

論文2002-39SD-1-6

측면연마된 단일모드 광섬유와 폴리머 평면도파로 결합기를 이용한 고감도 온도센서

(High-sensitivity temperature sensor using the side
polished single mode fiber and polymer planar
waveguide coupler)

鄭 雄 圭 * , 金 相 佑 * , 金 光 鐸 ** , 金 應 秀 *** , 俞 允 植 **** ,
姜 信 元 *****

(Woong-Gyu Jung, Sang-Woo Kim, Kwang-Taek Kim, Eung-Soo Kim,
Yun-Sik Yu, and Shin-Won Kang)

요 약

단일모드 광섬유와 평면도파로 결합기의 파장선택성을 이용한 고감도 온도센서를 구현하였다. 폴리머 평면도파로의 높은 열광학 효과에 의하여 결합기의 공진파장이 $-3.43\text{nm}/^\circ\text{C}$ 정도로 매우 민감하게 이동함을 관찰할 수 있었다. 소자의 편광의존성을 줄이고 온도에 대한 감도를 증가시키기 위한 설계 기법을 제시하였다.

Abstract

High-sensitivity temperature sensor based on the wavelength selectivity of single mode fiber-to-planar waveguide coupler, was demonstrated. The resonant wavelength of the coupler was shifted with large rate of $-3.43\text{nm}/^\circ\text{C}$ owing to good thermo-optic effects of polymer planar waveguide. The device design technique to reduce the polarization dependent properties and increase the temperature sensitivity was presented.

* 正會員, 慶北大學校 센서工學科
(Department of Sensor Engineering, Kyungpook National University)

** 正會員, 湖南大學校 電子工學科
(Division of Electrical and Electronic and Computer, Honam University)

*** 正會員, 釜山外國語大學校 컴퓨터電子工學部
(Division of Electronic and Computer Engineering, Pusan University of Foreign Studies)

**** 正會員, 東義大學校 科學技術學部
(School of Science and Technology, Dongeui University)

***** 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學部
(School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University)

接受日字:2001年2月7日, 수정완료일:2001年11月16日

I. 서 론

현재 주로 사용하고 있는 전기적 신호 방식의 온도 센서는 원거리측정에 있어 전력공급이 어려울 뿐만 아니라 신호전송시 잡음의 영향을 심하게 받는다. 이에 비해 광섬유형 온도센서는 전자장의 간섭을 받지 않고 광섬유가 신호전송로 역할을 결합할 수 있으며 높은 온도의 측정이 가능하기 때문에 활발한 연구가 진행되어 왔다.

지금까지 많이 연구되고 있는 광섬유형 온도센서는 광섬유 브래그 격자형 온도센서와 광섬유 간섭계를 이용한 온도센서 등이 있다. 광섬유 브래그 격자형 온도

센서는 크기가 작고 제작이 용이하다는 장점이 있으나 격자간격의 이동과 광섬유의 굴절률 변화로 온도를 감지하기 때문에 감도가 높지 않다^[1]. 간섭계형 온도센서는 높은 감도의 장점을 가지는 반면 안정화시키기 매우 힘들다는 단점이 있다.^[2, 3]

본 논문에서는 측면 연마된 단일모드 광섬유 위에 평면도파로를 결합한 새로운 형태의 고감도 온도센서를 제안하고, 그 동작특성을 이론과 실험으로 분석하였다. 제안된 센서는 구조가 다른 두 도파로 사이에서 발생하는 높은 파장선택성 결합을 이용하였으며 감도를 높이기 위하여 열광학 효과가 우수한 폴리머를 평면도파로로 사용하였다. 이는 주위 온도 변화에 의하여 폴리머 도파로의 굴절률이 변하고 결과적으로 소자의 공진파장이 온도에도 민감하게 반응하는 결과를 가져온다. 제작된 센서의 온도에 따른 파장응답 특성을 측정하였으며 평면도파로 재료에 따른 감도의 변화정도를 비교였다. 또한, 소자의 편광의존성을 줄이기 위한 센서의 구조를 제안하고 이를 실험적으로 검증하였다.

II. 센서의 동작원리

본 연구에서 제작된 센서는 광섬유-평면도파로 결합기의 구조를 가지며 그림 1과 같다.

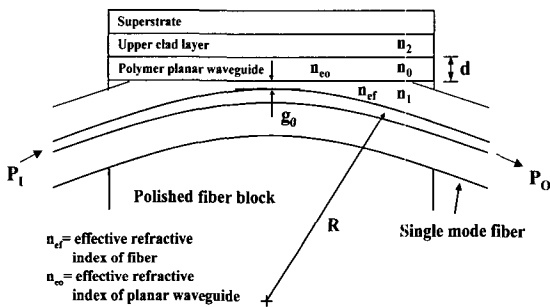


그림 1. 온도센서로 활용하기 위한 광섬유-평면도파로 결합기 구조

Fig. 1. Schematic configuration of fiber-to-planar waveguide coupler for applying to a temperature sensor.

측면이 코어 가까이 연마된 단일모드 광섬유와 다중모드를 가지는 평면도파로의 소산장 결합(Evanescent Field Coupling)이 형성되면 두 광경로 사이에 광에너지 교환이 발생할 수 있다. 평면도파로는 여러 모드를 가질 수 있으며 이 중 광섬유 모드와 위상정합(phase

matching) 조건을 만족하는 최고차 모드가 효과적인 광 결합을 일으킨다. 다중모드를 가지는 평면도파로의 m번째 모드의 유효굴절률을 찾기 위한 고유치 방정식은 다음과 같다^[4].

$$\frac{2\pi d}{\lambda} (n_0^2 - n_{eo}^2)^{1/2} = m\pi + \psi_1 + \psi_2 \quad (1)$$

여기서 m은 모드의 차수를 나타내는 정수, λ 는 광의 파장, d는 평면도파로의 코어층 두께, n_0 는 평면도파로의 코어 굴절률 그리고 n_{eo} 는 m번째 고차모드의 유효굴절률이다. ψ_1 과 ψ_2 는 평면도파로의 코어층과 클래드층의 경계에서 발생하는 모드의 위상차이로서 다음과 같이 주어진다.

$$\psi_i (i=1 \text{ or } 2) = \tan^{-1} \zeta \frac{\sqrt{(n_{eo}^2 - n_i^2)}}{\sqrt{(n_o^2 - n_{eo}^2)}} \quad (2)$$

여기서 ζ 는 편광상태에 의존하는 상수로서 TE편광에 대해선 $\zeta=1$, TM편광에 대해선 $\zeta = n_o^2 / n_i^2$ 을 대입하면 된다. n_1 은 광섬유 클래드층의 굴절률인 동시에 평면도파로의 하부클래드 굴절률이며 n_2 는 평면도파로 상부클래드층의 굴절률이다.

광섬유-평면도파로 결합기가 광결합을 일으키기 위해서는 광섬유의 유효굴절률(n_{ef})과 평면도파로의 유효굴절률(n_{eo})이 일치해야 한다. 평면도파로의 최고차 모드가 가장 작은 유효굴절률을 가지기 때문에 광섬유의 유효굴절률과 가장 근접하게 되고 식(1)에 $n_{eo} = n_{ef}$ 을 대입하면 평면도파로 m차 모드에서 공진하는 파장(λ_m)을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_m = \frac{2d\pi(n_0^2 - n_{ef}^2)^{1/2}}{m\pi + \psi_1 + \psi_2} \quad (3)$$

한편 광섬유-평면도파로 결합기는 TE와 TM모드의 소산장이 도파로 경계에서 경험하는 위상차가 서로 다르기 때문에 편광의존성이 발생하게 된다. 결합기의 센서응용시 TE응답과 TM응답 중 한쪽 편광으로 온도변화를 감지할 수도 있지만 일반적인 광소자의 경우 편광에 무관하게 동작하는 특성은 매우 중요하다. 이를 위한 방법으로 평면도파로층의 상부 클래드 물질로 광섬유의 클래드와 같은 물질을 사용하여 편광에 의존하는 위상 차이량(ψ_2)을 최소화 시키는 방법과 두께를 증가시켜 모드 차수(m)를 크게 하여 상대적으로 위상

천이량의 효과를 감소시키는 방법이 있다⁶⁾. 굴절률이 1.55인 평면도파로의 두께가 20 μ m 인 평면 도파로의 상부층이 공기이면 10 nm 정도의 편광에 따른 공진 파장의 차이를 가지는 반면에 도파로 위에 놓인 물질이 광섬유 클래딩과 같은 물질이면 그 값이 0.5~0.6nm 정도로 개선 된다. 대칭적 평면 도파로일 경우 ψ_1 가 최소화 되고 분포향에서 두꺼운 평면도파로일 경우 최고차 모드(차수(m)이 큰 값을 가지기 때문에 정성적 해석을 위하여 식(3)의 오른쪽 ψ 항을 무시하면 아래와 같은 간단한 식이 유도된다.

$$\lambda_m = \frac{2d(n_0^2 - n_{ef}^2)^{1/2}}{m} \quad (4)$$

이러한 특성을 가지는 광섬유-평면도파로 결합기의 센서 응용시 온도가 증가되면 공진파장의 이동현상이 나타나는 파장변형 온도센서로 동작하게 된다. 센서의 공진파장 이동현상은 온도에 따른 평면도파로의 굴절률 변화(Δn_0)와 두께변화(Δd)가 원인이 된다. 본 연구에서 평면도파로 물질로 사용한 폴리머의 경우 온도가 증가하면 열광학계수(thermooptic coefficient)에 의해 굴절률이 감소하고 두께는 열팽창계수(thermal expansion coefficient)에 의해 증가하게 된다^{6, 8)}. 열팽창계수에 의한 효과는 식(3)에서 온도가 증가할수록 평면도파로의 두께가 증가하여 공진파장이 길어지는 방향으로 이동하는 현상을 일으킨다. 반면에 열광학계수에 의한 효과는 평면도파로의 굴절률 변화로 인하여 온도가 증가할수록 공진파장이 짧아지는 방향으로 이동시키는 상반되는 현상을 나타낼 수 있다. 일반적으로 폴리머의 경우 열광학계수는 ~ -10 -4/°C이고 열팽창계수는 ~ 10 -5/°C로 정도로서 온도 변화에 따른 공진파장의 이동현상은 굴절률이 변하는 효과가 주로 기여한다^{9, 10)}.

제안된 온도센서의 경우 공진파장의 이동으로 온도 변화를 감지하기 때문에 높은 해상도를 가지기 위해서는 좁은 반치폭이 요구된다. 제안된 소자의 파장선택성은 평면도파로의 분산 특성에 의존한다. 즉 광섬유 모드와 평면도파로 모드사이의 위상정합을 만족하는 파장영역이 평면도파로의 분산이 커질수록 줄어든다. 따라서 평면도파로의 분산을 크게 하는 방법으로 폴리머층의 굴절률과 두께를 증가시키는 방법이 유효하다. 또한 평면도파로의 두께를 증가시키면 반치폭이 줄어들 뿐만 아니라 광섬유모드와 결합하는 평면도파로의 최고차 모드의 차수가 증가하기 때문에 TE 편광과 TM

편광의 공진파장의 차이도 감소하게 되어 편광에 덜 의존하는 특성을 기대할 수 있다.

그림 1에서 평면도파로의 상부 클래드 재료는 광섬유 클래드와 같은 굴절률을 가져야 편광에 의존하는 위상천이량(ψ_2)를 최소화시킬 수 있다. 이때 소자의 최상부층(superstrate)의 재료는 센서가 사용되는 공간의 물질이기 때문에 소자의 공진파장이 최상부층의 굴절률에 영향을 받지 않기 위해서는 평면도파로의 두께를 충분히 두껍게 설계하여야 한다.

평면도파로의 굴절률(n_0)에 대한 공진파장의 변화($\frac{d\lambda_m}{dn_0}$)는 편광의존성이 없다고 가정할 때 즉, ψ_1 과 ψ_2 를 무시하면 쉽게 구할 수 있다. 폴리머의 열광학계수를 $\Gamma = \frac{dn_0}{dT}$ 라고 정의하고 미소 온도 변화에 대한 센서의 공진파장의 변화를 구하면 아래와 같다.

$$\frac{d\lambda_m}{dT} = \Gamma \frac{2d}{m(1 - n_{ef}^2/n_0^2)^{1/2}} \quad (5)$$

사실 폴리머의 열광학 효과는 폴리머의 부피 팽창에 기인한 것이다. 그러나 일반적으로 열광학 효과가 도파로 특성에 미치는 영향을 고려할 때 그 부피팽창에 의한 효과보다 굴절률 변화에 의한 효과가 더 큰 것으로 알려져 있기 때문에 폴리머막의 두께는 온도에 대해서 일정한 것으로 가정하였다. 광섬유가 폴리머 보다 열적으로 훨씬 안정하기 때문에 광섬유 유효굴절률의 온도 의존성은 고려하지 않았다. 본 연구에서 굴절률과 열광학 계수가 다른 다섯가지 폴리머를 평면도파로로 사용하여 소자의 특성을 비교하였다. 온도에 따른 공진 파장의 이동거리는 평면도파로의 두께에 크게 영향을 받지 않는다. 즉 식(5)에서 d가 커지면 m도 순차적으로 증가하기 때문이다. 실험으로 온도에 따른 공진 파장의 이동거리를 구하면 식(5)를 이용하여 폴리머 평면도파로의 열광학 계수를 간접적으로 계산이 가능하다.

III. 특성 측정 및 분석

본 연구에서는 적절한 곡률반경과 연마깊이가 고려된 V홈을 실리콘기판에 형성하고 그 속에 광섬유를 에폭시 수지로 집착한 후 연마하였다¹¹⁾. 여기서 곡률반경은 15cm로 유지하였다. 평면도파로는 연마된 광섬유 블록위에 스펀코팅 방법으로 형성하였으며 그 위에 RF

스퍼터로 광섬유 클래드와 굴절률이 동일한 실리콘 산화막(SiO₂)층을 형성하였다.

제작된 센서의 온도측정을 위한 장치도는 그림 2와 같으며 백색광원과 광스펙트럼분석기를 사용하여 소자의 특성을 측정하였다. 온도조절기를 사용하여 센서에 열을 가하여 안정화 시킨후 제작된 소자 위에 부착된 써모커플(thermo-couple)로 온도변화를 측정하였다.

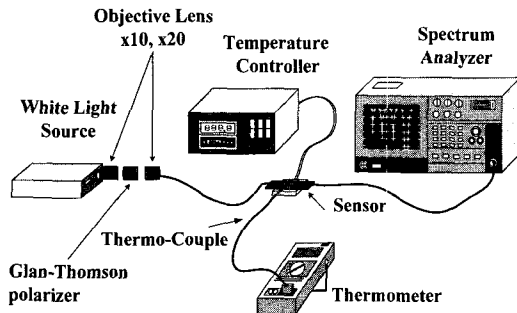


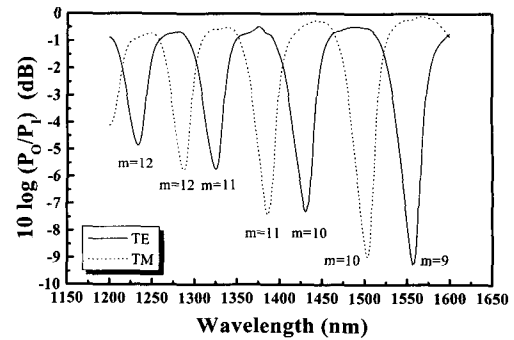
그림 2. 제작된 센서의 측정장치도

Fig. 2. Experimental setup of fabricated sensor.

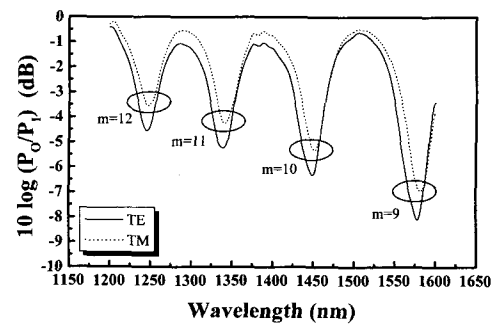
평면도파로의 상부층의 재료에 따른 결합기의 편광 의존성과 평면도파로층의 두께에 따른 파장응답특성을 측정하였다. 그림 3은 평면도파로의 상부클래드층 굴절률을 달리했을 경우의 편광의존성을 측정한 결과이다. 복소굴절률을 가지는 금과 공기 그리고 SiO₂를 상부클래드로 형성하였다. 측정결과 이론적 예측과 마찬가지로 평면도파로의 구조가 대칭적일 때 공진파장이 입력 광의 편광상태에 가장 의존하지 않는 특성을 보였다.

그림 4는 평면도파로의 두께를 달리했을 경우의 파장응답 특성을 나타내었다. 측정결과 평면도파로의 두께가 두꺼울수록 결합모드의 수가 증가하며 여러 개의 공진이 발생할 때 파장이 긴 쪽에서 여과 깊이가 더 깊게 나타남을 알 수 있다. 이는 파장이 길수록 광섬유 모드의 결합이 더 크게 일어나기 때문이다. 또한 이론적 분석과 마찬가지로 두께가 두꺼울수록 파장간의 간격이 짧아지면서 공진파장의 반치폭이 작아짐을 알 수 있다. 이는 센서의 측정시 관측의 용이함을 위해 평면도파로의 두께가 두꺼워야 함을 나타낸다.

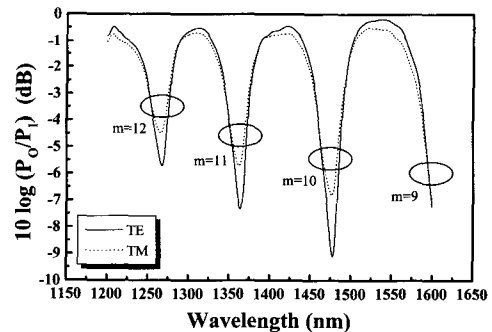
광섬유 측면연마 후 남은 광섬유 클래드의 두께에 따른 투과스펙트럼을 측정하였다. 결합간격(g_0)이 다른 다섯개의 광섬유 블록을 제작하여 여과 특성을 비교하였으며 AZ4562를 이용하여 동일한 두께의 평면도파로를 형성시켰다. 남은 광섬유 클래드의 두께는 제작된



(a)



(b)

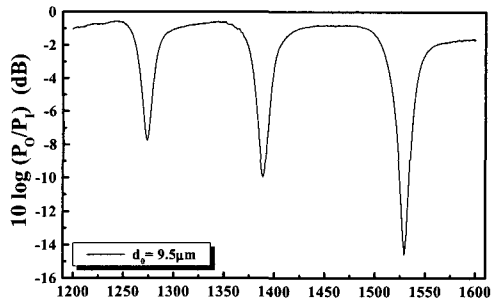


(c)

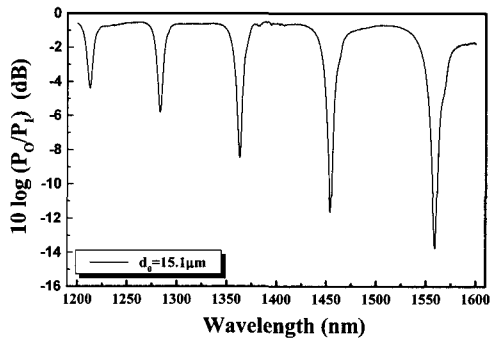
그림 3. 평면도파로 상부클래드 물질에 따른 파장응답, 평면도파로 물질 : AZ4562 ($n_0 = 1.600$), (a) $n_2=0.4+j8.25$ (금), (b) $n_2=1.0$ (공기), (c) $n_2=1.444$ (실리콘 산화막)

Fig. 3. Wavelength response with upper clad materials of planar waveguide, Planar waveguide material : AZ4562 ($n_0 = 1.600$), (a) $n_2=0.4+j8.25$ (gold), (b) $n_2=1.0$ (air), (c) $n_2=1.444$ (SiO₂).

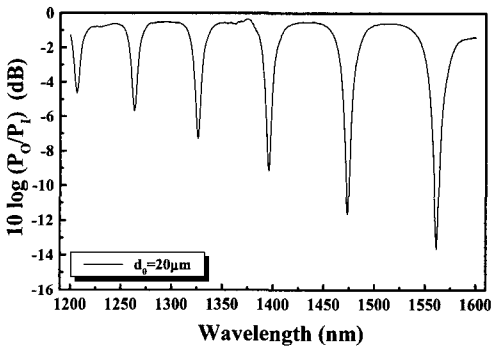
광섬유 블록 위에 광섬유의 코어와 동일한 굴절률을 가진 정합액을 도포하여 손실을 측정을 통해 계산한 결과 각각 5.7, 5.5, 5.2, 4.5, 4.0 μ m이었다^[12]. 이렇게 제



(a)



(b)



(c)

그림 4. 평면도파로의 두께에 따른 파장응답
Fig. 4. Wavelength response with thickness of planar waveguide.

작된 광섬유 위에 동일한 두께를 가지는 폴리머 평면도파로를 결합시켜 그 특성을 측정된 결과가 그림 5에 나타나 있다. 평면도파로의 두께가 같고 연마 후 남은 광섬유 클래드의 두께가 다른 다섯개 결합기의 공진파장은 거의 동일하였으며 연마후 남은 클래드가 적을수록 광결합 반치폭이 커짐을 알 수 있다^[13]. 따라서 센서 적용시 광결합 반치폭이 작으면 측정에 용이하므로 광결합이 일어날 수 있는 범위에서 최대한 연마를 적게 하여 센서를 제작하였다.

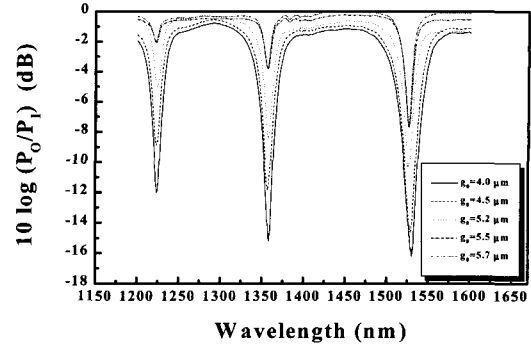
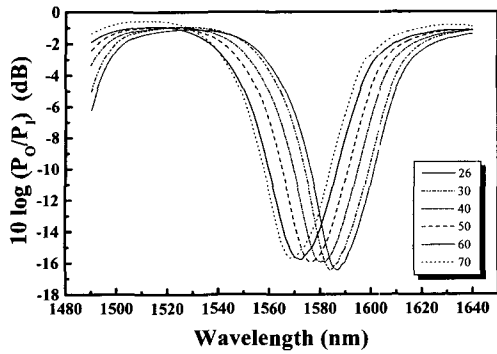
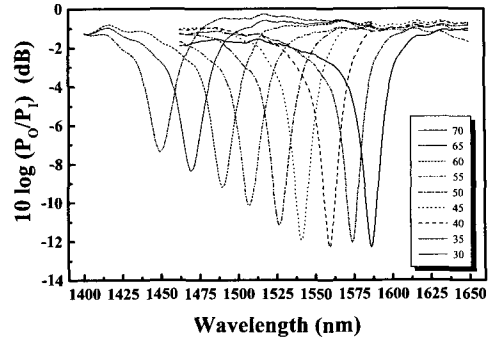


그림 5. 결합간격(g_0)에 따른 파장응답, 평면도파로 물질 : AZ4562, 상부클래드 물질 : SiO₂
Fig. 5. Wavelength response with coupling gap(g_0), Planar waveguide material : AZ4562, Upper clad material : SiO₂.

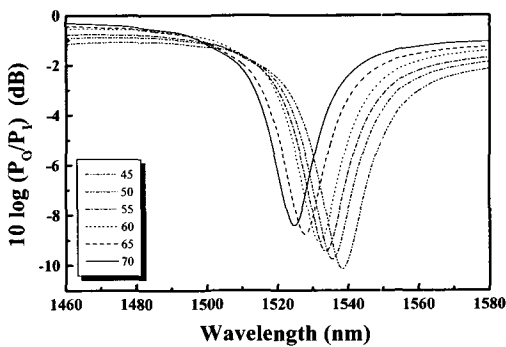
그림 6은 제작된 센서의 온도에 대한 파장특성을 나타내었다. 그림 6(a)는 평면도파로 물질로 AZ4562를 사용하였을 경우 온도에 따른 파장응답특성이다. 소자를 실온의 기판에서 70°C로 가열된 기판 위에 옮겼을 때 공진 파장이 완전히 이동하는 시간은 약 2분 정도로 측정되었다. 실온(26°C)에서 70°C까지 온도변화를 주었을 때 공진파장의 변화는 -0.39nm/°C 이며 5°C의 온도변화 감지는 가능하였으나 1°C의 온도 변화를 관측하기에는 용이하지 못하였다. 그림 6(b)는 폴리스티렌을 평면도파로로 사용하였을 경우 센서의 파장응답특성이다. 폴리스티렌의 경우 -0.65nm/°C의 특성을 보였으면 1°C의 온도변화도 측정 가능하였다. 그림 6(c)는 AZ1512를 평면도파로로 사용하여 제작한 센서의 파장응답특성이다. 온도에 따른 공진파장의 변화는 -0.71nm/°C로 폴리스티렌과 비슷하게 나타났으나 전자의 두 물질보다 감도의 변화가 증가함을 알 수 있으며 1°C의 온도변화 측정도 보다 용이함을 알 수 있다. 이는 요즘 많은 연구가 이루어지고 있는 FBG형 센서가 13pm/°C의 감도를 가진 점을 감안할 때 개선된 감도특성을 보인다. 그림 6(d)는 NOA61을 평면도파로로 사용하였을 경우 파장응답 특성이다. 양성 포토레지스터인 AZ4562와 AZ1512는 100°C 이상의 온도를 경험하면 원래성질이 되돌아 오지 않는 특성을 보였고, 나머지 폴리스타렌과 자외선 감광 물질인 NOA61과 THB30은 120°C이상의 온도를 경험해도 원래 성질을 잘 견디는 실험결과를 보였다. 따라서 본 연구에서 사용한 NOA61과 THB30을 평면도파로의 재료로 이용할 경우 100°C이하에서 안정적으로 이용 가능하다. 또한 NOA61의 경우 1°C의 온도변화 뿐만 아니



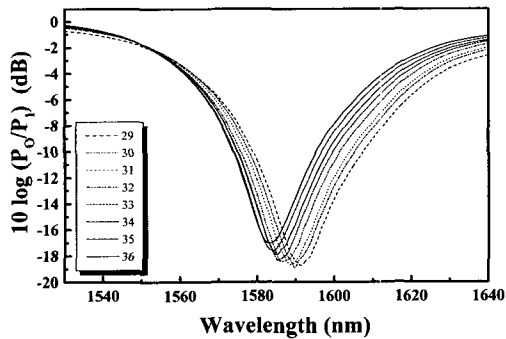
(a)



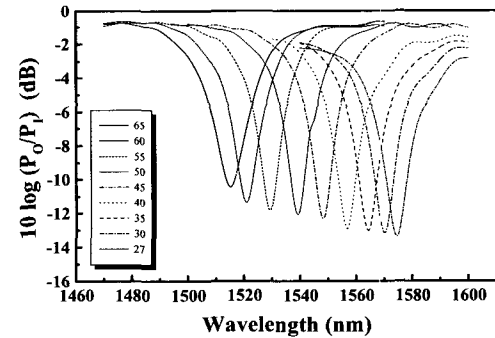
(e)



(b)



(c)



(d)

그림 6. 제작된 센서들의 온도에 따른 파장응답,

- (a) 평면도파로 물질 : AZ4562,
- (b) 평면도파로 물질 : 폴리스티렌,
- (c) 평면도파로 물질 : AZ1512,
- (d) 평면도파로 물질 : NOA61,
- (e) 평면도파로 물질 : THB30

Fig. 6. Wavelength response of fabricated sensors with temperature.

- (a) Planar waveguide material : AZ4562,
- (b) Planar waveguide material : Polystyrene,
- (c) Planar waveguide material : AZ1512,
- (d) Planar waveguide material : NOA61,
- (e) Planar waveguide material : THB30.

표 1. 평면도파로 물질의 광학적 특성

Table 1. Optical characteristic of planar waveguide materials.

특성 물질	굴절률	파장이동 (nm/°C)	열광학계수 (°C ⁻¹) (Δn/ΔT)	비 고
AZ4562	1.600	-0.39	-0.779 × 10 ⁻⁴	Hochest
폴리스티렌	1.580	-0.65	-1.048 × 10 ⁻⁴	Aldrich
AZ1512	1.570	-0.71	-1.106 × 10 ⁻⁴	Hochest
NOA61	1.5294	-1.57	-2.131 × 10 ⁻⁴	Norland
THB30	1.533	-3.43	-4.746 × 10 ⁻⁴	Japan synthetic rubber

라 그 이하의 미소한 온도의 변화도 감지가 가능함을 알 수 있다. 그림 6(e)의 THB30을 평면도파로로 사용하였을 경우 센서는 -3.43nm/°C의 특성을 나타내어 제작한 센서중 가장 좋은 감도특성을 보였으며 AZ4562보다 약 10배 정도의 감도가 크게 나타났다. 표 1에 제작된 센서의 광학적 특성과 식(5)를 이용하여 구한 열광학계수를 정리하였다.

그림 7은 다른 열광학계수를 가지는 물질을 평면도파로로 사용하여 제작된 센서들의 감도를 비교하였다. 센서의 감도는 비교적 선형성을 보였으며 물질에 따라 감도의 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 제안된 센서의 경우 온도에 따른 정확한 측정과 평면도파로의 물질에 따라 센서의 감도를 조절하여 제작할 수 있음을 나타낸다.

THB-30의 경우 주위온도와 공진 파장의 관계가 가장 비선형 적으로 나타났다. 완전 선형으로 가정할 경우 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 오차가 발생하기 때문에 정확한 온도 특성을 측정하기 위해서는 약간의 보정이 필요하다.

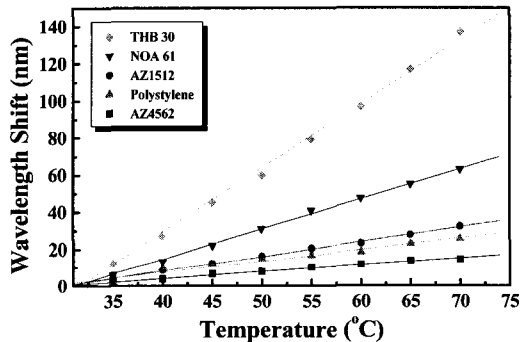


그림 7. 평면도파로 물질에 따른 센서들의 감도비교
Fig. 7. Sensitivity comparison of sensors with planar waveguide materials.

IV. 결 론

본 연구에서는 측면연마된 광섬유와 평면도파로 결합기를 이용하여 고감도 온도센서를 제작하고 그 특성을 측정하였다. 폴리머를 평면도파로로 사용하여 다양한 감도의 센서를 구현하였고 평면도파로의 대칭적 구조를 이용하여 측면연마시 생기는 편광의존성을 제거하였다. 제작된 센서는 온도에 대해 선형적인 변화를 보임으로 정확한 측정이 가능하고 평면도파로의 열광학 특성을 이용하기 때문에 온도에 보다 민감하게 반응하는 센서의 구현이 가능함을 실험을 통해 알 수 있었다. 또한 열광학계수 측정의 한 방법으로도 본 센서의 구조가 이용될 수 있음을 확인하였다. 본 센서의 경우 그 특성이 평면도파로의 광학적 성질에 많이 의존하므로 열광학효과가 우수한 평면도파로 재료를 사용할 경우 보다 고감도의 센서의 제작과 감도를 조절하여 유동적인 제작이 가능함으로 다양한 응용이 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] A. D. Kersey, T. A. Berkoff and W. W. Morey, "High resolution fiber Bragg grating based strain sensor with interferometric wavelength shift detection," *Electron. Lett.* Vol. 28, pp. 236-238, 1992.
- [2] G. Lin, L. Wang, C. C. Yang, M. C. Shin and T. J. Chuang, "Thermal performance of metal-clad fiber Bragg grating sensor," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 10, pp. 406-408, 1998.
- [3] Zhi-Yi Zhang, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer and B. T. Meggitt, "Thulium-doped intrinsic fiber optic sensor for temperature measurements," *Review of scientific instruments*, Vol. 69, pp. 3210-3214, 1998.
- [4] W. Johnstone, G. thursby, D. Moodie, and K. Mccallion, "Fiber-optic refractometer that utilizes multimode waveguide overlay devices," *Optics Lett.* Vol 17. No. 21, pp. 1538-1540, Nov. 1992.
- [5] Kwang-taek Kim, Hyung-woo Kwon, Jae-won Song, Sang-jae Lee, Woong-gyu Jung, Shin-won Kang, "Polarizing properties of optical coupler composed of single mode side-polished fiber and multimode metal-clad planar waveguide," *Optics communications*. Vol. 180, pp. 37-42, 2000.
- [6] Yasuhiro Hida, Katsuhide Onose, and Saburo Imamura, "Moisture-induced drift in thermo-optic phase shifters composed of deuterated and fluorinated methacrylate polymer waveguides", *Applied optics*, Vol. 36. No. 27, pp. 6828-6837, 1997.
- [7] J. M. Cariou, J. Dugas, L. Martin, and P. Michel, "Refractive-index variations with temperature of PMMA and polycarbonate", *Applied optics*, Vol. 25. No. 3, pp. 334-336, 1986.
- [8] Toshio Watanbe, Naoki Ooba, Yasuhiro Hida,

- and Makoto Hikita, "Influence of humidity on refractive index of polymers for optical waveguide and its temperature dependence," Appl. Phys. Lett. Vol. 72(13). pp. 1533-1535, 1998.
- [9] J. Brandrup, E. H. Immergut, "Polymer handbook," John Wiley & Sons, 1989.
- [10] R. H. Boundy, R. F. Boyer, eds. "Styrene, Its Polymers, copolymers and Derivatives", Reinhold Publishing Corp., New York, 1952.
- [11] S. M. Tseng and C. L. Chen, "Side-polished fibers," Applied optics, Vol. 31, No. 18, pp. 3438-3447, June 1992.
- [12] Ssu-pin ma and Shiao-min Tseng, "High-performance side-polished fiber and application as liquid crystal clad fiber polarizers," IEEE J. of Lightwave Tech. Vol. 15, No. 4, pp. 864-867, Aug. 1995.
- [13] 김광택, 유효중, 송재원, 김시홍, 강신원, "단일모드 광섬유와 다중모드 평면도파로의 소산장결합을 이용한 광필터의 동작특성 측정", 대한전자공학회, Vol. 36, pp. 622-629, 1999

 저 자 소 개

鄭 雄 圭(正會員)

1999. 2 : 경남대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2001. 2 : 경북대학교 센서공학과 졸업(공학석사). <주관심분야> 광통신소자, 광섬유센서

金 光 鐸(正會員)

1989년 : 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1991년 : 경북대학교 전자공학과 졸업(공학석사). 2000년 : 경북대학교 전자공학과 졸업(공학박사). 1991년~1995년 : 포항공대 가속기연구소. 2000년~현재 : 호남대학교 전자공학과 교수. <주관심분야> 광섬유소자, 집적광학소자, 광센서

俞 允 植(正會員)

1977년 : 부산대학교 물리교육학과(이학사), 1977년 : 부산대학교 물리학과(이학석사), 1992년 : 부산대학교 물리학과(이학박사), 1982년~현재 : 동의대학교 물리학과 교수, 1996년 3월~1997년 8월 : Emory 대학교(미국) 교환교수. 1999년 4월~2001년 3월 : 동의대학교 기초과학연구소 소장. <주관심분야> 레이저 분광학(Brillouin, Raman, PL), 강유전체 박막, 반도체 레이저, 청색 형광체

金 相 佑(正會員)

2000. 2 : 동아대학교 물리학과 졸업(이학사). 2000. 3~현재 : 경북대학교 센서공학과 석사과정. <주관심분야> 광섬유센서, 광통신소자

金 應 秀(正會員)

1990년 : 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1992년 : 경북대학교 전자공학과 졸업(공학석사). 1996년 : 일본 게이오대학교 물질과학과 졸업(공학박사). 1996년~1997년 : LG 반도체 주식회사 ULSI 연구소 선임연구원. 1997년~현재 : 부산외국어대학교 컴퓨터전자공학부 교수. <주관심분야> 광센서, 광통신, 비선형광학

姜 信 元(正會員)

1978년 : 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사), 1980년 : 영남대학교 전자공학과 졸업(공학석사), 1993년 : 일본 게이오대학교 생체의공학과 졸업(공학박사), 1994년~현재 : 경북대학교 전자전기공학부 교수 <주관심분야> 광도파로/광섬유센서, 집적광학소자