

소수성 졸-겔로 개질된 센서 막 표면의 미생물 비점착과 광학 특성 연구

김선용* · 이종일†

전남대학교 응용화학공학부, *전남대학교 물질·생물화공과
(2008년 1월 22일 접수, 2008년 2월 13일 채택)

A Study on Microorganisms Antifouling and Optical Properties of the Sensing Membrane Surface Modified by Hydrophobic Sol-gels

Sun-Yong Kim* and Jong Il Rhee†

School of Applied Chemical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

*Department of Material and Biochemical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

(Received January 22, 2008; accepted February 13, 2008)

본 연구에서는 광학센서의 응용을 위해 소수성 졸-겔로 개질된 고분자 막의 미생물 비점착 특성과 광학특성을 조사하였다. DiMe-DMOS (Dimethoxy-dimethylsilane)와 TMOS (Tetramethyl-orthosilicate)를 이용하여 제조한 소수성 졸-겔로 코팅된 컨퍼컬디쉬 표면과 유리표면에 *E. coli* JM109, *B. cereus* 318 그리고 *P. pastoris* X-33을 배양하였다. 배양 후, 부유세포를 중류수를 이용하여 제거하고 그람 염색법에 의해서 점착된 미생물을 염색하였다. 점착된 미생물의 수는 SEM을 이용하여 정량적으로 분석하였다. 유리표면에는 $2\sim 3 \times 10^4$ 개/mm²의 미생물이 점착되었으나 소수성 졸-겔 표면에는 200~300개/mm²의 미생물이 점착됨으로써 소수성 졸-겔의 비점착 효과를 알 수 있었다. 또한, 소수성 졸-겔과 절광물질인 흑연을 혼합하여 제조한 절광층(Light insulating layer)을 pH나 용존산소 검출막 위에 재코팅한 후, pH나 용존산소의 검출막의 성능이 향상되었음을 알 수 있었다.

In this work we have studied the antifouling properties of the hydrophobic sol-gel modified sensing membrane and its optical properties for sensor application. *E. coli* JM109, *B. cereus* 318 and *P. pastoris* X-33 were cultivated in confocal cultivation dishes with glass surface, respectively. The glass surface was coated with the hydrophobic sol-gels prepared by the dimethoxy-dimethyl-silane (DiMe-DMOS) and tetramethyl-orthosilicate (TMOS). After cultivation, microorganisms adhered on the surface coated with sol-gels and glass surface were dyed by gram-staining method and the numbers of microorganisms were analyzed based on the image data of the scanning electronic microscope (SEM). A great number of microorganisms, about $2\sim 3 \times 10^4$ /mm², was adhered on the glass surfaces which no hydrophobic sol-gels were coated. However, the antifouling effect of the hydrophobic sol-gels was large, that microorganisms of less than 200~300/mm² were adhered on the coated glass surface. The performance of the sensing membranes for detection of pH and dissolved oxygen was enhanced by recasting the light insulation layer prepared with the mixture of the hydrophobic sol-gel and graphite particles.

Keywords: antifouling, biosensor, hydrophobic sol-gel, microorganisms

1. 서 론

고감도와 고정밀도를 요구하는 센서 또는 의료용 분석기기 검출부에 미생물이나 단백질 등이 점착(fouling)되었을 때 기기의 기능이나 검출 성능은 현저히 저하된다. 최근, 센서의 검출 성능을 저하시키는 원인 중의 하나인 미생물의 점착현상을 방지하거나 최소화하기 위한 연구가 환경 미생물학이나 화학분석 분야에서 활발하게 이루어지고 있다[1]. 특히, 센서의 검출 표면과 미생물의 생태학적 환경사이의 상호작용을 제어함으로써 미생물의 점착현상을 방지할 수 있다. 흔히, 미생물이 센서 표면에 점착되는 현상은 센서 표면의 화학적 구성물이나 기계적 부착 (mechanical attachment) 또는 수압(hydraulic force) 등에 의해 발생한다

다고 알려져 있다[2,3]. 즉, 미생물의 세포벽과 센서 표면 사이의 상호결합 및 가교 형성을 통해서 미생물이 센서의 표면에 점착되어 센서의 성능을 저하시킨다고 할 수 있다. 각종 생물 및 환경공정에서 pH, 용존산소 그리고 이산화탄소 등의 농도를 실시간으로 모니터링 하는데 있어서 센서 표면에 미생물이나 단백질의 점착현상은 센서의 수명이나 감도를 저하시킬 수 있다.

미생물 등의 외래물질이 고분자 표면에서 점착되는 것을 최소화하기 위해 1990년대 초부터 관련연구가 활발하게 이루어지고 있는데, 다양한 계면활성제나 합성고분자는 물질표면과 외래물질간의 엔트로피 장벽 (entropy barrier)을 낮추어 미생물이나 단백질의 점착을 방지한다고 보고되었다[4]. 최근, 소수성 졸-겔이 비점착성 고분자 재료로 많이 사용되고 있는데, 졸(sol)은 콜로이드나 무기물 단분자 고체 분자들이 분산되어 있는 현탁액 상태로 반응이 지속됨에 따라 분산된 고체분자들이 고분자

† 교신저자 (e-mail: jirhee@chonnam.ac.kr)

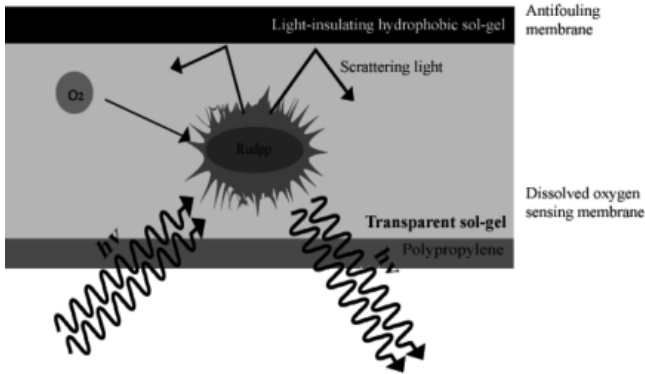


Figure 1. Effects of the graphite mixed hydrophobic sol-gel on light insulation.

화 되어 연속적인 고체 망목 구조(network structure)를 이루어 유동성을 잃은 겔(gel)상태가 된다. 졸이 용액에서 출발하는 경우 용액 중에 추가적으로 함유되는 물질은 금속화합물(유기, 무기 및 산화물), 물, 유기용매, 산 또는 염기 첨가물이다. 금속유기화합물 중의 금속 알콕사이드는 반응성이 좋고 용액 중에서 M-O-M 결합의 금속산화물 중합체 또는 금속산화물의 겔 전구체를 만드는 등의 여러 장점을 가지고 있어 많이 사용된다. 한편, 산을 촉매로 사용하는 경우 겔화 시간은 길어지며 덜 교차 결합된 상태가 되어서 섬유 형태의 겔이 되며, 건조하는 동안에 폴리머 배열을 가능하게 하고 열처리 후 치밀한 박막을 제조하는데 유리하다. 반면에 염기를 촉매로 사용하는 경우 겔화 시간은 짧아지며 상분리가 일어나고 구형의 겔이 형성되기 때문에 박막의 열처리 후 산 촉매에 비해 덜 치밀한 구조를 나타낸다[5-9]. 졸-겔법은 다른 기술에 비하여 단순하고 졸-겔 방법으로 제조된 물질은 다른 고분자막에 비하여 단단하고 다른 환경 인자에 대한 저항성이 크며 빛에 대해 투과성이 우수하기 때문에 각종 광학 센서 제작에 많이 사용되고 있다[10]. 졸-겔법에 의하여 제조된 소수성 졸-겔은 물과 결합할 수 있는 수산화기(-OH)가 존재하지 않기 때문에 액체상태로 존재하는 배양액내의 미생물과의 상호결합력을 감소시켜 물질 표면과의 점착현상을 최소화 시킬 수 있을 것이다. 또한, 광학센서 재료로써 졸-겔에 분말상태의 흑연(graphite)을 첨가하여 센서 검출부에 코팅할 경우 센서에서 발생하는 형광이나 발광량의 손실을 감소시켜 센서의 검출 성능을 향상시킬 수 있다(Figure 1).

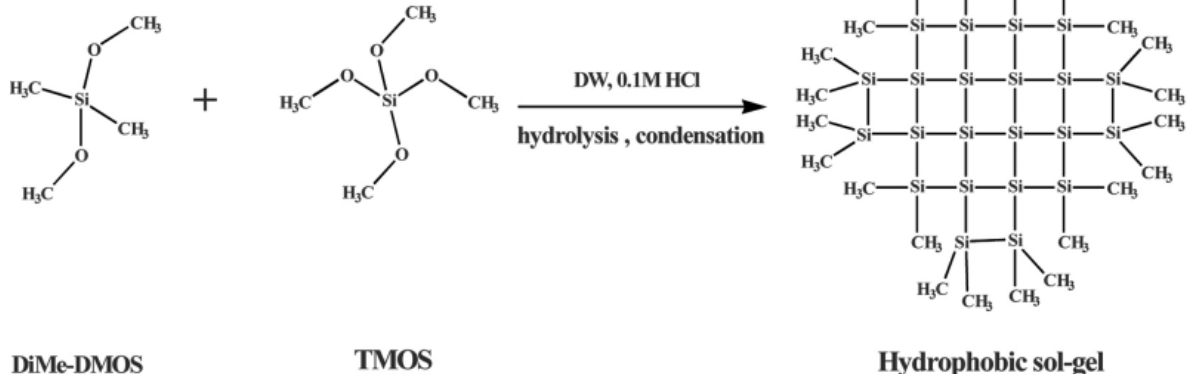


Figure 2. Preparation of the hydrophobic sol-gel using DiMe-DMOS and TMOS.

본 연구에서는 실란계 화합물인 DiMe-DMOS (Dimethoxydimethylsilane)와 TMOS (Tetramethyl-orthosilicate)을 전구체(precursor)로 이용하여 소수성 졸-겔 막을 제조하였고 각종 미생물의 배양을 통해 막 표면의 미생물 점착특성을 조사하였다. 그리고 빛의 손실을 줄이기 위해 흑연을 첨가하여 제조한 막을 pH와 용존산소 검출막에 코팅하여 광학 센서의 검출 성능을 조사하였다.

2. 실험

2.1. 소수성 졸-겔에 의한 미생물 비점착막의 제조

소수성 졸-겔을 이용한 미생물 비점착막은 전구체 물질(Precursor)로 DiMe-DMOS (Dimethoxydimethylsilane)와 TMOS (Tetramethyl-orthosilicate)을 사용하여 제조하였다(Figure 2). 소수성 졸-겔은 TMSO : DiMe-DMOS : 증류수 : 0.1 M HCl의 부피비가 각각 1 : 2.45 : 1.70 : 1.1이 되도록 하였으며 제조한 졸-겔 용액은 3.5 h 동안 가수분해와 축합 반응을 위해 교반하였다. 교반된 졸-겔 용액에서 침전된 소수성 졸(Sol)을 얻기 위하여 원심분리(7500 rpm, 5 min)를 하였다. 원심 분리하여 얻은 침전된 졸에 50 uL/mL(졸)의 0.1 M 인산완충 용액(0.1 M Potassium phosphate buffer, pH 7)을 첨가한 후, 컨퍼컬 디쉬(직경: 35 mm, 유리표면 직경: 12 mm, SPL Co, Cat. No: 100350, South Korea) 내 유리표면에 20 uL을 주입하여 고르게 도포를 시키고 4~5일 동안 실온에서 건조하였다[11]. 건조된 컨퍼컬 디쉬는 투명하고 얇은 비점착막을 유리표면에 형성하였다.

2.2. 미생물 배양

제조한 소수성 졸-겔을 코팅한 막의 미생물에 대한 비점착 특성 연구를 위해 *Escherichia coli* JM109, *Bacillus cereus* 318과 *Pichia pastoris* X-33을 사용하였다. *E. coli* JM109의 배양에는 LB배지(Yeast extract: 5 g/L, Tryptone: 10 g/L, NaCl: 10 g/L), *B. cereus* 318의 배양에는 바실러스용 배지(Glucose: 5 g/L, Peptone: 5 g/L, Yeast extract: 5 g/L, NaHCO₃: 3 g/L) 그리고 *P. pastoris* X-33의 배양에는 YPD배지(Yeast extract: 10 g/L, Peptone: 20 g/L, Dextrose: 20 g/L)가 사용되었다. 한편, 배양실험을 수행하기 전 외부 물질에 의한 오염을 방지하기 위해 컨퍼컬 디쉬를 UV 램프 아래 24 h 동안 멸균하였다. 그리고 전배양이 미생물(각 9 uL)을 291 uL의 배양액에 접종하여 소수성 졸-겔이 코팅된 컨퍼

컬 디쉬에 분주한 후, 80 rpm 조건에서 진탕배양기(KoBiotech Co., Korea)를 이용하여 배양 실험(*E. coli* JM109: 37 °C, *B. cereus* 318: 37 °C, *P. pastoris* X-33: 30 °C)을 하였다. 배양 중 일정한 시간 간격으로 수집한 컨퍼컬 디쉬는 증류수로 세척하여 부유세포를 제거한 후, 컨퍼컬 디쉬내 유리표면에 정착된 미생물의 개체수를 측정하기 위해 그람 염색을 하였다.

2.3. 정착된 미생물의 개체수 측정

미생물 배양 중 일정한 시간대에 채취한 컨퍼컬 디쉬는 미생물의 정착도 측정대상 표면을 증류수로 1회 세척한 후, 증류수가 담긴 비이커에 넣고 교반기에서 150 rpm으로 3 min간 세척하였다. 부유세포가 제거된 컨퍼컬 디쉬는 그람 염색[12]을 하기 위해 60 °C에서 10 min간 건조하였고, 정착도 측정 대상 표면에 정착된 미생물을 고정하기 위해 화염멸균을 시켰다. 화염멸균 후 그람염색을 하기 위해 0.2 mL의 크리스탈 바이올렛 용액(Crystal violet)을 이용하여 1 min간 염색시켰다. 증류수로 세척된 컨퍼컬 디쉬 내 측정대상 표면은 0.2 mL 요오드(Iodine) 용액으로 다시 1 min간 염색하였다. 염색된 컨퍼컬 디쉬는 95% 에탄올로 세포외막을 탈색시킨 후, 0.2 mL의 사프란린 O 용액(Safranin O)으로 1 min간 재염색하였다. 최종적으로, 증류수로 세척한 컨퍼컬 디쉬는 70 °C에서 10 min간 건조하여 수분을 제거하였다. 위의 염색과정이 끝난 컨퍼컬 디쉬의 시료표면을 SEM (Scanning electron microscope) 촬영을 한 후 정착된 미생물의 개체수를 정량적으로 측정하였다[13].

2.4. 비점착막의 광학센서에서의 응용

소수성 졸-겔을 이용하여 제조한 비점착막을 pH 검출막과 용존산소 검출막 위에 다시 코팅하여 광학센서의 검출성능을 조사하였다. 한편, pH 검출막과 용존산소 검출막의 지지체로 사용되는 졸-겔은 실란계 화합물로서 에탄올 용액에 혼합하고 증류수와 35% HCl을 첨가하면서 상온에서 16 h 동안 교반하였다[14]. 그리고 pH 검출막에는 80 mM의 6-aminofluoresein을 위에서 제조한 졸-겔에 혼합하였으며, 용존산소 검출막에는 15 mg/mL 농도의 루테늄 복합체(Ruthenium complex, Ru-DPP)를 졸-겔에 혼합하였다. 제조한 졸-겔과 형광염료의 혼합용액은 균일하고 얇은 두께의 검출막을 제조하기 위해서 스핀코팅 기법을 사용하였다. 스핀코팅 공정 후 pH와 용존산소 검출막은 상온에서 30 min간 건조하고 80 °C에서 4 h 동안 열경화하였다. 그리고 열경화된 pH와 용존산소 검출막 표면에서의 빛 차단을 위해 본 연구에서 제조한 소수성 졸-겔 용액에 0.15 g/mL(sol) 흑연을 혼합하여 다시 코팅하였다. 소수성 졸-겔을 이용하여 절광층(light insulating layer)을 채코팅한 pH 검출막은 0.1 M 인산완충 용액(pH 2-8)을 이용하여 480 nm의 여기파장(Ex: 480 nm)과 525 nm의 방출파장(Em: 525 nm)에서 pH에 따른 형광세기를 측정하였다. 또한, 용존산소 검출막은 증류수와 아황산나트륨 수용액을 주입하여 480 nm의 여기파장(Ex: 480 nm)과 600 nm의 방출파장(Em: 600 nm)에서 용존산소량에 따른 형광세기를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

소수성 졸-겔로 개질된 비점착막의 표면에 각종 미생물의 정착 특성을 조사하기 위해 본 연구에서는 그람 음성균(gram-negative strain)인 *E. coli* JM109, 그람 양성균(gram-positive strain)인 *B. cereus* 318 그리고 양쪽 범주에 속하지 않는 균주(non gram-negative/-positive strain)인 *P. pastoris* X-33을 배양하여 사용하였다. 우선, 소수성 졸-겔로 개질된 막의 미생물 정착특성을 조사하기 위해 소수성 졸-겔로 코팅한 표면과 대조

균으로써 유리 표면을 사용하였으며 표면에 정착되는 미생물의 개체수를 정량적으로 측정하여 비교하였다. 또한, 본 연구에서 제조한 비점착막을 pH막 과 용존 산소 검출막 위에 다시 코팅하여 검출막의 성능에 대한 영향을 조사하였다.

3.1. *Escherichia coli*의 정착특성

각종 의약품이나 생물제품의 생산에 가장 많이 이용되는 미생물 중의 하나인 *E. coli* JM109를 유리와 소수성 졸-겔이 코팅된 컨퍼컬 디쉬에서 배양하여 일정한 시간별(6, 12, 18, 24 h)로 시료를 수집하였고 각 표면에 정착된 미생물을 SEM 촬영한 후 정량적으로 분석하였다. Figure 3은 SEM 촬영 자료에 근거하여 단위면적(mm²)당 유리 및 소수성 졸-겔로 코팅된 표면에 정착된 미생물의 개체수를 정량적으로 나타낸 것이다. 유리 표면에서 *E. coli* JM109는 배양 후 6 h에서 약 7.7×10^4 개/mm²가 정착되었으나, 배양 6 h 이후에는 세포성장 주기에서 정지기와 사멸기에 접어들기 때문에 유리 표면에 정착된 미생물의 수가 점차적으로 감소하였다. 반면에 소수성 졸-겔 표면에서는 배양 후 18 h에서 단위면적(mm²)당 정착된 *E. coli* JM109의 수가 유리표면에서 정착된 미생물의 최대 개체수에 비해 97% 이상 감소하였다. 즉, 비점착막을 구성하는 소수성의 졸-겔은 그람 음성균인 미생물과 막표면 사이의 물리적 상호결합력을 감소시켜 미생물의 정착을 방지함을 알 수 있었다(Figure 3).

3.2. *Bacillus cereus*의 정착특성

B. cereus 318 균주에 대한 소수성 졸-겔로 코팅된 막에서의 정착특성을 알아보기 위해 *E. coli*의 비점착 실험에서 사용하였던 것과 동일한 조건으로 소수성 졸-겔 표면과 대조균으로 유리표면을 사용하였다. *B. cereus* 318를 유리와 소수성 졸-겔 표면에서 3, 6, 12, 18, 24 h 동안 배양한 후, 각기 다른 배양 종료시점에서 정착된 미생물의 수를 SEM 촬영을 통해 분석하였다. Figure 4는 SEM 자료에 근거하여 단위면적(mm²)당 유리 및 소수성 졸-겔 표면에 정착된 *B. cereus* 318의 개체수를 배양 시간에 따라 정량적으로 나타낸 것이다. 그림에서 소수성 졸-겔의 대조균으로 사용한 유리표면에서 배양한 *B. cereus* 318은 배양 후 12 h에서 약 3.2×10^4 개/mm²가 정착되었고 12 h 이후, 사멸기에 접어들면서 정착된 *B. cereus* 318 세포의 수가 급격하게 감소하였다(18 h: 3.2×10^3 개/mm², 24 h: 1.8×10^3 개/mm²). 한편, 소수성 졸-겔 표면에서 배양된 *B. cereus* 318은 배양 후 3 h 후, 최대 정착 세포의 수가 6.2×10^2 개/mm²로써 유리표면에 정착된 최대 개체수에 비해 98% 이상 감소하였다. 따라서 본 연구에서 제조한 졸-겔 막 표면에 그람 양성균인 미생물도 잘 정착되지 않음을 알 수 있었다(Figure 4).

3.3. *Pichia pastoris*의 정착특성

P. pastoris X-33에 대한 소수성 졸-겔막의 비점착 특성을 조사하기 위해 유리 및 소수성 졸-겔로 코팅된 표면이 있는 컨퍼컬 디쉬에서 배양하였다. *E. coli*나 *B. cereus* 균주에 비해 느린 효모류 미생물의 성장속도를 고려하여 12, 24, 36, 48, 60, 72 h 동안 배양한 후 시료를 수집하여 미생물이 정착된 각각의 막 표면을 SEM 촬영하였다. Figure 5는 배양시간에 따른 *P. pastoris* X-33의 SEM 자료에 근거한 단위면적 mm²당 유리 및 소수성 졸-겔 표면에 정착된 *P. pastoris*의 개체수를 정량적으로 나타내었다. *E. coli*나 *B. cereus*의 실험 결과에서 알 수 있듯이 본 실험에서 대조균으로 사용한 유리표면에는 많은 개체수의 *P. pastoris* X-33이 정착된 반면, 소수성 졸-겔을 이용하여 코팅한 막 표면에서는 소수의 *P. pastoris* X-33이 정착되었음을 알 수 있었다. 즉, 유리표면에서는 배양 시작 후 정착된 미생물의 수가 꾸준히 증가하다가(12 h: 7×10^3 개/mm² 24

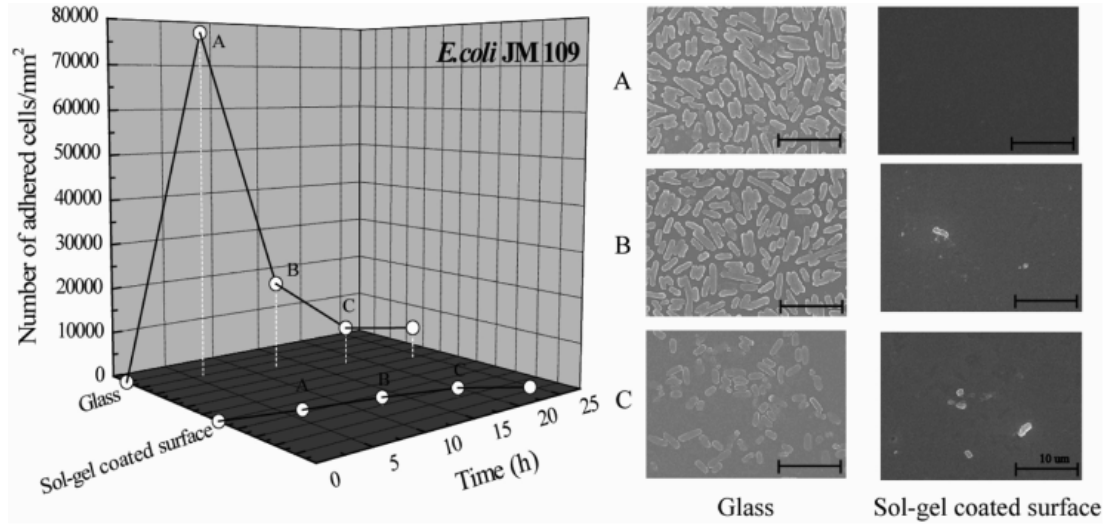


Figure 3. Numbers of *E. coli* JM109 adhered on glass surface and sol-gel coated surface with respect to culture time.

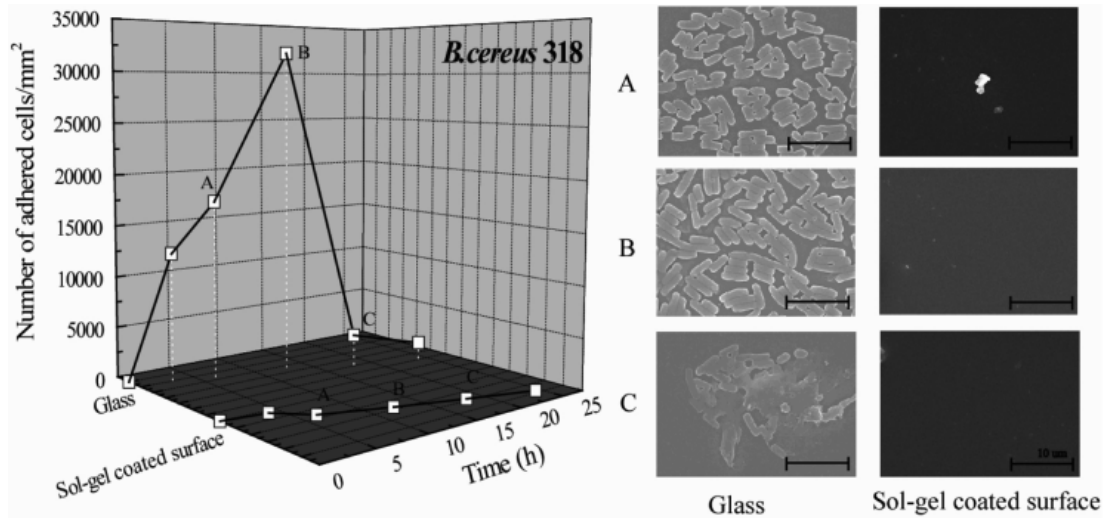


Figure 4. Numbers of *B. cereus* 318 adhered on glass surface and sol-gel coated surface with respect to culture time.

h: 8.8×10^3 개/mm², 36 h: 1.3×10^4 개/mm²), 배양 후 36 h에서 1.3×10^4 개/mm²의 *P. pastoris* X-33이 표면에 점착되었다. 한편, 소수성 졸-겔로 개질, 코팅된 비점착막에서는 배양 후 36 h에 1.2×10^2 개/mm²의 미생물이 점착되었다. 즉, 비점착막에 점착된 *P. pastoris* X-33의 개체수는 유리표면에 점착된 최대 미생물의 개체수에 비해 99% 이상 감소하였다(Figure 5).

3.4. 소수성 졸-겔로 개질된 비점착막의 광학센서에서의 응용

본 연구에서는 사용된 비점착막의 광학센서에 대한 응용성을 알아보기 위해 pH 센서막과 용존산소 센서막의 검출부에 절광물질인 흑연을 혼합한 비점착막을 코팅하여 형광 검출 성능을 조사하였다.

먼저, 비점착막의 pH 센서에서의 응용을 위해 GPTS 졸-겔 용액에 80 mM 6-amino-fluorescein (AF)을 첨가하여 제조한 pH 검출막에 흑연을 절광층으로써 첨가한 비점착막을 재코팅하여 pH 2-8 영역에서 형광세기의 변화를 측정하였다. Figure 6에서 절광층을 코팅하지 않은 pH 센서막 (80 mM AF sensitivity: 41.5)에 비해 비점착막을 재코팅한 pH 센서막

(80 mM AF sensitivity: 73.8)의 pH 검출 감도가 향상되었다. 그리고 비점착막의 용존산소 센서에서의 응용을 위해 GPTS 졸-겔 용액에 15 mg/sol-gel (mL)의 루테튬 복합체를 혼합하여 제조한 용존산소 검출막 위에 절광물질인 흑연을 첨가한 비점착막을 재코팅 하였다. 이와 같이 비점착막으로 재코팅된 용존산소 검출막은 0%와 100% 용존산소 조건하에서 형광분광계를 이용하여 형광세기의 차이($I_{0\%DO} - I_{100\%DO}$)를 측정하였다. Figure 7에서 비점착막을 재코팅한 용존산소 검출막은 700 [RFU]의 형광세기 차이를 나타내었으나 비점착막을 코팅하지 않은 검출막은 낮은 형광세기 차이(500 [RFU])를 나타내었다(Figures 6, 7).

따라서 본 연구에서 제조한 졸-겔로 개질된 비점착막은 흑연을 첨가하여 광학센서의 검출부에 코팅하여 사용할 경우 미생물의 점착을 방지할 뿐만 아니라 센서의 검출성능을 향상시킬 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 소수성 졸-겔을 이용하여 비점착막을 제조하고 각종 미

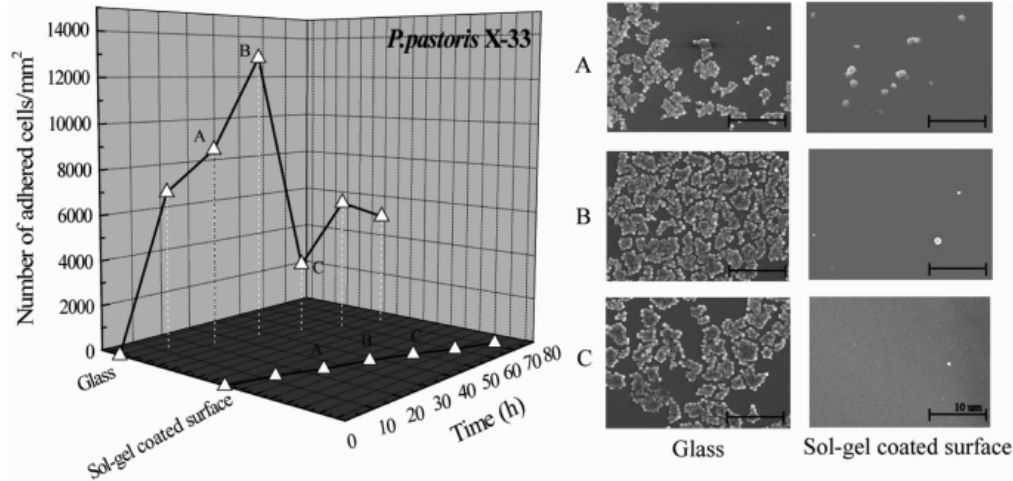


Figure 5. Numbers of *P. pastoris* X-33 adhered on glass surface and sol-gel coated surface with respect to culture time.

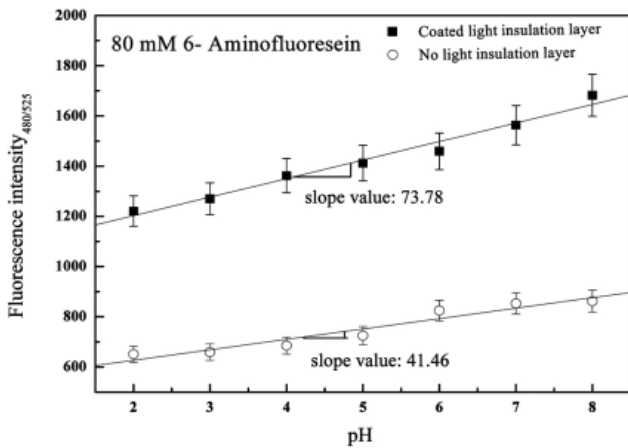


Figure 6. Calibration curve of the pH sensing membrane with coated and uncoated light insulating layer in the pH range of 2~8.

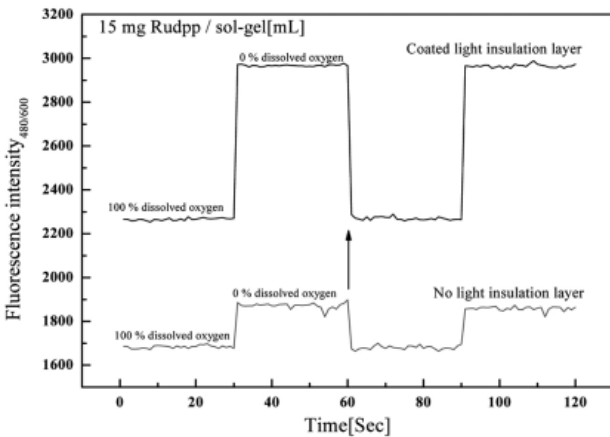


Figure 7. Sensitivity of the DO sensing membranes with recoated light insulating layer at 0 and 100% of dissolved oxygen concentration.

생물에 대한 점착 특성을 조사하였다. 대조군으로 유리와 소수성 졸-겔로 개질된 비점착성 막을 사용하여 *E. coli*, *B. cereus*, *P. pastoris* 등 미생

물의 막 표면으로의 점착특성을 조사하였다. 그람음성 미생물 *E. coli* JM109는 소수성 졸-겔로 개질된 표면에 점착된 개체수가 유리 표면에 점착된 개체수에 비해 97% 이상 감소하였다. 또한 그람양성 미생물 *B. cereus* 318도 유리 표면에 비해 소수성 졸-겔로 개질된 비점착막에 점착된 개체수가 98% 이상 감소하였으며, 효모의 일종인 *P. pastoris* X-33은 유리 표면에 비해 비점착막에 점착된 미생물의 개수가 99% 이상 감소하였다. 그리고 소수성 졸-겔 용액에 흑연을 혼합하여 제조한 절광형 비점착막을 pH 검출막과 용존산소 검출막 위에 재코팅하여 센서의 검출성능을 조사하였는데 재코팅한 검출막이 코팅하지 않은 검출막에 비해 pH, 용존 산소에 대해 더 우수한 검출성능을 나타내었다. 따라서 미생물이나 단백질 등 생물물질에 대해 비점착 효과가 높은 소수성 졸-겔로 개질된 비점착막을 광학센서 등의 검출부에 코팅할 경우, 미생물이나 단백질 등의 외래물질로 인한 센서의 성능저하를 방지할 뿐만 아니라 흑연과 같은 절광물질을 혼합할 경우에는 측정대상에 대한 형광발생량의 손실을 감소시켜 센서의 기능을 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-03-03)과 Post-BK21 사업 및 전남대학교 축매연구소의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. B. T. Watermann, B. Daehre, and S. Sievers, *Chemosphere*, **60**, 1530 (2005).
2. L. Yu and T. Lu (2001), *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **17**, 111 (2001).
3. R. Murga, J. M. Miller, and R. M. Donlan, *Journal of Clinical Microbiology*, **39**, 2294 (2001).
4. J. H. Lee, P. Kopeckova, J. Kopecek, and J. D. Andrade, *Biomaterials*, **11**, 455 (1990).
5. H. Podbielska and A. Ulatowska-Jarza, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Science*, **53**, 261 (2005).
6. G. Kuncova and O. Podrazky, *Journal of Sol-gel Science and Technology*, **31**, 335 (2004).

7. J. Livage, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, **2**, 132 (1997).
8. C. A. Jeronimo, N. Araujo, and M. Conceicao, *Talanta*, **72**, 13 (2007).
9. G. Menezes, H. C. Camargo, and M. Oliveira, *Journal of Colloid and Interface Science*, **299**, 291 (2006).
10. J. M. Lee, M. Lee, S. H. Lee, and Y. S. Kim, *Journal of Korean Sensors Society*, **13**, 169 (2004).
11. L. Pang and N. Y. Kwok, *Sensors and Actuators B*, **123**, 120 (2007).
12. P. Yazdankhah, H. Sorum, J. S. Larsen, and G. Gogstad, *Journal of Microbiological Method* **47**, 369 (2001).
13. F. Fay, I. Linossier, and V. Langlois, *Progress in Organic Coatings* **54**, 216 (2005).