이 95 nm인 LED를 광섬유 결합기의 입력 단에 용착 접속하였고, 다른 입력 단에는 광 스펙트럼 분석기를 연결하여 결합기 출력 단에 용착 접속된 FBG 온도 센서로부터 반사되는 스펙트럼을 측정하였다. 광섬유 결합기의 나머지 출력 단은 index-matching oil에 담가 불필요한 신호가 입력으로 반사되는 것을 막았다.

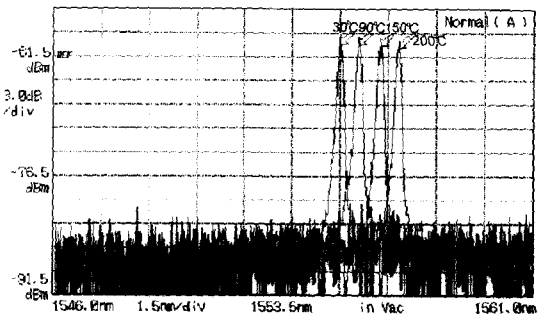


그림 3. 땀납 부착 전 FBG의 브래그 파장 스펙트럼
Fig. 3. Bragg wavelength spectra for a bare FBG.

그림 3은 땀납이 부착되지 않은 FBG의 온도에 따른 브래그 파장 변이를 나타내고 있다. 온도가 증가함에 따라 광섬유 격자의 주기가 증가하여 브래그 파장이 장파장으로 이동하며, LED의 침투 파장이 1525 nm이기 때문에 FBG로부터 반사되는 파워는 온도의 증가에 따라 감소하였다.

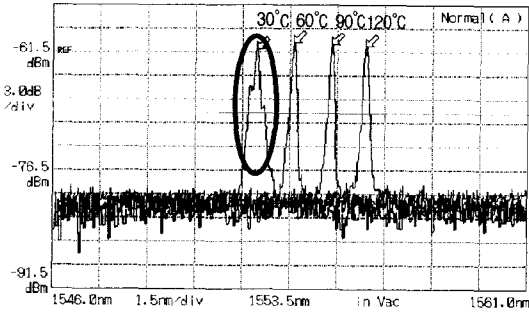


그림 4. 땀납 부착 후 열처리 전 FBG의 브래그 파장 스펙트럼

Fig. 4. Bragg wavelength spectra for the solder-clad FBG before annealing.

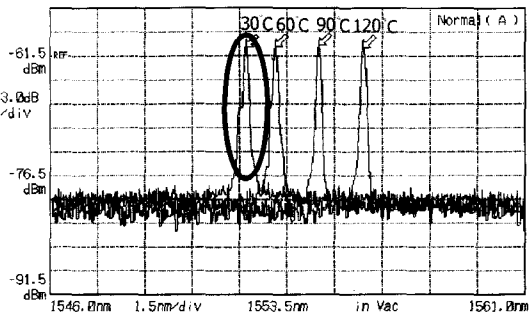


그림 5. 땀납 부착 후 열처리 후 FBG의 브래그 파장 스펙트럼

Fig. 5. Bragg wavelength spectra for the solder-clad FBG after annealing.

그림 4는 땀납을 부착한 후에 측정된 FBG의 브래그 파장 변이이다. 땀납 부착 전과 비교할 때 동일 온도 범위에서 보다 큰 브래그 파장 변이가 관측되었다. 땀납 부착 전 FBG의 브래그 파장은 30°C에서 1555 nm이었으며, 땀납 부착 후의 브래그 파장은 1551.85 nm로 단파장 쪽으로 3.15 nm 만큼 이동하였다. 이는 고온에서 용융 상태인 땀납이 응고하며 수축하여 FBG의 주기를 감소시켰기 때문이다. 또한, 30°C에서 스펙트럼 폭이 땀납 부착 전의 스펙트럼 폭보다 넓고, 파워 또한 낮다. 이와 같은 현상은 센서 제작시 FBG를 감싸고 있던 용융 상태의 땀납이 급격히 응고되는 과정에서 FBG와

땀납의 계면에서 스트레스로 인해 발생한 microbending 때문이라고 판단된다^[11]. 열처리 후에는 30°C에서의 스펙트럼 폭이 감소하여 나타나는 것을 관찰할 수 있었으며 그림 5에 나타내었다.

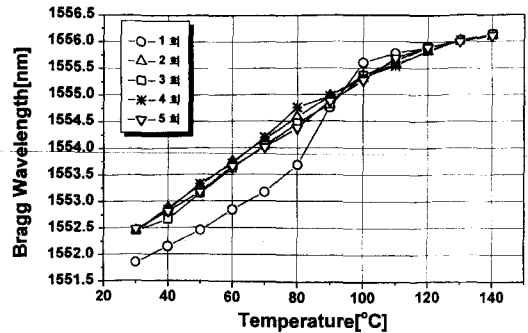


그림 6. 땀납 부착 후 FBG의 온도 사이클에 따른 파장 변이

Fig. 6. Wavelength sensitivity of the solder-clad FBG for temperature cycles.

땀납이 부착된 FBG의 온도를 30°C에서 140°C까지 증가시키며 반복하여 브래그 파장 변이를 측정하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다. 땀납 부착 후 첫 번째 온도 사이클의 경우, 30°C에서의 브래그 파장은 1551.85 nm이었고, 두 번째 온도 사이클의 30°C에서 브래그 파장은 1552.45 nm로 첫 번째 온도 사이클에 비해 장파장 쪽으로 0.6 nm 이동하였다. 이러한 현상은 땀납이 부착된 후 첫 번째 온도 사이클 과정에서 열처리 효과를 발생하여 땀납과 FBG 간의 스트레스를 완화시켜주는 작용을 했기 때문이라고 판단된다. 첫 번째 온도 사이클 후에는 땀납을 부착시킨 FBG의 브래그 파장이 30°C에서 1552.45 nm로 거의 일정하게 유지되었다. 각 온도 사이클의 30°C에서 110°C의 온도 범위에서 파장 변이와 30°C에서의 브래그 파장을 표 2에 정리하였다.

표 2. 브래그 파장과 파장 변이

Table 2. Bragg wavelength at 30°C and wavelength sensitivity.

온도 사이클	브래그 파장 (nm, @30°C)	파장 변이 (nm/°C)
1	1551.85	0.053
2	1552.45	0.04
3	1552.45	0.042
4	1552.45	0.04
5	1552.48	0.041

그림 7은 땀납 부착 후 동일 온도에서의 브래그 파장 변화를 감소시키기 위해 120°C에서 100분에 걸쳐 2회의 열처리를 실시한 후에 측정된 파장 변이를 나타내고 있다. 열처리 후에는 땀납과 FBG 간의 스트레스가 완화되어서 장파장 쪽으로 약 0.3 nm의 추가적인 브래그 파장 천이가 발생하였다. 또한, 각각의 온도에서 브래그 파장은 열처리하기 전보다 일정하게 유지되었다.

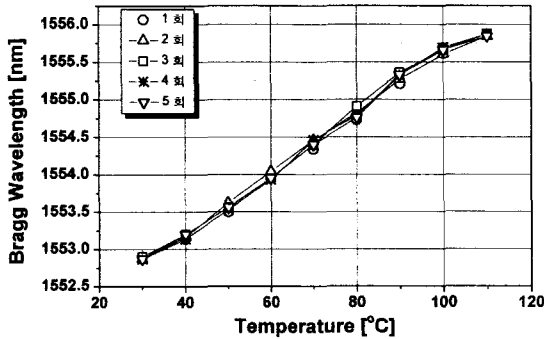


그림 7. 열처리 후 FBG의 온도 사이클에 따른 파장 변이
Fig. 7. Wavelength sensitivity of the solder-clad FBG after annealing for temperature cycles.

각 온도에서 측정된 브래그 파장의 변동폭은 1 %미만으로 안정적이었으며, 파장 변이는 평균 0.04 nm/°C로 나타났다.

그림 8에 땀납 부착 전과 땀납 부착 후에 측정된 브래그 파장 변이를 비교하여 도시하였다. 그림 8에서 알 수 있듯이 땀납 부착 전에는 파장 변이가 0.01 nm/°C이었던 것이 열팽창 계수가 큰 땀납을 부착한 후에는 파장 변이가 0.04 nm/°C로 4배의 감도 향상이 있었으며, 땀납이 부착된 FBG의 브래그 파장이 110°C 이상의 온도에서는 땀납 부착 전 FBG의 브래그 파장과 일치하는 현상이 발생하였다. 이와 같은 현상은 땀납 부착 후 FBG에 가해지는 온도가 약 110°C 이상인 경우에는 땀납에 구조적인 변화가 발생하여 땀납과 광섬유의 밀착도가 떨어지면서, 실제적으로 땀납이 광섬유 격자의 주기를 늘려주는 역할을 수행하지 못하기 때문이라고 분석된다. 따라서, 본 온도센서는 110°C 이하의 온도에서 가장 안정적이고 향상된 감도를 보인다고 할 수 있겠다.

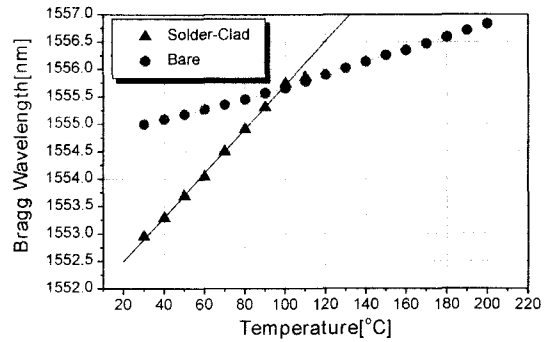


그림 8. 땀납이 부착되지 않은 FBG와 땀납이 부착된 FBG의 파장 변이
Fig. 8. Wavelength sensitivity of the solder-clad FBG and a bare FBG.

IV. 결론

재료를 구하기가 용이하며, 가공이 용이한 땀납을 FBG에 용융 부착시킨 고감도 FBG 온도센서를 제작하였다. 땀납 부착 전 FBG의 온도에 대한 감도가 0.01 nm/°C이던 것이, 땀납 부착 후에는 0.04 nm/°C로 4배의 감도 향상이 있었다.

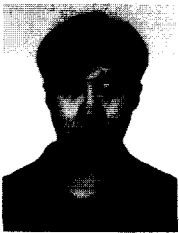
땀납 부착된 FBG는 고온에서 용융 상태인 땀납이 응고하며 수축하여 FBG의 주기를 감소시켰기 때문에 110°C 이하에서는 브래그 파장이 단파장 쪽으로 이동하여 나타났다. 또한, 열처리 전에는 스펙트럼 폭이 땀납 부착 전의 스펙트럼 폭보다 넓고, 파워 또한 낮게 나타났으며 이와 같은 현상은 센서 제작시 FBG를 감싸고 있던 용융 상태의 땀납이 급격히 응고되는 과정에서 FBG와 땀납의 계면에서 스트레스로 인해 발생한 microbending 때문이라고 판단된다. 열처리 후에는 파장 변이가 실험 횟수에 관계없이 일정하게 나타났으며, 동일 온도에서 동일한 브래그 파장이 반복적으로 측정되었다.

참고 문헌

[1] Takashi Mizuochi, "Interferometric crosstalk-free optical add/drop multiplexer using Mach-Zehnder-based fiber gratings," J. Lightwave Technol., vol. 16, no. 2, pp. 265-276, 1998.
[2] Paul F. Wysocki et al., "Broad-band erbium-

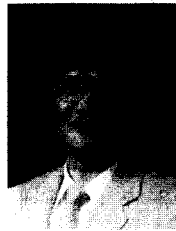
- doped fiber amplifier flattened beyond 40 nm using long period grating filter," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 9, no. 10, pp. 1343-1345, 1997.
- [3] M. H. Song, B. H. Lee, S. B. Lee, S. S. Choi, "Interferometric temperature-insensitive strain measurement with different-diameter fiber Bragg gratings," Opt. Lett., vol. 22, no. 11, pp. 790-792, 1997.
- [4] W. H. Loh et al., "Dispersion compensation over distances in excess of 500 km for 10-Gb/s systems using chirped fiber gratings," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 8, no. 7, pp. 944-946, 1996.
- [5] M. G. Xu, J. L. Archambault, L. Reekie and J. P. Dakin, "Discrimination between strain and temperature effects using dual wavelength fibre grating sensors," Electron. Lett., vol. 30, no. 13, pp. 1085-1087, 1994.
- [6] Vikram Bhatia et al., "Temperature-insensitive and strain-insensitive long-period grating sensors for smart structures," Optical Engineering, vol. 36, no. 7, pp. 1872-1876, 1997.
- [7] H. J. Patrick, G. M. Williams, A. D. Kersey, J. R. Pedrazzani, A. M. Vengsarkar, "Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 8, no. 9, pp. 1223-1225, 1996.
- [8] Vikram Bhatia, Ashish M. Vengsarkar, "Optical fiber long-period grating sensors," Opt. Lett., vol. 21, no. 9, pp. 692-694, 1996.
- [9] N. Lagakos, J. A. Bucaro, and J. Jarzynski, "Temperature-induced optical phase shifts in fibers," Appl. Opt., vol. 20, no. 13, pp. 2305-2308, 1981.
- [10] Andreas Othonos, "Fiber Bragg Gratings," Rev. Sci. Instrum., vol. 68, no. 12, pp. 4309-4341, 1997.
- [11] Gang-Chih Lin et al., "Thermal performance of metal-clad fiber Bragg grating sensors," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 10, no. 3, pp. 406-408, 1998.

저 자 소 개



平裁協(學生會員)

1997년 8월 호서대학교, 정보통신공학과(학사). 1997년 9월~현재 숭실대학교 대학원 석사과정. 주관심 분야는 WDM 광통신 시스템, FBG 센서 구현



辛宗德(正會員)

1976년~1981년: 연세대학교, 전자공학과(학사). 1984년~1988년: University of Texas at Austin. 전기 및 컴퓨터 공학과(석사). 1988년~1991년: Texas A&M University, 전기공학과(박사). 1980년~1983년: 대영전자공업(주) 개발부, 계장. 1991년~1995년: 한국전자통신연구소, 선임연구원. 1995년~현재: 숭실대학교, 정보통신공학과 조교수. 주관심분야: 완전광통신망, 광교환, 광신호처리, 광섬유 소자

李相培(正會員) 第35卷 D編 第12號 參照

한국과학기술연구원(KIST) 시스템연구부 광기술연구센터 책임연구원