

## 입자크기와 중합온도 제어를 통한 폴리다이아세틸렌의 센싱감도 향상

이길선\*\*\* · 오재호\* · 안동준\*†

\*고려대학교 화공생명공학과  
136-713 서울시 성북구 안암동 5가  
\*\*고려대학교 청정화학시스템연구소  
136-713 서울시 성북구 안암동 5가  
(2010년 11월 12일 접수, 2010년 12월 9일 채택)

### Sensitivity Enhancement of Polydiacetylene Vesicles through Control of Particle Size and Polymerization Temperature

Gil Sun Lee\*\*\*, Jae Ho Oh\* and Dong June Ahn\*†

\*Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University, 5-ga, Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-713, Korea  
\*\*Research Institute of Clean Chemical Engineering Systems, Korea University, 5-ga, Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-713, Korea  
(Received 12 November 2010; accepted 9 December 2010)

#### 요 약

폴리다이아세틸렌(polydiacetylene: PDA)은 독특한 광학적 특성, 즉 외부자극에 의하여 파란색에서 빨간색으로 색상이 변화하는 동시에 형광이 없던 상태에서 자가형광을 발현하는 특성 때문에 화학, 바이오센서로써 응용하기 위한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 특히, 센서의 성능에서 감지하고자 하는 물질에 대한 우수한 민감도는 매우 중요하다. 본 연구에서는 다양한 필터 사이즈를 이용하여 10,12-pentacosadynoic acid(PCDA) 베시클의 크기를 조절함과 동시에 중합온도를 조절하여  $\alpha$ -사이클로덱스트린(CD)을 검출하여 두 가지 효과가 민감도 향상에 어떤 영향을 미치는지 조사하였다. 필터를 사용하지 않은 베시클과 0.22  $\mu\text{m}$ 로 필터한 베시클을 25  $^{\circ}\text{C}$ 에서 고분자한 후에  $\alpha$ -CD(5 mM)와 30분 반응하였을 때 색전이 정도(colorimetric response, CR)가 31.4%에서 74.0%로 증가하였다. 또한, 0.22  $\mu\text{m}$ 로 필터한 베시클을 25  $^{\circ}\text{C}$ 와 5  $^{\circ}\text{C}$ 에서 고분자한 후에  $\alpha$ -CD(5 mM)와 30분 반응하였을 때 CR값이 74.0%에서 99.2%로 증가하였다. 이는 폴리다이아세틸렌의 크기와 고분자시 온도를 조절함으로써 민감도를 크게 증가시킬 수 있음을 보여준다. 또한, 폴리다이아세틸렌은 감도 향상이 매우 중요한 바이오물질을 검출하는데 적용될 수 있을 것이다.

**Abstract** – Many studies on polydiacetylene(PDA) have been investigated to apply to chemical and biological sensors due to their unique optical properties of color change from blue to red and fluorescence change from non-fluorescence to red fluorescence. Especially, high sensitivity against specific molecules is very important to apply polydiacetylenes to various sensors. In this study, we examined the effect of sensitivity enhancement of 10,12-pentacosadynoic acid(PCDA) vesicles in detection  $\alpha$ -cyclodextrin(CD) according to control of vesicle size by filters with different pore sizes and polymerization temperature. Colorimetric response(CR) was calculated using visible spectrometer. In order to investigate the effect of vesicle size on sensitivity of PDA vesicles, two PCDA vesicles were filtered without filtration and with 0.22  $\mu\text{m}$  filter. The two PCDA vesicles were polymerized at 25  $^{\circ}\text{C}$  and were incubated with  $\alpha$ -CD(5 mM) for 30 min. The CRs of the former and latter vesicles were 31.4% and 74.0%, respectively. Then, two PCDA vesicles filtered with 0.22  $\mu\text{m}$  filter were polymerized at 25  $^{\circ}\text{C}$  and 5  $^{\circ}\text{C}$  and were reacted with  $\alpha$ -CD(5 mM) for 30 min to examine the effect of polymerization temperature. The CRs of the former and latter vesicles were 74.0 and 99.2%, respectively. This suggests that vesicle sizes and polymerization temperature are key factors in enhancing the sensitivity of PDA vesicles. In addition, these results are expected to be useful to apply the PDA vesicles as biosensors to detect DNA, protein, and cells.

Key words: Polydiacetylene Vesicles, Polymerization Temperature, Vesicle Size, Sensitivity Enhancement

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: ahn@korea.ac.kr

‡ 이 논문은 고려대학교 홍석인 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

## 1. 서 론

바이오센서는 생체감지물질과 신호변환기로 구성되어 있으며 측정대상물로부터 정보를 얻을 때 생물학적 요소를 이용하거나 생물학적 요소를 모방하여 인식 가능한 신호로 변환하여 분석하고자 하는 물질을 선택적으로 감지하는 장치이다. 생체감지물질로는 특성 물질과 선택적으로 반응 및 결합할 수 있는 효소, 항체, 항원 등이 있으며, 신호변환 방법으로 색상, 전기화학, 형광, 발색, surface plasmon resonance (SPR), quartz crystal microbalance(QCM) 등 다양한 물리화학적 방법이 사용된다[1,2].

한편, 인간의 생체 내에서 세포막을 구성하고 있는 인지질과 유사한 형태를 지닌 다이아세틸렌(diacetylene)은 다양한 방법으로 초분자체를 형성할 수 있고 중합반응에 의하여 폴리다이아세틸렌(polydiacetylene)으로 고분자화 된다. 폴리다이아세틸렌은 고분자 뼈대에 존재하는 이중, 삼중 결합 때문에 독특한 광학적 특성, 즉 외부 자극에 의하여 파란색에서 빨간색으로 색상이 변화하는 동시에 형광이 없던 상태에서 자가형광을 발현하는 특성이 있다[3,4]. 이러한 특성 때문에 최근까지 다양한 외부 자극들(pH[5], 온도[6], 용매[7], 리간드-리셉터 상호작용[8-11] 등)을 인식하기 위한 센서로써 많은 연구가 활발하게 진행되어 왔다.

하지만, 센서의 성능에서 감지하고자 하는 물질에 대한 우수한 민감도는 매우 중요함에도 불구하고 폴리다이아세틸렌을 이용하여 센서의 민감도를 향상시키기 위한 연구는 상대적으로 미진한 상태로써 단지 몇 연구진의 결과만이 보고되었다. 폴리다이아세틸렌의 전체 알킬체인의 개수가 줄어들어 따라 외부 자극에 민감하게 반응함이 알려졌다[12,13]. Charych 박사와 Jiang 교수는 다이아세틸렌 매트릭스에 리간드 분자와 같은 성분을 물리적으로 결합하여 파란색 상태를 불안정화시켜서 열적 자극과 *E. coli* 검출에서 민감도가 향상됨을 보고하였다[12-14]. 또한, *E. coli* 검출 시에 pH를 조절하여 민감도를 증가시켰다[14].

최근에 여러 가지 크기의 필터를 이용하여 폴리다이아세틸렌 베시클의 크기를 조절함으로써 당지질(concanavalin A) 검출의 민감도를 향상시킬 수 있음이 보고되었다[15]. 또한, 본 연구진은 간단한 공정 조건인 중합온도를 조절함으로써 열과 pH에 매우 민감한 폴리다이아세틸렌 센서를 제작하여 보고하였다[16]. 이러한 결과들로부터 본 연구에서는 필터를 이용한 베시클 크기와 중합온도를 함께 조절함으로써 더욱 민감도가 향상된 센서를 제조할 수 있을 것이라 제안한다.

본 연구에서는 다양한 필터 사이즈를 이용하여 10,12-pentacosadiynoic acid(PCDA) 베시클의 크기를 조절함과 동시에 중합온도를 조절하여

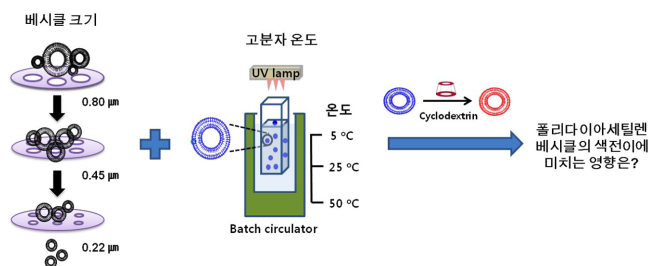


Fig. 1. Schematic plans for sensitivity enhancement of PDA vesicles in detection  $\alpha$ -cyclodextrin according to control of vesicle size by filters with different pore sizes and polymerization temperature.

$\alpha$ -사이클로덱스트린(CD)과 반응할 때 색전이를 확인함으로써 두 가지 효과가 민감도 향상에 어떤 영향을 미치는지 조사하였다. Fig. 1은 사용된 필터의 크기와 중합온도 및  $\alpha$ -CD와의 실험 방법 등을 간략하게 묘사하고 있다. 이러한 시도는 폴리다이아세틸렌의 민감도를 크게 향상시켰다. 이러한 결과는 폴리다이아세틸렌이 감도 향상이 매우 중요한 바이오물질을 검출하는데 적용될 수 있음을 보여준다.

## 2. 실험

### 2-1. 재료 및 시약

실험에 사용된 10,12-pentacosadiynoic acid(PCDA; >97.0%, Fluka)와  $\alpha$ -CD(Sigma)는 구입 후 정제과정 없이 사용하였다. 용매로는 클로로포름( $\text{CHCl}_3$ , Sigma-Adrich), HEPES(N-2-hydroxyethylpiperazine-N'-2-ethanesulfonic acid) 버퍼와 삼차 증류된 초순수 물(18.2  $\Omega$ -m)이 사용되었다.

### 2-2. 다이아세틸렌 베시클 제조

일정량의 PCDA 단량체를 삼각플라스크에 넣고 적당량의 클로로포름으로 녹인 후, 질소 기체를 약하게 불어넣으며 클로로포름을 기화시키면 삼각플라스크 바닥에 단량체의 얇은 막이 형성된다. 삼각플라스크에 HEPES를 5 mM(pH=7.65)가 되도록 담고, 단량체가 잘 분산될 수 있도록 80 °C에서 15분 동안 물중탕 상태에서 교반시킨다. 이 때 생성된 PCDA 베시클의 농도는 1 mM이다. 그 후 단량체가 분산된 용액을 microtip probe sonicator(Fisher scientific model 550 sonic dismembrator)를 이용하여 60 W의 전력으로 15분간 sonication 한다. 이때 용액 속에서 구형의 베시클이 형성되어 용액은 맑은 우유 빛과 같은 불투명한 상태가 된다.

### 2-3. 다이아세틸렌 베시클의 크기와 중합온도 조절

Sonication이 끝나면 0.22, 0.45, 0.80  $\mu\text{m}$  크기의 나일론 필터로 걸러주고, 4 °C 온도에서 4시간 이상 냉장보관을 한다. 이 용액을 5, 25, 50 °C에서 254 nm( $1 \text{ mW/cm}^2$ )의 자외선을 일정시간 노광하면 베시클은 중합되어 파란색을 띄게 된다(Fig. 2 참조).

### 2-4. 분석기기

색상의 변화를 측정하고자 ultraviolet(UV)-visible spectrometer

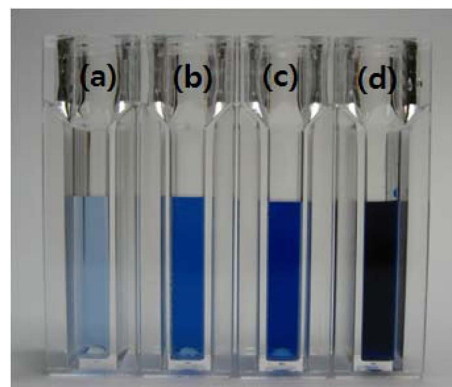


Fig. 2. Optical images of PCDA vesicles (1 mM) polymerized at 25 °C and filtered with different filter sizes in a HEPES buffer solution (5 mM). (a) 0.22  $\mu\text{m}$ , (b) 0.45  $\mu\text{m}$ , (c) 0.8  $\mu\text{m}$ , and (d) no filtration.

(HP 8453)가 사용되었다. 가시광선 영역이라 부르는 300에서 800 nm 영역의 빛을 흡수하면 겉보기에 색상을 나타낸다. 또한 시료의 농도에 따라 흡광도가 변하기 때문에 정량분석에 사용될 수 있다. 시료의 농도가 너무 진하면 흡광도가 포화되어 측정할 수 없게 된다. 이러한 경우에는 시료의 농도를 희석해서 흡광도를 얻었다. 또한, 필터를 통과한 다이아세틸렌 베시클의 크기를 laser light scattering(ELS-8000)을 이용하여 결정하였다.

**2-5. 색전이 정도(colorimetric response; CR)**

폴리다이아세틸렌 센서의 색상변화를 정량적으로 설명하기 위하여 CR이 도입되었다[17]. Visible 스펙트라의 흡광도를 이용하여 α-CD 이 폴리다이아세틸렌의 색상 변화를 어느 정도 유발하였는지 다음과 같은 식으로 정량화할 수 있다.

$$CR(\%) = [(PB_0 - PB_1) / PB_0] \times 100(\%)$$

초기 상대 흡광도:  $PB_0 = A_{640\text{ nm}} / (A_{550\text{ nm}} + A_{640\text{ nm}})$

반응후 상대 흡광도:  $PB_1 = A_{640\text{ nm}} / (A_{550\text{ nm}} + A_{640\text{ nm}})$

여기서,  $A_{640\text{ nm}}$ 은 visible 스펙트라에서 640 nm 피크의 visible 세기를 의미한다. 중합된 폴리다이아세틸렌 베시클은 과란색을 나타내는데 이때 주요 피크는 640 nm이다. 외부 자극에 의하여 색상이 빨간색으로 변하게 되면 주요 피크는 550 nm로 변화되면서 동시에 640 nm의 피크는 감소하게 된다. 따라서, 이 두 피크들을 기준으로 초기의 상대 흡광도와 반응 후의 상대 흡광도를 이용하여 색전이 정도를 정의하였다.

**3. 결과 및 토론**

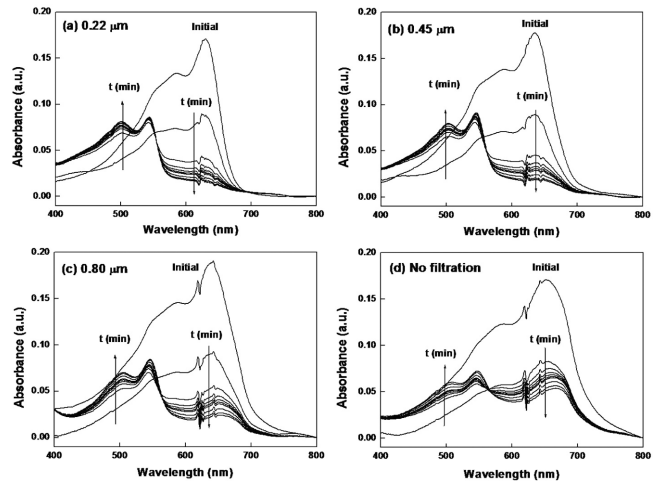
**3-1. 베시클 크기가 폴리다이아세틸렌 색전이에 미치는 영향**

다이아세틸렌 베시클을 제조한 다음에 0.22, 0.45, 0.80 μm 크기의 나일론 필터로 걸러주고, 4 °C 온도에서 4시간 이상 냉장 보관한 후에 25 °C에서 254 nm(1 mW/cm<sup>2</sup>)의 자외선을 노광하면 폴리다이아세틸렌 베시클은 중합되어 과란색을 띄게 된다. Fig. 2는 0.22, 0.45, 0.80 μm 필터로 걸러준 것과 필터를 하지 않은 폴리다이아세틸렌의 광학사진들이다. 작은 크기의 필터를 이용한 경우는 연한 과란색을 나타내고 필터를 이용하지 않은 경우는 매우 짙은 과란색임을 알 수 있다. Table 1은 laser light scattering을 이용하여 베시클들의 크기를 분석한 결과이다. 작은 크기의 필터를 사용할수록 베시클의 크기가 감소하는 것을 알 수 있다.

한편, α-CD는 외부가 친수성이고 내부는 소수성인 구조로써 폴리다이아세틸렌 초분자체들과 호스트-게스트 반응이 일어나 inclusion complex를 형성함이 보고되었다[18,19]. α-CD와의 반응을 정량화하기 위해서 사용되는 모든 폴리다이아세틸렌의 농도가 비슷해야만 한다. 이를 위하여 0.45, 0.80 μm 필터된 베시클과 필터하지 않은 베시클은 각각 3배, 5배, 60배 희석하여 비슷한 흡광도를 가지도록 만든

**Table 1. Size distribution of PCDA vesicles filtered with different filter sizes determined by laser light scattering**

Filter size	Mean diameter (nm)
No filtration	517 ± 62 nm
0.80 μm	300 ± 37 nm
0.45 μm	276 ± 27 nm
0.22 μm	219 ± 26 nm

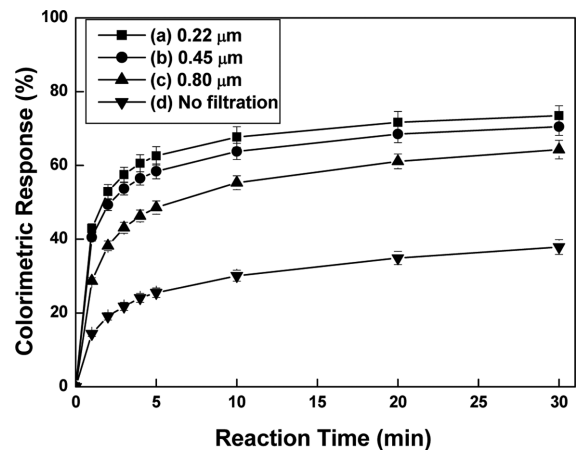


**Fig. 3. Visible spectra of filtered PCDA vesicles (1 mM) reacted with α-CD (5 mM) according to reaction time (arrow direction; 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30 min). (a) 0.22 μm, (b) 0.45 μm, (c) 0.8 μm, and (d) no filtration.**

후에 α-CD와의 반응에 사용하였다.

Fig. 3은 비슷한 농도로 희석된 사이즈가 다른 베시클들(0.5 mL)이 같은 양의 α-CD(5 mM, 0.5 mL)와 반응할 때 반응시간에 따른 색전이 정도를 나타낸 visible 스펙트라를 보여준다. 모든 경우에 시간에 증가함에 따라 과란색 성분(640 nm 부근) 피크가 줄고 빨간색 성분(550 nm 부근) 피크가 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만, 시간에 따라 색전이가 일어난다는 것은 visible 스펙트라에서 확인할 수 있지만 이것을 정량화하는 것은 어렵다.

시간에 따른 반응 정도를 정량화하기 위하여 색전이 정도(CR)을 도입한 후, Fig. 3의 visible 스펙트라로부터 CR 값을 구하였다. Fig. 4는 크기가 조절된 베시클들의 반응시간에 따른 CR 값을 보여준다. 베시클의 크기가 작을수록 CR 값이 모든 반응시간에서 큰 것을 알 수 있다. 특히, 필터를 사용하지 않은 베시클과 0.22 μm로 필터한 베시클을 중합한 후에 α-CD(5 mM)와 30분 반응하였을 때 CR 값이 31.4%에서 74.0%로 증가하였다. 이는 작은 크기의 베시클이 당지질 (concanavalin A) 검출의 민감도를 향상시켰다는 결과[15]와 잘 일치한다. 또한, 이러한 결과는 폴리다이아세틸렌 베시클의 크기가 α-CD



**Fig. 4. Relationship between the CR value and filtered PCDA vesicles (1 mM) reacted with α-CD (5 mM) according to reaction time. (a) 0.22 μm, (b) 0.45 μm, (c) 0.8 μm, and (d) no filtration.**

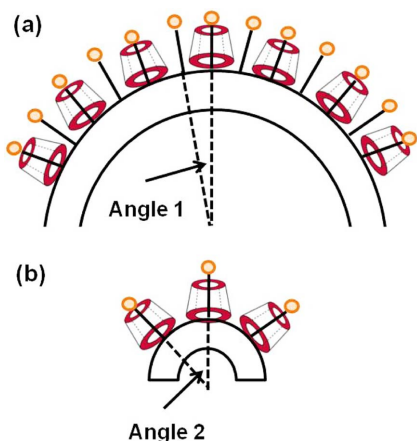


Fig. 5. Curvature effect on host-guest complex between filtered PDA vesicles and  $\alpha$ -CD. (a) larger PDA vesicles and (b) smaller PDA vesicles.

를 검출하는데 있어서 매우 중요한 역할을 한다는 것을 보여준다.

Fig. 5는 베시클의 크기가  $\alpha$ -CD를 검출할 때 민감도에 어떻게 영향을 미치는지를 보여주고 있다. (a)와 (b) 그림을 비교해보면 큰 베시클의 경우에는 작은 곡률을 가지고 있기 때문에  $\alpha$ -CD와 반응할 수 있는 PDA의 모든 사이트가 결합하지 못한다. 즉, 작은 곡률 때문에 반응할 수 있는 공간이 부족하게 된다. 반면, 작은 베시클의 경우는 큰 곡률을 가지게 때문에 거의 모든 사이트가  $\alpha$ -CD와 결합함으로써 큰 CR 값을 가지게 된다.

### 3-2. 중합온도가 폴리다이아세틸렌 색전이에 미치는 영향

중합온도가 폴리다이아세틸렌 색전이에 미치는 영향을 알아보기 위하여 0.22  $\mu$ m로 필터한 베시클을 5, 25, 50  $^{\circ}$ C에서 고분자한 후에  $\alpha$ -CD의 농도를 변화시키면서 반응시켰다. Fig. 6은  $\alpha$ -CD 농도가 1, 3, 5 mM일 때 반응시간에 따른 CR 값들을 보여주고 있다. 세 가지 농도 모두에서 5  $^{\circ}$ C에서 중합된 베시클이 모든 반응시간에 대하여 큰 CR 값들을 가짐을 알 수 있다. 특히, 0.22  $\mu$ m로 필터한 베시클을 25  $^{\circ}$ C와 5  $^{\circ}$ C에서 고분자한 후에  $\alpha$ -CD(5 mM)와 30분 반응하였을 때 CR 값이 74.0%에서 99.2%로 증가하였다(Fig. 6(c)). 이는 낮은 온도에서 중합된 폴리다이아세틸렌이 열적 자극에 매우 민감하다는 선행연구와 잘 일치한다[16]. 또한, 이러한 결과는 간단한 공정 조건인 중합 온도가 폴리다이아세틸렌 베시클을 이용하여  $\alpha$ -CD를 검출하는데 매우 중요한 역할을 한다는 것을 보여준다.

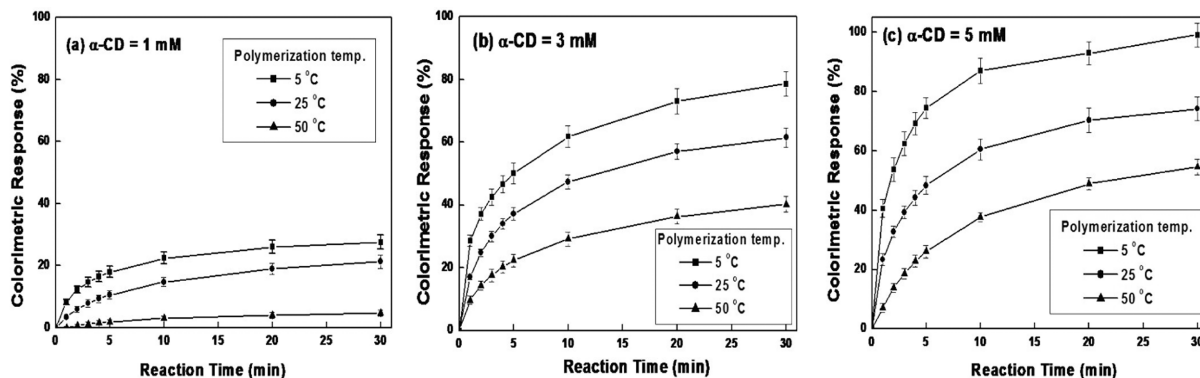


Fig. 6. Relationship between the CR value and PCDA vesicles (1 mM) filtered with 0.22  $\mu$ m filter reacted with different  $\alpha$ -CD concentrations according to polymerization temperature. (a)  $\alpha$ -CD (1 mM), (b)  $\alpha$ -CD (3 mM), and (c)  $\alpha$ -CD (5 mM).

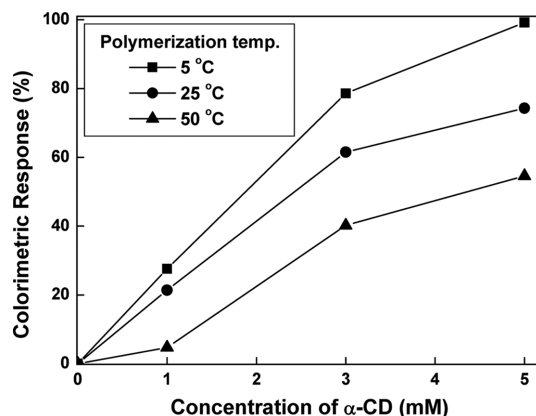


Fig. 7. Relationship between the CR value and PCDA vesicles (1 mM) filtered with 0.22  $\mu$ m filter reacted with different  $\alpha$ -CD concentrations for 30 min according to polymerization temperature.

Fig. 7은 중합온도를 달리한 폴리다이아세틸렌 베시클이  $\alpha$ -CD와 30분 반응하였을 때  $\alpha$ -CD의 농도에 따른 CR 값들을 보여주고 있다. 모든 농도에서 낮은 중합온도가 큰 CR 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 폴리다이아세틸렌이 감도가 좋은 화학 및 바이오센서로서 적용 가능성을 보여준다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 다양한 필터 사이즈를 이용하여 PCDA 베시클의 크기를 조절함과 동시에 중합온도를 조절하여  $\alpha$ -CD를 검출할 때 두 가지 효과가 민감도 향상에 어떤 영향을 미치는지 조사하였다. 폴리다이아세틸렌 베시클의 크기가 작을수록 낮은 온도에서 중합된 베시클일수록 CR 값이 큰 것을 알 수 있었다. 특히, 필터를 사용하지 않은 베시클과 0.22  $\mu$ m로 필터한 베시클을 25  $^{\circ}$ C에서 중합한 후에  $\alpha$ -CD(5 mM)와 30분 반응하였을 때 CR 값이 31.4%에서 74.0%로 증가하였다. 또한, 0.22  $\mu$ m로 필터한 베시클을 25  $^{\circ}$ C와 5  $^{\circ}$ C에서 중합한 후에  $\alpha$ -CD(5 mM)와 30분 반응하였을 때 CR 값이 74.0%에서 99.2%로 증가하였다. 즉, CR 값의 변화가 31.4%(필터하지 않은 베시클) $\rightarrow$ 74.0%(0.22  $\mu$ m 필터로 사이즈 조절) $\rightarrow$ 99.2%(5  $^{\circ}$ C의 중합온도)로 발생하였다. 이로부터 베시클의 크기와 중합온도를 함께 조절하는 것이 시너지 효과를 발휘하여 더 높은 색전이를 유발하였음을 알 수 있다. 이러한 결과는 폴리다이아세틸렌을 이용하여 감도가 매

우 우수한 화학 및 바이오센서를 개발하는데 중요한 단서를 제공할 것으로 사료된다.

## 감 사

이 연구는 지식경제부(No. 10033477-2010-12), 한국연구재단(No. 2010-0016641, 2010-0017825, 2009K001614) 및 고려대학교 교내연구비에 수행되었으며 이에 사의를 표합니다.

## 참고문헌

- Fendler, J. H., "Atomic and Molecular Clusters in Membrane Mimetic Chemistry," *Chem. Rev.*, **87**, 877-899(1987).
- Swager, T. M., "The Molecular Wire Approach to Sensory Signal Amplification," *Acc. Chem. Res.*, **31**, 201-207(1998).
- Ahn, D. J. and Kim, J.-M., "Fluorogenic Polydiacetylene Supramolecules: Immobilization, Micropatterning, and Application to Label-Free Chemosensors," *Acc. Chem. Res.*, **41**, 805-816(2008).
- Lee, K., Povlich, L. K. and Kim, J., "Recent Advances in Fluorescent and Colorimetric Conjugated Polymer-based Biosensors," *Analyst*, **135**, 2179-2189(2010).
- Exarhos, G. J., Risen, W. M. and Bauhman, R. H., "Resonance Raman Study of the Thermochromic Phase Transition of a Polydiacetylene," *J. Am. Chem. Soc.*, **98**, 481-487(1976).
- Chu, B. and Xu, R., "Chromatic Transition of Polydiacetylene in Solution," *Acc. Chem. Res.*, **24**, 384-389(1991).
- Cheng, Q., Peng, T. and Stevens, R. C., "Signaling of Escherichia Coli Enterotoxin on Supramolecular Redox Bilayer Liposomes," *J. Am. Chem. Soc.*, **121**, 6767-6768(1999).
- Kim, K.-W., Choi, H., Lee, G. S., Oh, M.-K. and D. J. Ahn, D. J., "Micro-patterned Polydiacetylene Vesicle Chips for Detecting Protein-Protein Interactions," *Macromol. Res.*, **14**, 483-485(2006).
- Lee, S. W., Kang, C. D., Yang, D. H., Lee, J.-S., Kim, J.-M., Ahn, D. J. and Sim, S. J., "The Development of a Generic Bio-analytical Matrix Using Polydiacetylenes," *Adv. Funct. Mater.*, **17**, 2038-2044(2007).
- Kim, K.-W., Choi, H., Lee, G. S., Ahn, D. J. and Oh, M.-K., "Effect of Phospholipid Insertion on Arrayed Polydiacetylene Biosensors," *Colloid Surfaces B: Biointerfaces*, **66**, 213-217(2008).
- Wang, C., Ma, Z. and Su, Z., "Facile Method to Detect Oligonucleotides with Functionalized Polydiacetylene Vesicles," *Sensor Actuat. B: Chem.*, **113**, 510-515(2006).
- Okada, S., Peng, S., Spevak, W. and Charych, D., "Color and Chromism of Polydiacetylene Vesicles," *Acc. Chem. Res.*, **31**, 229-239(1998).
- Ma, Z., Li, J., Jiang, L., Cao, J. and Boullanger, P., "Influence of the Spacer Length of Glycolipid Receptors in Polydiacetylene Vesicles on the Colorimetric Detection of *Escherichia coli*," *Langmuir*, **16**, 7801-7804(2000).
- Su, Y., Li, J., Jiang, L. and Cao, J., "Biosensor Signal Amplification of Vesicles Functionalized with Glycolipid for Colorimetric Detection of *Escherichia coli*," *J. Colloid Interf. Sci.*, **284**, 114-119(2005).
- Guo, C. X., Boullanger, P., Liu, T. and Jiang, L., "Size Effect of Polydiacetylene Vesicles Functionalized with Glycolipids on Their Colorimetric Detection Ability," *J. Phy. Chem. B*, **109**, 18765-18771(2005).
- Lee, G. S., Hyun, S. J., Woo, S. M., Yang, K. J., Kim, J.-M. and Ahn, D. J., "Temperature-dependent Phase Behavior of Langmuir Films of 10,12-pentacosadiynoic Acid at the Air/water Interface and Its Effects on Chromatic Stability of the Polymerized Langmuir-Schaefer Films," *Langmuir*, submitted.
- Spevak, W., Nagy, J. O., Charych, D. H., Schaefer, M. E., Gilbert, J. H. and Bednarski, M. D., "Polymerized Liposomes Containing C-Glycosides of Sialic Acid: Potent Inhibitors of Influenza Virus in vitro Infectivity," *J. Am. Chem. Soc.*, **115**, 1146-1147(1993).
- Kim, J.-M., Lee, Y. B., Yang, D. H., Lee, J.-S., Lee, G. S. and Ahn, D. J., "A Polydiacetylene-Based Fluorescent Sensor Chip," *J. Am. Chem. Soc.*, **127**, 17580-17581(2005).
- Kim, J.-M., Lee, J.-S., Lee, J.-S., Woo, S.-Y. and Ahn, D. J., "Unique Effects of Cyclodextrins on the Formation and Colorimetric Transition of Polydiacetylene Vesicles," *Macromol. Chem. Phys.*, **206**, 2299(2005).