

# 고분자/베타-사이클로덱스트린 포접 화합물로 이루어진 고분자 혼성체 필름의 물성 및 구조에 미치는 게스트 분자의 영향

배준원<sup>†</sup>

동덕여자대학교 응용화학과  
(2021년 7월 22일 접수, 2021년 8월 11일 수정, 2021년 8월 12일 채택)

## Effect of Guest Molecules on Structure and Properties of Polymer/beta-Cyclodextrin Inclusion Compound Hybrid Films

Joonwon Bae<sup>†</sup>

Department of Applied Chemistry, Dongduk Women's University, Seoul 02748, Republic of Korea  
(Received July 22, 2021; Revised August 11, 2021; Accepted August 12, 2021)

### 초 록

본 연구에서는 게스트 분자(guest molecule)의 특성이 고분자/베타-사이클로덱스트린(beta-cyclodextrin) 포접화합물(inclusion compound)로 이루어진 고분자 필름의 구조 및 물성에 미치는 영향에 대해서 고찰하고자 한다. 본 연구에서 사용된 게스트 분자는 미백 효과를 지니는 것으로 알려진 3가지로 하이드로퀴논(hydroquinone, HQ), 알부틴(arbutin, AB), 그리고 트랜엑사믹 에시드(tranexamic acid, TA)이다. 먼저, 베타-사이클로덱스트린과 게스트 분자 간의 포접화합물의 성공적인 형성과 이를 포함하는 고분자 필름의 제조여부를 라만(Raman) 분광학으로 확인하였다. 포접화합물을 포함하는 고분자 필름의 구조 및 물성은 엑스선 회절법(X-ray diffraction)과 주사열용량법 및 열중량추적법 같은 열분석법으로 고찰하였다. 그 결과, 트랜엑사믹 에시드의 영향이 다른 분자의 영향과 비교하여 상당히 상이하였음을 관찰할 수 있었다. 이러한 경향은 간단한 분자 시뮬레이션 기법으로 재검증하였다. 본 연구는 포접화합물을 형성하는 게스트 분자들의 상이한 영향에 대한 체계적인 접근을 통한 실험적 검증의 사례로 향후 관련 연구에 중요한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

### Abstract

In this study, the effect of molecular features of guest molecules on the structure, property, and formation of poly(vinyl alcohol) (PVA)/beta-cyclodextrin (bCD) inclusion compound hybrid films was investigated using three types of guest molecules such as hydroquinone (HQ), arbutin (AB), and tranexamic acid (TA). First, the successful formation of inclusion compounds between bCD and the guest molecules, and polymer/inclusion compound hybrid were proved using Raman spectroscopy. The effect of bCD-based inclusion compounds on the structure and property of PVA matrix composites containing inclusion compounds was also studied using X-ray diffraction (XRD) and thermal analyses such as differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetric analysis (TGA). It was notable that the effect of TA to the crystalline structure of the PVA was significantly different from that of using other guest molecules including HQ and AB. It was also supported by a simple molecular simulation result. This article will be a good example for demonstrating the effect of molecular characteristics on the inclusion compound formation in polymer films, which can provide important information for relevant future research.

**Keywords:** Cyclodextrin, Inclusion compound, Guest molecule, Polymer film, Poly(vinyl alcohol)

## 1. 서 론

사이클로덱스트린(cyclodextrin)은 6-8개의 글루코피라노스(glucofuranose) 그룹으로 이루어진 환형다당류(cyclic oligosaccharides)로 양친성을 지

니고 있으며 다양한 활용도를 보여주고 있다. 이 분자들은 대체로 컵 모양의 화학 구조를 지니고 있으며 게스트 분자(guest molecule)들이 도입되면 사이클로덱스트린의 안쪽 공간에 자리하여 포접화합물(inclusion compound)을 형성한다[1]. 포접화합물의 형성은 사이클로덱스트린과 게스트 분자 간의 특이적 상호작용(specific interaction)에 의해서 추진되며, 이 상호작용에는 정전기적 또는 극성 상호작용이나 수소 결합이 존재한다[2]. 포접화합물의 형성에 관하여는 이론적으로나[3] 실험적으로[4] 많이 연구되어 왔다. 특수한 경우, 포접화합물 형성시에 전하의 전달이 이루어지기도 한다[4]. 이를 이용하여, 외부 화

<sup>†</sup> Corresponding Author: Dongduk Women's University  
Department of Applied Chemistry, Seoul 02748, Republic of Korea  
Tel: +82-2-940-4506 e-mail: redsox7@dongduk.ac.kr; joonwonbae@gmail.com

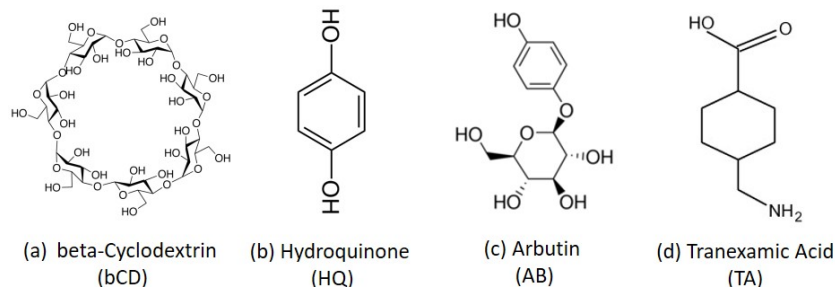


Figure 1. Chemical structures of the host and guest molecules used in this study.

합물의 유입을 감지하는 센서로 포접화합물이 활용되기도 한다[5].

현재까지, 사이클로덱스트린이나 이를 기반으로 한 포접화합물은 고분자 매트릭스(polymer matrix)에 도입되어 다양한 방법으로 활용되어 왔다.[6] 이 때 사이클로덱스트린이 고분자 매트릭스의 구조와 물성에 미치는 영향을 다양한 방식으로 드러내며, 몇 가지 중요한 변수에 의해서 영향을 받는다. 이 변수로는 친수성/소수성, 고분자 결정 구조 및 크기, 고분자 체인의 탄력성 등이 있다[7, 8]. 이러한 요소들은 고분자/사이클로-덱스트린 복합체의 활용 측면에서 간간히 고찰되어 왔다. 한편, 사이클로덱스트린 기반 포접화합물이 고분자 구조에 미치는 영향은 2000년대 초반부터 널리 연구되어 왔다. 특히, 포접화합물이 도입될 경우 고분자의 결정 구조가 상당히 영향을 받는다는 것이 알려졌다[9, 10]. 고분자와 도입된 포접화합물 간에 상당한 수준의 상호작용이 발생하게 되므로 고분자의 구조가 영향을 받는 것은 이해할 수 있다[11, 12].

포접화합물의 형성과 이가 고분자 구조에 미치는 영향을 많은 관심을 끌고 연구되어 왔으나, 아직도 상당히 어렵고 도전적인 연구 분야이다. 게스트 분자의 종류마다 포접화합물의 형성 과정, 형태, 및 특성이 상이하며 따라서 이 포접화합물이 고분자에 도입될 경우 나타나는 현상 및 결과도 제각각이다. 따라서, 포접화합물의 형성을 잘 이해하기 위해서는 게스트 분자의 구조, 특성, 입체 요소 등에 대한 철저한 이해가 필요하다. 이는 실험적인 접근 및 이론적인 계산도 필요한 분야이다. 또는 동일한 포접화합물이 상이한 고분자에 도입되는 경우에도 효과가 다를 수 있다.

본 연구에서는 피부미백 효과를 나타내는 것으로 알려진 3가지 게스트 분자들, 하이드로퀴논(hydroquinone, HQ), 알부틴(arbutin, AB), 트랜엑사믹 에시드(tranexamic acid, TA)가 사이클로덱스트린과 포접화합물을 형성할 때 나타나는 현상 및 특성을 고찰해 보고, 이를 포함하는 고분자 필름을 제조하여 포접화합물의 존재가 고분자 필름의 구조 및 특성에 미치는 영향을 분석해 보고자 한다. 포접화합물 형성 및 포접화합물을 포함한 고분자 필름의 형성은 라만(Raman)분광학 방법으로 확인하였다. 특히, 포접화합물 포함한 고분자 필름의 구조 및 물성은 엑스레이 회절법(X-ray diffraction) 및 열분석 법으로 고찰하였다. 실험 결과를 뒷받침하기 위하여 간단한 분자 시뮬레이션 방법을 동원하여 추가적으로 확인하였다.

이들 세 가지 분자들은 공통적으로 피부미백 효과를 나타내는 것으로 알려져 있고, 포접화합물의 형태로 피부에 도입될 경우 효과가 증대될 것으로 기대된다. 만약, 본 연구를 통해 이들 화합물을 도입한 포접화합물의 특성과 형성 시에 드러나는 현상을 종합적으로 이해할 수 있다면 피부미백 용도로 활용할 때 효용성을 개선할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서, 본 연구에서 얻어진 결과는 관련 연구 분야의 향후 연구에 있어 중요한 사전 정보를 제공할 수 있다.

## 2. 실험

### 2.1. 재료

베타-사이클로덱스트린(bcd), 게스트 분자들, 및 매트릭스로 사용한 폴리비닐알코올(poly(vinyl alcohol), Mw 85~124 kg/mol, PVA)은 알드리치(Aldrich, Wisconsin, USA)에서 구매하여 추가 정제 없이 사용하였다. Figure 1은 이들 분자의 화학 구조를 나타내고 있다.

### 2.2. 포접화합물 생성

포접화합물 형성을 위해 게스트 분자(0.5 mmol)를 베타-사이클로덱스트린(0.5 mmol)을 포함한 일정량의 수용액(50 mL)에 도입한다. 이 수용액은  $-80^{\circ}\text{C}$ 에서 100시간 동안 동결건조한다. 게스트 분자와 베타-사이클로덱스트린의 당량비를 맞춘다.

### 2.3. 포접화합물을 포함한 고분자 필름의 제조

PVA(3.6 g)를 증류수(30 mL)에  $80^{\circ}\text{C}$ 에서 녹인 후, 3시간 유지한 다음  $40^{\circ}\text{C}$ 로 냉각한다. 이어서, 포접화합물(0.4 g)을 위에서 제조한 용액에 투입하고 1시간 동안 혼합한다. 각각의 용액(10 mL)을 페트리 디시에 부어  $60^{\circ}\text{C}$ 에서 24시간동안 건조한다. PVA 및 PVA/bcd 필름도 유사한 방법으로 제조한다.

### 2.4. 분석 및 측정

라만 분광 스펙트럼은 Horiba Jobin-Yvon (Kyoto, Japan)사의 LabRam Aramis spectrometer를 이용하여 얻었다. 파장 514 nm를 갖는 아르곤 이온 레이저를 스스로 이용하였다. 엑스레이 회절(XRD)패턴은 Rigaku (Tokyo, Japan)사의 D-Max/3C X-ray diffractometer를 이용하여  $10^{\circ}/\text{mn}$ 의 속도로 스캔하여 얻었다. 주사열용량 곡선은 Perkin Elmer (Waltham, MA, USA)사의 DSC8000을 이용하여 질소분위기에서 상온에서  $300^{\circ}\text{C}$ 까지  $10^{\circ}/\text{mn}$ 의 속도로 승온하여 얻었다. 열중량분석 결과는 Texas Instruments (Dallas, TX, USA)사의 Q50으로 질소 분위기에서 상온에서  $600^{\circ}\text{C}$ 까지 분당  $10^{\circ}/\text{mn}$ 의 속도로 승온하여 얻었다. 분자 시뮬레이션은 오토독(Autodock) 소프트웨어를 이용하여 실시하였다.

## 3. 결과 및 고찰

이 실험에서, 세 가지 게스트 분자에 대하여 포접화합물 제조를 시도하였다. 포접화합물 형성의 이론적인 근거는 이전 논문에서 제시되었다[3]. 하지만, 개별적인 게스트 분자에 대하여 포접화합물의 형성에 대하여는 확인할 필요가 있다. 이를 위하여 분광학적 기법들 중에서 신뢰도가 높다고 고려되는 라만 분광기법을 도입하여 포접화합물의 형성을 검증하였다. 사이클로덱스트린, 게스트 분자들의 적외선 및

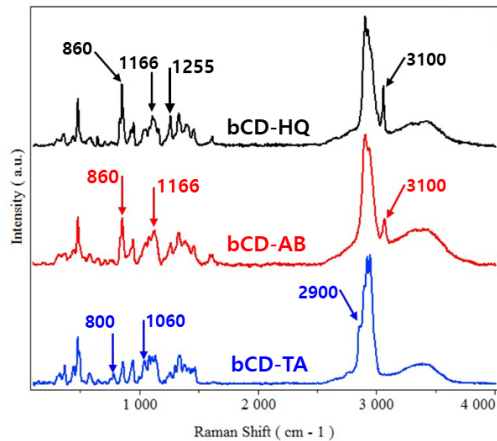


Figure 2. FT-Raman spectra of the inclusion compounds.

라만 스펙트럼을 분석하고, 이를 포접화합물의 라만 스펙트럼과 비교하였다.

Figure 2는 세 가지 포접화합물의 라만 스펙트럼을 나타내고 있다. 먼저 bCD-HQ 포접화합물의 경우, C-C 및 C=C 스트레칭(stretching)에 의한 특성 피크(peak)는 3,000 및 1,680 파수(wavenumber,  $\text{cm}^{-1}$ )에서 관찰되고 있으며, 이를 통해서는 포접화합물의 형성을 판단하기 힘들다. 따라서, 추가적인 피크 분석이 필요한데 HQ의 고리 진동(ring vibration)에 의해 각각 1,166 및 1,255 파수에 나타나는 피크들이 낮은 파수로 이동(downshift)하였다는 것을 볼 수 있었다. 이는 포접화합물의 형성에 의하여 HQ의 고리 진동이 다소 제한되어 일어나는 현상으로 볼 수 있다. 알부틴(AB) 분자에 대해서도 유사한 현상을 관찰할 수 있었는데, 포접화합물이 생성되었을 때, 860 및 1,250 파수에서 나타나는 피크들이 낮은 파수로 전이하였음을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 HQ와 AB의 분자 구조가 상당히 닮아 있어 나타나는 것으로 이해할 수 있다. TA의 경우에도 800 파수 근처에서 나타나는 고리 진동(bending) 피크가 낮은 파수로 이동한 것을 확인할 수 있다. 즉, 세 가지 게스트 분자에 대하여 포접화합물이 생성될 경우, 게스트 분자의 운동성이 제한을 받는 것을 확인할 수 있다[13].

한편, 포접화합물의 생성 비율 및 효율 등 몇 가지 특성은 게스트 분자의 특성 및 구조에 의존할 것으로 예상된다. 이 부분을 염두에 두고 우리는 포접화합물을 고분자(PVA)에 도입하여 필름형태로 제조하여 포접화합물의 영향을 고찰해 보고자 하였다. 사이클로덱스트린과 PVA는 친수성을 지니고 있으므로, 혼합성은 큰 이슈가 되지 않는다. 단순한 혼합과 상온 건조를 통해 투명한 PVA 기반 고분자 필름을 제조할 수 있었다(Figure 3 inset). 포접화합물이 도입되었을 때에도 이러한 외형적인 특성과 투명도는 크게 달라지지 않은 것으로 판단할 때, 포접화합물의 고분자 내 분산은 이루어진 것으로 볼 수 있다. 포접화합물의 분자 크기를 고려해 볼 때, 이 화합물의 고분자 내 분산은 열역학적으로 매우 불리한 과정으로 볼 수 있다. 왜냐하면, 상당히 큰 분자 크기를 갖는 포접화합물이 상당히 조밀한 고분자 결정 내부의 공간으로 들어가거나, 비정형 영역에 포함되어 있어야 하기 때문이다. 양쪽 모두 친수성을 지니고 있어 상분리가 일어날 가능성은 낮아 보이지만, 이 과정을 추구하기 위해서는 엔트로피(entropy)의 불리함(penalty)을 극복해야 하므로 시간이 오래 걸릴 것으로 예상된다[14]. 따라서, 천천히 오랜 시간동안 건조하는 것이 필수적이며, 본 연구에서 상온 건조 방법을 채택하였다. Figure 3은 포접화합물을 포함한 고분자 필름의 라만 스펙트럼을 나타내고 있다. 이 때, PVA의 특성 피

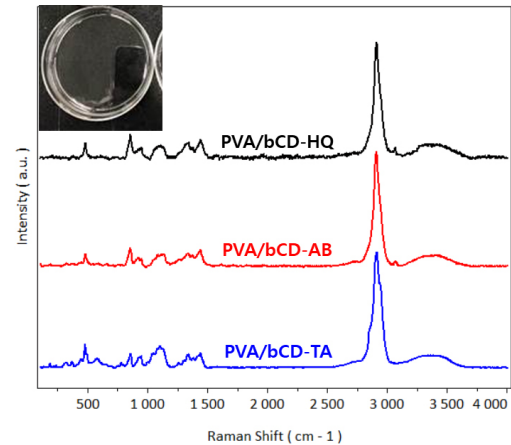


Figure 3. FT-Raman spectra and digital image (inset) of PVA thin films containing the inclusion compounds: PVA/bCD-HQ (Black); PVA/bCD-AB (Red); PVA/bCD-TA (Blue).

크들이 1,100 (C-H bending), 1,400 (C-O bending), 3,300 (O-H stretching) 파수에서 나타나게 된다. PVA 고분자 함량이 높으므로 PVA 특성 피크들이 두드러지게 관찰되고 포접화합물의 특성 피크들은 상대적으로 약하게 된다. 따라서, 세 가지 스펙트럼의 전체적인 양상이 다소 유사하게 관찰되는 경향을 보인다.

지금까지 포접화합물 및 이를 포함한 PVA 필름의 형성에 대하여 고찰하였다. 이제 조금 더 미세 구조에 대한 관심을 두고 엑스레이 회절분석을 실시하였다. Figure 4는 PVA, PVA/bCD, 그리고 포접화합물을 포함한 PVA 필름의 XRD 패턴을 나타내고 있다. PVA는 결정성이 존재하는 고분자로 모든 패턴들에서 다소 강한 1차 피크( $2\theta$ )와 약한 2차 피크가  $43^\circ$ 에서 나타나는 것을 확인할 수 있다. 2차 피크의 출현은 장거리 규칙성이 존재함을 의미하는 것으로 포접화합물이 고분자 결정 구조를 심하게 변화시키지 않는 상태로 포함되어 있음을 나타낸다. 사이클로덱스트린 또는 포접화합물의 분자 크기가 1~2 nm이며, PVA 고분자의 회전반지름(radius of gyration)이 약 9 nm인 것을 고려하며, 포접화합물이 고분자의 체인에 의해 형성된 공간에 포함되는 것이 가능하다고 판단된다[9]. 내부 공간이 존재하는 것만으로 포접화합물의 고분자 내부에 포함된 것을 확인할 수 없으므로, 천천히 건조하여 엔트로피의 불리함을 극복하도록 조절하였다. 즉, 포접화합물이 수용될 수 있는 공간으로 이동할 수 있는 시간을 제공하는 방법으로 건조하였다. 이러한 방식으로 평형에 도달하여 결정구조가 유지된 채로 안정된 형상을 유지한 것으로 사료된다. 특히, 두드러지는 않지만 TA의 경우 1, 2차 피크의 세기(intensity)가 상대적으로 약한 것을 감지할 수 있었는데, 이는 결정의 규칙도가 다소 약하다는 측면으로 추측할 수 있으며, 이를 확인하기 위해서는 추가적인 분석을 통해 조금 더 살펴볼 필요가 있다. TA의 분자구조가 HQ 및 AB와는 다소 상이하기 때문에 고분자 구조에 미치는 영향이 다소 특이할 것으로 예상된다. 또한, TA의 경우 분자의 친수성이 다소 약한데, 이러한 특성도 영향을 미칠 것으로 가정해 볼 수 있다.

위에서 언급한 구조적 특성 및 구조에 미치는 포접화합물의 영향은 상당히 중요하므로, 추가적인 열분석을 통해 상세히 살펴보았다. 고분자 구조를 나타내는 대표적인 물성은 바로 결정성(결정도)이다. Figure 5는 PVA, PVA/bCD, 및 포접화합물을 포함한 PVA 필름의 DSC 곡선이다. 승온(heating) 시에 얻어진 곡선에서는 공통적으로 하나의 피크가 나타나고 약  $220^\circ\text{C}$  근처에서 나타나는데, 이는 용융

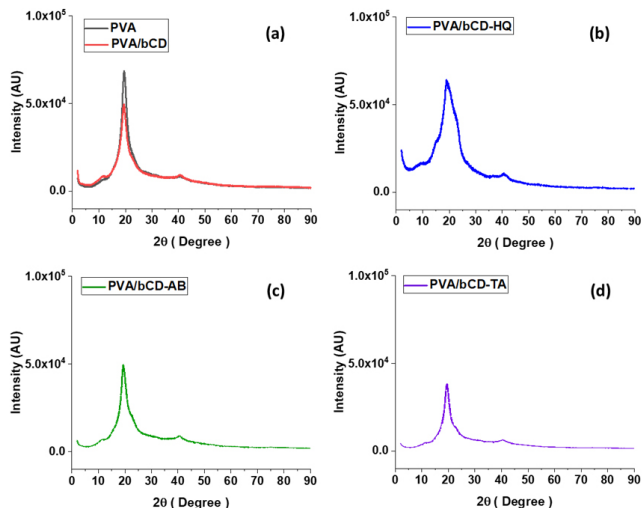


Figure 4. XRD patterns of thin films composed of (a) PVA alone and PVA/bCD, (b) PVA/bCD-HQ, (c) PVA/bCD-AB, and (d) PVA/bCD-TA.

(melting) 피크이다. 약간의 온도 차이는 존재하나, 대체적으로 유사한 거동을 보여주고 있으며, 알려진 PVA의 용융 온도와 거의 일치한다 [15]. 냉각(cooling)하면서 얻은 DSC 프로파일에서는 두 가지 현상이 두드러지게 관찰되었다. 먼저, 결정화 온도가 포접화합물의 투입에 의해 내려가는 점이다. 포접화합물이 투입되면, 결정 구조가 다소 느슨하게 변화하면서 결정화 온도가 다소 감소하는 경향을 보일 수 있다. 다른 현상은 포접화합물 bCD-TA를 포함한 PVA 필름의 경우 결정화 온도를 고찰하기 상당히 어려웠다는 점이다. 이는 XRD 프로파일에서 관찰된 현상과 연관되어 있을 가능성도 보인다. 즉, bCD-TA의 영향에 의하여 고분자 결정 구조가 상당히 흔들렸을 가능성이 있다. 즉, TA가 보이는 효과가 HQ나 AB보다 크다고 판단할 수 있다.

엑스레이 회절 및 열용량주사법 분석에서 얻어진 결과로부터 논의된 내용을 확인하기 위하여 간단한 분자 시뮬레이션을 활용하였다. Figure 6은 오토독(Autodock) 소프트웨어를 활용해 얻어진 포접화합물 형성에 대한 결과이다. 게스트 분자들은 사이클로덱스트린의 내부 기공에 안착해 있음을 볼 수 있다. 이는 모든 게스트 분자들이 사이클로덱스트린과 수소 결합을 할 수 있기 때문이다. 그러나, 자세한 형상은 상당히 상이한데, HQ와 AB는 bCD와 같은 평면 위에 존재하는 경향을 보이는 반면에 TA는 수직으로 배치되는 경향을 지니는 것으로 드러나 입체 구조가 다소 불리한 것으로 나타났다. 이는 TA의 친수성이 약하여 bCD와의 상대적인 친화도가 약하여 나타나는 결과로 보인다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는, 세 가지 미백 효과를 지니는 게스트 화합물을 사이클로덱스트린과 결합하여 포접화합물을 형성하고 이를 고분자 매트릭스에 도입하여 필름을 형성하였다. 세 가지 게스트 화합물은 모두 성공적으로 포접화합물을 형성하였으며, 포접화합물은 역시 고분자와 친화적 상호작용이 가능하기에 고분자 매트릭스에 도입이 될 수 있었다. 성공적인 형성은 라만 분광법으로 고찰되었다. 다만, 얻어진 포접화합물을 포함한 고분자 필름의 구조 및 물성은 게스트 분자의 특성에 따라서 다소 상이하게 나타났다. 포접화합물의 존재는 고분자의 결정 구조를 심하게 변화시키지 않았으나, 결정의 규칙성에 약간 영

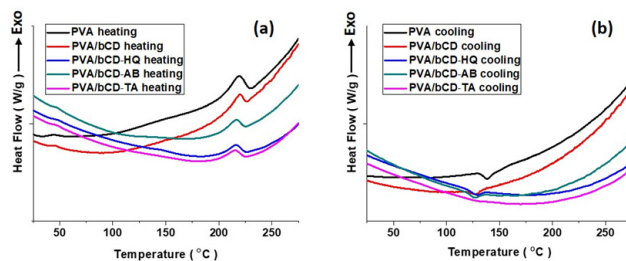


Figure 5. DSC profiles of PVA-based thin films containing inclusion compound obtained during (a) heating and (b) cooling.

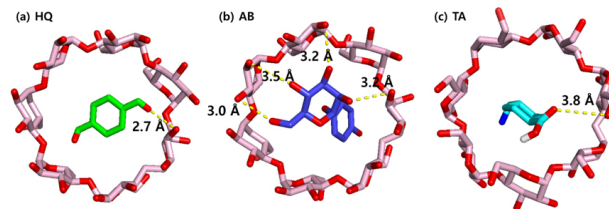


Figure 6. Molecular simulation results for the bCD-based inclusion complex formation.

향을 미치는 것으로 나타났다. 열분석으로 추가 고찰한 결과 특정한 게스트 분자의 경우 고분자 결정 구조를 다소 느슨하게 만드는 것으로 나타났다. 본 연구에서 얻어진 결과는 향후 관련 분야 연구에 있어 상당히 중요한 정보들을 제공할 것으로 기대되며, 특히 미백 분자의 활용 측면에서 상당히 도움이 될 것으로 역시 기대된다.

#### 감 사

이 연구는 동덕여자대학교의 연구년 지원으로 수행되었습니다. (2020년)

#### References

1. C. Folch-Cano, M. Yazdani-Pedram, and C. Olea-Azar, Inclusion and functionalization of polymers with cyclodextrins: current applications and future prospects, *Molecules*, **19**, 14066-14079 (2014).
2. J. Bae, K. Shin, O. S. Kwon, Y. Hwang, J. An, A. Jang, H. J. Kim, and C. S. Lee, A succinct review of refined chemical sensor systems based on conducting polymer-cyclodextrin hybrids, *J. Ind. Eng. Chem.*, **79**, 19-28 (2019).
3. L. Liu, K. S. Song, X. S. Li, and Q. X. Guo, Charge-transfer Interaction: A driving force for cyclodextrin inclusion complexation. *J. Inclusion Phenom. Macrocycl. Chem.*, **40**, 35-39 (2001).
4. M. Park, S. Kim, and J. Bae, Study on Electrochemical Detection of Cyclodextrin-molecule Interactions for Sensor Applications, *Appl. Chem. Eng.*, **29**, 519-523 (2018).
5. J. Bae, Y. Hwang, J. H. Ha, O. S. Kwon, A. Jang, H. J. Kim, J. An, C. S. Lee, and S. H. Park, Versatile chemical sensors using oligosaccharides on cleanable PDMS/graphene hybrids for monitoring environmentally hazardous substances, *Appl. Surf. Sci.*, **507**, 145139 (2020).
6. U. Kaneto, F. Hirayama, and T. Irie, Cyclodextrin Drug Carrier Systems, *Chem. Rev.*, **98**, 2045-2076 (1998).

7. S. M. Lemma, M. Scampicchio, P. J. Mahon, I. Sbarski, J. Wang, and P. J. Kingshott, Controlled release of retinyl acetate from  $\beta$ -cyclodextrin functionalized poly(vinyl alcohol) electrospun nanofibers, *J. Agric. Food Chem.*, **63**, 3481-3488 (2015).
8. G. Narayanan, R. Aguda, M. Hartman, C. C. Chung, R. Boy, B. S. Gupta, and A. J. Tonelli, Fabrication and characterization of poly ( $\epsilon$ -caprolactone)/ $\alpha$ -cyclodextrin pseudorotaxane nanofibers, *Bio-macromolecules*, **17**, 271-279 (2016).
9. T. Dong, Y. He, B. Zhu, K. M. Shin, and Y. Inoue, Nucleation mechanism of  $\alpha$ -cyclodextrin-enhanced crystallization of some semicrystalline aliphatic polymers, *Macromolecules*, **38**, 7736-7744 (2005).
10. K. -M. Shin, T. Dong, Y. He, Y. Taguchi, A. Oishi, H. Nishida, and Y. Inoue, Inclusion complex formation between  $\alpha$ -cyclodextrin and biodegradable aliphatic polyesters, *Macromol. Biosci.*, **4**, 1075-1083 (2004).
11. M. Wei, W. Davis, B. Urban, Y. Song, F. E. Porbeni, W. Wang, J. L. White, C. M. Balik, C. C. Rusa, J. Fox, and A. J. Tonelli, Manipulation of Nylon-6 Crystal Structures with Its  $\alpha$ -Cyclodextrin Inclusion Complex, *Macromolecules*, **35**, 8039-8044 (2002).
12. T. Dong, W. Kai, P. Pan, A. Cao, and Y. Inoue, Effects of host-guest stoichiometry of  $\alpha$ -cyclodextrin-aliphatic polyester inclusion complexes and molecular weight of guest polymer on the crystallization behavior of aliphatic polyesters, *Macromolecules*, **40**, 7244- 7251 (2007).
13. J. Bae, Identification of Toxic Chemicals Using Polypyrrole-Cyclodextrin Hybrids, *Appl. Chem. Eng.*, **30**, 186-189 (2019).
14. T. Uyar, M. A. Hunt, H. S. Gracz, and A. J. Tonelli, Crystalline cyclodextrin inclusion compounds formed with aromatic guests: guest dependent stoichiometries and hydration-sensitive crystal structures, *Cryst. Growth. Des.*, **6**, 1113-1119 (2006).
15. H. Xiao, X. Kong, J. Bao, and S. Zhang, Preparation of poly(vinyl alcohol) and hydroxypropyl- $\beta$ -cyclodextrin inclusion complex through polymer processing. *Polym. Eng. Sci.*, **55**, 1988-1993 (2015).

**Author**

Joonwon Bae; Ph.D., Associate Professor, Department of Applied Chemistry, Dongduk Women's University, Seoul 02748, Republic of Korea; redsox7@dongduk.ac.kr; joonwonbae@gmail.com