

# 리그노셀룰로오스 나노피브릴의 분무건조 및 건조물의 특성<sup>1</sup>

박 찬 우<sup>2</sup> · 한 송 이<sup>2</sup> · 이 승 환<sup>2,†</sup>

## Spray Drying of Lignocellulose Nanofibril (LCNF) and Characterization of Spray-dried LCNF<sup>1</sup>

Chan-Woo Park<sup>2</sup> · Song-Yi Han<sup>2</sup> · Seung-Hwan Lee<sup>2,†</sup>

### 요 약

본 연구에서는 분무건조 조건 및 계면활성제 첨가에 따른 리그노셀룰로오스 나노피브릴(lignocellulose nanofibril, LCNF)의 분무건조 수율 및 건조 LCNF의 형태학적 특성, 치수분포 및 수재분산성을 조사하였다. 원료로는 약 70-300 nm 직경을 지니는 섬유상의 LCNF를 사용하였으며, 분무건조 LCNF는 rod형 파티클의 형태학적 특성을 보였다. 140℃ 온도조건에서의 분무건조 수율이 가장 높았으며, 분무건조 LCNF의 입자크기 또한 가장 작았다. LCNF 현탁액의 농도가 감소할수록 또한 송풍량이 증가할수록 분무건조 수율 및 입자크기가 증가하였다. 또한, 계면활성제의 첨가로 건조 수율을 향상시킬 수 있었으며, 첨가 비율이 증가할수록 평균입자크기가 감소하였다. 건조 LCNF의 입자크기가 감소할수록, 물에서의 재분산성이 향상되었으며, 수현탁액의 여수시간이 증가하였다.

### ABSTRACT

In this study, the effect of spray-drying conditions and surfactant addition on the spray-drying yield, morphological characterization, size distribution and re-dispersity in water of spray-dried lignocellulose nanofibril (LCNF) were investigated. The freeze-dried LCNF after solvent exchange had linear fiber morphology with a diameter of 70-300 nm, and the spray-dried LCNF showed rod-like particle morphology. The spray-drying yield and particle size of spary-dried LCNF at 140℃ was highest and smallest, respectively. As LCNF concentration and blowing rate decreased and increased, respectively, the spray-drying yield and particle size were increased. The highest spray-drying yield was found at distearyl dimethyl ammonium chloride (DDAC) addition of 10 phr at 140℃. As the particle size decreased and the DDAC content increased, filtration time of spray-dried LCNF in water was decreased and increased, respectively.

**Keywords :** lignocellulose nanofibril, spray-drying, freeze-drying, surfactant, particle size

<sup>1</sup> Date Received March 3, 2017, Date Accepted April 18, 2017

<sup>2</sup> 강원대학교 산림바이오소재공학과, Department of Forest Biomaterials Engineering, Kangwon National University

<sup>†</sup> 교신저자(Corresponding author): 이승환(e-mail: lshyhk@kangwon.ac.kr)

## 1. 서 론

나노셀룰로오스는 기계적, 화학적, 생물학적 처리 방법을 통해 주로 습식 조건에서 수현탁액 상태로 제조되어진다(Amin 등, 2014; Peng 등, 2012a). 나노셀룰로오스는 물과 같은 극성 용매에 잘 분산되며, 습식 상태에서 나노스케일의 형태학적 특성이 유지된다(Gardner 등, 2008; Peng 등, 2012a; Peng 등, 2012b). 건조 조건에서는 셀룰로오스의 분자간의 강한 수소결합으로 인해 마이크론스케일로 응집되기 쉬우며, 응집된 나노셀룰로오스는 다시 수분을 첨가하여도 나노스케일로 재분산되기 매우 힘든 비가역적 성질을 지니고 있다(Iwamoto 등, 2008; Peng 2012a). 산업적인 측면에서, 나노셀룰로오스는 높은 수분 함량으로 인하여(약 80-99%) 대형 저장 시설 및 높은 운송 비용이 필요하며, 미생물 공격에 매우 취약한 단점들이 있다(Amin 등, 2014; Eyholzer 등, 2010; Peng 등, 2012b; Peng 등, 2013). 이러한 단점을 보완하고 나노셀룰로오스의 형태학적 특성을 유지하기 위한 효율적인 건조 공정 개발이 절실히 요구되고 있다. Peng 등(2012a)은 열풍건조, 동결건조, 초임계건조 및 분무건조 방법에 따른 건조 나노셀룰로오스의 형태학적 특성을 조사한 결과, 분무건조된 나노셀룰로오스가 열풍, 동결 및 초임계 건조된 나노셀룰로오스에 비해 상대적으로 응집현상이 적게 나타나며, 나노 및 마이크론 크기의 파티클 형태의 건조 나노셀룰로오스가 얻어진다고 보고하고 있다. 분무건조된 나노셀룰로오스는 고강도 복합재료 제조를 위한 강화 필러로서 높은 응용 가치를 지니고 있으며(Peng 등, 2012a), 다양한 응용 분야에 활용될 것으로 기대되고 있다.

분무건조는 동결건조와 함께 산업에서 가장 널리 사용되고 있는 연속식 건조 공정이며, 빠른 건조속도, 낮은 에너지 소비 등 다양한 장점을 지니고 있다(Sosnik와 Seremeta, 2015; Peng 등, 2013). 또한, 건조 온도, 공기 유량 및 압력, 공급속도 및 투입 용매의 농도 조절을 통해 건조 수율, 입자 크기, 부피 및 밀도 제어가 가능하다(Amin 등, 2014; Cal 과 Sollohub, 2010; Part et 등, 2017; Walton과

Mumford, 1999). 그러나, 분무건조는 약 10-40%의 낮은 건조 수율을 지니고 있다. 따라서, 나노셀룰로오스의 효율적인 분무건조를 위해서는 수율 향상을 위한 최적의 건조조건 탐색이 필요하다.

본 연구에서는 온도, 농도, 송풍량의 분무건조 조건 및 계면활성제 첨가가 LCNF의 분무건조 수율에 미치는 영향을 조사하였다. 또한, 분무건조된 LCNF의 형태학적 특성, 치수분포 및 수재분산성을 조사하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 공시재료

LCNF 제조를 위한 원료로서 강원대학교 학슬림에서 채취한 잣나무(*Pinus koraiensis* S. et Z.)를 사용하였으며, 커터밀로 분쇄 후 40 mesh 크기로 선별된 목분을 사용하였다. 계면활성제로는 양이온성 계면활성제인 distearyl dimethyl ammonium chloride (DDAC)를 사용하였으며, LCNF의 특성분석을 위한 용매치환에는 *tert-butyl alcohol* (Daejung Chemical & Materials, Republic of Korea)을 사용하였다.

### 2.2. LCNF 제조

잣나무 목분을 5.0 wt% 수현탁액(3,000 ml)으로 제조한 후, 습식 디스크밀(wet disk-milling, WDM, MKCA6-2, Masuko Sangyo, Japan)을 이용하여 15회 까지 반복해섬하였다. 디스크가 맞닿는 영점으로부터 디스크간격을 80-100  $\mu\text{m}$  감소시켰으며, 디스크 회전속도를 1,800 rpm으로 설정하였다.

### 2.3. 분무건조 및 수율 측정

제조된 LCNF 수현탁액을 0.50, 0.75 및 1.00 wt% 수현탁액(500 ml)으로 각각 희석시킨 후, 분무건조기(SD-1000, Eyela, Japan)에서 5.0 ml/min 속도로 분사하여 분무건조를 실시하였다. 투입구 온도(inlet temperature)는 120, 130 및 140 $^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였으며,

송풍량(blowing rate)은 0.50, 0.55 및 0.60 m<sup>3</sup>/min로 조절하였다. 계면활성제 DDAC를 LCNF 고형분량 대비 10, 25, 50 phr만큼 첨가하여, DDAC 첨가가 분무건조 수율 및 분무건조된 LCNF의 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 분무건조된 LCNF를 30℃ 진공건조기에서 3일간 진공건조한 후 전건 무게를 측정하였으며, 식 1에 대입하여 분무건조 수율을 산출하였다.

$$Yield\ of\ spray-drying(\%) = \frac{W_s}{W_0} \times 100 \quad \dots \quad \text{식(1)}$$

$W_0$ : Solid weight of LCNF

$W_s$ : Solid weight of spray-dried LCNF

또한, 동결건조와 분무건조에 의한 건조 LCNF의 특성을 비교하기 위하여, 동결건조기(FDB-5503, Operon, Republic of Korea)를 이용하여 LCNF 수현탁액(0.5 wt%)을 -55℃ 온도조건에서 3일간 동결건조하였다.

## 2.4. 형태학적 특성

LCNF 수현탁액을 0.001 wt% 농도의 수현탁액(100 ml)으로 희석시킨 후, 초음파분산기(VCX130PB, Sonics&Materials, U.S.A.)를 이용하여 60초간 분산시켰다. 감압여과장치(N8203FT, KNF Neuberger, Sweden)를 이용하여 분산된 수현탁액을 0.2 μm 공극크기의 polytetrafluoroethylene 멤브레인 필터(Toyo Roshi Kaisha, Japan) 위에 여과하였다. 그 후, 나노피브릴의 응집을 방지하기 위하여 여수된 LCNF를 과잉의 tert-butyl alcohol에 30 min 동안 3회 침지하여 용매치환을 실시하였으며, 동결건조기를 이용하여 -55℃ 온도에서 2 h 동안 동결건조하였다. 동결건조된 샘플을 카본진공증착기(JEE-400, JEOL, Japan)에서 30 mA 전류로 카본코팅한 후, 강원대학교 공동실험실습관(Central Laboratory of Kangwon National University)의 주사전자현미경(scanning electron microscope, S-4800, Hitachi, Japan)으로 형

태학적 특성을 관찰하였다.

분무건조 및 동결건조된 LCNF는 진공건조기를 이용하여 30℃에서 3일간 진공건조하였으며, 카본코팅 후 주사전자현미경을 통해 형태학적 특성을 관찰하였다.

## 2.5. 입자 크기 분포 및 비표면적 측정

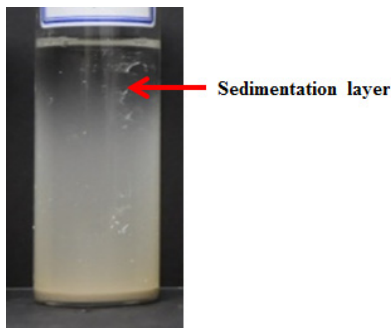
분무건조 및 동결건조 LCNF를 물에 재분산하여 0.1 wt% 현탁액을 제조하였으며, 입도분석기(Mastersizer 2000, Malvern Instruments, U.K.)에 투입하여 0.002-1000 μm 입자범위에서 분무건조된 LCNF의 평균입자크기 및 입자크기분포를 조사하였다. 또한, 측정시에는 과량의 증류수를 첨가하여 0.008-0.010% 농도에서 측정을 진행하였다. 분무건조 및 동결건조 LCNF의 비표면적은 흡수착분석기(BELSORP-Max, BEL Japan)를 이용하여 77K 조건에서 N<sub>2</sub> 흡착을 통해 측정되었다. LCNF의 비표면적은 다음과 같은 방법을 통해 측정되었다. 5.0 wt% LCNF 수현탁액(30 ml)을 원심분리기(VS-21SMTi, Vision Scientific, Republic of Korea)를 이용하여 20,000 rpm으로 15 min 동안 원심분리한 후, 상등액을 제거하였다. 원심분리된 LCNF에 tert-butyl alcohol (30 ml)을 넣은 후 vortex mixer (IKA® MS2 mini shaker, IKA Werke, Germany)를 이용하여 15 min 동안 용매치환하였으며, 원심분리 및 용매치환 과정을 15회 반복하였다. 그 후, 동결건조기를 이용하여 -55℃ 온도에서 24 h 동안 동결건조하였으며, 흡수착분석기를 이용하여 77K 조건에서 N<sub>2</sub> 흡착을 통해 비표면적을 측정하였다.

## 2.6. 수재분산성

분무건조된 LCNF의 수재분산성을 평가하기 위하여 중력침강법을 통한 침강현상 및 여수시간을 조사하였다. 분무건조된 LCNF를 0.5 wt% 수현탁액(40 ml)으로 제조한 후, 초음파분산기를 통해 60초간 분산하였다. 그 후, 48 h 동안 정치하였으며, 시간 경과에 따른 침강층(Sedimentation layer)의 높이를

**Table 1.** Effect of spray-drying condition on yield of spray-drying

Inlet temperature (°C)	LCNF concentration (wt%)	Blowing rate (m <sup>3</sup> /min)	DDAC content (phr)	Yield of spray-drying (%)
130	0.50	0.55	-	34.14
140	0.50	0.55	-	38.40
150	0.50	0.55	-	27.41
140	0.50	0.55	-	38.40
140	0.75	0.55	-	29.43
140	1.00	0.55	-	26.80
140	0.50	0.50	-	33.30
140	0.50	0.55	-	38.40
140	0.50	0.60	-	39.59
140	0.50	0.55	-	38.40
140	0.50	0.55	10	40.80
140	0.50	0.55	25	30.17
140	0.50	0.55	50	27.68



**Fig. 1.** Sedimentation layer in LCNF suspension.

초기 높이에 대한 백분율로 나타내었다(Fig. 1). 또한, 0.1 wt% 농도의 분무건조 LCNF 수현탁액(440 ml)을 제조한 후, 감압여과 장치(N8203FT, KNF Neuberger, Sweden)를 이용하여 실리콘 코팅 처리된 필터(Whatman® No. 2200 125, GE Healthcare Ltd., UK) 위에 감압여과하여 여수시간을 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 분무건조 수율

Table 1은 온도, LCNF 농도, 송풍량 및 DDAC 첨

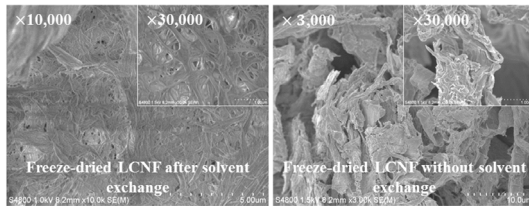
가비율에 따른 LCNF 수현탁액의 분무건조 수율을 나타낸 결과이다. 140°C 온도조건에서의 분무건조 수율이 130, 150°C 조건에 비해 높게 나타났다. LCNF 수현탁액의 농도가 0.50에서 1.00 wt%로 증가할수록 수율이 감소하는 경향을 보였으며, 송풍량이 0.50에서 0.60 m<sup>3</sup>/min으로 증가할수록 수율이 증가하였다. 10 phr DDAC 첨가시 무첨가 조건에 비해 수율이 다소 증가하였으나, 25, 50 phr 첨가시에는 오히려 수율이 감소하는 경향을 나타냈다.

#### 3.2. 형태학적 특성

Fig. 2는 용매치환 후 동결건조된 LCNF 및 용매치환 없이 동결건조된 LCNF의 형태학적 특성이다. 용매치환 후 동결건조된 LCNF는 섬유상의 형태학적 특성을 보이고 있으며, 약 70-300 nm의 직경을 보이고 있다. 용매치환없이 수현탁을 그대로 동결건조한 LCNF는 섬유가 응집된 형태를 나타내고 있다. 각 분무건조 조건에 따른 분무건조 LCNF의 형태학적 특성은 Fig. 3에 나타내었다. 모든 샘플에서 짧고 굵은 rod형 파티클의 형태학적 특성을 보이고 있으며, 너비와 길이는 각각 약 1-3 μm 및 수 μm로 나타났다. 건조조건에 따른 형태학적 특성의 차이는 두드러

**Table 2.** Effect of spray-drying condition on average size of spray-dried LCNF

Inlet temperature (°C)	LCNF concentration (wt%)	Blowing rate (m <sup>3</sup> /min)	DDAC content (phr)	Average size (μm)
130	0.50	0.55	-	19.89 ± 20.77
140	0.50	0.55	-	19.45 ± 15.08
150	0.50	0.55	-	22.15 ± 21.17
140	0.50	0.55	-	19.45 ± 15.08
140	0.75	0.55	-	18.89 ± 13.40
140	1.00	0.55	-	17.89 ± 9.87
140	0.50	0.50	-	18.57 ± 11.79
140	0.50	0.55	-	19.45 ± 15.08
140	0.50	0.60	-	20.10 ± 10.06
140	0.50	0.55	0	19.45 ± 15.08
140	0.50	0.55	10	14.11 ± 6.31
140	0.50	0.55	25	12.68 ± 4.56
140	0.50	0.55	50	16.69 ± 9.43
Freeze-dried LCNF without solvent exchange				42.95 ± 38.98



**Fig. 2.** SEM micrograms of freeze-dried LCNF after solvent exchange and (left) and without solvent exchange (right).

지게 나타나지 않았다. Peng 등(2012b)은 분무건조 조건에 따른 분무건조 cellulose nanocrystal (CNC) 및 cellulose nanofibril (CNF)의 형태학적 특성을 조사한 결과, 분무건조 CNC는 도넛 및 구형의 형태학적 특성을 나타낸 반면, 분무건조 CNF는 본 결과와 같이 rod형 파티클의 형태학적 특성을 보인다고 보고하고 있다.

### 3.3. 입자 크기 및 비표면적

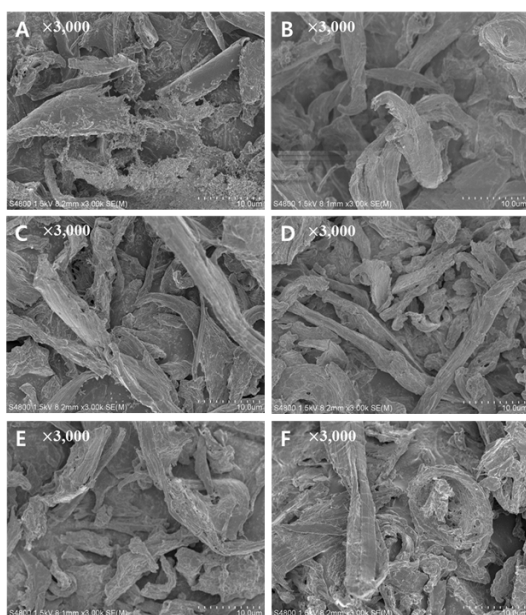
Table 2는 분무건조 조건에 따른 건조 LCNF의 평균 입자크기를 나타낸 결과이다. 140°C 온도조건에

서 분무건조된 LCNF의 입자크기가 130, 150°C 조건에 비해 상대적으로 작게 나타났으며, LCNF 농도가 증가할수록 입자크기가 감소하는 경향을 보였다. 또한, 송풍량이 증가할수록 입자크기가 커졌다. DDAC 첨가비율이 0 phr에서 25 phr로 증가할수록 평균 입자크기가 감소하였으며, 50 phr 첨가시에는 10 phr 조건에 비해 오히려 다소 증가하였다. 동결건조 LCNF의 평균 입자 크기는 42.98 ± 38.98 μm이었으며, 분무건조 LCNF에 비해 현저하게 큰 입자크기를 보였다.

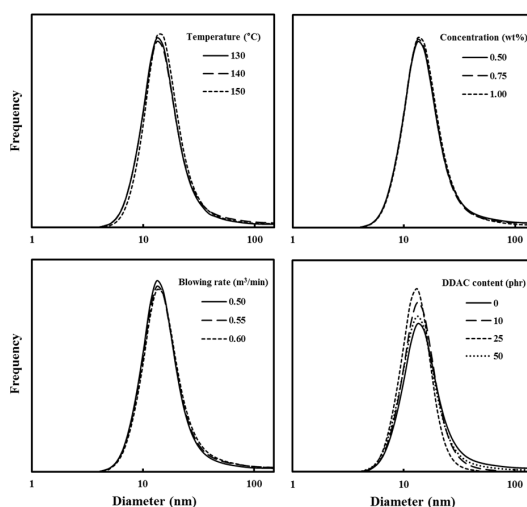
분무건조 LCNF 입자 크기의 정량적 평가를 실시하여 입자 크기 분포도를 조사하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 모든 분무건조 조건에서 LCNF의 입자 크기 분포는 비슷한 경향을 나타내었다. DDAC 첨가비율이 0 phr에서 25 phr로 증가할수록 입자 크기 분포가 작은 범위에서 나타났으며, 분포폭 또한 감소하였다. 50 phr 첨가조건에서는 집중 분포 범위가 10 phr 조건에 비해 다소 증가하였다. 분무건조 및 동결건조 LCNF의 입자 크기 분포를 조사한 결과(Fig. 5), 동결건조 LCNF의 입자 분포가 분무건조 LCNF에 비해 큰 범위에서 나타났으며, 분포폭 또한 현저하게 넓게 나타났다.

**Table 3.** Effect of spray-drying condition on specific surface area of spray-dried LCNF

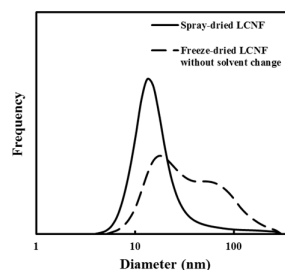
Inlet temperature (°C)	LCNF concentration (wt%)	Blowing rate (m <sup>3</sup> /min)	DDAC content (phr)	Specific surface area (m <sup>2</sup> /g)
140	0.75	0.55	-	3.33
140	0.50	0.60	-	3.33
140	0.50	0.55	-	3.10
140	0.50	0.55	10	3.49
140	0.50	0.55	25	2.68
Freeze-dried LCNF after solvent exchange				37.3
Freeze-dried LCNF without solvent exchange				7.57



**Fig. 3.** SEM micrograms of spray-dried LCNFs depending on spray-drying condition. (A) Inlet temperature (InT) 130°C, LCNF concentration 0.50 wt%, Blowing rate 0.55 m<sup>3</sup>/min; (B) InT 140°C, LCNF concentration 0.50 wt%, Blowing rate 0.55 m<sup>3</sup>/min; (C) InT 140°C, LCNF concentration 0.75 wt%, Blowing rate 0.55 m<sup>3</sup>/min; (D) InT 140°C, LCNF concentration 0.50 wt%, Blowing rate 0.60 m<sup>3</sup>/min; (E) InT 140°C, LCNF concentration 0.50 wt%, Blowing rate 0.55 m<sup>3</sup>/min, DDAC content 10 phr; (F) InT 140°C, LCNF concentration 0.50 wt%, Blowing rate 0.55 m<sup>3</sup>/min, DDAC content 25 phr.



**Fig. 4.** Effect of spray-drying condition on the particle size distribution of spray-dried LCNF.



**Fig. 5.** Particle size distribution of spray-dried LCNF and freeze-dried LCNF without solvent exchange. Note: Condition of spray-drying, InT 140°C, LCNF concentration 0.50 wt%, Blowing rate 0.55 m<sup>3</sup>/min.

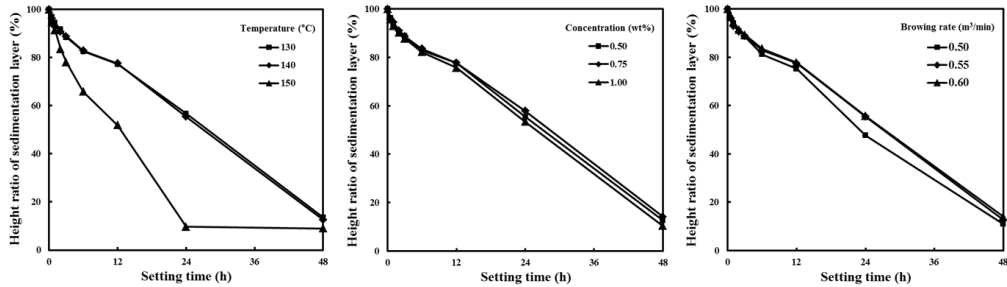


Fig. 6. Effect of spray-drying condition on sedimentation rate of spray-dried LCNF suspension over settling time.

Table 3은 분무건조 조건에 따른 분무건조 LCNF의 비표면적을 나타낸 결과이다. 분무건조 LCNF의 비표면적은 2.68-3.33 m<sup>2</sup>/g 범위에서 비슷한 수치를 보이고 있으며, 용매치환 후 동결건조된 LCNF의 비표면적(37.3 m<sup>2</sup>/g) 및 수현탁액 상태에서 동결건조된 LCNF의 비표면적(7.57 m<sup>2</sup>/g)에 비해 작게 나타났다.

### 3.4. 침강률 및 여수시간

분무건조된 LCNF의 물에의 재분산성 및 여수시간을 평가함으로써, 분무건조효율을 간접적으로 평가하고자 하였다. 침강층 높이가 높을수록 또한 침강속도가 느릴수록 재분산성이 우수한 것을 나타낸다. Fig. 6은 분무건조된 LCNF이 재분산된 수현탁액의 시간경과에 따른 침강률을 나타낸 결과이다. 150℃에서 분무건조된 샘플의 침강층 높이는 130 및 140℃ 건조 샘플에 비해 급격하게 감소하였다. 분무건조된 LCNF의 농도가 증가함에 따라 침강층의 높이는 낮아지는 경향을 보였으며, 송풍량이 작을수록 시간경과에 따른 침강층의 높이가 작아지는 경향을 보였다. 분무건조 조건에 따른 분무건조된 LCNF의 입자크기(Table 2) 및 침강률의 상관관계를 살펴본 결과, 입자크기가 증가할수록 침강층의 높이가 낮아지는 경향을 보였다. 이러한 결과는 입자크기 감소가 수재분산성 향상에 기인한 결과로 판단된다. 계면활성제 DDAC 첨가시에는 뚜렷한 침강현상의 거의 일어나지 않았으며, 침강층의 판별이 힘들었다. 이는 계면활성제 첨가로 인하여 분무건조 LCNF의 분산성

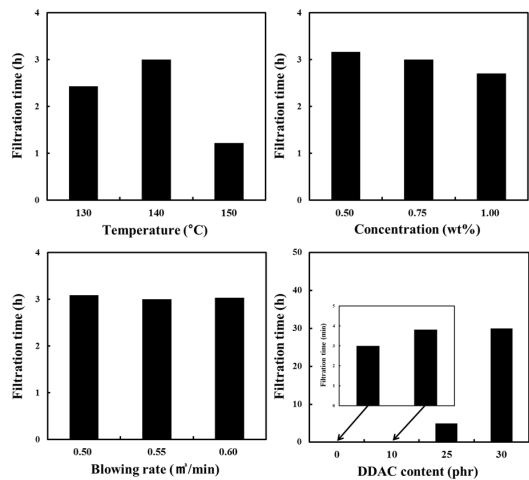


Fig. 7. Effect of spray drying conditions on filtration time of spray-dried LCNF suspension.

Note: Concentration of spray-dried LCNF suspension, 0.1 wt%.

이 향상된 것으로 생각된다.

Fig. 7은 분무건조 조건에 따른 분무건조 LCNF의 수현탁액의 여수시간을 나타낸다. 평균 입자 크기가 가장 작게 나타난 140℃에서 건조된 샘플(Table 2)의 여수시간이 가장 길게 나타났으며, 입자 크기가 가장 큰 150℃ 건조 샘플의 여수시간이 가장 짧게 나타났다. 분무건조시 LCNF의 농도가 증가함에 따라 여수시간은 짧게 나타났다. 송풍량 조건에 따른 여수시간의 차이는 크게 나타나지 않았다. DDAC 첨가 비율이 증가함에 따라 여수시간 또한 증가하였으며, 특히 25 phr 이상 첨가시에는 여수시간이 현저하

게 증가하였다. 이러한 결과를 토대로, 입자 크기 감소 및 계면활성제 첨가로 수재분산성이 향상되어 여수시간의 증가에 영향을 미친 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 분무건조 온도, LCNF 수현탁액 농도, 송풍량 및 계면활성제 DDAC 첨가에 따른 분무건조 수율 및 분무건조 LCNF의 특성을 조사하였다. 유기용매 치환 후 동결건조된 LCNF는 섬유상의 형태학적 특성을 나타내었으며, 분무건조 LCNF는 rod형 파티클의 형태학적 특성을 보였다. 140℃ 온도조건에서 분무건조 수율이 가장 높았으며, 분무건조 LCNF의 입자크기 또한 가장 작았다. LCNF 수현탁액의 농도가 감소 및 송풍량이 증가할수록 분무건조 수율 및 입자크기가 증가하였다. 또한, 10 phr DDAC 첨가시 분무건조수율이 증가하였으며, 입자크기가 감소하였다. 분무건조 LCNF 수현탁액의 침강율 및 여수시간을 평가한 결과, 입자크기가 감소할수록 수재분산성이 증가하여 침강속도가 느리게 나타났다. 결론적으로, 분무건조 조건 변화 및 계면활성제 첨가를 통해 LCNF의 분무건조 수율 향상 및 입자크기 조절이 가능하였으며, 고강도 목재-플라스틱 복합재료 등의 강화 필러로서의 분무건조 LCNF의 응용이 기대된다. 그러나, 현재의 분무건조물의 입자크기는 마이크론스케일이며, 향후 나노셀룰로오스의 수현탁에서의 본연의 형태학적 성질을 유지하면서 입자크기를 나노스케일로 건조시키는 방법의 모색이 필요하다고 생각된다.

#### 사 사

본 연구는 산림청 ‘산림과학기술개발사업(과제번호: S211316L010120)’ 및 한국연구재단 ‘기초연구사업(No. NRF-2015R1D1A1A01061522)’의 지원에 의하여 이루어진 것임. 실험에 도움을 준 이서호 학생에게 감사드립니다.

#### REFERENCES

- Amin, M.C.I.M., Abadi, A.G., Kates, H. 2014. Purification, characterization and comparative studies of spray-dried bacterial cellulose microparticles. *Carbohydrate Polymers* 99: 180-189.
- Cal, K. and Sollohub, K. 2010. Spray drying technique. I: Hardware and process parameters. *Journal of pharmaceutical sciences* 99(2): 575-586.
- Eyholzer, C., Bordeanu, N., Lopez-Suevos, F., Rentsch, D., Zimmermann, T., Oksman, K. 2010. Preparation and characterization of water-redispersible nanofibrillated cellulose in powder form. *Cellulose* 17(1): 19-30.
- Gardner D.J., Oporto, G.S., Mills, R., Samir, M.A.S.A. 2008. Adhesion and surface issues in cellulose and nanocellulose. *Journal of Adhesion Science and Technology* 22: 545-567.
- Iwamoto, S., Abe, K., Yano, H. 2008. The effect of hemicelluloses on wood pulp nanofibrillation and nanofiber network characteristics. *Biomacromolecules* 9: 1022-1026.
- Park, C.W., Han, S.Y., Namgung, H.W., Seo, P.N., Lee, S.H. 2017. Effect of spray-drying condition and surfactant addition on morphological characteristics of spray-dried nanocellulose. *Journal of Forest and Environmental Science* 33(1): 33-38.
- Peng, Y., Gardner D.J., Han, Y. 2012a. Drying cellulose nanofibrils: in search of a suitable method. *Cellulose* 19: 91-102.
- Peng, Y., Han, Y., Gardner D.J. 2012b. Spray-drying cellulose nanofibrils: effect of drying process parameters on particle morphology and size distribution. *Wood and Fiber Science* 44: 1-14.
- Peng, Y., Gardner, D.J., Han, Y., Kiziltas, A., Cai, Z., Tshabalala, M.A. 2013. Influence of drying method on the material properties of nanocellulose I: thermostability and crystallinity. *Cellulose* 20(5): 2379-2392.



Sosnik, A. and Seremeta, K.P. 2015. Advantages and challenges of the spray-drying technology for the production of pure drug particles and drug-loaded polymeric carriers. *Advances in colloid and interface science* 223: 40-54.

Walton, D.E. and Mumford, C.J. 1999. Spray dried products—characterization of particle morphology. *Chemical Engineering Research and Design* 77(1): 21-38.