

졸-겔 필름을 이용한 반사형 광섬유 pH 센서의 개발

유욱재¹ · 서정기¹ · 장경원¹ · 문진수¹ · 한기택¹ · 박장연¹ · 이봉수^{1,+} · 조승현² · 허지연³ · 박병기⁴

Development of Reflection-type Fiber-optic pH Sensor Using Sol-gel Film

Wook Jae Yoo¹, Jeong Ki Seo¹, Kyoung Won Jang¹, Jinsoo Moon¹, Ki-Tek Han¹, Jang-Yeon Park¹, Bongsoo Lee^{1,+},
Seunghyun Cho², Ji Yeon Heo³ and Byung Gi Park⁴

Abstract

A reflection-type fiber-optic pH sensor, which is composed of a pH sol-gel film, plastic optical fibers, a mirror, a light source and a spectrometer, is developed in this study. As pH indicators, a bromthymol blue, a cresol red and a thymol blue are used, and they are immobilized in the sol-gel films. The emitted light from a light source is guided by a fiber-optic Y-coupler and plastic optical fibers to the pH sol-gel film in a pH sensing probe. The pH change in the sensing probe gives rise to a change in the color of the pH sol-gel film, and the optical characteristic of reflected light through the pH sol-gel film is also changed. Therefore, we have measured the spectra of reflected lights, which are changed according to the color variations of the pH sol-gel films with different pH values, by using of a spectrometer. Also, the relationships between the pH values and the intensities of reflected lights are obtained on the basis of the color variations of the pH sol-gel films.

Keywords : Fiber-Optic Sensor, Optical Fiber, pH Sensor, pH Indicator, Sol-Gel

1. 서론

pH는 화학, 임상의학, 환경공학 그리고 산업공정 등과 같이 다양한 분야에서 중요한 인자로 작용하므로 pH의 측정과 조절은 매우 중요하다[1-3]. 예를 들어 혈액, 위, 식도, 흉수, 복막 그리고 관절의 활액 등 체액의 pH 측정은 질병을 진단하는데 도움이 되고[4,5], 상·하수 및 산업적 폐수의 처리에서 슬러지(sludge)의 탈수, 물의 연수 및 응집, pH의 중성화와 같은 화학적 처리 등의 공정에서는 적정 pH를 유지하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 특히, 원자력발전소의 증기발생기, 2차계통(secondary system) 및 배관들은 금속재질로 이루어진 구조 재

료상의 특성과 증기발생기로부터 유입되는 슬러지로 인해 부식이 일어나기 쉬우므로, 이러한 구조상의 부식을 억제하고 최소화하기 위해서는 pH의 조절이 필수적이다. 일반적으로 원전의 구조적 안전성을 위해 계통수의 pH는 적정수준으로 유지되어야 하며, pH 조절을 위한 pH 제어제로는 암모니아(ammonia), 모르폴린(morpholine), 시클로헥실아민(cyclohexylamine) 등을 사용하고 있다[6, 7].

pH 측정 방법으로는 pH 스트립(strip)과 지시약(indicator), 유리전극(glass electrode) 또는 세라믹 막 전극(ceramic membrane electrode) 기반의 pH 미터를 이용하는 방법 등이 있는데 일반적으로 유리전극 pH 미터가 주로 사용되고 있다[8]. 하지만 이러한 방법들을 이용하여 강한 전자기장이나 방사능 또는 고온/고압의 원자력 환경과 같은 극한 환경(harsh environment)에서 pH를 측정할 경우, 특히 고온에서 측정된 pH 값을 보정하기가 어렵고, 많은 시간이 소요된다. 또한 전자기파 및 방사선의 영향, 센서 물질의 특성과 내구성 등과 같이 고려해야 할 사항이 많기 때문에 구조적, 환경적 문제를 극복하여 안전하고 정확한 계측을 할 수 있는 pH 측정 장비가 필요하다[9-11].

일반적으로 광섬유(optical fiber) 기반의 물리, 화학 센서는 신호 계측에 있어 전자기파 및 방사선의 간섭을 받지 않고, 작은 크기와 간단한 구성으로 장소에 구애 받지 않으며 원거리 신호 전송과 실시간 계측이 가능하다. 또한 빠른 신호 응답특성과 높

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

² 송실대학교 공과대학 유기신소재·파이버공학과(Department of Organic Materials & Fiber Engineering, College of Engineering, Soongsil University)

³ 식품의약품안전청, 의료기기안전국, 의료기기 심사부 진단기기과(Diagnostic Medical Devices Division, Medical Device Safety Bureau, Korea Food & Drug Administration)

⁴ 순천향대학교 공과대학 에너지환경공학과 (Department of Energy & Environment Engineering, College of Engineering, Soonchunhyang University)

⁺Corresponding author: bslee@kku.ac.kr

(Received : Jun. 16, 2011, Accepted : Jul. 20, 2011)

은 광 민감도(optical sensitivity)를 가지며, 광섬유 재질의 특성상 부식이 되지 않고, 독성이 없으며 높은 내구성을 가지는 장점이 있다[12-14].

졸-겔(sol-gel)은 실리콘이나 금속 알콕사이드(metal alkoxide) 단위 전구체(precursor)를 기반으로 합성한 용액에서 생성된 입자 혹은 고분자 형태의 졸(sol)이 겔(gel)화 과정을 통해 무기질 망상조직으로 변화되어 생성되는 물질을 말하고, 건조과정을 통해 경화시켜서 다공질의 박막과 코팅재료 등으로 사용된다[15, 16].

졸-겔 반응은 전구체 분자의 가수분해(hydrolysis)와 실라놀(silanol) 축합(condensation)의 두 단계 반응으로 이루어져 있다. 전구체와 용매(solvent)가 혼합되어 가수분해가 일어나고, 물 축합과 알코올 축합 반응이 일어나서 삼차원적으로 가교된 네트워크를 형성하게 된다. 이러한 제조 공정에서 물질의 합성 비율은 생성되는 유기 실리카 입자의 크기나 네트워크 형성에 중요한 변수가 되고, 온도, pH, 용매, 촉매 등에 따라 다양한 망상 구조체가 형성된다[17].

일반적으로 실리카 전구체로는 TEOS(tetraethyl orthosilicate) 또는 TMOS(tetra methoxysilane)가 많이 사용되고, 실리카와 고분자 사이에서 화학결합의 접착성 또는 친화성을 향상시키기 위한 목적으로 Triton X-100, 3-MPTMS(3-mercaptopropyltrimethoxysilane), GPTMS(glycidoxypropyl trimethoxysilane) 등의 실란 커플링제(silane coupling agent)가 사용된다[18]. 실리카 전구체와 상용성이 우수한 용매로는 물 또는 물과 알코올의 혼합용매가 있고, 가수분해 및 중축합(polycondensation) 반응의 촉진을 위해서 산 또는 염기 촉매를 사용한다. 산 촉매를 사용할 경우, 겔화 시간은 길어지고 교차 결합이 완전히 이뤄지지 않기 때문에 섬유 형태의 겔이 형성되고, 건조와 열처리 후에 박막의 기계적 강도가 우수해진다. 반면에 염기 촉매를 사용할 경우, 겔화 시간은 짧아지고 구형의 겔이 형성되며 열처리 후에는 산 촉매를 사용한 경우에 비해 박막의 구조가 치밀하지 않다. 산 촉매로는 염산(HCl), 질산(HNO₃), 황산(H₂SO₄)이나 아세트산(CH₃COOH) 등이 사용되고, 염기 촉매로는 수산화칼륨(KOH), 수산화나트륨(NaOH) 등이 사용된다. 졸-겔 공정은 다공성 고분자 막을 비교적 간단한 방법으로 제조할 수 있는 방법으로서 다른 환경 인자에 대한 저항성이 크고, 빛의 투과성이 우수하기 때문에 광학 센서의 제작에 유용하다[19, 20].

본 연구는 졸-겔 기반의 광섬유 pH 센서의 개발에 대한 것으로서, 기초실험으로 수행한 분광학적 연구결과를 바탕으로[21], 반사형(reflection type) 시스템을 구성하고 pH 지시약을 고정화(immobilization)시킨 졸-겔 필름 기반의 광섬유 pH 센서를 제작하여, pH에 따라 변하는 광 강도(optical intensity)를 스펙트로미터(spectrometer)를 사용하여 측정 및 분석하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 광섬유는 계단형 굴절률(step-index)을 갖는 멀티 모드(multi-mode) 플라스틱 광섬유(GH4001, Mitsubishi Rayon)로서 코어(core)의 직경은 0.98 mm, 클래딩(cladding)을 포함한 외경은 1.0 mm이다. 코어 부분은 굴절률이 1.490인 폴리메틸 메타크릴레이트(polymethylmethacrylate, PMMA), 클래딩은 굴절률이 1.402인 불소 중합체(fluorinated polymer)로 구성되어 있고, 광섬유의 개구수(numerical aperture, NA)는 0.504이다.

광원과 광 검출기 및 pH 감지부를 연결하기 위하여 Y-커플러(Y-coupler, IF-562, Mitsubishi Rayon)를 사용하였다. Y-커플러는 본 연구에서 사용한 플라스틱 광섬유와 광학적 특성이 동일한 광섬유로 제조된 것을 사용하였고, 광 분할율(splitting ratio)은 50 : 50이다.

pH 변화에 대한 광원의 파장에 따른 광섬유 pH 센서의 광학적 특성을 알아보기 위해 파장이 서로 다른 발광다이오드(light emitting diode, LED)를 사용하였으며, 광섬유용 LED(IF-series, Industrial Fiber Optics)의 각 파장은 660 nm, 530 nm 그리고 470 nm이다. 실험에 사용된 광섬유용 LED의 반치폭(full width at half maximum, FWHM)은 40 nm~60 nm 이고, 광섬유 끝단과의 결합이 용이하여 광 손실이 적다는 장점을 가진다.

광 검출기로는 pH 변화를 분광학적으로 분석하기 위해서 스펙트로미터(QE65000, Ocean Optics)를 사용하였다. 실험에 사용한 스펙트로미터의 측정 파장범위는 200 nm~1,100 nm 이고, 0.14 nm~7.7 nm의 FWHM을 가지며 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)는 1000 : 1이다. 또한 기준용액(buffer solution)의 pH를 확인하기 위해서 유리전극 pH 미터(Model 215, Denver Instruments)를 사용하였으며, 유리전극 pH 미터의 측정범위는 pH -2.000~pH 20.000이다. 또한 분해능과 정밀도는 각각 pH 0.001, ±pH 0.002이고, 자동온도보상 범위는 -5 °C~105 °C이다.

pH 졸-겔 필름을 제작하기 위해서 실리카 전구체의 출발물질로 98.0 %의 TEOS와 용매물질인 99.9 %의 에탄올(EtOH) 그리고 증류수(H₂O)를 혼합하였고, 가수분해의 촉매작용과 중축합 반응의 촉진을 위한 산 촉매로서 염산을 첨가하였다[16, 19]. 또한 건조과정 중에 생기는 졸-겔 내부의 압력 증가로 인한 균열을 방지하고, 분자 간의 화학적 결합력을 향상시키는 실란 커플링제로 GPTMS를 첨가하여 가교도를 높였다[18]. pH 지시약으로는 pH 6.0~pH 7.6의 변색범위(황색-청색)를 가지는 브롬티몰블루(bromthymol blue, BTB), pH 7.2~pH 8.8의 변색범위(황색-적색)를 가지는 크레졸레드(cresol red) 그리고 pH 8.0~pH 9.6의 변색범위(황색-청색)를 가지는 티몰블루

(thymol blue)를 사용하였다.

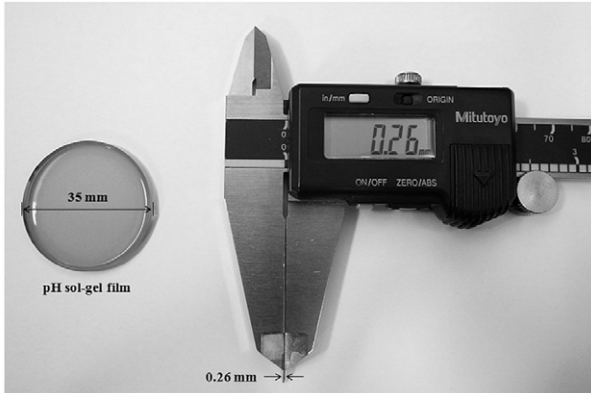


Fig. 1. Photograph of the pH sol-gel film.

본 연구에서는 pH 졸-겔 필름을 제조하기 위해 GPTMS : TEOS : EtOH : H₂O = 3 : 3 : 3 : 1의 부피비(volume ratio)로 혼합하고, 염산을 첨가하여 pH를 2.0으로 조절한 다음, pH 지시약을 첨가하였다. 제조된 졸은 72시간 동안 교반(stirring)하였고, 겔화가 이루어지면 코팅비닐을 씌운 직경 35 mm의 페트리 디쉬(petri dish)에 졸-겔 용액을 부은 뒤, 상온에서 20일 동안 건조시켜 pH 졸-겔 필름을 제조하였다. Fig. 1은 pH 졸-겔 필름을 보여주고 있으며, 최종 제작된 졸-겔 필름의 평균두께는 약 0.26 mm이다.

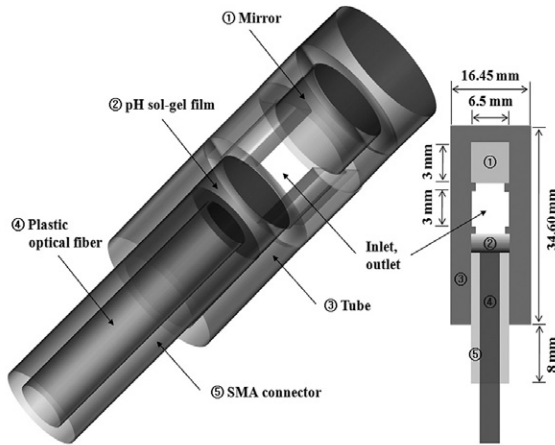


Fig. 2. Structure of the fiber-optic pH sensing probe.

광섬유 pH 센서는 프로브(probe) 형태로 제작하였고, Fig. 2는 제작된 반사형 광섬유 pH 센서의 감지부의 구조를 보여준다. 폴리스티렌(polystyrene, PS) 재질의 튜브 끝단에 알루미늄 반사경(protected aluminum mirror, PF10-03-G01, Thorlabs)을 부착하여 반사효율을 높였고, 졸-겔 필름을 교체할 수 있도록 설계 및 제작하였다. 또한 측정하고자 하는 pH 용액의 유입과 유출이 가능하도록 하였으며, 감지부의 끝단에

SMA(subminiature type A) 커넥터를 부착시켜 광섬유와의 결합 및 분리가 용이하도록 제작하였다.

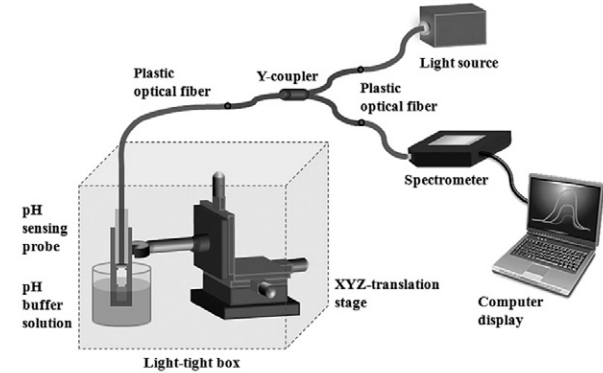


Fig. 3. Experimental setup for pH measurement using the reflection-type fiber-optic pH sensor.

Fig. 3은 졸-겔 필름을 이용한 반사형 광섬유 pH 센서의 실험구성을 보여준다. 광섬유 pH 센서 시스템은 pH 감지부, 광원, 광섬유, 스펙트로미터 및 컴퓨터 디스플레이 장치로 구성되고, pH의 기준값을 측정하기 위해 유리전극 pH 미터를 사용하였다. 광원으로부터 방출된 빛은 1 m 길이의 플라스틱 광섬유와 Y-커플러를 통해 pH 용액이 담긴 비커 내에 위치한 감지부의 pH 졸-겔 필름으로 전송되고, 졸-겔 필름을 통과하면서 광학적 특성이 변한 빛은 반사경에 의해 반사되어 다시 광섬유를 통해 스펙트로미터로 전송된다.

본 연구에서 모든 실험은 상온에서 수행하였고, 반복 실험을 통해 pH 변화에 의한 졸-겔 필름의 변색정도에 따른 스펙트로미터의 출력신호를 측정하였으며 pH와 반사광의 광 강도 사이의 관계를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

최적의 광원 파장을 선정하기 위해 파장이 서로 다른 LED를 사용하였으며 Fig. 4는 크레졸레드 졸-겔 필름을 사용하였을 때, 광원의 파장에 따른 pH와 반사광의 광 강도 사이의 관계를 보여준다. 그래프를 통해 530 nm의 광원을 사용한 경우, 470 nm과 660 nm의 광원을 사용한 결과와 비교해 볼 때, 가장 선형적이고 광 강도의 총 변화량이 큰 특성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한 브롬티몰블루 및 티몰블루를 고정화시킨 졸-겔 필름들을 사용한 경우에도 530 nm의 광원을 사용한 실험에서 pH 변화에 따른 확인한 광 강도의 변화를 확인하였다. 이에 따라 530 nm LED를 광섬유 pH 센서의 광원으로 선정하고 실험을 수행하였다.

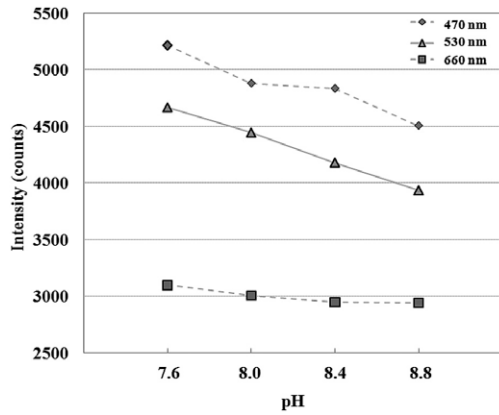


Fig. 4. Relationships between the pH value and the intensity of reflection peak according to the wavelength of three kinds of LED when the cresol red-sol-gel film is used.

Fig. 5는 브롬티몰블루를 고정화시킨 졸-겔 필름을 사용하였을 때, pH 변화에 따른 출력 스펙트럼의 변화 및 광 강도 변화를 보여주며, pH 6.4~pH 7.6 범위에서 pH가 증가할수록 측정되는 광 강도가 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만 반사광의 최대 파장인 538 nm에서 반사광의 광 강도(y)와 pH(x) 사이의 관계를 분석한 결과, $y=41.75x^2-245.4x+5120.7$ 이고, 이때의 정확도는 97.89%로서, 선형성(linearity)과 정확도가 낮은 것을 확인할 수 있다.

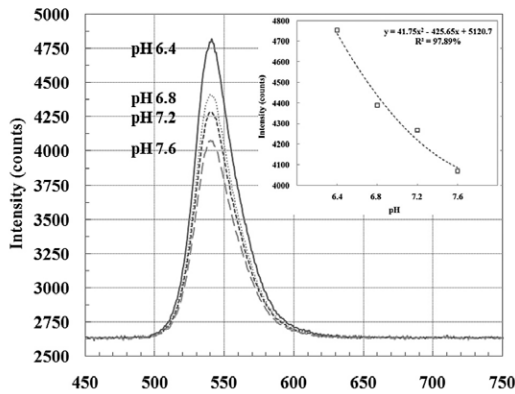


Fig. 5. Intensity variation of peak wavelength as pH changes when the BTB-based sol-gel film is used.

Fig. 6은 크레졸레드 기반의 졸-겔 필름을 사용하였을 때, pH 변화에 따른 출력 스펙트럼의 변화 및 광 강도 변화를 보여 준다. pH 7.6~pH 8.8 범위에서 pH가 증가할수록 측정되는 광 강도가 선형적으로 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이는 크레졸레드의 색이 황색에서 적색으로 바뀌면서 졸-겔 필름의 광 흡수도가 증가하여 빛의 투과를 방해한 결과로 판단된다. 광 강도 변화는 전체 스펙트럼 중에서 반사광의 최대값인 539 nm에서 분석하였으며 광 강도(y)와 pH(x) 사이의 관계는 $y=-245.4x+4,920$ 이고, 이때의 정확도는 99.9%이다.

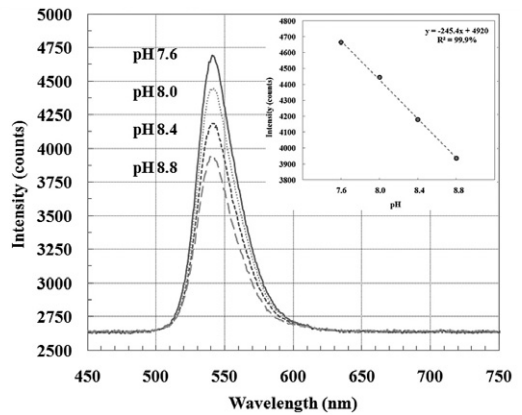


Fig. 6. Intensity variation of peak wavelength as pH changes when the cresol red-based sol-gel film is used.

Fig. 7은 pH 변화에 의한 티몰블루 졸-겔 필름의 변색정도에 따른 반사광의 출력 스펙트럼의 변화 및 광 강도 변화를 보여주며, pH 8.0~pH 9.6 범위에서 pH가 증가함에 따라 반사광의 광 강도가 감소하며, 광 강도의 변화율이 작아지는 것을 확인할 수 있다. pH 변화에 따른 광 강도 변화는 반사광의 최대 파장인 539 nm에서 분석하였으며 광 강도(y)와 pH(x) 사이의 관계는 $y=328.12x^2-6,635.7x+37,936$ 이고, 이때의 정확도는 99.15%이다.

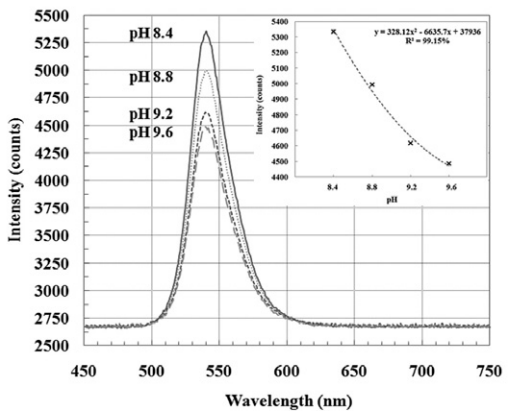


Fig. 7. Intensity variation of peak wavelength as pH changes when the thymol blue-based sol-gel film is used.

4. 결 론

본 연구에서는 브롬티몰블루, 크레졸레드 및 티몰블루를 고정화시킨 pH 졸-겔 필름을 이용하여 pH 6.4~pH 9.6 범위 내에서 pH 측정이 가능한 반사형 광섬유 pH 센서를 개발하였다. pH 감지 프로브 내에 위치하는 pH 졸-겔 필름을 제작하기 위해 먼저 GPTMS, TEOS, EtOH, H₂O를 3 : 3 : 3 : 1의 부피비로 혼합하고, pH를 2.0으로 조절하여 졸을 제조한 다음, pH 지시약을 첨가하였다. 그 후 제조된 졸을 72시간 동안 교반하고,

겔화가 이루어지면 졸-겔 용액을 상온에서 20일 동안 건조시켜 졸-겔 필름을 최종 제작하였다.

제조된 졸-겔 필름의 기공 내에 고정시킨 pH 지시약의 pH 변화에 따른 변색으로 인한 반사광의 특성변화를 스펙트로미터를 이용하여 측정하였고, 광 강도와 pH 사이의 관계를 분광학적으로 분석하여, 관계식을 정립하였다. 실험결과, pH 7.6~pH 8.8 범위에서 pH 측정이 가능한 크레졸레드 기반의 졸-겔 필름을 사용할 경우, 선형성을 가지며 상대적으로 정확도가 높은 것을 확인하였다.

본 연구에서 제작한 졸-겔 필름을 이용한 반사형 광섬유 pH 센서는 크기가 작고, 유연하여 신호 측정에 대한 공간적인 제재를 받지 않는다. 또한 장거리 신호 전달과 실시간 측정이 가능하며 강한 내구성과 전자기파에 대한 무간섭, 무독성 등의 장점을 가지므로 본 연구결과를 기초로 pH 측정이 어려운 의료 및 방사성 환경에서 사용 가능한 pH 센서의 개발이 기대된다. 앞으로 더 수행해야 할 연구방향은 금속 코팅 광섬유(metal-coated optical fiber)를 사용하여 pH 센서를 제작한 후, 고온/고압 환경에서 온도에 따른 pH의 변화를 측정하는 것이다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20100029812, 20110006337).

REFERENCES

- [1] A. Safavi and M. Bagheri, "Novel optical pH sensor for high and low pH value", *Sens. Actuators B*, vol. 90, pp. 143-150, 2003.
- [2] M. Janowiak, H. Huang, S. Chang, and M. H. Garcia-Rubio, "Fiber optic pH sensor development", *Proc. 14th International Congress of Chemical and Process Engineering*, pp. 27-31, Praha, Czech Republic, 2000.
- [3] Z. Jin, Y. Su and Y. Duan, "An improved optical pH sensor based on polyaniline", *Sens. Actuators B*, vol. 71, pp. 118-122, 2000.
- [4] J. H. Kim, J. S. Kim, K. S. Byun, Y. T. Bak, J. G. Kim, C. H. Lee, and N. H. Won, "Phenol red spray technique to assess *Helicobacter pylori* infection", *Korean J. Gastroenterol*, vol. 25, pp. 72-81, 1993.
- [5] A. S. Jeevarajan, S. Vani, T. D. Taylor, and M. M. Anderson, "Continuous pH monitoring in a perfused bioreactor system using an optical pH sensor", *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 78, pp. 467-472, 2002.
- [6] H. K. Ahn, I. H. Rhee, and H. J. Jeong, "A study on ion exchange characteristics; the influence of composition and concentration of solution", *Theories and Applications of Chem. Eng.*, vol. 12, pp. 447-450, 2006.
- [7] H. K. Ahn, I. H. Rhee, and H. J. Jeong, "A study on characteristics of metal oxides", *Theories and Applications of Chem. Eng.*, vol. 12, pp. 451-454, 2006.
- [8] J. Lin and D. Liu, "An optical pH sensor with a linear response over a broad range", *Anal. Chem. Acta.*, vol. 408, pp. 49-55, 2000.
- [9] J. Goicoechea, C. R. Zamarreno, I. R. Matias, and F. J. Arregui, "Optical fiber pH sensors based on layer-by-layer electrostatic self-assembled neutral red", *Sens. Actuators B*, vol. 132, pp. 305-311, 2008.
- [10] Y. Huh, J.-G. Lee, D. C. McPhail, and K. Kim, "Measurement of pH at elevated temperatures using the optical indicator acridine", *J. Solution Chem.*, vol. 22, pp. 651-661, 1993.
- [11] S. N. Lvov, X. Y. Zhou, S. M. Ulyanov, and A. V. Bandura, "Reference systems for assessing viability and accuracy of pH sensors in high temperature subcritical and supercritical aqueous solutions", *Chem. Geol.* vol. 167, pp. 105-115, 2000.
- [12] F. Baldini, "In vivo monitoring of the gastroesophageal system using optical fibre sensors", *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 375, pp. 732-743, 2003.
- [13] B. Lee, J.-Y. Hong, Y.-M. Hwang, and S. Cho, "Feasibility study on the development of fiber-optic pH sensor for endoscope", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 13, no. 3, pp. 213-217, 2004.
- [14] D. Wencel, B. D. MacCraith, and C. McDonagh, "High performance optical ratiometric sol-gel- based pH sensor", *Sens. Actuators B*, vol. 139, pp. 208-213, 2009.
- [15] D. A. Nivens, Y. Zhang, and S. M. Angel, "A fiber-optic pH sensor prepared using a base-catalyzed organo-silica sol-gel", *Anal. Chim. Acta.*, vol. 376, pp. 235-245, 1998.
- [16] O. B. Miled, H. B. Ouada, and J. Livage, "pH sensor based on a detection sol-gel layer onto optical fiber", *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 21, pp. 183-188, 2002.
- [17] K. Ertekin, C. Karapire, S. Alp, B. Yenigul, and S. Icli, "Photophysical and photochemical characteristics of an azlactone dye in sol-gel matrix; a new fluorescent pH indicator", *Dyes and Pigments*, vol. 56, pp. 125-133, 2003.
- [18] S. Dong, M. Luo, G. Peng, and W. Cheng, "Broad range pH sensor based on sol-gel entrapped indicators on fibre

optic”, *Sens. Actuators B*, vol. 129, pp. 94-98, 2008.

- [19] 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, no. 3, pp. 169-174, 2004.
- [20] 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.

- [21] W. J. Yoo, J. Y. Heo, D. H. Cho, K. W. Jang, J. K. Seo, B. Lee, Y.-H. Cho, J. H. Moon, and B. G. Park, “Spectroscopic study on the development of fiber-optic pH sensor”, *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 18, no. 5, pp. 365-371, 2009.



유 옥 재(Wook Jae Yoo)

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



서 정 기(Jeong Ki Seo)

- 2008년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사)
- 2010년 2월 건국대학교 일반대학원 의학공학과(공학석사)
- 2010년 3월~현재 건국대학교 일반대학원 의학공학과 박사과정



장 경 원(Kyoung Won Jang)

- 2005년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사)
- 2007년 2월 건국대학교 일반대학원 의학공학과(공학석사)
- 2007년 3월~현재 건국대학교 일반대학원 의학공학과 박사과정



문 진 수(Jinsoo Moon)

- 2010년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사)
- 2010년 3월~현재 건국대학교 일반대학원 의학공학과 석사과정



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



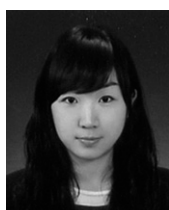
이 봉 수(Bongsoo Lee)

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



조 승 현(Seunghyun Cho)

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



허 지 연(Ji Yeon Heo)

- 2009년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사)
- 2011년 2월 건국대학교 일반대학원 의학공학과(공학석사)
- 2010년 12월~현재 식품의약품안전청 의료기기안전국 진단기과 심사관



박 병 기(Byung Gi Park)

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