

# TEAH/요소/셀룰로오스 용액의 온도가 표면장력 및 셀룰로오스 비즈 입자 크기에 미치는 영향

안희진<sup>1</sup>, 박희연<sup>2†</sup>, 조병욱<sup>3†</sup>

접수일(2021년 12월 4일), 수정일(2021년 12월 22일), 채택일(2021년 12월 23일)

## Effect of Temperature of Tetraethylammonium Hydroxide/Urea/Cellulose Solution on Surface Tension and Cellulose Bead Size

Hee-Jin An<sup>1</sup>, Heon E. Park<sup>2†</sup> and Byoung-Uk Cho<sup>3†</sup>

Received December 4, 2021; Received in revised form December 22, 2021; Accepted December 23, 2021

### ABSTRACT

Effects of temperature of the tetraethylammonium hydroxide (TEAH)/urea/cellulose solution on viscosity, surface tension, and size of cellulose beads were investigated. Hardwood bleached kraft pulp (HwBKP) was used as a cellulose sauce and the dropping method was utilized to fabricate cellulose beads. Temperature of cellulose solution was varied from 30°C to 50°C. When the temperature of cellulose solution was increased, the viscosity decreased while the surface tension increased. In addition, increasing the temperature of cellulose solution resulted in the increased size of cellulose beads possibly due to the increased surface tension.

**Keywords:** Cellulose beads, dropping, solution temperature, particle size, viscosity, surface tension

1 강원대학교 산림환경과학대학 제지공학과(Department of Paper Science & Engineering, College of Forest and Environmental Science, Kangwon National University), 학생

2 캔터베리대학교, 화학공학과(Department of Chemical and Process Engineering, College of Engineering, University of Canterbury, New Zealand), 교수

3 강원대학교 산림환경과학대학 제지공학과(Department of Paper Science & Engineering, College of Forest and Environmental Science, Kangwon National University), 교수

† 교신저자(Corresponding Author): E-mail: bucho@kangwon.ac.kr (Address: Department of Paper Science & Engineering, Kangwon National University, Chunchon, Republic of Korea)

‡ 공동교신저자(Co-corresponding Author): E-mail: heon.park@canterbury.ac.nz (Address: Department of Chemical and Process Engineering, College of Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand)

## 1. 서론

전 세계적으로 버려지는 플라스틱으로 인한 환경문제가 급격하게 증가하고 있고, 더불어 해양생태계도 위협받고 있다.<sup>1)</sup> Jambeck 등<sup>2)</sup>은 2010년도에 바다에 유입된 플라스틱 쓰레기를 약 1000만 톤 정도로 추정했으며, 대책 방안이 없다면 2025년에는 네 배 정도의 플라스틱 쓰레기들이 해양으로 유입될 것이라고 분석하였다. 이러한 플라스틱에 의한 환경문제 중에서 특히 미세 플라스틱 비즈에 의한 환경문제가 심각한 문제를 일으키고 있다. 미세 플라스틱은 1차 미세 플라스틱과 2차 미세 플라스틱으로 구분되고 있다.<sup>3)</sup> 1차 미세 플라스틱은 치약, 세제, 세안제 등에 포함된 작은 구형의 미세 플라스틱을 의미하며 2차 미세 플라스틱은 큰 플라스틱이 해양환경에 노출되어 작게 조각난 것을 의미한다. Kathryn 등<sup>4)</sup>에 의하면 이러한 미세 플라스틱은 독성 화학물질을 해수로 방출하고, 바다속 화학물질을 표면에 흡착하여 해양 생물에 독성을 유발할 수 있다고 보고 했으며, 입자 크기가 매우 작아서 해양 생물들이 먹이로 오인하여 섭취하고, 먹이사슬에 의해 인간이 섭취하기 때문에 최종적으로 인간에게 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 목질계 바이오매스를 이용하여 플라스틱 마이크로 비즈를 대체할 수 있는 신소재 연구에 관심이 급증하고 있다.<sup>5,6)</sup>

목질계 바이오매스는 주로 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌으로 구성<sup>7)</sup>되어 있으며, 이 중에서 셀룰로오스는 지구상에서 가장 풍부한 바이오 고분자 중의 하나로, 생체 적합성이 높고, 생물학적으로 분해가 가능한 특징을 지니고 있어 플라스틱 소재를 대체할 수 있는 소재로 주목받고 있다.<sup>8)</sup>

최근 플라스틱 비즈를 대체하기 위한 셀룰로오스 비즈 제조 및 응용 기술을 개발하기 위하여 많은 연구가 진행 중이다.<sup>9)</sup> 셀룰로오스 비즈의 제조 공정은 셀룰로오스 또는 셀룰로오스 유도체를 용해하는 단계, 다당류 용액을 구형 입자로 성형화하는 단계, 그리고 성형된 구형 입자를 고형화하는 세 단계로 구성된다.<sup>9)</sup>

이전 연구에서 tetraethylammonium hydroxide (TEAH)-요소(urea) 용제를 이용하여 활엽수 표백 크라프트 펄프(HwBKP, hardwood bleached kraft pulp) 섬유를 용해하고, 주사기를 사용한 드로핑(dropping) 방법을 이용하여 구형의 셀룰로오스 비즈를 제조 가능하다고 보고하였다.<sup>10,11)</sup> 드로핑에 사용되는 주사기 바늘 내경

과 셀룰로오스 용액의 농도가 셀룰로오스 비즈의 입자정에 영향을 미치고, 주사기 바늘 직경을 감소시켜도 일정 크기 이하로 작은 비즈를 제조하기 힘들다고 보고하였다. 셀룰로오스 비즈의 크기에 영향을 미칠 수 있는 인자 중의 하나는 셀룰로오스 용액의 점도이다. Mandato 등<sup>12)</sup>은 노즐에 의해서 액체를 분사 시, 액체의 점도를 감소시키면 미분화된 액체 방울의 입자 크기는 감소한다고 보고 하였다.

본 연구에서는 셀룰로오스 용액의 온도를 조절하여 점도를 감소시키고, 이에 의해서 셀룰로오스 비즈의 입자 크기를 감소시킬 수 있는지를 평가하고자 하였다. HwBKP 섬유를 TEAH-요소 용제에 용해시키고, 셀룰로오스 용액의 온도를 조절하면서 주사기를 사용하여 드로핑하여 셀룰로오스 비즈를 제조하였다. 셀룰로오스 용액의 온도가 용액의 점도 및 표면장력에 미치는 영향을 평가하고, 제조된 셀룰로오스 비즈의 크기에 미치는 영향을 평가하여, 셀룰로오스 비즈 제조 기술 개발을 위한 기초 자료로 삼고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 공시재료

셀룰로오스 원료로는 HwBKP(eucalyptus, Brazil)를 국내 H사에서 분양받아 공시재료로 사용하였다. 셀룰로오스 용제인 TEAH(35 wt% in H<sub>2</sub>O)는 Sigma-Aldrich사에서 구매하여 사용하였다. 요소(98%, Extra pure)는 대정화금에서 구매하여 사용하였다. 성형된 셀룰로오스 비즈를 고형화하기 위한 초산(acetic acid, 99.5%, Extra pure)과 비즈의 세척 용도로 사용된 에탄올(ethyl alcohol, 94.5%, Extra pure)은 대정화금에서 구매하여 사용하였다.

### 2.2 실험방법

#### 2.2.1 셀룰로오스 용액 제조

HwBKP를 직경 0.25 mm 스크린을 장착한 Universal Cutting Mill(Pulversette 19, FRITSCH, Germany)을 이용하여 분쇄하여 사용하였다. 분쇄된 섬유의 평균 섬유장(length weighted average fiber length)은 0.39 mm, 미세분 함량은 56.8%이었다. 평균 섬유장과 미세분 함량은 섬유장분석기(Fiber tester, L&W, Sweden)를 사용하

였고, 사용한 섬유장 분석기는 길이 0.1 mm 이하의 미세 섬유를 미세분으로 간주하였다. 셀룰로오스 용제로는 Sirvio와 Heiskanen의 연구 결과<sup>13)</sup>에 기초하여 TEAH-요소 용제를 사용하였다. TEAH 27 wt%, 요소 22 wt%, 증류수 51 wt%의 비율로 혼합한 다음, 자력 교반기를 사용하여 20분간 교반하여 셀룰로오스 용제를 제조하였다. 상온의 셀룰로오스 용제에 펄프 농도가 4%(w/w)가 되도록 정량한 분쇄된 HwBKP를 첨가하고 교반기를 사용하여 250 rpm에서 2시간 동안 교반시켜 HwBKP를 충분히 해리한 다음 12시간 동안 상온에서 정치시켰다. 12시간 정치 후에 250 rpm으로 1시간 동안 교반하여 투명한 셀룰로오스 용액을 제조하였다. 용해된 셀룰로오스 용액은 항온수조에서 목표 온도(30℃, 40℃, 50℃)로 조절 후에 셀룰로오스 비즈 제조에 사용하였다.

### 2.2.2 드롭핑 기술에 의한 셀룰로오스 비즈 형성

제조된 4%(w/w) 농도의 셀룰로오스 용액을 시린지 펌프(syringe pump, NE1600, New Era, USA)를 이용하여 유속 0.25 mL/min으로 초산 용액 위에 드롭핑하였다. 사용된 주사기 바늘의 내경은 0.60 mm이었다. 초산과 주사기 바늘 사이의 높이는 모든 실험에서 50 cm로 조정하였다. 셀룰로오스 용액의 온도가 셀룰로오스 비즈의 입자 크기에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 셀룰로오스 용액의 온도를 항온수조에서 조절한 후, 스테인리스 주사기에 넣고 드롭핑을 진행하였다. 스테인리스 주사기 표면을 자동 온도조절기가 부착된 가열 패드(heating pad)로 감싸 목표 온도(30℃, 40℃, 50℃)로 조절하였다. 제조된 셀룰로오스 비즈를 에탄올로 충분히 세척 후, 60℃의 건조기에서 24시간 동안 건조하였다.

### 2.2.3 셀룰로오스 비즈 분석

TEAH/요소/셀룰로오스 용액의 점도는 레오메터(HAAKE Viscotester iQ Rheometer, ThermoFisher Scientific, USA)를 사용하여 측정하였다. 표면장력은 표면장력측정기(surface tensiometer, BZY-203, CGOLDENWALL, China)를 사용하여 측정하였다. 셀룰로오스 비즈의 입자 크기 분포 및 평균 입자 크기는 레이저 회절 입도분석기(Mastersizer 3000, Marvern Panalytical Ltd., Netherlands & UK)를 사용하여 분석하였다. SEM(CX-200TM, COXEM, Korea)을 이용하여 셀룰로오스 비즈의 형태 및 표면을 관찰하였다. 가속전압

(acceleration voltage)은 5.0 kV였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 셀룰로오스 용액의 점도 및 표면장력

Fig. 1은 세 온도에서 전단속도의 변화에 따른 TEAH/요소/셀룰로오스 용액의 점도 변화를 나타낸다. 전단속도가 증가할수록 점도가 감소하는 전단희박유체(shear thinning fluid) 거동을 보이는 것으로 관찰되었다. 셀룰로오스 원료와 용제의 종류가 셀룰로오스 용액의 레올로지 특성에 영향을 미치는 것으로 사료된다. Sirvio와 Heiskanen<sup>13)</sup>는 결정셀룰로오스(microcrystalline cellulose, MCC)를 TEAH-요소 용제에 용해시킨 경우에 뉴턴 유체(Newtonian fluid) 또는 미약한 전단희박유체의 shear thinning 성질을 보이고, TEAH/1,1-dimethylurea(1,1-DMU) 용제에 용해시킨 경우에는 전단희박유체의 거동을 보인다고 보고하였다. Hamdaoui 등<sup>14,15)</sup>은 크라프트 펄프를 염화리튬(LiCl, lithium chloride)/N-디메틸아세트아미드(DMAc, N,N-dimethylacetamide) 용제 또는 1-butyl-3-methylimidazolium chloride ([Bmim]Cl) 용제에 용해시킨 경우에 전단희박유체 거동을 보였고, MCC를 용해시킨 경우에는 뉴턴유체 거동을 보인다고 보고하였다. Fig. 1-A에서 보여주는 바대로 본 연구에 사용된 HwBKP 셀룰로오스 용액은 전단희박유체 거동을 보였다. 이는 전단속도 또는 전단력 변화에 따라 용액 내에서 셀룰로오스 사슬들 사이의 관계가 변했다는 것을 의미한다. 저전단속도에서 셀룰로오스 사슬 사이의 얽힘으로 인해, 셀룰로오스 분자들로 이루어진 물리적인 그물구조를 형성(높은 점도)하고 있다가, 전단속도가 증가하면 기계적인 힘에 의해서 셀룰로오스 사슬 사이의 얽힘이 풀어지면서 그물구조가 흩어져서 점도가 저하되었다고 사료된다.

또한, Fig. 1-A는 셀룰로오스 용액의 온도를 증가시키면 용액의 점도가 감소하는 것을 보여주고 있다. 일반적으로 셀룰로오스 용액의 온도를 증가시키면 점도는 저하되는 것으로 여러 문헌들<sup>14-17)</sup>에서 보고되었다. Karti-kawati 등<sup>18)</sup>은 tetramethylammonium hydroxide(TMAH)와 TEAH 같은 암모늄 기반 이온성 액체들의 물리적 특성을 연구하여 이온성 액체의 온도를 증가하면 점도가 감소한다고 보고하였다. Fig. 1-B는 30℃를 기준

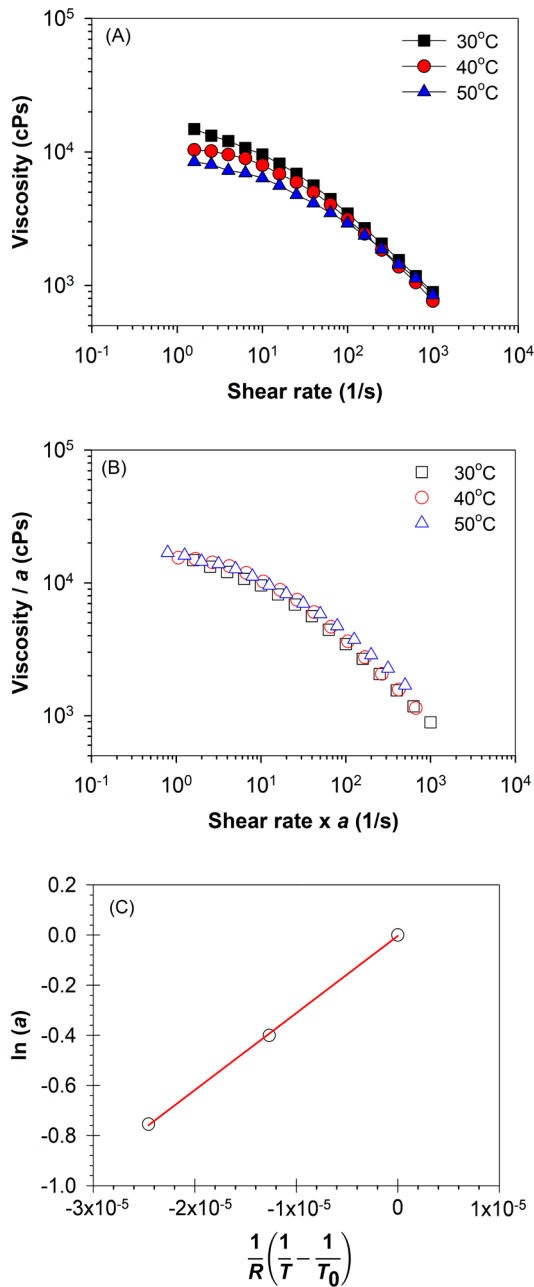


Fig. 1. (A) Viscosity–shear rate curves of cellulose/TEAH/urea solutions at various solution temperature, (B) Shifted viscosity–shear rate curves to that at 30°C, (C) Shift factors as a function of temperature, and the slope is the activation energy for the flow. The line is the Arrhenius model fit,

온도로 설정했을 때, 이 기준온도의 점도 곡선으로 다른 온도에서의 점도 곡선들을 이동한 결과를 보여준다. 이때 사용된 이동인자(shift factor) a는 40°C 및 50°C에서 각각 0,67 및 0,47이고, 이 값들은 Fig. 1-C에서 보여지듯이 Arrhenius 식(Eq. 1)으로<sup>19)</sup> 모사가 잘 되었다.

$$\ln a = \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad [1]$$

Eq. 1에서 a는 이동인자, R은 기체상수, T는 측정온도, T<sub>0</sub>는 기준온도 30°C이며, activation energy E<sub>a</sub>의 값은 30,8 kJ/mol가 얻어졌다. 이 값은 polyethylene 멜트의 activation energy<sup>19)</sup>와 비슷한 값이다. 50°C 및 높은 전단속도에서는 완전한 열-유변학적 단순성(thermo-rheological simplicity)<sup>19)</sup>을 보여 주지는 않지만, 전반적으로 중첩이 잘 되는 것으로 보아 상대적으로 단순한 용액구조를 갖고 있는 것으로 사료된다.

TEAH 및 TEAH/요소 용제, TEAH/요소/셀룰로오스 용액의 온도 변화가 표면장력에 미치는 영향을 Table 1에 나타내었다. 용액의 종류 및 온도가 표면장력에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이온성 액체인 TEAH 용제의 표면장력은 용액의 온도 증가와 함께 감소하였다. Sánchez 등<sup>20)</sup>과 Carvalho 등<sup>21)</sup>은 이온성 액체의 표면장력은 물의 표면장력보다 낮고, 온도를 증가시키면 표면장력은 감소한다고 보고하였다. Kartikawati 등<sup>18)</sup>은 TEAH를 포함하는 암모늄기반 이온성 액체들은 온도를 증가시키면 표면장력이 감소하는데, 이는 높은 온도에서 분자들 사이의 수소결합이 감소하기 때문이라고 제안하였다.

TEAH에 요소(urea)를 혼합하면 전체적으로 용액의 표면장력이 낮아지고, TEAH/요소 용제의 경우도 온도를 증가시키면 표면장력이 저하되는 것으로 나타났다. 요소

Table 1. Effect of types and temperature of solutions on surface tension

Solution temp. (°C)		30	40	50
Surface tension (mmN/m)	TEAH	65.05	64.34	62.75
	TEAH/urea	56.06	48.48	49.93
	TEAH/urea/cellulose	82.02	84.07	85.14

는 알칼리 용액과 TEAH 같은 이온성 액체의 공용매로 사용되어 셀룰로오스의 용해도를 향상시키는 것으로 보고되었다.<sup>13,22)</sup>

일반적으로 고분자 용액의 온도를 증가시키면 용액의 표면장력은 감소하는 경향을 보인다. Hu 등<sup>23)</sup>은 polyacrylamide (PAM), polyacrylic acid (PAA), carboxymethyl cellulose (CMC), hydroxyethyl cellulose (HEC) 등 네 고분자 용액의 표면장력 변화를 연구하여 일정한 농도에서 온도를 증가하면 표면장력은 감소한다고 보고하였다. 그러나 본 연구에서는 TEAH/요소 용제에 HwBKP 첨유를 용해시킨 셀룰로오스 용액의 경우에 온도를 증가시키면 표면장력이 증가하는 것으로 관찰되어, 일반적인 고분자 용액과 다른 거동을 보였다 (Table 1). Schuermann 등<sup>24)</sup>도 본 연구결과와 유사한 결과를 보고하였다. 분자량이 다른 네 종류의 셀룰로오스를 이온성 액체인 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate([Emim]Ac)에 용해시킨 셀룰로오스 용액의 온도를 증가시키면 표면장력이 증가하였다고 보고하였다. 셀룰로오스 용액의 온도가 표면장력에 미치는 영향에 관한 연구는 이 이외에 거의 보고된 바가 없고, 추후에 이 이유에 관한 연구가 필요하다고 사료된다.

### 3.2 셀룰로오스 비즈의 크기 및 형태

Fig. 2는 셀룰로오스 용액의 온도를 30℃, 40℃, 50℃로 조절하고 드롭핑법에 의해서 제조된 셀룰로오스 비즈의 입자 크기 분포와 평균 입자 크기를 보여주고 있다. 평균 입자 크기는 중위수(volume median diameter,

D50)를 사용하여 나타내었다. 셀룰로오스 용액의 온도를 30℃와 40℃로 조절하고 드롭핑하였을 경우에 거의 유사한 입자크기 분포와 평균 입자 크기를 나타내었다. 반면, 셀룰로오스 용액의 온도를 50℃로 증가시켰을 때 셀룰로오스 비즈의 크기가 급격하게 커지는 것이 관찰되었다. 노즐을 사용하여 고분자 용액을 스프레이하여 미분화하는 경우에 미분화된 액체 방울의 크기는 액체의 점도, 표면장력, 공기압, 액체 사출 속도 등에 의해서 영향을 받는 것으로 보고되었다.<sup>12,25)</sup> Davanou 등<sup>25)</sup>은 액체의 점도와 표면장력이 노즐에서 스프레이 되는 액체 방울의 입자 크기에 미치는 영향에 관해서 연구하였다. 높은 레이놀드수에서 표면장력이 좀 더 주된 인자이고, 표면장력이 높을수록 액체 방울의 입자 크기가 커진다고 보고하였다. 표면장력이 높으면 액체가 불안정하다는 것을 의미하고, 좀 더 안정해지기 위해서 단위 부피당 표면적을 줄이려고 하게 된다. 즉, 스프레이 된 액체 방울의 부피가 커지는 쪽으로 진행되어, 액체 방울의 입자 크기가 커지는 것으로 사료된다. TEAH/요소/셀룰로오스 용액의 온도를 50℃로 증가시켰을 경우 셀룰로오스 비즈의 크기가 커진 것은 셀룰로오스 용액의 증가한 표면장력 때문으로 판단된다. 셀룰로오스 용액의 점도를 낮추기 위해 온도를 증가시켜서 좀 더 작은 입자 크기를 가지는 셀룰로오스 비즈를 제조하는 것은 힘들 것으로 판단된다. 즉, 점도보다는 표면장력이 비즈의 크기를 결정하는 좀 더 중요한 요인이라고 보여진다.

Fig. 3은 4%(w/w) 농도의 셀룰로오스 용액의 온도를 30℃, 40℃, 50℃로 조절하고 주사기를 사용하여 드롭

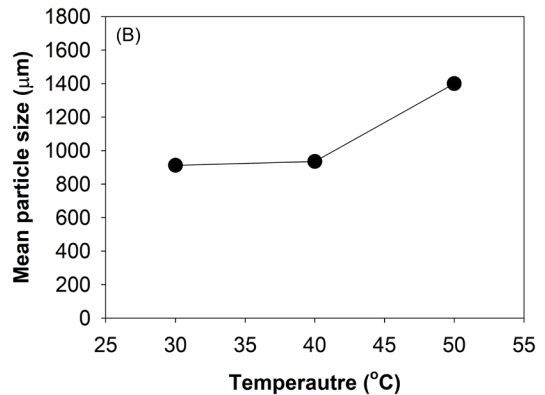
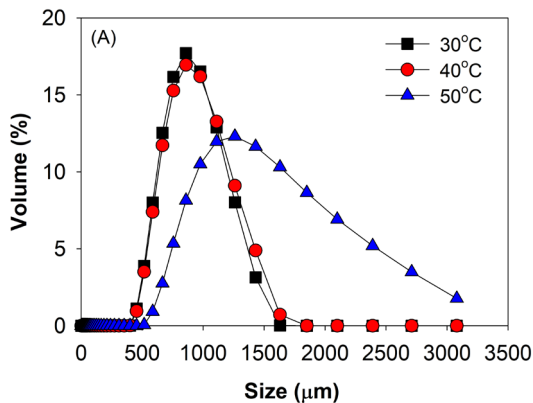


Fig. 2. (A) Particle size distribution and (B) mean particle size of cellulose beads at various cellulose solution temperature.



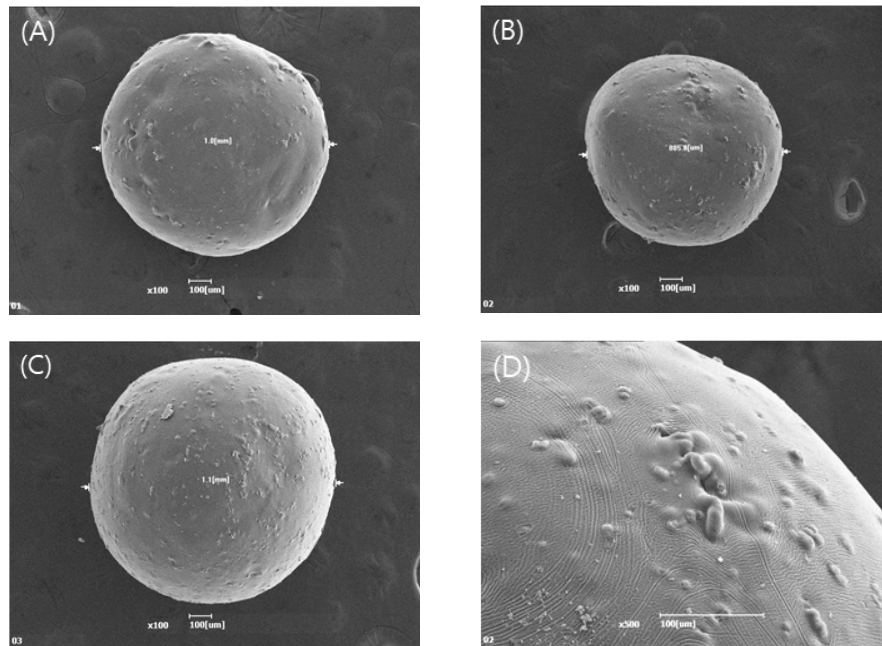


Fig. 3. SEM images of the cellulose beads produced in different temperature: (A) 30°C, (B) 40°C, (C) 50°C, and (D) 40°C.

핑 기술로 제조한 셀룰로오스 비즈의 SEM 사진들을 보여주고 있다. 온도가 변화하여도 전반적으로 구형의 셀룰로오스 비즈가 형성되는 것으로 나타났다. 셀룰로오스 용액의 농도가 50%인 경우(Fig. 3-C)에 비즈 크기가 좀 크지만, 형태에는 뚜렷한 차이가 관찰되지 않았다. 비즈의 표면은 완전히 매끄럽지 않았으나, 표면에서 공극들은 관찰되지 않았다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 TEAH와 요소 혼합 용제를 이용하여 HwBKP 섬유를 용해하고 드롭핑 기술을 이용하여 셀룰로오스 비즈를 제조할 시, 셀룰로오스 용액의 온도가 점도, 표면장력, 셀룰로오스 비즈의 크기에 미치는 영향을 평가하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) TEAH/요소/셀룰로오스 용액의 온도를 증가시키면 점도는 감소하고, 표면장력은 증가하였다.

2) TEAH/요소/셀룰로오스 용액의 온도가 증가하면 셀룰로오스 비즈의 크기는 증가하였는데, 이는 증가된 셀룰로오스 용액의 표면장력 때문으로 판단된다. 셀룰로오

스 용액의 온도를 증가시켜, 셀룰로오스 비즈의 크기를 감소시키는 것은 힘들다고 판단된다.

#### 사사

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2019R1A2C2009284).

#### Literature Cited

1. An, D. and Kim, J., Proposing policy for prevention of marine pollution from microplastics, *Journal of Environmental Policy and Administration* 26(3):77-102 (2018).
2. Jambeck, J. R., Andrady, A., Geyer, R., Narayan, R., Perryman, M., Siegler, T., Wilcox, C., and Lavender Law, K., Plastic waste inputs from land into the ocean, *Science* 347:768-771

- (2015).
3. GESAMP, Sources, fate and effects of micro-plastics in the marine environment: A global assessment, Kershaw, P.J. (ed.), IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, Reports and Studies GESAMP No. 90, p.96 (2015).
  4. Kathryn, M., Santillo, D., and Johnston, P., Plastics in seafood – full technical review of the occurrence, fate and effects of microplastics in fish and shellfish, Greenpeace Research Laboratories Technical Report (Review) 07–2016 (2016).
  5. Kim, K. W., Current status of plastic pollution and the scientific policy to solve the problem, KAST Research Report 123, The Korean Academy of Science and Technology (2018).
  6. Moon, S. M., Jeon, S. H., Eom, T., and Shim, B. S., Recent research trends in eco-friendly materials for solving environmental micro-plastic problems, *Prospectives of Industrial Chemistry* 22(2):25–43 (2019).
  7. Kwon, G.-J. and Kim, N.-H., Trend and technology development of bioenergy from woody biomass, *Journal of Forest and Environmental Science* 25(2):131–138 (2009).
  8. Klemm, D., Heublein, B., Fink, H.-P., and Bohn, A., Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material, *Angewandte Chemie International Edition* 44:3358–3393 (2005).
  9. Gericke, M., Trygg, J., and Fardim, P., Functional cellulose beads: Preparation, characterization, and applications, *Chemical Reviews* 113:4812–4836 (2013).
  10. Kim, Y., An, H.-J., and Cho, B.-U., Production of cellulose beads with TEAH-urea solvent and dropping technique – Effect of inner diameter of syringe needle, *Journal of Korea TAPPI* 52(6):149–156 (2020).
  11. Kim, Y., An, H.-J., and Cho, B.-U., Production of cellulose beads with TEAH-urea solvent and dropping technique – Effect of concentration of cellulose solution, *Journal of Korea TAPPI* 53(1):83–89 (2021).
  12. Mandato, S., Rondet, E., Delaplace, G., Barkouti, A., Galet, L., Accart, P., Ruiz, T., and Cuq, B., Liquid's atomization with two different nozzles: Modeling of effect of some processing and formulation conditions by dimensional analysis, *Powder Technology* 224:323–330 (2012).
  13. Sirvio, J. A. and Heiskanen, J. P., Room temperature dissolution and chemical modification of cellulose in aqueous tetraethylammonium hydroxide-carbamide solutions, *Cellulose* 27:1933–1950 (2020).
  14. Hamdaoui, L. E., Bouchti, M. E., and Moussaouiti, M. E., Comparison of rheological properties of kraft and microcrystalline cellulose dissolved in lithium chloride/N,N-dimethylacetamide, *Polymer Bulletin* 75(2):1–11 (2018).
  15. Hamdaoui, L. E., Bouchti, M. E., Moussaouiti, M. E., and Gmouh, S., Comparison of rheological properties of kraft and microcrystalline cellulose dissolved in 1-butyl-3-methylimidazolium chloride, *Moroccan Journal of Chemistry* 6(2):237–244 (2018).
  16. Kamide, K., Saito, M., and Kowsaka, K., Temperature dependence of limiting viscosity number and radius of gyration for cellulose dissolved in aqueous 8% sodium hydroxide solution, *Polymer Journal* 19(10):1173–1181 (1987).
  17. Chen, X., Zhang, Y., Cheng, L., and Wang, H., Rheology of concentrated cellulose solutions in 1-butyl-3-methylimidazolium chloride, *Journal of Polymers and the Environment* 17(4):273–279 (2009).

18. Kartikawati, N. A., Safdar, R., Lal, B., Mutalib, M. I. B. A., and Shariff, A. M., Measurement and correlation of the physical properties of aqueous solutions of ammonium based ionic liquids, *Journal of Molecular Liquids* 253:250–258 (2018).
19. Park, H. E., Dealy, J., and Münstedt, H., Influence of long-chain branching on time-pressure and time-temperature shift factors for polystyrene and polyethylene, *Rheologica Acta* 46:153–159 (2006).
20. Sánchez, L. G., Espel, J. R., Onink, F., Meindersma, G. W., Haan, A. B., Density, viscosity, and surface tension of synthesis grade imidazolium, pyridinium, and pyrrolidinium based roomtemperature ionic liquids, *Journal of Chemical & Engineering Data* 54(10):2803–2912 (2009).
21. Carvalho, P. J., Neves, C.M.S. S., and Coutinho, J. A., Surface tension of bis(trifluoromethyl-sulfonyl)imide anion-based ionic liquids, *Journal of Chemical & Engineering Data* 55(9): 3807–3812 (2010).
22. Xiong, B., Zhao, P., Hu, K., Zhang, L., and Cheng, G., Dissolution of cellulose in aqueous NaOH/urea solution: Role of urea, *Cellulose* 21:1183–1192 (2014).
23. Hu, R. Y. Z., Wang, A. T. A., and Hartnett, J. P., Surface tension measurement of aqueous polymer solutions, *Experimental Thermal and Fluid Science* 4(6):723–729 (1991).
24. Schuermann, J., Huber, T., LeCore, D., Mortha, G., Sellier, M., Duchemin, B., and Staiger, M. P., Surface tension of concentrated cellulose solutions in 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate, *Cellulose* 23:1043–1050 (2016).
25. Davanliu, A., Lee, J. D., Basu, S., and Kumar, R., Effect of viscosity and surface tension on breakup and coalescence of bicomponent sprays, *Chemical Engineering Science* 131:243–255 (2015).