

뉴트럴레드가 고정화된 다공성 졸-겔 필름을 이용한 고감도 광섬유 pH 센서의 특성

전다영¹ · 유욱재¹ · 신상훈¹ · 한기택¹ · 박장연¹ · 박병기² · 조승현³ · 이봉수^{1,+}

High-Sensitive Fiber-Optic pH Sensor Using Neutral Red Immobilized in Porous Sol-Gel Film

Dayeong Jeon¹, Wook Jae Yoo¹, Sang Hun Shin¹, Ki-Tek Han¹, Jang-Yeon Park¹,
Byung Gi Park², Seunghyun Cho³, and Bongsoo Lee^{1,+}

Abstract

In this study, a fiber-optic pH sensor based on a pH sol-gel film is fabricated. The sol-gel film is made by co-polymerizing tetramethoxysilane, trimethoxymethylsilane, ethanol and distilled water. As a pH indicator, a neutral red is immobilized in a thin porous film formed by the sol-gel process. The pH change in a sensing probe gives rise to a change in the color of the pH sol-gel film, and the absorbance of reflected light through the pH sol-gel film is also changed. By using a spectrometer, therefore, the spectra of reflected lights in the sensing probe with different pH values are measured. Also, the relationships between the pH values and the absorbance are analyzed on the basis of the color variations of the pH sol-gel films. In repeated experiments, the fiber-optic pH sensor shows that it has reversibility, a high reproducibility and a wide absorbance change in a pH range from pH 5 to 9. Also, we confirmed that the fabricated pH sol-gel film exhibits a fast response time, little or no pH indicator leaching and a dynamic range of 2.04 dB from pH 5 to 9. Based on the results of this study, a fiber-optic pH sensor can be developed for the pH monitoring in the harsh environments.

Keywords : Fiber-Optic Sensor, pH Sensor, Neutral Red, Sol-Gel, Absorbance

1. 서론

일반적으로 광섬유(optical fiber) 기반의 물리 및 화학 센서는 감지된 광 신호의 전송경로로서 광섬유를 사용하므로 신호 계측에 있어 전자기파의 간섭을 받지 않고, 원거리 신호전송 및 실시간 계측이 가능하다. 또한 가시광선을 투과시키는 일반 광섬유의 재질은 유리 또는 플라스틱이므로 유연하고, 부식이 되지 않으며 높은 내구성, 무독성을 가진다[1, 2]. 이와 같이 다양한 장점을 가지는 광섬유를 이용하여 물리적 또는 화학적 변화를 감지하기 위해서는 광섬유의 끝 단 또는 클래딩(cladding)을 제거한 코어(core) 부분에 측정

하고자 하는 대상의 변화에 따라 광학적 성질이 바뀌는 특수물질을 코팅시키거나 필름형태로 제작하여 부착시켜야 한다[3, 4].

광섬유를 이용한 pH 센서의 경우, pH 를 감지하는 감응막은 투명한 매질에 지시약(indicator)을 함유하여야 하며, 외부의 pH 물질과의 반응을 위하여 다공성(porosity)이어야 한다. 본 연구에서는 광섬유 pH 센서의 감지 프로브(sensing probe)에 사용할 pH 지시약을 필름(film)형태로 제조하거나 코팅시키기 위하여 졸-겔(sol-gel) 공정을 이용하였다[5].

졸-겔은 금속염(metallic salts) 또는 금속 알콕사이드(metal alkoxide)를 기반으로 합성한 용액 상에서 가수분해(hydrolysis)를 통해 생성된 입자 또는 고분자 형태의 졸(sol)이 중축합(condensation) 반응에 의한 결합작용으로 삼차원적 망상구조인 겔(gel)로 변화되어 생성되는 물질로서[4, 6, 7], 건조과정을 통해 경화시켜서 다공질의 박막과 각종 세라믹스, 코팅재료 등으로 사용된다[1]. 유리 또는 금속물질에 적용할 수 있는 세라믹 코팅의 경우, 1,000 °C 이상의 고온에서 공정이 이루어지기 때문에 유/무기 복합체의 제조가 어려운 반면, 졸-겔 기술을 이용한 코팅의 경우, 상온에서 다공성 고분자 막을 제조할 수 있다[8]. 또한 제조된 졸-겔 박

¹건국대학교 의료생명대학 의공학부 의공학실험기술연구소(School of Biomedical Engineering, College of Biomedical & Health Science, Research Institute of Biomedical Engineering, Konkuk University)

²순천향대학교 공과대학 에너지환경공학과(Department of Energy & Environment Engineering, College of Engineering, Soonchunhyang University)

³승실대학교 공과대학 유기신소재·파이버공학과(Department of Organic Materials & Fiber Engineering, College of Engineering, Soongsil University)

⁺Corresponding author: bslee@kku.ac.kr

(Received : Mar. 16, 2012, Revised : May 9, 2012, Accepted : May 15, 2012)

막은 폴리머 막보다 환경 인자에 대한 저항성이 크고, 빛의 투과성이 우수하기 때문에 광학 센서의 감지부 제작에 유용하다[9, 10].

본 연구에서는 기초실험으로 수행한 분광학적 연구결과[11] 및 졸-겔 필름을 이용한 반사형 pH 센서의 개발에 대한 연구결과를 바탕으로[12], 새로운 졸-겔 필름을 제작하였고, 백색광원(white light source)과 스펙트로미터(spectrometer)를 이용한 반사형 시스템을 구성하였다. 특정파장을 가지는 발광다이오드(light emitting diode, LED) 광원을 이용하여 pH 변화에 의한 졸-겔 필름의 변색 정도에 따른 광 강도(optical intensity)의 변화를 측정할 기존의 광섬유 pH 센서의 경우[12], 제작한 pH 졸-겔 필름의 두께가 상대적으로 두꺼워 감응시간이 오래 걸리고, 미세한 pH 변화를 측정하기 힘든 단점을 가지는 것으로 파악되었다. 이에 따라 본 연구에서는 뉴트럴레드(neutral red)를 고정화(immobilization)시킨 얇은 다공성 졸-겔 필름을 이용하여 pH 에 따라 변하는 흡광도(optical absorbance)를 스펙트로미터를 사용하여 측정 및 분석하였다. 스펙트로미터를 통해 측정되는 흡광도는 식(1)에 의해 계산된다[13].

$$A_{\lambda} = -\log_{10} \left(\frac{S_{\lambda} - D_{\lambda}}{R_{\lambda} - D_{\lambda}} \right) \quad (1)$$

여기서, A_{λ} 는 흡광도, S_{λ} 는 변색된 pH 졸-겔 필름의 광 강도, D_{λ} 는 암 잡음(dark noise)의 광 강도 그리고 R_{λ} 는 기준 신호(reference signal)로부터 측정되는 광 강도이다.

2. 실험 방법

본 연구에서 제작한 광섬유 pH 센서 시스템은 pH 졸-겔 필름, pH 감지 프로브, 플라스틱 광섬유, 백색광원, 스펙트로미터 및 컴퓨터 디스플레이 장치로 구성된다.

pH 졸-겔 필름을 제작하기 위해서 콜로이드(colloid) 합성을 위한 전구체(precursor)의 출발물질로 99.0 %의 TMOS (tetramethoxysilane, Sigma-Aldrich)와 졸-겔 물질을 균일하게 혼합하기 위한 용매물질로 99.9 %의 에탄올(EtOH, Samchun Chemical)사용하였고, 졸-겔 물질의 가수분해를 위해 증류수(H₂O)를 혼합하였다. 또한 건조과정 중에 생기는 졸-겔 내부의 압력 증가로 인한 균열을 방지하고, 실리카와 고분자간의 화학적 결합력을 향상시키는 MTMS(trimethoxymethylsilane, Sigma-Aldrich)를 실란커플링제(silane coupling agent)로 첨가하였다. pH 지시약으로는 pH 6.8~8.0의 변색범위(적색-황색)를 가지는 뉴트럴레드(Samchun Chemical)를 사용하였다. 출발물질로 실리카 전구체인 TMOS를 사용한 이유는 졸-겔 필름을 이용한 반사형 pH 센서의 개발에 대한 연구[12]에서 사용한 TEOS(tetraethyl orthosilicate, Samchun Chemical)의 에틸기는 탄소사슬의 분자

구조가 길어 겔화가 늦어져 건조시간이 오래 걸리는 단점을 가졌기 때문에, 본 연구에서 선택한 TMOS 는 탄소사슬의 분자구조가 짧은 메틸기를 가진다.

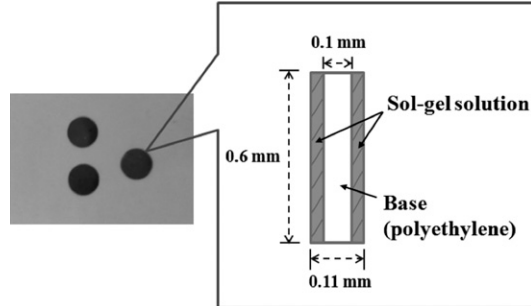


Fig. 1. Photograph and structure of a fabricated pH sol-gel film using neutral red.

본 연구에서는 pH 졸-겔 필름을 제조하기 위해 TMOS : MTMS : EtOH : H₂O : Neutral red = 1 : 1 : 5 : 2 : 0.001의 몰비(molar ratio)로 혼합하였다. 제조된 용액은 EtOH 와 H₂O 가 증발하지 않도록 밀봉한 후 25 °C 에서 1일 동안 교반(stirring)하였다. 교반된 졸은 전처리 과정을 통해 표면의 오염물질을 제거한 0.1 mm 두께의 폴리에틸렌(polyethylene, PE) 필름 위에 딥-코팅(dip-coating) 기기(EF-4100, e-flex)를 이용하여 1 mm/sec의 속도로 딥-코팅 시킨 후, 상온에서 1일, 60 °C 오븐에서 7일 동안 건조시켜 졸-겔 필름을 제조하였다. Fig. 1은 pH 졸-겔 필름을 보여주고 있으며, 최종 제작된 졸-겔 필름의 지름은 0.6 mm 이고 평균두께는 약 0.11 mm 로서 필름의 두께를 제외한 한쪽 코팅 면의 두께는 0.005 mm 이다.

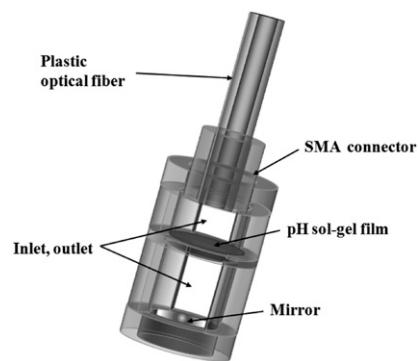


Fig. 2. Structure of the reflection type fiber-optic pH sensing probe.

광섬유 pH 센서는 반사형프로브 형태로 제작하였고, Fig. 2는 제작된 광섬유 pH 센서의 감지 프로브의 구조를 보여준다. 본 연구에서 제작된 프로브는 pH 졸-겔 필름의 교체가 용이하도록 설계 및 제작하였고, 프로브의 중심에 위치한 pH 졸-겔 필름의 위쪽과

아래쪽으로 측정대상이 되는 pH 기준용액(buffer solution)의 유입과 유출이 가능하도록 하여 pH 용액의 순환이 빠르게 이루어져 변색시간이 단축되도록 제작하였다. 또한 프로브 끝단에 알루미늄 반사경(protected aluminum mirror; PF10-03-G01, Thorlabs)을 부착하여 반사효율을 높였고, 감지 프로브의 끝단에 SMA(subminiature type A) 커넥터를 부착시켜 광섬유와의 결합 및 분리가 용이하도록 제작하였다.

pH 변화에 따른 pH 졸-겔 필름의 흡광도 변화를 분광학적으로 분석하기 위한 광 검출기로는 스펙트로미터(QE65000, Ocean Optics)를 사용하였다. 실험에 사용된 스펙트로미터는 24.6 μm 크기의 정방형 광 센서가 1,044×64 로 배열되어있는 전하결합소자(charge-coupled device, CCD)를 검출기로 가진다. 측정파장범위는 200 nm ~ 1,100 nm 이고, 0.14 nm ~ 7.7 nm 의 반치폭(full width at half maximum, FWHM)을 가지며 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)는 1000 : 1이다.

가시광선 영역에서 광원의 파장에 따른 광섬유 pH 센서의 광학적 특성을 알아보기 위해 백색광원(DH-2000-BAL, Ocean Optics)을 사용하였다. 실험에 사용된 백색광원은 230 nm ~ 400 nm 의 파장을 방출하는 듀테륨(deuterium) 광원과 360 nm ~ 2,000 nm 의 파장범위를 가지는 텅스텐 할로젠(tungsten halogen) 광원이 합쳐진 것으로 총 방출파장은 230 nm ~ 2,000 nm 이다. 본 연구에서 사용된 백색광원은 SMA 커넥터 처리된 광섬유 끝 단과 결합이 용이하도록 제작되어 있어 광 손실이 적다는 장점을 가진다.

광원과 스펙트로미터 및 pH 감지 프로브를 연결하기 위하여 광섬유 Y-커플러(Y-coupler; IF-562, Mitsubishi Rayon)를 사용하였다. Y-커플러의 광 분할율(splitting ratio)은 50 : 50 이고, 본 연구에서 사용한 광섬유 Y-커플러는 멀티모드(multi-mode), 계단형굴절률(step-index)을 가지는 플라스틱 광섬유(GH4001, Mitsubishi Rayon)로 구성된다. 플라스틱 광섬유 코어의 직경은 0.98 mm, 클래딩을 포함한 외경은 1.0 mm 이며 곡률반경(bend radius)은 25 mm 를 갖는다. 코어 부분은 굴절률이 1.490인 폴리메틸-메타크릴레이트(polymethyl-methacrylate, PMMA), 클래딩은 굴절률이 1.402인 불소중합체(fluorinated polymer)로 구성되어 있고, 광섬유의 개구수(numerical aperture, NA)는 0.504이다.

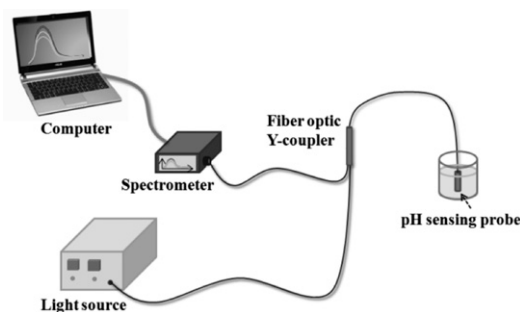


Fig. 3. Experimental setup for pH measurement using a neutral red sol-gel film-based fiber-optic pH sensor.

Fig. 3은 pH 변화에 따른 흡광도 변화를 측정하기 위해 뉴트럴 레드 졸-겔 필름 기반의 광섬유 pH 센서를 이용한 전체 실험구성을 보여준다. 백색광원으로부터 방출된 빛은 Y-커플러를 통해 pH 기준용액이 담긴 비커 내에 위치한 감지 프로브의 pH 졸-겔 필름으로 전송되고, pH 기준용액에 의해 변색된 pH 졸-겔 필름을 통과하면서 광학적 특성이 변하게 된다. 이 빛은 반사경에 의해 반사되어 다시 Y-커플러를 통해 스펙트로미터로 전송되고, 출력 스펙트럼을 분광학적으로 분석하여 pH 를 결정하게 된다.

본 연구에서 모든 실험은 상온 25 ± 1 °C 에서 수행하였고, pH 변화에 의한 졸-겔 필름의 변색정도에 따른 스펙트로미터의 출력신호를 측정하였다. 또한 결과값을 토대로 pH 와 흡광도의 관계를 분석하였고, pH 변화에 따른 졸-겔 필름의 변색 응답시간을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 pH 변화에 따른 pH 졸-겔 필름의 흡광도변화를 보여주며 pH 4 일 때의 흡광도 값을 기준신호로 두고 측정하였다. 실험 결과 pH 가 증가할수록 즉, 염기성에 가까워질수록 435 nm 에서는 흡광도가 증가하고, 반대로 539 nm 에서는 흡광도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 뉴트럴레드 기반의 pH 졸-겔 필름이 적색에서 황색으로 바뀌면서 흡수하는 파장영역이 변했기 때문이다. 즉, 475 nm 파장을 중심으로 산성과 염기성에 따라 pH 졸-겔 필름의 흡수파장의 이동이 발생했다고 볼 수 있다.

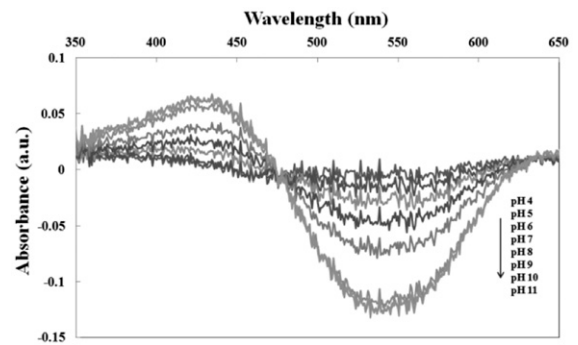


Fig. 4. Relationship between the pH values and the absorbance spectra.

흡광도가 급격하게 변하는 파장영역(539 nm)에서의 pH 변화에 따른 흡광도 특성을 살펴보기 위하여 pH 와 광섬유 pH 센서의 출력 흡광도 사이의 관계식을 도출하였고, 결과 그래프를 Fig. 5에 나타내었다. 539 nm 에서 흡광도의 변화는 S자 곡선의 형태(sigmoid-shape curve)를 가지고, 변색범위를 포함한 pH 5~8 까지는 선형적인 응답을, pH 5 ~ pH 9 영역에서는 2차함수를 나타내고 있으며, 그 밖의 범위에서는 흡광도의 변화가 상대적으로 미미한 것을 볼 수 있다. 또한 pH(x)와 흡광도(y) 사이의 관계식을 Fig. 5에 나타

내었고, pH 변화에 따라 흡광도의 확연한 차이를 보인 pH 5~9 영역에서 흡광도는 pH의 증가에 따라 평균 2.04 dB로 감소하는 것을 확인하였다.

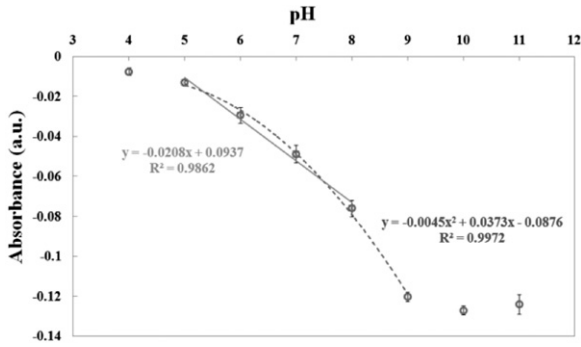


Fig. 5. Absorbance variations of the absorption peak wavelength at 539 nm.

pH 변화에 의해 이동하는 흡수파장에 따른 흡광도 변화에 대한 특성을 살펴보기 위하여 pH가 증가할수록 흡광도가 확연하게 증가하는 435 nm와 반대로 흡광도가 감소하는 539 nm에서의 흡광도 값을 비율 관계식으로 도출하였고, Fig. 6에 그래프로 나타내었다. Fig. 5의 그래프와 마찬가지로 S자 곡선의 형태를 나타내고 있고, 흡광도의 변화가 뚜렷한 pH 5~9 영역에서 pH(x)와 흡광도(y) 사이의 관계는 $y = 0.048x^2 - 0.0381x + 0.0878$ 로 2차식의 함수를 가지며, 이때의 정확도는 99.64%로 나타났다.

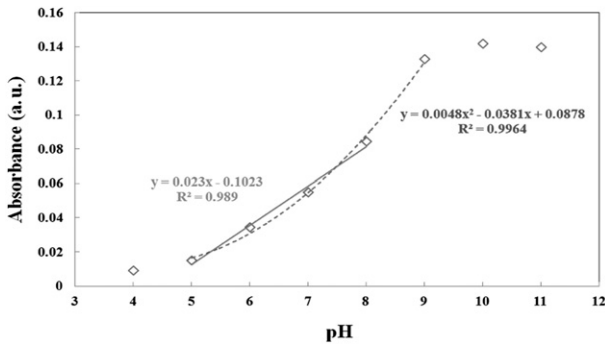


Fig. 6. Relationships between the 435/539 nm ratio signals and the pH values.

Fig. 7은 본 연구에서 제작된 광섬유 pH 센서의 응답시간을 나타낸다. pH 4와 pH 11의 기준용액을 이용하여 pH 값을 반복적으로 바꿔주었을 때 재현성(reproducibility)을 가지고 광 강도가 실시간으로 변하는 것을 확인할 수 있다. 실험결과, pH를 증가시킬 경우(pH 4 → pH 11), 흡광도와는 반대로 광 강도가 증가하고 안정화될 때까지는 약 50 초가 소요되는 것을 알 수 있다. 반대로 pH를 감소시킬 경우(pH 11 → pH 4), 광 강도가 감소하고 안정화될 때까지는 약 40 초가 소요된다. 표준편차는 pH 4에서 5.04, pH 11에서

는 1.02로, pH 11에서의 표준편차가 더 작은 것으로 나타났다. Fig. 7의 그래프에서 기준용액의 pH가 변하는 순간, 즉각적으로 광 강도가 변하는 것으로 미루어보아 pH가 바뀔 때 광섬유 pH 센서가 빠르게 반응하는 것을 알 수 있다. 또한 pH를 바꾼 후 출력 광 강도가 안정화되었을 때 유사한 광 강도 값을 가지므로 본 연구에서 제작된 뉴트럴레드를 고정화시킨 졸-겔 필름 기반의 광섬유 pH 센서가 가역성(reversibility) 및 재현성을 가지는 것을 확인하였다.

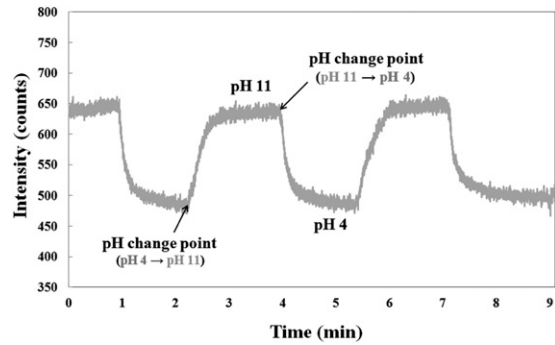


Fig. 7. Repeated response of a neutral red sol-gel film-based fiber-optic pH sensor (optical intensity measured at 539 nm).

4. 결론

본 연구에서는 뉴트럴레드를 고정화시킨 pH 졸-겔필름을 이용하여 pH 5~9 범위 내에서 pH 측정이 가능한 광섬유 pH 센서를 개발하였다.

pH 졸-겔 필름을 제작하기 위해 먼저 TMOS : MTMS : EtOH : H₂O : Neutral red = 1 : 1 : 5 : 2 : 0.001의 몰비로 혼합하여 졸을 제조하였다. 제조된 졸은 25 °C에서 24시간 동안 교반하였고, 모든 첨가물이 균일하게 혼합되면 졸-겔 용액을 얇은 PE 필름 위에 딥-코팅시킨 후 상온에서 1일, 60 °C의 오븐에서 7일 동안 건조시켜 pH 졸-겔 필름을 최종 제작하였다.

제작된 졸-겔 필름을 pH 감응막으로 하는 반사형광섬유 pH 센서 시스템을 구성한 뒤, pH 변화에 따른 졸-겔 필름의 변색으로 인한 흡광도 변화를 스펙트로미터를 이용하여 측정하였다. 본 연구에서는 흡광도와 pH 사이의 관계를 분광학적으로 분석하였고, 흡광도가 증가하는 435 nm와 흡광도가 감소하는 539 nm에서 흡광도의 비율을 계산하여 관계식을 정립하였다. 또한 반복실험과 스트립 차트(strip chart)를 통해 pH 졸-겔 필름의 빠른 응답성, 가역성과 재현성을 확인하였다. 실험결과, pH 5~9 범위에서 pH 측정이 가능한 뉴트럴레드 기반의 졸-겔 필름을 사용할 경우, 가역성 및 재현성이 높은 것을 확인하였고, 특히 pH 5~8 영역에서는 pH와 흡광도 사이의 관계가 선형성(linearity)을 가지는 것을 확인하였다.

본 연구에서 제작한 뉴트럴레드 기반의 졸-겔 필름을 이용한 광섬유 pH 센서는 크기가 작고, 유연하여 공간적인 제약을 받지 않는

다. 또한 광신호 전송을 위해 플라스틱 광섬유를 사용하므로 장거리 신호전송과 실시간 측정이 가능하며 전자기파에 대한 무간섭, 무독성 등의 장점을 가지므로 본 연구결과를 기초로 기존의 pH 센서를 이용한 pH 측정이 어려운 환경에서 사용가능한 광섬유 pH 센서의 개발이 기대된다. 앞으로 더 수행해야 할 연구방향은 고온/고압환경에서의 pH 측정을 위한 다중코팅 pH 졸-겔 필름의 제조와 금속 코팅 광섬유(metal-coated optical fiber)를 이용한 고온 pH 센서의 제작을 통해 온도에 따른 pH의 변화를 측정하는 것이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20110006337 and No. 20110028022).

REFERENCES

- [1] Eden J. Netto, John I. Peterson, Michael McShane, and Victoria Hampshire, "A fiber-optic broad-range pH sensor system for gastric measurements", *Sens. Actuators B-Chem.*, vol. 29, pp. 157-163, 1995.
- [2] P. K. Choudhury and Toshihiko Yoshino, "On the pH response of fiber optic evanescent field absorption sensor having a U-shaped probe: An experimental analysis", *Optik*, vol. 114, pp. 13-18, 2003.
- [3] Aleksandra Lobnik, Ines Oehme, Ivana Murkovic, and Otto S. Wolfbeis, "pH optical sensors based on sol-gels: Chemical doping versus covalent immobilization", *Anal. Chim. Acta*, vol. 367, pp. 159-165, 1998.
- [4] Othman Belhadj Miled, Hafedh Ben Ouada, and Jacques Livage, "pH sensor based on a detection sol-gel layer onto optical fiber", *Mater. Sci. Eng. C-biomimetic Supramol. Syst.*, vol. 21, pp. 183-188, 2002.
- [5] J. D. Mackenzie and Eric Bescher, "Some factors governing the coating of organic polymers by sol-gel derived hybrid materials", *J. Sol-Gel Sci. Tech.*, vol. 27, pp. 7-14, 2003.
- [6] Delana A. Nivens, Yunke Zhang, and S. Michael Angel, "A fiber-optic pH sensor prepared using a base-catalyzed organo-silica sol-gel", *Anal. Chim. Acta*, vol. 376, pp. 235-245, 1998.
- [7] D. Wencel, B. D. MacCraith, and C. McDonagh, "High performance optical ratiometric sol-gel-based pH sensor", *Sens. Actuators B-Chem.*, vol. 139, pp. 208-213, 2009.
- [8] Jerzy Zarzycki, "Past and present of sol-gel science and technology", *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, vol. 8, pp. 17-22, 1997.
- [9] J.-M Lee, M. Li, S.-H. Lee, Y.-S. Kim, C.-J. Kim, and B.-H. Lee, "A pH optosensor based on fluorescence from Nile blue encapsulated within silica sol-gel film", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 13, pp. 169-174, 2004.
- [10] X. Yang, Jian Wang, and L. Wang, "Sol-gel matrix modified microstructured optical fibre towards a fluoride sensitive optical probe", *Opt. Commun.*, vol. 282, pp. 2502-2505, 2009.
- [11] Wook Jae Yoo, JiYeon Heo, Dong Hyun Cho, Kyung Won Jang, Jeong Ki Seo, Bongsoo Lee, Young-Ho Cho, Joo Hyun Moon, and ByungGi Park, "Spectroscopic study on the development of fiber-optic pH sensor", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 18, pp. 365-371, 2009.
- [12] Wook Jae Yoo, Jeong Ki Seo, Kyung Won Jang, Jinsoo Moon, Ki-Tek Han, Jang-Yeon Park, Bongsoo Lee, Seunghyun Cho, JiYeon Heo, and ByungGi Park, "Development of reflection-type fiber-optic pH sensor using sol-gel film", *JSST.*, vol. 20, pp. 266-271, 2011.
- [13] A. Safavi and Bagheri, "Novel optical pH sensor for high and low pH value", *Sens. Actuators B-Chem.*, vol. 90, pp. 143-150, 2003.



전 다 영 (Dayeong Jeon)

- 2012년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 건국대학교 일반대학원 의학공학과 석사과정



유 옥 재 (Wook Jae Yoo)

- 2006년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사)
- 2008년 2월 건국대학교 일반대학원 의학공학과(공학석사)
- 2008년 3월 ~ 현재 건국대학교 일반대학원 의학공학과 박사과정



신 상 훈 (Sang Hun Shin)

- 2007년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사)
- 2009년 2월 건국대학교 일반대학원 의학공학과(공학석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 건국대학교 일반대학원 의학공학과 박사과정



한 기 택 (Ki-Tek Han)

- 2011년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사)
- 2011년 3월 ~ 현재 건국대학교 일반대학원 의학공학과 석사과정



박 장 연 (Jang-Yeon Park)

- 1995년 8월 서울대학교 원자핵공학과(공학사)
- 2006년 5월 University of Minnesota(공학박사)
- 2010년 3월 ~ 현재 건국대학교 의학공학부 조교수



박 병 기 (Byung Gi Park)

- 1999년 2월 서울대학교 원자핵공학과(공학박사)
- 2002년 10월 ~ 2007년 2월 (주)미래와도전 전문연구원
- 2007년 3월 ~ 현재 순천향대학교 에너지환경공학과 조교수



조 승 현 (Seunghyun Cho)

- 1989년 2월 서울대학교 섬유공학과(공학사)
- 1991년 2월 서울대학교 섬유공학과(공학석사)
- 2002년 8월 University of Florida(공학박사)
- 2010년 3월 ~ 현재 송실대학교 유기신소재 · 파이버공학과 조교수



이 봉 수 (Bongsoo Lee)

- 1989년 2월 서울대학교 원자핵공학과(공학사)
- 1991년 2월 서울대학교 원자핵공학과(공학석사)
- 1999년 8월 University of Florida(공학박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 건국대학교 의학공학부 교수