《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Volume 22, Number 2, April 2011 DOI: 10.3807/KJOP.2011.22.2.067

UV광 측정용 아조벤젠 코팅된 FBG의 열적 효과 제거 및 파장 의존성에 대한 연구

최동석[1] · 김현경[2] · 안태정[1†]

[1]조선대학교 광기술공학과
㊞ 501-759 광주광역시 동구 서석동

[2]조선대학교 응용화학소재공학과
㊞ 501-759 광주광역시 동구 서석동

(2011년 1월 26일 받음, 2011년 2월 22일 수정본 받음, 2011년 2월 22일 게재 확정)

본 논문에서는 ultraviolet (UV) 광의 세기를 원격으로 측정하기 위한 아조벤젠 (azobenzene) 코팅된 fiber Bragg grating (FBG)를 구현하였다. 아조벤젠 폴리머는 UV 광에 의해서 탄성이 변화하여 FBG의 코어 격자의 주기 변화를 유도하여 중심파장을 이동시킨다. 중심파장의 이동은 UV 광과 UV 이외의 파장대역의 빛에 의해서 복합적으로 발생하는데 중심파장의 이동량은 약 0.18 nm 이다. 측정의 정확성을 향상시키기 위해서 광원의 복사열에 의한 중심파장의 이동을 열차단 필터(thermal filter)를 사용하여 제거한 결과 중심파장의 이동량은 약 0.06 nm로 다소 감소하였지만 분석 결과 열에 의한 이동량이 충분히 제거된 것을 확인하였다. 또한 서로 다른 방법인 열경화법과 UV 경화법으로 각각 제작된 아조벤젠 폴리머를 이용하여 아조벤젠 코팅 FBG를 제작하였고, 각 제조법에 따른 UV센서로서의 적합성을 확인하였다. 몇 개의 밴드패스 필터(band pass filter)를 사용하여 파장에 대한 민감도를 측정한 결과, 단위 UV 세기당 중심파장의 이동량은 370nm 파장 밴드에서 가장 큰 값인 0.029로, 단파장 영역에서 반응성이 우수하다는 사실을 확인 하였다. 아조벤젠 폴리머의 흡수 스펙트럼과 아조벤젠 코팅 FBG의 파장 의존도가 서로 잘 일치하는 것을 확인하였다. .

The Study of Thermal Effect Suppression and Wavelength Dependence of Azobenzene-coated FBG for UV Sensing Application

Dong-seok Choi[1], Hyun-Kyoung Kim[2], and Tae-Jung Ahn[1†]

[1]*Department of Photonic Engineering, Chosun University, Seoseok-dong, Dong-gu, Gwangju 501-759, Korea*

[2]*Department Polymer Science & Engineering, Chosun University, Seoseok-dong, Dong-gu, Gwangju 501-759, Korea*

(Received January 26, 2011; Revised manuscript February 22, 2011; Accepted February 22, 2011)

In the paper, we have demonstrated an azobenzene-coated fiber Bragg grating (FBG) for monitoring ultraviolet light (UV) intensity in remote measurement. The elasticity of the coated azobenzene polymer is changed by the UV light, which induces a center wavelength change corresponding to the change of the FBG's grating period. The wavelength shift resulting from both UV light and other light with the wavelength out of the UV range was about 0.18 nm. In order to improve the accuracy of the measurement, the center wavelength shift caused by radiant heat of the light source was sufficiently removed by using a thermal filter. The amount of the center wavelength shift was consequently reduced to 0.06 nm, compared to the result without the thermal filter. Also, the FBGs coated by using azobenzene polymer were produced by two different methods; thermal casting and UV curing. Considering temperature dependence, UV curing is more suitable than thermal casting in UV sensor application of the azobenzene-coated FBG. In addition, we have confirmed the wavelength dependence of the optical sensor by means of four different band pass filters. Thus, we found out that the center wavelength shift per unit intensity is 0.029 [arb. unit] as a maximum value at 370 nm wavelength region and that the absorption spectrum of the azobenzene polymer was very consistent with the wavelength dependence of the azobenzene-coated FBG.

Keywords: Fiber Bragg grating, UV sensor, Azobenzene, Polymer
OCIS codes: (060.0060) Fiber optics and optical communications; (060.2370) Fiber optics sensors; (060.3738) Fiber Bragg gratings, photosensitivity

†E-mail: taejung.ahn@chosun.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

I. 서 론

최근 들어 포토 리소그래피, 워터마크 제작, 광택, 코팅 등 다양한 분야에서 UV light emitting diode (LED), UV 램프, 고출력 UV 레이저 등의 UV 광이 많이 사용되고 있다. 그 결과, 피부병변이나 색소 침착, 백내장 등의 안과 질환과 인체 면역계통에의 악영향 등의 인체 유해성이 문제로 대두되고 있으며, 이로 인해 UV 광의 세기를 안전하게 원격으로 측정할 수 있는 시스템의 필요성이 대두되고 있다[1]. 일반적으로, 포토다이오드(photo-diode) 기반의 UV 광 측정용 광검출기는 비교적 고가이고, 원격 측정 시스템에 적용하기 어려운 것으로 알려져 있다. 기존에 제안된, 측면 연마된 광섬유 센서와 미소광학 간섭계 센서는 가격과 제작에 있어서 포토다이오드 기반 UV 센서보다 우수한 특성을 보이지만, 제작이 어렵고 단일 측정 시스템에서 다중 포인트를 측정하지 못하는 단점이 있다[2, 3]. 최근 이러한 단점들을 극복한 UV에 민감한 아조벤젠 (azobenzene) 폴리머가 코팅된 광섬유 격자 센서가 제안되었다[8]. UV 광에 노출된 아조벤젠 폴리머는 광섬유에 장력을 유도하여 광섬유격자 간격을 변화시켜 최종적으로 중심파장 특성을 변화시킴으로써 광의 세기를 측정하는 원리이다. 여기서 제안된 UV 광 측정용 아조벤젠 코팅 FBG 센서는 UV 광뿐만 아니라 외부열 (예, 광원의 복사열, 주변 온도)에 의해서도 중심파장이 이동하게 되어 실제 UV 광 자체의 세기 측정의 정확도가 낮아지게 된다. 본 논문에서는 이 문제를 해결하기 위해 간단히 특정 파장대역의 UV 광만 투과시키는 열차단 필터(즉, UV 투과 필터)를 사용하여 외부 열을 차단 하여 외부 온도에 의한 중심파장의 변화를 제거하여 측정의 정확도를 높였다. 또한 개발된 UV 센서의 파장 의존도를 확인하기 위해 투과 파장 대역이 서로 다른 밴드패스 필터 (band pass filter)를 사용 하여 파장에 따른 응답 특성을 확인하였다.

II. 아조벤젠 폴리머 및 아조벤젠 코팅 FBG 제작 방법

본 실험에서는 비닐이서 타입의 아조벤젠 모노머[R]와 trimethylolpropane triacrylate (TMPTA), hydroxyethyl acrylate (HEA) 그리고 2, 4, 6-trimethylbenzoyl-diphenyl phosphine oxide (TPO) 등의 광개시제로 구성된, 새로운 아조벤젠을 함유한 자외선 경화형 배합물을 열경화법(thermal casting method)과 UV 경화법, 두 가지 방법을 이용하여 각각 다른 특성을 갖도록 FBG에 결합하였다[4-7]. 아조벤젠 폴리머는 UV 광에 의해서 이성화가 진행되어 필름의 탄성이 줄어드는 특성을 가진다.

그림 1에서 보는 바와 같이 줄어든 탄성 때문에 폴리머의 길이는 길어지게 되는데, 이러한 특성을 FBG에 결합 시키기 위해 액체 상태의 아조벤젠 폴리머 속에 FBG를 위치시킨 후 핫플레이트와 경화용 UV를 이용하여 서로 다른 방법으로 아조벤젠 폴리머를 FBG 표면에 경화 및 코팅 하였다. UV광에 의해서 발생한 아조벤젠 폴리머의 길이의 증가는 FBG에

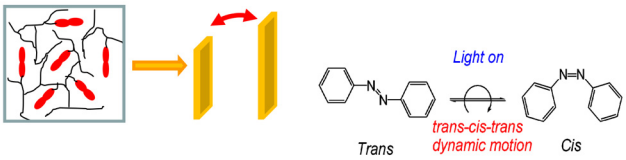

FIG. 1. Schematic representation of mechanical stretching behavior induced by UV.

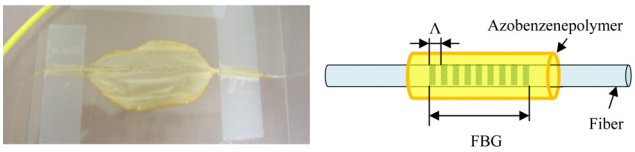

FIG. 2. Azobenzene-coated FBG.

장력으로 작용하여 광섬유 코어 격자 주기를 증가시켜 최종적으로 중심파장을 장파장으로 이동 시키게 된다. UV 광에 의해서 아조벤젠 코팅 FBG는 실제로 ~0.1% 정도의 변형율(strain)의 증가가 발생하는데[8], 스트레인과 중심파장의 관계는 간단히 다음 수식으로 표현된다.

$$\lambda_B = 2n_e\Lambda \tag{1}$$

여기서 λ_B와 Λ는 각각 FBG의 공진파장과 격자 주기이고, n_e는 FBG의 유효 굴절률을 나타낸다. 아조벤젠 폴리머에 의해서 발생한 FBG의 장력은 격자 간격을 증가시킨다. 격자 주기(Λ)와 공진파장(λ_B)은 비례 관계에 있으므로 격자 주기의 증가는 결과적으로 FBG의 공진 파장을 장파장으로 이동시키게 된다. 그림 2에서는 실제 제작된 아조벤젠 코팅된 FBG와 세부구조를 보여주고 있다.

III. 실험 및 실험 결과

본 실험의 구성도는 그림 3과 같다. 광원으로는 1550 nm 대역의 광대역 광원 (superluminescent light emitting diode, SLED)을 사용했고, UV 광원으로는 270~600 nm 대역의 파장을 가진 UV 램프(Acticure, EFOS inc.)를 사용 하였다. 열차단 필터(thermal filter)로는 0~550nm 대역을 투과시키는 밴드패스 필터(FES0550, Thorlabsinc.)를 사용 하였다. 또한 광스펙트럼 분석기 (optical spectrum analyzer, OSA)와 LabVIEW를 연동하여 스펙트럼 데이터를 수집하였다.

UV 광에 의한 아조벤젠 코팅 FBG의 공진 스펙트럼과 중심파장의 이동은 그림 4와 같다. 시간이 경과함에 따라서 UV 광에 의한 아조벤젠 코팅 FBG의 공진 스펙트럼이 장파장으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 또한 UV 광의 세기가 커짐에 따라서 중심파장의 이동량이 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있는데[8] 이와 같은 특징을 이용하여 아조벤젠 코팅 FBG를 UV 센서로 사용할 수 있다.

아조벤젠 코팅 FBG의 중심파장의 이동에는 크게 3가지 요

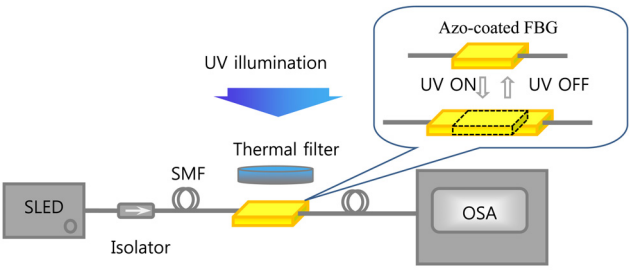

FIG. 3. Schematic diagram of UV sensor based on azobenzene-coated FBG.

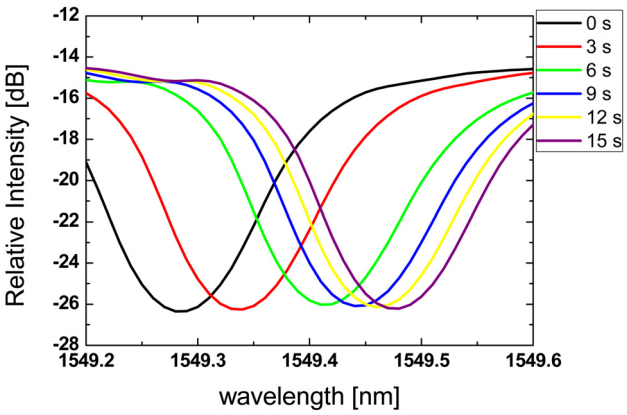

FIG. 4. Optical transmission spectrum of azobenzene-coated FBG and peak wavelength shift of azo-coated FBG with respect to time.

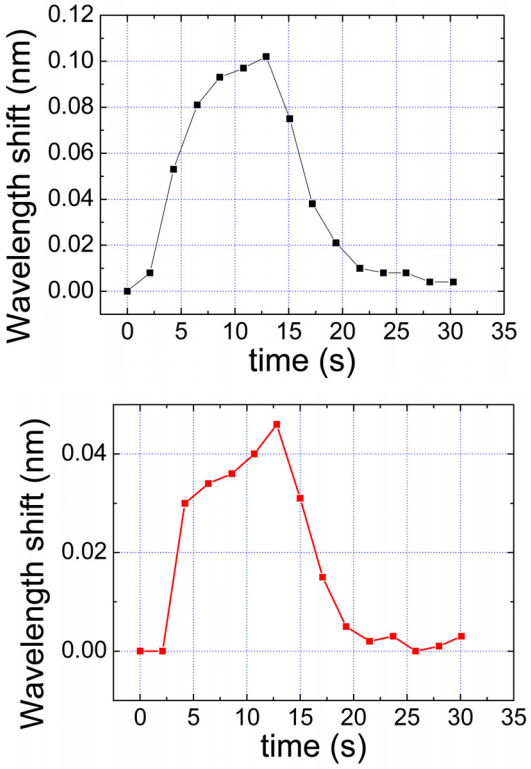

FIG. 5. Peak wavelength shift (in time domain) (a) without and (b) with thermal filter of azobenzene-coated FBG fabricated by thermal casting method.

인이 존재한다. UV 광에 의한 아조벤젠 폴리머의 길이의 변화로 인한 격자 주기 변화, 광원에서 발생한 열에 의한 격자 주기 변화, 그리고 UV 광에 의한 격자의 굴절률 변화이다[8]. 아조벤젠 코팅 FBG의 외부 열에 의한 중심파장의 이동이 UV 광의 세기 측정의 정확성을 저하시키는 원인이 된다. 정확성을 향상시키기 위해 열차단 필터로써 밴드패스 필터(0~550 nm)를 UV 광원과 아조벤젠 코팅 FBG 사이에 위치시켜서, UV 광원에서 발생하는, UV 영역 이외에서 발생하는 복사열을 차단하였다.

열경화법으로 제작된 아조벤젠 폴리머가 코팅된 FBG는 UV 광의 세기가 16 mW/cm^2 일 때, 시간이 경과함에 따라 최대 0.102 nm 정도의 이동을 보였다. 열차단 필터를 사용하지 않은 경우(Fig.5(a)), 시간의 경과에 따른 중심파장의 변화 형태는 아조벤젠 폴리머의 길이변화에 의한 중심파장의 이동(급격한 변화)과 광원의 복사열에 의한 이동(느린 변화)으로 명확히 구분되지 않는다. 열차단 필터를 사용한 경우(Fig. 5(b)), 중심파장의 이동량은 최대 0.046 nm로 필터를 사용하지 않은 경우에 비해서 절반이상 감소하였다. 중심파장의 이동 형태를 살펴보면 폴리머의 길이의 변화에 의한 중심파장의 이동은 2~4초 사이에서 급격히 증가하고 13~19초 사이에서 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 외부 열에 의한 완만한 증가와 감소는 4~13초 사이와 19~30초 사이에서 발생한다. 중심파장의 이동 형태는 급격한 변화와 완만한 변화 두 가지로 비교적 명확하게 구분 되었으나 광원의 복사열에 의한 중심파장의 변화가 완전히 제거 되지 않은 것을 확인할 수 있다. UV광은 0초에서 켜진 뒤 중심파장의 이동량이 증가하는 시간(0~13초)동안 유지된 후, 중심파장의 증가량이 감소하기 시작하는 부분(13초)에서 꺼진다.

UV 경화법으로 제작된 아조벤젠폴리머가 코팅된 FBG는 위와 동일한 환경에서 최대 0.18 nm 정도의 이동량을 보인다. UV 조사에 따른 아조벤젠 코팅 FBG의 시간의 경과에 따른 중심파장의 이동은 다음 그림 6과 같다. 열차단 필터를 사용하지 않고 측정한 경우 폴리머의 길이의 변화에 의해 급격히 변하는 부분(A, C)과 열에 의해 천천히 변화하는 부분(B, D)으로 명확하게 나눌 수 있다. 열에 의한 변화를 제거하기 위해 열차단 필터를 사용한 경우(그림 6(b)), 중심파장의 최대 이동량은 0.06nm로써 열차단 필터를 사용하지 않은 경우보다 중심파장의 이동량이 감소하지만, 열경화 방법으로 제작된 아조벤젠 코팅 FBG와는 다르게 열에 의한 중심파장의 완만한 변화(B, D)가 거의 제거된 것을 확인할 수 있다. UV광은 0초에서 켜진 뒤 중심파장의 이동량이 증가하는 시간(0~30초)동안 유지된 후, 중심파장의 증가량이 감소하기 시작하는 부분(30초)에서 꺼진다.

열차단 필터를 사용 하지 않았을 경우에 아조벤젠 코팅 FBG 주변의 온도 변화량은 4℃인 반면, 필터를 사용 했을 경우의 온도 변화량은 약 1.5℃로, 사용된 필터에 의해서

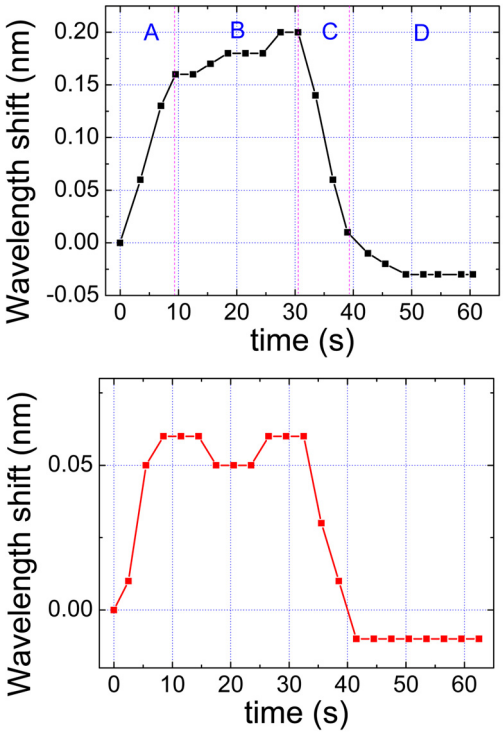

FIG. 6. Peak wavelength shift(in time-domain) (a) without and (b) with thermal filterof azobenzene-coated FBG fabricated by UV curing method.

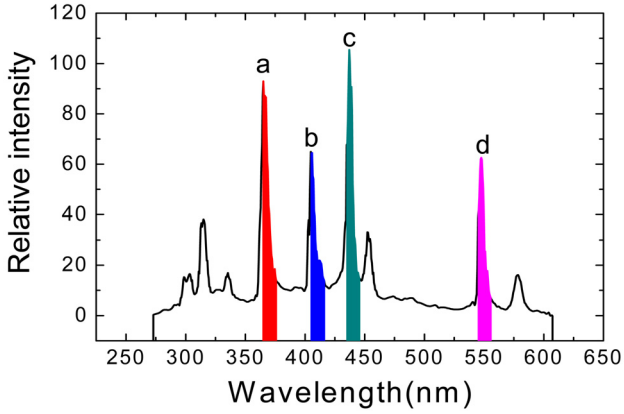

FIG. 7. Spectrum of the UV lamp source.

TABLE 1. Wavelength dependant characteristics of azobenzene coated-FBG

Bandpass Filter[nm]	광원의 기의 면적 비(A)	중심파장의 이동량 (△λ) [nm]	△λ/A [arb.]
a : 37010	0.6675	0.02	0.029
b : 41010	0.5582	0.009	0.016
c : 44010	1	0.015	0.015
d : 55010	0.7842	0.007	0.009

UV 광원에서 발생하는 복사열이 상당량 제거되었다. 이는 UV광원에서 발생하는 복사열에 의한 아조벤젠 코팅 FBG의 중심파장 이동량이 충분히 제거되어 UV 영역 광세기에 의한 중심파장의 이동 만이 발생한다는 것을 의미한다. 또한 열경화 방법과 UV 경화 방법으로 제작된 두 종류의 아조벤젠 코팅 FBG를 각각 비교해 보았을 때, UV 광원에 대한 중심파장의 이동량 및 열차단 효과는 UV 경화법으로 제작된 아조벤젠 코팅 FBG가 더 우수하고, 센서로서 더 적합하다는 것을 확인하였다. 또한 UV 광에 의한 아조벤젠 코팅 FBG의 변형률(strain) 및 응력(stress)변화를 수학적인 방법을 통해 구할 수 있다[9]. 열차단 필터를 사용 했을 때, 제조법이 서로 다른 두 아조벤젠 코팅 FBG의 변형률은 0.00404%와 0.0052%이고, 응력은 2.21×10^6 mN/mm^{2}와 2.87×10^6 mN/mm^{2}로서, UV 경화법으로 제작된 아조벤젠 코팅 FBG가 열 경화법으로 제조된 것에 비해 UV 광에 대해서 더 큰 민감도를 갖는 것을 알 수 있다.

제작된 아조벤젠 코팅 FBG의 파장에 대한 응답 특성을 알아보기 위해서 네 종류의 서로 다른 파장선택 필터를 사용하여 각각의 경우에 대한 중심파장의 이동량을 측정하였다.

그림 7은 본 연구에서 사용한 UV광원의 스펙트럼을 보여주고 있으며, y축의 크기는 437.11 nm를 100로 했을 경우의 상대적인 세기를 나타낸다. UV광원의 스펙트럼은 대략 5개의 밴드(band)를 가지고 있다. 그 중에서 a, b, c, d 네 개의 밴드를 선택해서 해당 파장에 맞는 필터를 사용 하였다. 각 밴드의 중심파장은 365.08 nm, 404.73 nm, 437.11 nm, 547.66 nm이고, 여기에 해당하는 파장선택 필터는 중심파장이 370 nm (FB370-10), 410 nm (FB410-10), 440 nm (FB440-10), 550 nm (FB550-10)이고 필터 대역폭은 ±10 nm로 동일하다. 표 1은 각각 파장에 따른 광원의 세기, 중심파장의 이동량 및 단위 UV광 세기당 중심파장의 이동량을 나타낸다.

광원의 세기 면적비는 필터의 중심파장과 대역폭을 고려하여 면적을 구한 다음 440 nm 파장에서의 세기를 정규화(normalization)하여 구했으며. 필터의 삽입손실(insertion loss)은 모두 동일하다고 가정 하였다. 모든 파장선택 필터의 중심파장의 이동량(△λ)과 광원의 세기의 면적비(A)를 비교해 보았을 때, 370 nm 필터를 사용했을 경우 광의 세기의 면적비가 0.67정도로, 440 nm에서의 광의 세기보다 작음에도 불구하고 중심파장의 이동량이 0.02 nm로 가장 크게 관찰되었다. 중심파장의 이동량을 광원의 세기의 면적 비로 나누면 광원의 단위 세기당 중심파장의 이동량(△λ/A)을 얻을 수 있는데 370±10 nm 필터를 사용 했을 경우 단위 세기당 중심파장의 이동량은 0.029로서, UV광원의 각 밴드가 동일한 세기를 가진다고 가정할 경우, 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장의 이동량은 370±10 nm 필터를 사용 했을 때 다른 파장 영역에 비교하여 가장 큰 값을 얻었다. 이것은 아조벤젠 코팅된 FBG는 단파장 영역에서 반응성이 장파장보다 우수하다는 것을 의미한다.

그림 8는 아조벤젠 폴리머의 흡수 스펙트럼과 사용된 각 필터의 단위 UV 광 세기당 중심파장의 이동량을 보여주고

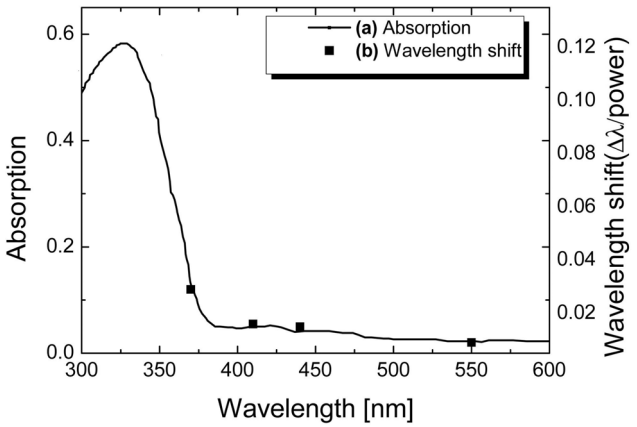

FIG. 8. UV absorption spectra of azobenzene gel film.

있다. 아조벤젠 폴리머는 330 nm 영역의 빛에서 가장 큰 흡수율을 가지며 파장이 길어질수록 급격히 감소하는 경향을 보인다. 그림 7에서 보듯이 UV 광원에서 나오는 빛은 파장에 따라 동일한 세기를 가지고 있지 않기 때문에 정규화된 (normalized) 단위 세기당 중심파장의 이동량(그림 8(a))을 흡수율 그래프(그림 8(b))와 비교해 보면 두 값이 일치하는 것을 확인할 수 있다. 아조벤젠 폴리머는 440 nm 영역의 빛보다 370nm 영역의 빛을 더 많이 흡수하므로, 370 nm 필터를 사용 했을 경우 더 큰 중심파장의 이동량을 얻을 수 있다. 본 실험으로 아조벤젠 코팅 FBG는 단파장 (330 nm 대역) 영역에서의 우수한 광 반응성을 보임을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 UV 광의 세기를 측정하기 위한 아조벤젠 코팅된 FBG를 구현 하였다. UV광원에서 나오는 UV영역 이외의 파장대역을 가진 빛은 아조벤젠 코팅된 FBG에 열로 작용해서 측정의 정확성을 저하 시키므로 이를 제거하기 위해 열 차단 필터를 사용 하여 측정의 정확성을 향상시켰다. 열 경화법과 UV 경화법으로 각각 제작된 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장의 이동 형태를 관찰한 결과, UV 경화법으로 제작된 아조벤젠 폴리머가 코팅된 FBG는 UV광에 의해서 중심파장이 9초 이내로 변화하고, 열에 의한 중심파장의 변화가 나타나지 않는 것으로 확인 되어 UV 센서로서의 적합성을 확인하였다. ±10 nm의 대역폭을 갖는, 투과 파장대역이 각각 다른 4개의 파장선택 필터를 사용 하여 파장에 대한 응답특성을 조사한 결과 단위세기당 중심파장의 이동량은 370±10 nm 필터를 사용했을 경우 0.029로 가장 우수한 반응성을 보였고, 이는 아조벤젠 코팅 FBG가 단파장 영역에서 응답특성이 우수하다는 것을 의미한다. 또한, 아조벤젠 폴리머의 흡수 스펙트럼과 단위 UV광 세기당 중심파장의 이동량을 비교해본 결과 아조벤젠 폴리머의 흡수 스펙트럼과 아조벤젠 코팅 FBG의 파장 의존도가 잘 일치하는 것을 확인하였고, 흡수도가 클수록 중심파장의 이동량이 증가하는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2009학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음

References

1. http://en.wikipedia.org/wiki/Ultraviolet.
2. K. T. Kim, N. I Moon, and H. K. Kim, “A fiber-optic UV sensor based on a side-polished single mode fiber covered with azobenzene dye-doped polycarbonate,” Sens. Actuators A **160**, 19-21 (2010).
3. K. J. Kim, J. H. Lee, S. W. Jang, H. D. Kim, J. W. Song, and S. W. Kang, “The micro-optic Mach-Zehnder interferometry : application to the UV sensors,” IEEE Sensors **2006**, 185-188 (2006).
4. H. K. Kim, X. S. Wang, Y. Fujita, A. Sudo, H. Nishida, M. Fujii, and T. Endo, “A rapid photomechanical switching polymer blend system composed of azobenzene-carrying poly(vinylether) and poly(carbonate),” Polymer **46**, 5879-5883 (2005).
5. H. K. Kim, X. S. Wang, Y. Fujita, A. Sudo, H. Nishida, M. Fujii, and T. Endo, “Photomechanical switching behavior of semi-interpenetrating polymer network consisting of azobenzene-carrying crosslinked poly(vinyl ether) and polycarbonate,” Macromol. Rapid Commun. **26**, 1032-1036 (2005).
6. H. K. Kim, X. S. Wang, Y. Fujita, A. Sudo, H. Nishida, M. Fujii, and T. Endo, “Reversible photo mechanical switching behavior of azobenzene-containing semi-interpenetrating network under UV and visible light irradiation,” Macromol. Chem. Phys. **206**, 2106-2111 (2005).
7. S. Tanaka, H. K. Kim, A. Sudo, H. Nishida, and T. Endo, “Anisotropic photomechanical response of stretched blend film made of polycaprolactone-polyvinyl ether with azobenzene group as side chain,” Macromol. Chem. Phys. **209**, 2071-2077 (2008).
8. H. K. Kim, W. Shin, and T.-J. Ahn, “UV sensor based on photomechanically functional polymer-coated FBG,” IEEE Photon. Technol. Lett. **22**, 1404-1406 (2010).
9. J. Paul, L. Zhao, and B. K. A. Ngoi, “Fiber-optic sensor for handgrip-strength monitoring: conception and design,” Appl. Opt. **44**, 3696-3704 (2005).