

Improving the Sensitivity of an Ultraviolet Optical Sensor Based on a Fiber Bragg Grating by Coating With a Photoresponsive Material

Woo Young Kim¹, Chan-Young Kim¹, Hyun-Kyoung Kim², and Tae-Jung Ahn^{1†}

¹Department of Photonic Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

²Department of Biochemical & Polymer Engineering, Chosun University,
309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 501-759, Korea

(Received October 6, 2014; Revised manuscript December 18, 2014; Accepted January 5, 2015)

This study was focused on developing an optical sensor that monitors ultraviolet (UV) light. Recently, we proposed and demonstrated a novel, highly sensitive UV sensor based on a fiber Bragg grating (FBG). To ensure that the incident UV light is focused on the FBG surface, the sensor was coated with an azobenzene polymer material that acts as a UV-induced stretchable functional material, in combination with a cylindrical focal lens. In this study we have improved the sensitivity of the sensor by employing a cylindrical focal mirror as a curved reflector, to refocus the UV light passing through the FBG. We considered the performance of several different types of reflectors and chose the optimal radius of curvature for the reflector. Compared to the UV sensor without an auxiliary device, the sensitivity of the FBG sensor with a focal lens and a curved reflector was 15 times as high.

Keywords: UV Sensor, Azobenzene Polymer, FBG(Fiber Bragg Grating), Cylindrical lens, Reflector

OCIS codes: (060.0060) Fiber optics and optical communications; (060.2370) Fiber optics sensors; (060.3738) Fiber Bragg grating, photosensitivity

광반응 재료가 코팅된 단주기 광섬유격자 기반 자외선센서의 광민감도 향상 연구

김우영¹ · 김찬영¹ · 김현경² · 안태정^{1†}

¹조선대학교 광기술공학과

⊕ 501-759 광주광역시 동구 필문대로 309(서석동, 조선대학교)

²조선대학교 생명화학고분자공학과

⊕ 501-759 광주광역시 동구 필문대로 309(서석동, 조선대학교)

(2014년 10월 6일 받음, 2014년 12월 18일 수정본 받음, 2015년 1월 5일 게재 확정)

본 논문은 자외선 광학센서 개발에 관한 것이다. 기존에 반도체 기반 자외선 센서를 대체하기 위해 개발된 단주기 광섬유격자 기반 자외선 센서에 대한 측정 민감도를 향상시키기 위한 다양한 장치들을 설계하고 실험을 통해 성능을 확인하였다. 최근 연구를 통해 자외선 흡수에 따라 인장력이 유도되는 아조벤젠 폴리머 재료와 장력에 따른 광섬유격자 특성 변화를 조합하여 새로운 자외선 센서의 개념이 제시되었다. 본 연구에서는 광섬유격자 기반 자외선 센서에서 흡수하지 못하고 통과되는 자외선 잔광을 반사판을 이용해서 다시 반사시켜 센서에서 재흡수되는 원리로 센서의 민감도를 향상시켰다. 본 논문에서는 반사판의 종류를 선정하고 반사판의 곡률반경을 최적화하였다. 또한 기존의 원통형 집광렌즈를 이용한 민감도 향상 기술을 접목시켜 아무런 장치가 없을 때와 비교해서 약 15배의 성능을 향상시키는 결과를 얻었다. 또한 외부 환경 효과를 줄이기 위한 패키지 모듈을 제작하여 적용하고 그 특성을 분석하였다.

Keywords: 자외선 센서, 아조벤젠 폴리머, 광섬유 브래그 격자, 원통형 렌즈, 반사판

OCIS codes: (060.0060) Fiber optics and optical communications; (060.2370) Fiber optics sensors; (060.3738) Fiber Bragg grating, 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

현재 고출력 자외선 발생 장치는 초정밀 부품 생산, 대형 프린팅, 3차원 프린팅 등 많은 산업분야에서 그 활용도가 높아지고 있다. 그에 반해 작업자가 인지 유무에 상관없이 자외선은 눈에 보이지 않기 때문에 자외선 노출에 의한 안전사고 위험이 높다. 자외선은 에너지가 강하므로 UV 램프, UV LED 등 자외선 장치 사용자는 눈과 피부에 직접 자외선이 과다 노출되지 않도록 주의해야 한다^[1]. 이러한 산업현장에서 발생하는 자외선을 감지하기 위해서 다양한 자외선 센서가 개발되었으며, 최근에는 대기 및 천체 관측^[2], 화재감시, 핵발전소, 의료분야, 기상관측분야^[3], 생물학 분야^[4], 코로나 방전 감지^[5] 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 기존 상용화된 자외선 센서는 대부분 반도체소자 기반으로 제작되어 코로나 방전 감지 같은 고전압을 사용하는 산업현장에서 전자기적 간섭으로 오작동을 일으킬 가능성이 높고 작업자의 현장 접근이 어려운 환경에서 사용하기 불편함 있다^[6]. 이런 문제를 해결하기 위해서는 전자기적 간섭에 강하며 원거리 측정 등의 장점을 가지고 있는 단주기 광섬유격자 기반 자외선 센서가 연구되었으나, 현장 적용을 위해서는 자외선 광민감도 성능 향상이 요구되었다^[7]. 최근 연구를 통해 자외선 민감도를 향상시킨 아조벤젠(Azobenzene) 폴리머가 코팅된 광섬유 격자 센서가 개발되었다. 이 광센서의 원리는 자외선광 노출 유무에 따라 광섬유격자에 코팅된 아조벤젠 폴리머가 수축 또는 이완을 하게 되어 광섬유격자에 장력을 유도한다. 따라서 자외선광에 노출에 의한 광섬유격자 간격을 변화시켜 최종적으로 스펙트럼상에서 광섬유격자의 중심파장이 이동하게 되고, 이 이동량을 분석하여 자외선광의 세기를 측정하는 원리이다^[6, 8, 9].

본 논문은 기존에 개발된 자외선 센서에 민감도 향상 방법으로 광섬유격자에 영향을 주지 못하고 지나간 잔광을 다시 반사시켜 아조벤젠 폴리머에 재흡수 시키는 연구를 수행하였다. 또한 외부 환경 변화를 줄이기 위해 자외선센서 패키징 모듈을 제작하고 그 특성을 분석하였다.

II. 실험 및 결과

2.1. 자외선 센서 제작

기존 연구에서 자외선에 의해 수축 이완하는 특성을 가지는 아조벤젠 폴리머^[10]를 이용하여 광섬유 단주기 격자에 코팅된 자외선 센서를 제안하였다^[6]. 이 자외선 센서에 코팅된 아조벤젠 폴리머는 UV 민감 특성에 반복적으로 재현이되며^[10], 광센서의 온도반응도에 크게 영향을 주지 않는다는 것을 확인 하였다^[11]. 하지만 광민감도가 높지 않고 응답속도가 빠르지 못해 센서로 이용될 수 없었다. 광섬유의 장력에 대한 민감도를 향상시키기 위해 불산(HF)를 이용해서 표면을 식각하여 직경을 줄이는 방법이 제안되었다^[12]. 동일한 방법으로 광섬유격자를 식각해주면 인장되는 장력에 격자간격이

쉽게 변하여 자외선 노출에 따른 센서의 민감도를 향상시킬 수 있었다^[13, 14]. 식각이 많이 될수록 민감도가 향상되는 것을 확인하였으나, 직경이 80 μm 이하 광섬유격자의 경우 쉽게 부러지는 등 다루기 어려워서 본 연구에서는 80 μm 식각된 광섬유격자를 가지고 모든 실험을 진행하였다. 이렇게 제작된 표면 식각된 광섬유격자를 본 연구실에서 설계 제작한 테프론 몰드에 설치하고, 아조벤젠 모노머를 도포한 후 자외선 경화법(파장 320 nm ~ 480 nm과 세기 25 mW/cm² 가진 자외선)으로 15분간 경화시켰다^[6]. 본 연구에서 자외선 센서의 민감도(단위: nm/mW/cm²)는 자외선을 노출 시켰을 때 중심파장의 이동량을 자외선의 세기로 나눈 값으로 정의하였다.

2.2. 민감도 향상

2.2.1. 곡률을 가지고 있는 반사판을 이용한 민감도 향상

아조벤젠 폴리머가 코팅된 광섬유격자에 자외선이 노출되는 면적이 작아서 많은 양의 자외선을 흡수시키기 어렵다. 많은 양의 자외선을 흡수시킬수록 민감도가 증가하기 때문에 이것을 위해 기존에는 원통형 자외선 집광렌즈를 사용해서 흡수율을 증가시켜 자외선센서의 민감도를 향상시켰다^[9]. 하지만 아무리 잘 집광시켜도 광섬유격자를 통과해서 지나가는 잔광들이 존재하고 이러한 잔광들을 다시 반사시켜 재흡수를 시키면 민감도를 더욱 향상시킬 수 있다는 아이디어에서 연구가 시작되었다. 본 실험에서는 먼저 원통형 집광렌즈를 사용하지 않고 자외선 센서의 민감도를 향상시킬 수 있는 곡률을 가진 알루미늄 반사판(반사율 17.5%)을 사용하였고, 반사판을 구부려서 곡률의 초점 위치에 광섬유격자센서를 위치시켜 자외선 반사광을 재집광시켜서 자외선 민감도를 향상시켰다. 본 실험 구성도는 Fig. 1과 같다. 실험 방법은 파장분포가 1530 nm에서 1560 nm까지인 광대역 광원(Broadband Light Source, Opto speed, SLED-1550D5A)에서 나온 빛을 자외선 센서의 FBG입력단에 입사시킨 후 FBG에서 반사되는 광을 Circulator를 이용하여 Diffraction filter (Ibsen photonics I-MON interrogation)와 Linear CCD(Charge-Coupled Device, Ibsen photonics I-MON interrogation)를 통해 스펙트럼을 얻는다. 자외선이 아조벤젠 폴리머에 노출되면 광섬유격자에 장력을 유도하여 격자 간격을 변화되고, 이것에 의한 스펙트럼 상의 중심파장 변화를 관찰함으로써 자외선 광의 세기를 측정한다. Figure 1에서 정사각형인 알루미늄 반사판을 두고 양쪽에서 힘을 가해 정사각형인 반사판에 구부려 주면서, 자외선 센서에 자외선(입사된 자외선 세기: 5 mW/cm²)을 노출시키면서 센서의 민감도를 측정하였다. 반사판의 곡률반경을 변화시키면서 반복 측정하여 자외선 광민감도를 가장 높일 수 있는 곡률반경을 찾았다. 그 결과 Fig. 2에서와 같이 자외선 센서와 반사판의 사이 거리가 21 mm이고, 곡률반경이 42.9 mm인 지점에서 자외선에 의한 파장 변화량이 1.1 nm로 민감도가 가장 높은 것을 확인하였다.

2.2.2. 곡률을 가지고 있는 반사판과 원통형 집광렌즈를 이용한 민감도 향상

최근 연구에서 원통형 집광렌즈를 이용하여 자외선 센서의 민감도를 향상시켰다⁹⁾. 본 실험에서는 반사판과 집광렌즈를 함께 사용하여 기존에 얻은 민감도보다 더욱 향상된 결과를 얻었다. 실험 구성도는 Fig. 1과 같고, 자외선 센서 위에 Fig. 3과 같은 원통형 집광렌즈(LJ4107-UV, THORLABS)를 두고 실험하였다. Figure 2에서 자외선 센서의 민감도가 효율이 좋았던 곡률 반경인 39.3 mm, 42.9 mm, 46.7 mm 경우에서 각각 집광렌즈의 초점거리(25.4 mm)를 기준으로, 높이를 21.4 mm에서 27.4 mm까지 1 mm씩 변화시키면서 실험을 반복하였다. 그 결과 Fig. 4에서와 같이 곡률반경 42.9 mm와 렌즈의 높이 24.4 mm에서 파장 변화량이 약 1.9 nm로 가장 효율이 좋았다. 본 연구를 통해 자외선 센서의 민감도를 최적화하기 위한 집광렌즈의 위치와 반사판의 곡률반경 조건을 얻었다.

본 논문은 (i) 자외선 센서(아조벤젠 폴리머가 코팅된 FBG)

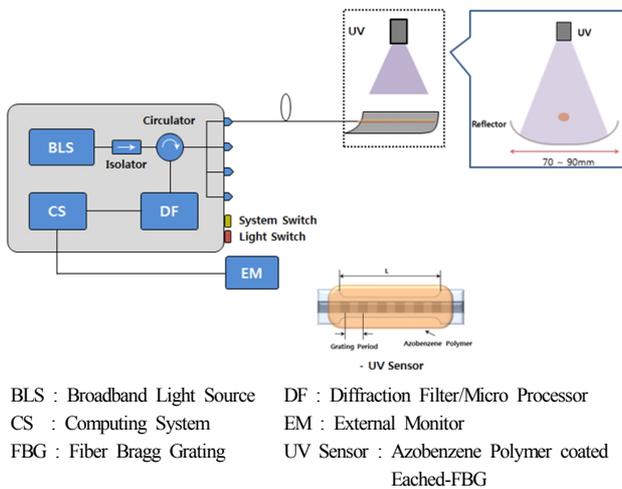


FIG. 1. Experimental setup for UV sensor in combination with a curved reflector.

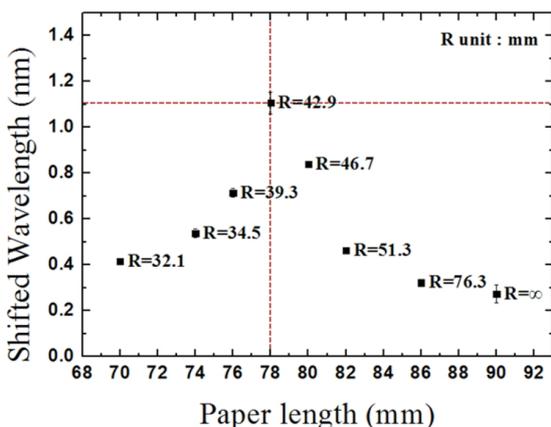


FIG. 2. Maximum wavelength shift according to curvature radius of an aluminum foil reflector.

만 사용하였을 경우, (ii) 자외선 센서에 최적화된 곡률반경을 가진 알루미늄 반사판을 적용했을 경우, (iii) 자외선 센서에 원통형 집광렌즈를 사용하였을 경우, (iv) 마지막으로 자외선 센서에 집광렌즈와 최적화된 곡률을 가진 반사판을 모두 사용하였을 경우 이렇게 4가지로 분류하여 실험을 진행하였다. Figure 5는 각 경우에 따른 자외선 센서가 측정 가능한 최소 자외선 세기를 보여준다. 이 값이 작을수록 자외선

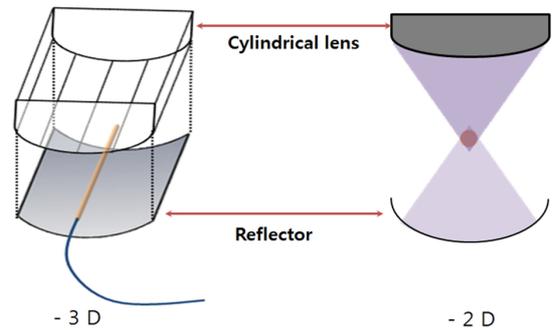


FIG. 3. Schematic diagram of UV sensor in combination with both a curved aluminum foil reflector and a cylindrical focal lens.

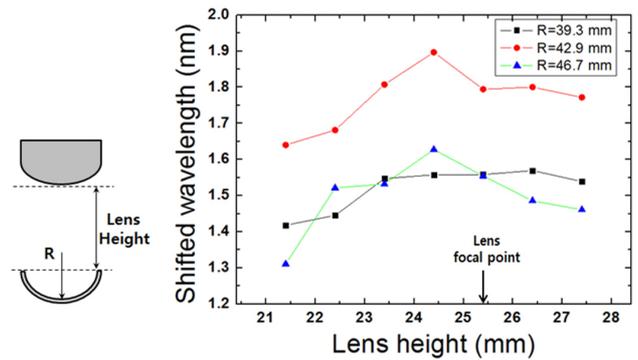


FIG. 4. Maximum wavelength shift depending on position of the lens and curvature radius of the reflector.

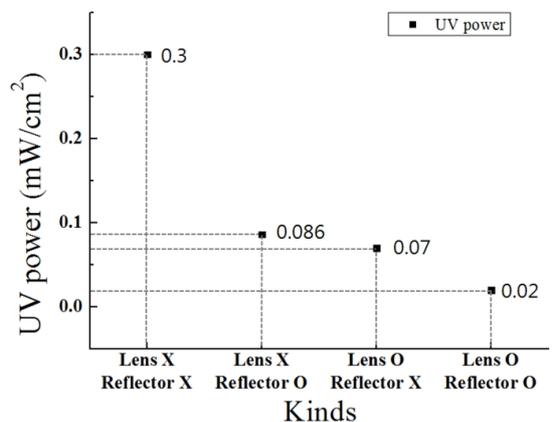


FIG. 5. Minimum measurable UV power of the UV sensor with different combinations of auxiliary devices in order to improve the sensing sensitivity.

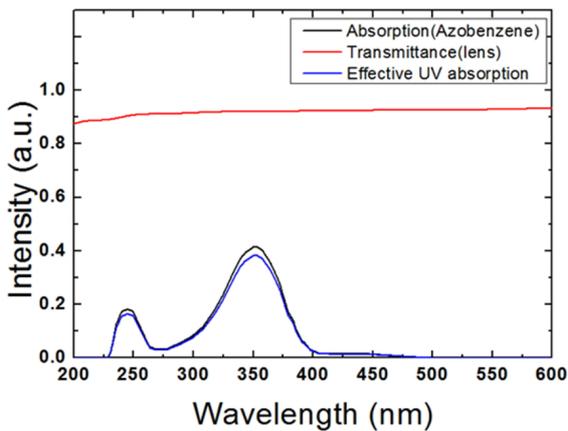


FIG. 6. Measurable wavelength range of UV sensor.

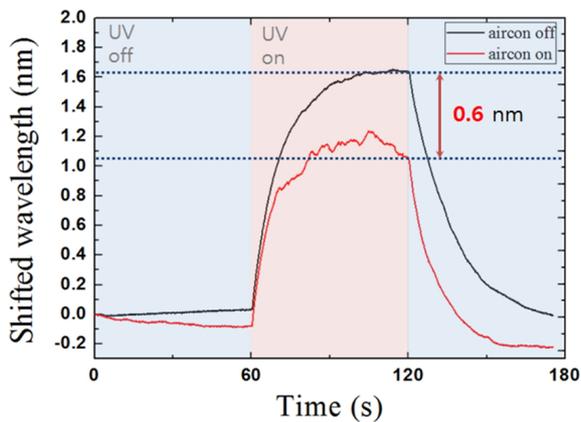


FIG. 7. Wavelength shift according to UV on/off without the module.

에 더 민감한 자외선 센서라고 할 수 있다. 측정된 결과 자외선 센서에 아무런 장치를 적용하지 않은 경우와 비교하여 반사판만 사용한 경우와 렌즈만을 사용한 경우가 각각 0.3 mW/cm^2 에서 0.086 mW/cm^2 그리고 0.07 mW/cm^2 으로 민감도가 각각 약 3.5배와 약 4.3배 증가한 것을 알 수 있다. 렌즈와 반사판을 모두 사용하였을 경우는 0.3 mW/cm^2 에서 0.02 mW/cm^2 으로 민감도가 15배가 증가하는 것을 확인하였다. 추가로 본 연구에서 개발된 자외선 센서의 측정 가능한 파장은 Fig. 6과 같이 약 230 nm에서 390 nm 대역을 가짐을 확인하였다. 이것은 코팅재료인 아조벤젠 폴리머의 흡수파장과 원통형 집광렌즈의 투과율을 고려하여 얻은 결과이다.

2.3. 측정 안정성 향상

자외선 센서의 측정 결과가 온도변화 또는 대기의 요동 등 외부 환경 요인에 의해 다소 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 여기에서 외부 진동과 온도 변화를 주기 위해서 실험실 내의 에어컨을 활용하여 실험하였다. 특히 모듈이 없을 때 자외선을 측정하는 과정에서 외부 진동과 온도 변화에 따라서 Fig. 7에서와 같이 자외선 측정값이 어떻게 변화하는지

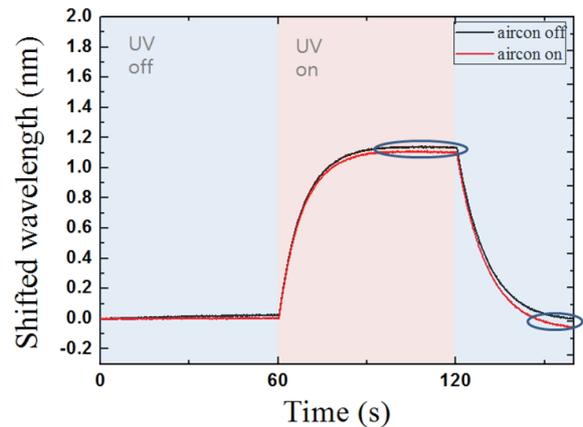


FIG. 8. Wavelength shift according to UV on/off with the module.

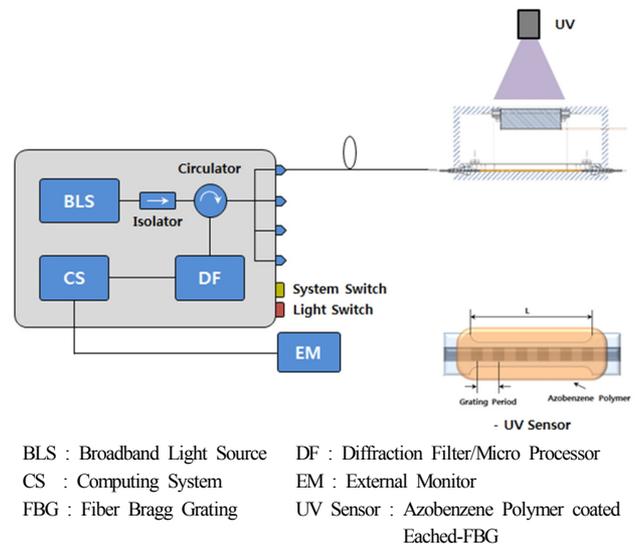


FIG. 9. Experimental setup with the module to package the UV sensor.

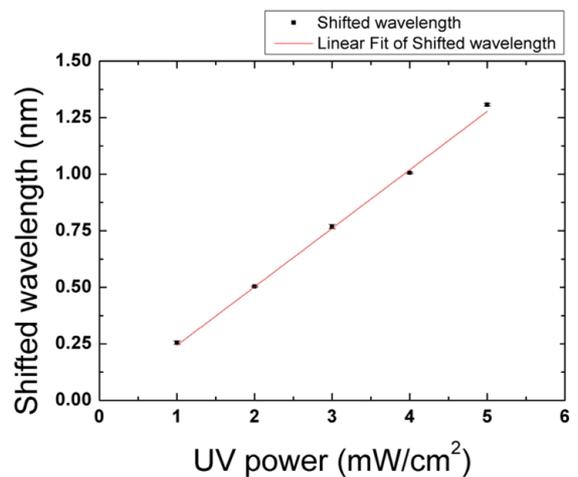


FIG. 10. Maximum wavelength shift according to power Of UV with the module.

확인하였다. 그 결과 외부 진동 및 온도 변화에 따라서 실험 값이 최대 0.6 nm가 발생하는 것을 확인 할 수 있었고, 모듈이 없을 때 측정 데이터는 신뢰하지 못함을 증명하였다. 측정 신뢰도를 향상시키기 위해 아조벤젠 코팅된 광섬유격자를 외부 환경 변화로부터 보호하기 위한 패키지 모듈을 설계 제작하였다. 제작된 모듈을 자외선 센서에 적용하여 같은 조건에서 실험을 진행하였을 때, Fig. 8과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 확인 결과 약간의 온도 변화에 따른 차이가 확인되나 진동에 따른 심각한 결과값의 오류는 보이지 않는다. 또한 Fig. 9와 같이 모듈을 적용하고, 자외선 세기에 따라서 자외선 센서의 반응도 실험을 진행하였고, Fig. 10과 같이 자외선 세기에 따라서 선형적으로 반응하는 것을 확인할 수 있었으며, 자외선 센서로서 적합함을 입증했다.

III. 결 론

본 논문은 자외선 센서(아조벤젠이 코팅된 FBG)의 민감도를 향상 시키기 위한 여러 가지 방법들을 제시하고 실험을 통해 그 성능을 확인하였다. 자외선 센서에 흡수되지 못하는 잔광들을 반사판을 사용해 반사시켜 다시 재흡수 시키는 기술을 개발하였다. 곡률을 가진 반사판이 곡면 렌즈의 효과를 가지게 하여 자외선 센서에 다시 집광되도록 설계하였다. 이때 반사율이 17.4%인 알루미늄 반사판을 이용하여 곡률반경이 42.9 mm일 때 최적화된 조건임을 확인됐다. 기존에 원통형 집광렌즈만 사용해서 자외선 센서에 자외선 흡수율 증가를 통해 민감도를 향상시켰던 방법에서 본 연구결과 최적화된 곡률반경을 가지는 알루미늄 반사판을 함께 적용하여 민감도를 최대로 증가시켰다. 자외선 센서만 사용하였을 경우와 비교하여 두 방법을 함께 적용한 경우 민감도가 약 15배 증가한 것을 확인하였다. 향후 자외선 반사율이 높은 곡면 반사판을 설계하여 더욱 민감도를 최적화할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 모듈의 없을 때 자외선을 측정하는 경우 외부 환경 요소 때문에 신뢰성이 떨어지는 것을 확인하였고, 이것을 보완하기 위해 자외선 센서 보호를 위한 패키지 모듈을 제작하여 안정성을 향상시켰다.

감사의 글

본 논문은 교육과학기술부/한국연구재단의 지역혁신인력 양성사업(2011-04-대-02-022)과 2014년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

1. J. Kim, "The strength of surface UV radiation over Korea peninsula and the consequent Minimum Erythema Dose

(MED) and its exposure time for Korean skin type and reaction," Institute of Earth & Environment Yonsei University, Health Care Technology Research and Development Project Report (2001), p. 3.

2. J. M. Topaz, O. Braun, and N. Brosch, "TAUVEX: UV space telescope," Ultraviolet Technology IV, Robert E. Huffman Editor, Proc. SPIE **1764**, 94 (1993).

3. R. H. Biggs and M. E. B. Joyner, "Stratospheric ozone depletion/UV-B radiation in the biosphere," NATOASI Series I **18**, 3 (1994).

4. J. Jagger, *Solar-UV Action on Living Cells* (Praeger Publisher, 1985).

5. K. M. Shong, Y. S. Kim, and S. G. Kim, "Images detection and diagnosis of corona discharge on porcelain insulators at 22.9 kV D/L," in Proc. SDEMPED (Cracow, Poland, 2007), pp. 462-466.

6. H. K. Kim, W. Shin, and T.-J. Ahn, "UV sensor based on photomechanically functional polymercoated FBG," IEEE Photon. Technol. Lett. **22**, 1404-1406 (2010).

7. J. K. Yoon, S. W. Kim, G. W. Seo, Y.-S. Yu, D.-H. Kwon, and S. W. Kang, "Side-polished fiber optic pressure sensor based on stress optical property of polymer planar waveguide," Sensor & Material **14**, 219-230 (2002).

8. D. S. Choi, H. K. Kim, and T.-J. Ahn, "The study of thermal effect suppression and wavelength dependence of azobenzene-coated FBG for UV sensing application," Korean J. Opt. Photon. (Hankook Kwanghak Hoeji) **22**, 67-71 (2011).

9. W. Y. Kim, I.-S. Song, C.-Y. Kim, H.-K. Kim, and T.-J. Ahn, "Study on sensitivity improvement of UV light sensor based on azobenzene functional polymer-coated FBG with optical lens," in Proc. COOC 2014 (Pusan, Korea, 2014), TP-II7.

10. J.-S. Yu, S.-Y. Lee, H.-Y. Na, T.-J. Ahn, and H.-K. Kim, "Photo-responsive smart polymer materials," Elastomers and Composites **47**, 282-291 (2012).

11. I.-S. Song, C.-Y. Kim, W. Y. Kim, J.-s. Yu, H.-K. Kim, and T.-J. Ahn, "Temperature dependence of Azobenzene coated etched fiber Bragg grating," in Proc. The Optical Society of Korea Summer Meeting 2013 (The Ocean Resort, Yeosu, Korea, 2013), WP-V12.

12. J.-L. Kou, M. Ding, J. Feng, Y.-Q. Lu, F. Xu, and G. Brambilla, "Microfiber-based Bragg gratings for sensing applications," Sensors **12**, 8861-8876 (2012).

13. I.-S. Song, C. Y. Kim, H.-K. Kim, B.-H. Kim, and T.-J. Ahn, "Sensitivity improvement of UV FBG sensor by downsizing grating diameter," in Proc. APOS 2014 (Wuhan, China, 2014), vol. 8924, pp. 892406-1~892406-4.

14. I.-S. Song, "Sensitivity Improvement of UV Sensor based on Photo-responsive material," Master's Thesis, Chosun University (2014).