

## 감귤 가공 부산물의 업사이클링을 위한 전처리 조건 최적화

이혜윤<sup>1,\*</sup> · 최정연<sup>1,\*</sup> · 김주상<sup>2</sup> · 천지연<sup>1,3,\*</sup>

<sup>1</sup>제주대학교 식품생명공학과, <sup>2</sup>주식회사 일해, <sup>3</sup>제주대학교 푸드테크센터

## Optimization of pre-treatment conditions for the upcycling of citrus pomace waste

Hye-Yoon Yi<sup>1,\*</sup>, Jung-Yeon Choi<sup>1,\*</sup>, Jusang Kim<sup>2</sup> and Ji-Yeon Chun<sup>1,3,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Food Bioengineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

<sup>2</sup>ILHAE Co., Ltd., Jeju 63343, Korea

<sup>3</sup>Food Tech Center (FTC), Jeju National University, Jeju 63243, Korea

### Abstract

In this study, the aim was to establish a pre-treatment process to utilize citrus pomace (CP) as a high-value-added material. Frozen CP was thawed under various conditions, including at room temperature, using ultrasound, and immersion at 25°C and 70°C, and samples from each thawing group were assigned to a non-washed (NW) or a washed (W) group. The samples in the W-CP groups were drained, and all samples were powdered after hot air drying. The samples in the NW-CP groups had a two-fold higher drying yield of CP powder, a significantly lower pH (4.20–4.26), and a higher soluble solids content (1.1–1.3°Brix) than the samples in the W-CP groups. Interestingly, the samples in the W-CP groups had significantly higher swelling capacity (8.18–8.53 mL/g), water absorption index (7.61–7.85 g/g), water holding capacity (8.92–10.30 g/g), and oil holding capacity (2.09–2.30 g/g) than samples in the NW-CP groups ( $p < 0.05$ ). Conversely, the thawing method only significantly affected the thawing rate of the CP, but it did not significantly affect the properties of the CP powder. The results of this study provide basic data for the industrialization and resource utilization of CP, and they suggest that various pre-treatment processes can influence CP standardization.

**Keywords:** Citrus pomace, By-product, Pre-treatment, Upcycling, Techno-functional

## 서론

감귤(*Citrus unshiu*)은 주 생산지인 제주도를 기준으로 연간 약 57.9만 톤이 생산되며, 국내에서 생산 및 소비량이 높은 과일 중 하나이다(DATA, 2024). 감귤은 음료, 잼, 차, 식초, 요구르트 등 식품 산업에서 다양한 제품 유형으로 많이 소비되고 있지만, 과육 위주로 사용되어 착즙 후 남은 외과피(flavedo)와 내과피(albedo), 침출수로 구성된 감귤박(citrus pomace)이 다량 발생하며 환경 오염으로 이어지고 있다(Zhao et al., 2025).

국내에서는 매년 약 5~7만 톤의 감귤박이 발생하며, 처리비용으로 연 15~20억 원이 들뿐만 아니라, 폐기물의 매립지 투기는 환경 오염 등 사회적 문제의 주요 원인으로 지적되고 있다(Kim, 2024). 국내 현행법상, 감귤박은 폐기물관리법 시행규칙에 따라 식물성 잔재물로 분류되어 일부는 적절한 가공처리 후 비료나 사료로 활용되고 있으나, 대부분 폐기물로 처리되고 있다(MCEE, 2025). 그러나 감귤박을 구성하고 있는 과육 및 과피에는 hesperidin과 naringin, tangeretin 등이 풍부하며, 수용성 및 불용성 식이섬유를 다량 함유하고 있어 기능성 소재 개발을 위한 원료로써 활용 가능성이 충분하다(Han et al., 2021).

Received: Nov 09, 2025 / Revised: Nov 19, 2025 / Accepted: Nov 19, 2025

Corresponding author: Ji-Yeon Chun, Department of Food Bioengineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

E-mail: [chunjiyeon@jejunu.ac.kr](mailto:chunjiyeon@jejunu.ac.kr)

\*These authors contributed equally to this work.

Copyright © 2025 Korean Society for Food Engineering.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

푸드 업사이클링 기술을 적용하여 다양한 식품 부산물을 소재화하고 더 나아가 고부가가치화하기 위한 연구 및 제품 상용화는 계속 해서 이어지고 있다. 특히, 맥주박(MinAlexander et al., 2023), 생강박(Jo et al., 2024), 토마토박(Son & Hwang, 2025) 등 다양한 식품 가공 부산물들을 적절한 전처리 공정 적용 후 최종적으로는 분말 형태로 제조하여 고식이섬유 식품 소재로 활용하기 위한 시도들이 이어지고 있다. 이처럼 식품 가공 부산물들은 대체로 높은 수분함량을 지니고 있으므로 발생 직후 활용이 불가한 경우 냉동 보관을 통해 조직 손상을 방지하고 미생물 활동 저해 및 저장 안정성을 확보하는 것이 우선시 되어야 한다(Im et al., 2022). 이후에는 저비용으로 품질 변화를 최소화할 수 있는 해동 공정 및 조건을 적용하는 것이 필수적이다. 실온 해동은 가장 저비용으로 간단하게 적용 가능하나, 소요 시간이 오래 걸려 미생물 증식에 위험이 있다. 침지 해동 또한 상대적으로 저비용으로 실온 해동보다 빠른 해동 시간이 특징적이거나, 균일한 해동은 어려울 수 있다. 초음파 해동은 주로 육류 해동에 활용되고 있으며, 초음파 세기를 조절하여 원하는 강도로 사용 가능하지만, 고가의 장비가 필요하다는 단점이 있다(Yi et al., 2025). 수세는 식재료 겉면에 존재하는 불순물, 미생물, 농약 등을 제거하기 위한 전처리 공정으로, 과채류의 경우 겉껍질에 남아있는 토양과 농약 성분들을 제거하기 위한 목적으로 섭취 전 반드시 거치게 되는 공정 중 하나이다(Socas-Rodríguez et al., 2021). 특히, 부산물 업사이클링을 통한 원료 소재화를 위해서는 이물질 제거 및 미생물 사멸을 목적으로 하는 수세 공정을 고려해 볼 수 있다(RE:HARVEST, 2022). 다만, 수분함량의 증가는 건조시간의 증가로 이어질 수 있으며, 이는 산업화 적용 시 비용적인 측면에서 좋지 않은 영향을 주게 된다.

지속가능한 부산물 업사이클링 기술 개발에 대한 높은 관심이 이어지고 있으나 실제 산업화를 위해 선행되어야 하는 전처리 공정 최적화 및 원료 표준화 관련 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 감귤 가공 부산물의 소재화를 위해 해동방법과 수세공정이 감귤박 특성에 미치는 영향을 조사하였으며, 이를 통해 감귤 가공 부산물 업사이클링을 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 실험 재료

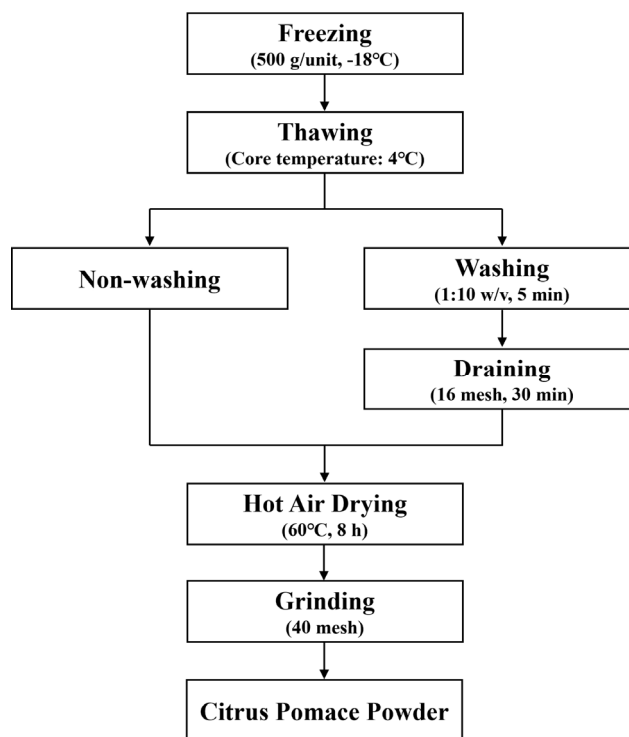
본 실험에 사용한 감귤박은 2024년 12월부터 2025년 1월까지 제주 지역에서 수확한 온주밀감(*Citrus unshiu* (Yu. Tanaka ex Swingle) Marcow.)을 착즙하는 과정에서 발생한 것으로써 (주)일해로부터 5 kg 씩 소분하여 냉동보관중인 것으로 공급받았으며,  $-20^{\circ}\text{C}$  냉동고에 보관하며 실험에 사용하였다. 실험에 사용한 감귤박은 사료 관리법 시행

규칙에 따라 일반성분, 곰팡이독소 및 중금속 분석을 실시하였으며, 곰팡이독소와 중금속 모두 불검출인 것으로 확인되었다(Table 1). 해동방법 및 수세공정을 달리한 감귤박 분말 제조과정은 Fig. 1과 같다.

**Table 1.** Proximate composition, mycotoxin, and heavy metal of citrus pomace

Category	Traits	Results
Proximate composition (%)	Moisture	79.80
	Crude protein	1.38
	Crude fat	0.27
	Crude fiber	2.48
	Crude ash	0.59
Mycotoxin (ppb)	Aflatoxin	ND
	Ochratoxin	ND
Heavy metal (ppm)	Lead (Pb)	ND
	Cadmium (Cd)	ND
	Arsenic (As)	ND
	Mercury (Hg)	ND
	Chromium (Cr)	ND
	Fluoride (F)	ND

ND: not detected.



**Fig. 1.** Manufacturing process diagram of citrus pomace powder according to various pre-treatment conditions.

## 해동 공정

해동방법에 따른 감귤박 특성 차이를 확인하기 위하여, 냉동 감귤박을 실온 해동 후 500 g씩 일정한 크기(180×140×20 mm)로 성형하여 지퍼백에 소분하였다. 이후, 중심부에 온도센서를 삽입한 후 -20℃ 냉동고(IBK-500F, INFOBIOTECH Co., Ltd., Korea)에 보관하였다. 감귤박의 중심부 온도는 데이터로거(SE-305 Thermo Data Logger, Center Technology Corp., New Taipei City, Taiwan)를 사용하여 확인하였으며, 이때 소분한 감귤박의 재냉동이 완료된 시점(심부 온도 -18℃ 이하) 이후 해동실험을 진행하였다. 냉동 감귤박은 실온(room temperature, RT), 초음파(ultrasonic, US), 침지(immersion, I)의 세 가지 방법으로 해동을 진행하였으며, 침지 해동의 경우 물의 온도를 25℃와 70℃로 달리하였다. 해동 완료 시점은 소분 감귤박의 중심부 온도가 4±1℃일 때로 설정하였다. 또한, 냉동 감귤박의 해동속도는 해동 전 감귤박의 초기 온도( $T_{initial}$ )와 해동 완료 시점에서의 온도( $T_{end}$ ), 해동 소요 시간( $t$ )을 이용하여 아래의 계산식에 대입하여 계산하였다.

$$\text{해동 속도 (}^{\circ}\text{C/min)} = \frac{(T_{end} - T_{initial})}{t}$$

## 수세 공정

해동 직후 감귤박의 수세여부를 달리하였으며, 수세 감귤박은 시료와 수도물을 1:10(w/v)으로 혼합 후 5분간 방치하고 16 mesh 체에 일정한 두께로 펼쳐 30분간 방치하여 탈수 및 여과하였다. 이후, 남아있는 고형분을 회수하여 시료로 사용하였다.

## 건조 및 분쇄 공정

해동방법과 수세여부를 달리한 감귤박은 산업용 스테인리스 열풍건조기(Samsung Electronics Co., Ltd., Korea)를 이용하여 60℃에서 8시간 동안 건조하였다. 이때, 최적의 건조 시간을 설정하기 위하여 건조 1시간마다 일정량의 시료를 채취하여 분쇄 후 수분활성도 측정기(Aqua Lab Pre water activity meter, METER Group, Pullman, WA, USA)를 이용하여 수분활성도를 측정하였다. 건조를 마친 감귤박은 믹서기(HMF-3500TG, Hanil, Korea)로 분쇄 후 40 mesh 체에 통과시켜 얻어진 분말을 최종 시료로 사용하였다.

## 건조 수율

감귤박의 건조 수율은 해동 전 소분한 감귤박의 초기 무게와 건조 후 얻어진 감귤박의 무게를 측정한 후 다음 계산식을 이용하여 나타내었다.

$$\text{건조 수율 (\%)} = \frac{\text{건조 후 감귤박 무게 (g)}}{\text{초기 감귤박 무게 (g)}} \times 100$$

## 색도

감귤박 분말의 색도는 색차계(YS3060, 3NH Technology Co., Ltd., China)를 사용하여  $L^*$ (명도, lightness),  $a^*$ (적색도, redness),  $b^*$ (황색도, yellowness)값을 3회 반복 측정하여 평균값으로 나타내었다. 이때 표준 백색판의  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ 값은 각각 91.16, 1.93, -6.81이었다.

## pH 및 가용성 고형분

감귤박 분말의 pH와 가용성 고형분 측정을 위해 시료액을 제조하였다. 감귤박 분말 1 g과 증류수 50 mL을 혼합 후 초고속균질기(Ultra Turrax T25d, IKA, Germany)를 이용하여 6,000 rpm으로 1분간 균질하여 얻어진 것을 시료액으로 하였다. pH는 pH meter(S470 Seven Excellence™, Mettler Toledo, Switzerland), 가용성 고형분은 당도계(PAL-BX|ACID181 Master Kit, ATAGO Co., Ltd., Japan)로 3회 반복 측정하였다.

## 수분함량

감귤박 분말의 수분함량은 105℃ 상압가열건조법으로 측정하였다. 시료 1 g을 칭량접시에 정밀히 달아 105℃로 설정된 dry oven(C-DOD3, CHANGSHIN SCIENCE Co., Korea)에서 24시간 동안 건조하고 30분간 방냉 후 무게를 측정하였다. 시료의 수분함량은 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{수분 함량 (\%)} = \frac{(b - c)}{(b - a)} \times 100$$

- a: 칭량접시의 질량(g)
- b: 칭량접시와 검체의 질량(g)
- c: 건조 후 항량이 되었을 때의 질량(g)

## 겉보기 밀도

감귤박 분말의 겉보기 밀도는 Zhao et al. (2025)의 방법을 일부 변형하여 측정하였다. 분말 2 g을 25 mL 메스실린더에 넣고, 실린더를 흔들어 분말의 높이를 일정하게 맞춘 후 부피를 측정하였다. 겉보기 밀도는 아래의 식을 사용하여 계산하였다.

$$\text{겉보기 밀도 (g/mL)} = \frac{\text{분말 무게 (g)}}{\text{부피 (mL)}}$$

## 팽윤 용량

감귤박 분말의 팽윤 용량은 Zhao et al. (2025)의 방법을 일부 변형하여 측정하였다. 분말 2 g을 25 mL 메스실린더에 넣고 초기 부피를 측정하였다. 이후, 초순수 20 mL을 넣어준 후, 혼합물을 실온에서 24시간 동안 방치하였다. 이후, 액체 내 감귤박 분말의 부피를 측정하였다. 팽윤 용량은 아래의 계산식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{팽윤 용량 (mL/g)} = \frac{[\text{액체 내 분말의 부피 (mL)} - \text{초기 분말의 부피 (mL)}]}{\text{분말의 무게 (g)}}$$

## 수분흡수지수(WAI) 및 수분용해지수(WSI)

수분흡수지수(water absorption index, WAI) 및 수분용해지수(water solubility index, WSI) 측정은 Lim & Hong (2021)의 방법을 일부 변형하여 측정하였다. 감귤박 분말 0.5 g과 증류수 20 mL을 혼합한 후 3,134×g에서 20분간 원심분리한 후 얻어진 침전물의 무게를 이용하여 수분흡수지수를 구하였으며, 상등액은 미리 무게를 구한 수기에 분리하여 105°C에서 24시간 동안 건조시킨 고형분의 무게를 이용하여 수분용해지수를 계산하였다.

$$\text{수분 흡수지수 (WAI, g/g)} = \frac{\text{침전물의 무게 (g)}}{\text{초기 분말의 무게 (g)}}$$

$$\text{수분 용해지수 (WSI, \%)} = \frac{\text{상등액 고형분의 무게 (g)}}{\text{초기 분말의 무게 (g)}} \times 100$$

## 수분보유능력(WHC)

감귤박 분말의 수분보유능력(water holding capacity, WHC)은 Kurek et al. (2018)의 실험법을 일부 변형하여 사용하였다. 감귤박 분말 0.50 g을 정확하게 칭량한 다음 증류수 20 mL과 잘 혼합해 주고 실온(25°C)에서 24시간 동안 방치하였다. 이후 시료액을 3,134 ×g에서 10분 동안 원심분리한 다음 상등액을 제거하고 남은 잔류물의 무게를 측정하였다. 시료에 의해 유지된 수분의 양은 아래의 계산식을 이용하여 구하였다.

$$\text{수분 보유능력 (WHC, g/g)} = \frac{\text{잔류물의 무게 (g)} - \text{초기 분말의 무게 (g)}}{\text{초기 분말의 무게 (g)}}$$

## 유지보유능력(OHC)

감귤박 분말의 유지보유능력(oil holding capacity, OHC)은 Kurek

et al. (2018)의 방법을 일부 변형하여 구하였다. 시료 0.50 g과 식용유 10 mL을 혼합한 후 실온에서 1시간 동안 방치하였다. 이후, 혼합물을 3,134×g에서 10분간 원심분리하고 상등액을 제거한 후 잔류물의 무게를 측정하여 아래의 계산식에 대입하여 구하였다.

$$\text{유지 보유능력 (OHC, g/g)} = \frac{\text{잔류물의 무게 (g)} - \text{초기 분말의 무게 (g)}}{\text{초기 분말의 무게 (g)}}$$

## 통계 처리

모든 측정은 최소 3회 이상 반복 수행하였으며, 데이터는 평균±표준편차(SD)로 표시하였다. OriginPro(OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA)를 사용하여 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)과 Tukey의 다중범위검정( $p < 0.05$ )을 실시하였다.

## 결과 및 고찰

### 해동 특성

해동방법을 달리한 냉동 감귤박의 해동곡선과 해동속도는 Fig. 2와 같다. 냉동 감귤박은 실온(RT), 초음파(US), 침지 25°C(I25), 침지 70°C(I70)로 방법과 조건을 달리하였으며, 해동 완료까지 각각 285분, 27분, 33분, 11분이 소요되었다(Fig. 2A). 실온 해동은 0.08°C/min으로 가장 느린 해동속도를 보였으며, 침지 70°C 해동은 1.72°C/min로 가장 빠른 해동속도를 보였다(Fig. 2B). 반면, 초음파 해동(0.70°C/min)과 침지 25°C 해동(0.60°C/min)의 해동속도는 유의미한 차이를 보이지 않았다( $p > 0.05$ ). 그럼에도, 초음파 해동과 침지 25°C 해동 과정에서 시간에 따른 온도 변화의 차이는 다른 경향을 보였다(Fig. 2A).

이처럼 해동 시간은 해동방법 및 조건에 따라 큰 차이를 보였는데, 침지 해동에 사용되는 물이 실온 해동에 사용되는 공기보다 열전도도가 높아 감귤박의 내부 온도를 상대적으로 빠르게 올려 해동에 소요된 시간이 짧았던 것으로 볼 수 있다(Yi et al., 2025). 따라서 열전달 매체에 따라 열전도율이 빠른 순으로 해동 속도가 빨라지는 것으로 판단된다(Im et al., 2022). 초음파 해동은 고주파를 이용하여 분자운동으로 생기는 열에 의해 해동이 진행되며, 해동 과정에서 기포의 진동이 다량 발생하여 해동 시간을 단축시킬 수 있다(Shim et al., 2015). 해동방법뿐만 아니라, 동일한 침지 해동을 적용하여도 수온에 따라 해동 시간의 차이를 보이며 침지 70°C 해동은 침지 25°C 해동 대비 약 3배 정도 더 빠른 해동 시간을 나타내었다. 이러한 결과는 Choi et al. (2017)의 연구에서 냉동 돈육 등심을 해동할 때 해동 온도가 증가함에 따라 해동 시간이 단축되었다는 결과와 유사한 경향을



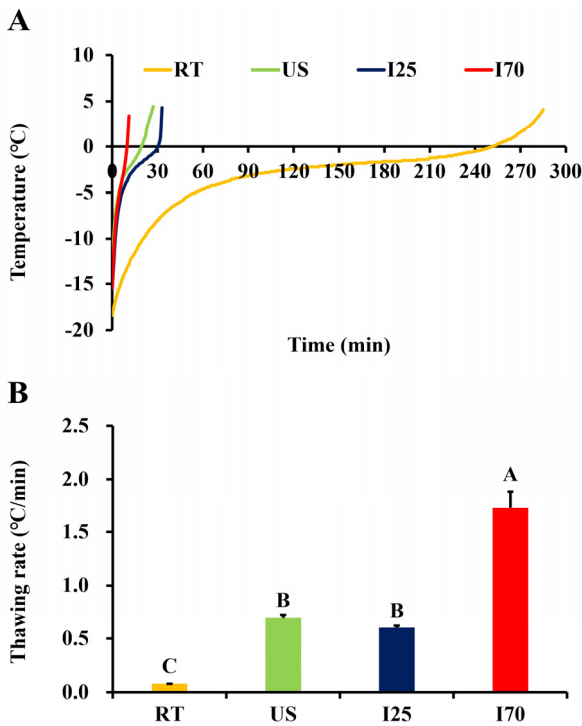


Fig. 2. Thawing curve (A) and thawing rate (B) according to thawing methods of citrus pomace. RT: room temperature, US: ultrasonic, I25: immersion at 25°C, I70: immersion at 70°C. Different letters indicate significant differences between different samples ( $p < 0.05$ ).

보였다. 또한, Farahnak et al. (2021)의 연구에서 초음파 해동의 효과는 대부분  $-5^{\circ}\text{C}$ 부터  $0^{\circ}\text{C}$ 까지의 온도 범위에서만 효과적임을 나타내었고, 이는 본 연구에서 나타난  $-5^{\circ}\text{C}$ 부터  $0^{\circ}\text{C}$ 까지의 초음파 해동의 온도 상승이 빠르게 발생한 점과 비슷한 경향을 확인할 수 있다.

## 건조 특성

특정 시기에 수확 및 가공하는 농산물로부터 발생하는 가공 부산물을 소재화하기 위해서는 건조 공정을 적용하여 용이한 보관 및 운송을 할 수 있도록 해야한다(Yi et al., 2022). 다양한 건조 방법 중에서도 열풍건조는 대량생산 시 비용효율적인 측면에서 가장 적합한 방법으로 알려져 있다. 이때 원물의 양, 건조온도, 건조시간 등에 따라 건조물의 색상뿐만 아니라 생리활성의 차이가 발생하며 과도한 건조시간은 곧 공정비용의 상승으로 이어지게 되므로 이러한 조건들을 최적화하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 Martínez-Martí et al. (2023)의 연구를 참고하여 건조온도를  $60^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였으며, 건조시간에 따른 수분활성도 변화를 관찰하여 최적 건조시간을 확립하고자 하였다. 해동방법과 수세여부를 달리한 감귤박의 건조곡선은 Fig. 3과 같다. 수세하지 않은 감귤박(NW)은 건조 3시간 시점부터 점차 수분활성도 값이 감소하였으며, NW-RT는 건조 5시

간 만에 0.3 이하의 값을 나타내었다(Fig. 3A). 이어서 NW-US와 NW-I70은 6시간, NW-I25는 7시간 건조 시  $a_w < 0.3$ 에 도달하였다. 수세 감귤박(W)은 건조 4시간까지 해동방법에 관계없이 모두 0.9 이상의 높은 수분활성도 값을 유지하였다(Fig. 3B). 이후, 감귤박의 수분활성도는 건조 6시간에서 7시간 사이에 급격하게 감소하는 경향을 보였으며, 8시간 건조하였을 때 W-I70을 제외하고는 모두  $a_w < 0.3$ 에 도달하였다. 이처럼 건조 특성에는 해동방법보다 수세여부에 따른 차이가 큰 것으로 나타났다. 또한, 수세 과정에서 감귤박 내외부에 자유수 함량이 증가함에 따라 건조 초기 단계에서 높은 수분활성도값을 유지한 것으로 생각된다(Kowalska et al., 2017). Lee et al. (2023)은 전처리 조건에 따른 우영의 건조시간 차이를 확인하였으며, 데치기 처리한 우영은 대조구보다 빠른 건조속도를 보였다고 하여 본 연구와는 다른 경향을 보였다. 이처럼 원물의 종류와 전처리 조건은 농산물의 건조 특성에 영향을 주는 것으로 생각된다.

## 건조 수율

열풍건조된 감귤박의 건조 수율은 Table 2에 나타내었다. 감귤박의 건조 수율은 해동방법에 따른 차이는 크게 보이지 않았으나, 수

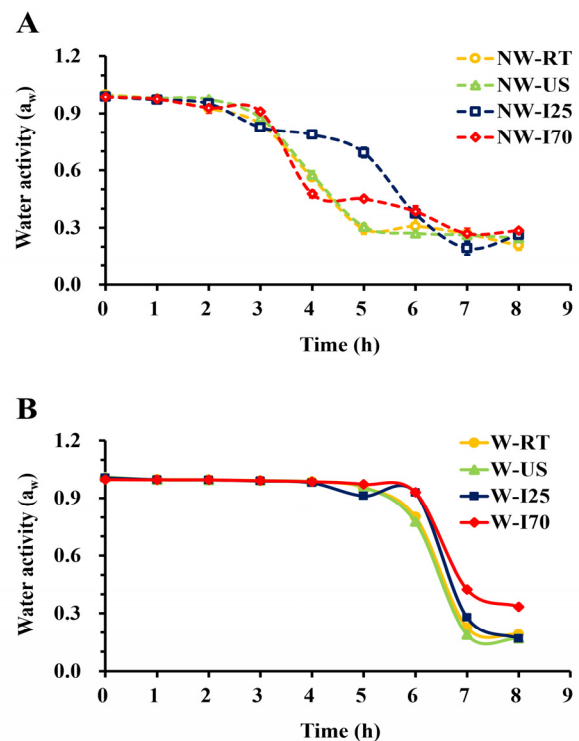


Fig. 3. Drying curves of citrus pomace according to pre-treatment conditions (thawing and washing) by drying time. NW: non-washing (A) and W: washing (B). RT: room temperature, US: ultrasonic, I25: immersion at  $25^{\circ}\text{C}$ , I70: immersion at  $70^{\circ}\text{C}$ .

Table 2. Drying yield of citrus pomace under various pre-treatment conditions

Washing conditions <sup>1)</sup>	Thawing methods <sup>2)</sup>	Drying yield (%)
NW	RT	19.88
	US	19.92
	I25	19.95
	I70	19.88
W	RT	10.86
	US	10.77
	I25	10.36
	I70	10.18

<sup>1)</sup>NW: non-washing, W: washing.<sup>2)</sup>RT: room temperature, US: ultrasonic, I25: immersion at 25°C, I70: immersion at 70°C.

세 여부에 따라 수세 하지 않은 감귤박(NW)이 수세 감귤박(W) 보다 약 2배 정도 높은 값을 보였다. 수세하지 않은 감귤박(NW)은 19.88~19.95%, 수세 감귤박은 10.18~10.86%의 건조 수율을 나타내었다. 이러한 결과는 수세 및 탈수/여과 과정에서 발생하는 원물 및 수용성 성분들의 손실에 따른 것으로 생각된다. Jeong et al. (2012)의 연구에서도 양파껍질을 수세 후 건조 처리 시 수율이 감소하였다고 보고하였고, 이는 본 연구와 유사한 경향을 나타내었다. 결과적으로, 감귤박 업사이클링 원료화를 위해서는 많은 양의 건조 감귤박을 확보하는 것이 우선시 될 수 있으므로 수율적인 측면에서는 수세 공정을 적용하지 않는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

### 수분활성도 및 수분함량

식품의 수분활성도( $a_w$ )는 분말의 저장안정성과 밀접한 관련이 있으며,  $a_w < 0.6$  미만일 때 미생물의 생육이 저해되어 부패하지 않고 오랜기간 안전성을 확보할 수 있다(Yi et al., 2022). 수분함량 또한 저장 중 식품 분말의 안정성을 결정하는 주요 기준 중 하나이다. 감귤박 분말의 수분활성도와 수분함량은 Table 3에 나타내었다. 감귤박 분말의 수분활성도는 0.222~0.316의 범위를 보였으며, W-RT(0.316)를 제외하고는 모두  $a_w < 0.3$ 의 결과를 보였다. 감귤박 분말의 수분활성도는 W-I70(0.222)에서 가장 낮은 값을 보였으나 NW-RT(0.235), NW-I70(0.225), W-I25(0.234)와 유의적인 차이는 보이지 않았다( $p > 0.05$ ). W-RT(0.316) 또한  $a_w < 0.6$ 이므로 다른 처리구와 마찬가지로 분말의 저장안정성은 보장될 것이라 생각된다. 건조 직후 감귤박의 수분활성도(Fig. 3)와 이를 분쇄한 감귤박 분말의 수분활성도(Table 3)를 비교하였을 때, NW-US, NW-I25, NW-I70을 제외한 나머지 처리구들에서는 감귤박 분말의 수분활성도 값이 더 높은 것으로 나타났다. 이는 건조 감귤박이 분말화되는 과정에서 공기 중 수분을 흡수한 것에 따른 것으로 생각된다. 분말 시료는

Table 3. Water activity and moisture content of citrus pomace powder under various pre-treatment conditions

Washing conditions <sup>1)</sup>	Thawing methods <sup>2)</sup>	Water activity ( $a_w$ )	Moisture content (%)
NW	RT	0.235±0.004 <sup>CD3)</sup>	8.87±0.35 <sup>A</sup>
	US	0.253±0.007 <sup>B</sup>	8.67±0.59 <sup>A</sup>
	I25	0.243±0.003 <sup>BC</sup>	8.67±0.57 <sup>A</sup>
	I70	0.225±0.002 <sup>D</sup>	8.23±0.76 <sup>A</sup>
W	RT	0.316±0.008 <sup>A</sup>	4.77±0.31 <sup>B</sup>
	US	0.255±0.003 <sup>B</sup>	5.10±0.60 <sup>B</sup>
	I25	0.234±0.006 <sup>CD</sup>	4.27±0.64 <sup>B</sup>
	I70	0.222±0.012 <sup>D</sup>	4.23±0.60 <sup>B</sup>

<sup>1)</sup>NW: non-washing, W: washing.<sup>2)</sup>RT: room temperature, US: ultrasonic, I25: immersion at 25°C, I70: immersion at 70°C.<sup>3)</sup>Different letters indicate significant differences between different samples ( $\alpha < 0.05$ ).

상대습도에 따라 수분활성도의 변화가 생기므로, 건조 직후 감귤박의 수분활성도와 분말화되는 과정에서 높은 상대습도에 노출된 감귤박 분말 간의 차이가 발생한 것으로 판단된다(Kim et al., 2017a).

감귤박 분말의 수분함량은 수세하지 않은 감귤박(NW)에서 8.23~8.87%의 범위를 보였으며, 수세 감귤박(W)은 4.23~5.10%로 나타나 수세여부가 유의미한 영향을 주는 것으로 확인되었다( $p < 0.05$ ). Lee et al. (2023)은 전처리 조건을 달리한 건조 우형칩의 품질특성을 확인하였으며, 이때 데치기 한 우형(3.12~3.77%)은 하지 않은 대조구(4.59%)보다 낮은 수분함량을 가진다고 보고하여 본 연구와 유사한 결과를 보였다. 이는 식품이 물에 노출되는 과정에서 조직이 붕괴되고 세포 투과성이 높아지면서 물질이동이 촉진되었기 때문으로 생각된다. 또한, 침지 또는 수세 과정에서 감귤박의 가용성 성분이 손실된 것에 따른 결과로 볼 수 있다(Choi et al., 2022). 결과적으로 본 연구에서는 전처리 조건을 달리한 감귤박 분말 제조 시 해동방법 보다는 수세여부가 수분함량에 더 큰 영향을 주는 것으로 확인되었다.

### pH 및 가용성 고형분

감귤박 분말의 pH와 가용성 고형분 함량은 Table 4에 나타내었다. 수세 하지 않은 감귤박(NW)의 pH는 4.20~4.26의 범위를 보였으며, 수세 감귤박(W) 분말의 pH는 4.46으로 확인되었다. 해동방법에 따른 감귤박 분말의 pH는 큰 차이가 없었으나( $p > 0.05$ ), 수세여부는 유의미한 차이를 주었다( $p < 0.05$ ). 감귤의 유기산은 대부분 citric acid로 이루어져 있으며, 이는 수용성으로 물에 잘 녹는다(Han et al., 2021). 따라서, 수세 감귤박(W)의 상대적으로 높은 pH는 수세 과정에서 감귤박의 유기산 성분들이 용출됨에 따른 결과로 보여진다.

**Table 4.** pH and soluble solids of citrus pomace powder under various pre-treatment conditions

Washing conditions <sup>1)</sup>	Thawing methods <sup>2)</sup>	pH	Soluble solids (°Brix)
NW	RT	4.26±0.00 <sup>B3)</sup>	1.10±0.00 <sup>A</sup>
	US	4.24±0.01 <sup>B</sup>	1.10±0.00 <sup>A</sup>
	I25	4.23±0.00 <sup>B</sup>	1.13±0.06 <sup>A</sup>
	I70	4.20±0.02 <sup>B</sup>	1.13±0.12 <sup>A</sup>
W	RT	4.46±0.03 <sup>A</sup>	0.50±0.00 <sup>B</sup>
	US	4.46±0.03 <sup>A</sup>	0.57±0.06 <sup>B</sup>
	I25	4.46±0.03 <sup>A</sup>	0.50±0.00 <sup>B</sup>
	I70	4.46±0.05 <sup>A</sup>	0.50±0.00 <sup>B</sup>

<sup>1)</sup>NW: non-washing, W: washing.<sup>2)</sup>RT: room temperature, US: ultrasonic, I25: immersion at 25°C, I70: immersion at 70°C.<sup>3)</sup>Different letters indicate significant differences between different samples ( $\alpha$ 0.05).

감귤박 분말의 가용성 고형분 함량 또한 해동방법 보다는 수세여부에 따른 유의미한 차이를 보였다( $p$ <0.05). 수세 하지 않은 감귤박(NW)은 1.10~1.13°Brix의 범위를 보였으며, 수세 감귤박(W)은 0.50~0.57°Brix의 범위를 보여 약 2배 정도 차이가 나는 것으로 확인되었다. 물을 용매로 한 시료의 가용성 고형분 함량은 증가한다(Jeong, 2011). Mahrouz et al. (2002)의 연구에서도 수세 처리가 클레멘타인의 가용성 고형분뿐만 아니라 비타민 C의 손실까지도 영향을 주었다고 보고하였다. 이처럼 본 연구에서도 수세 처리를 통해 감귤박의 가용성 고형분 함량이 절반 정도 줄어든 것으로 생각된다.

## 외관 및 색도

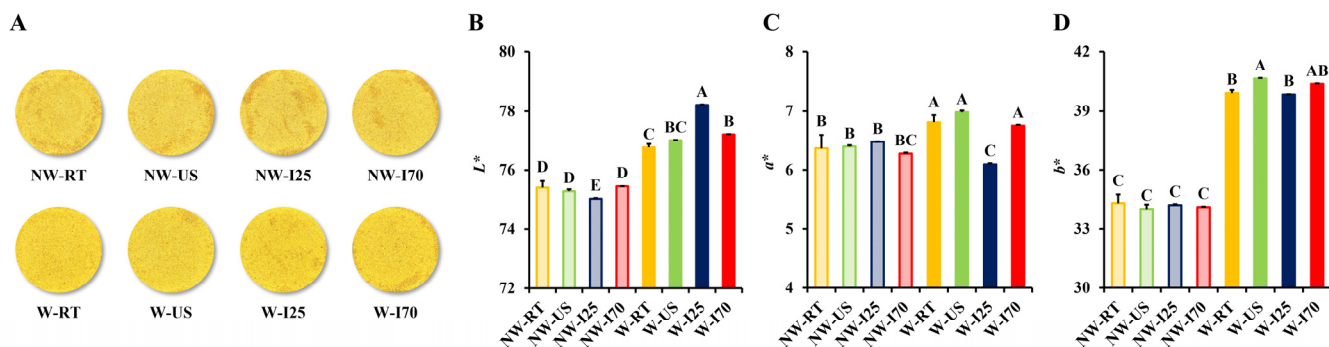
해동방법과 수세여부를 달리한 감귤박 분말의 외관과 색도는 Fig. 4와 같다. 감귤박 분말은 수세 하지 않은 감귤박(NW)이 수세 감귤박

(W)보다 더 짙은 주황색의 입자들이 다량 존재하는 것으로 확인되었다(Fig. 4A). 감귤박 분말의  $L^*$ 값은 수세하지 않은 감귤박(NW)에서 75.03~75.49의 범위를 보였으며, 수세 감귤박(W)은 76.76~78.21의 범위를 보이며 수세여부에 따른 유의미한 차이( $p$ <0.05)가 확인되었다(Fig. 4B). 반면, 감귤박 분말의  $a^*$ 값은 6.27~6.98의 범위를 보이며 전처리 조건에 따른 뚜렷한 차이는 확인되지 않았다(Fig. 4C). 감귤박 분말의  $b^*$ 값은 수세하지 않은 감귤박(NW)에서 34.03~34.32의 범위를 보였으며, 수세 감귤박(W)은 39.85~40.65의 범위를 보이며  $L^*$ 값과 유사하게 수세여부에 따른 유의미한 차이( $p$ <0.05)가 확인되었다(Fig. 4D). 이러한 차이는 수세 과정에서 감귤 과피에 다량 존재하는 수용성의 플라보노이드가 용출되었기 때문으로 생각된다(Han et al., 2021). 열처리와 해동방법에 따른 냉동 감자와 당근의 품질 변화를 확인한 연구에서 감자의  $L^*$ 값은 blanching 처리구에서 대조구 보다 높은 값을 보였고, 당근의  $L^*$ 값은 열처리와 해동방법에 따른 유의미한 차이가 없었다고 보고하였다(Im et al., 2022). 따라서, 원물의 종류와 전처리 방법 및 조건에 따라 식품의 색도 변화 여부는 달라질 수 있다고 생각된다.

## 겉보기 밀도 및 팽윤 용량

겉보기 밀도는 분말 소재의 단위 부피당 질량을 나타내며, 팽윤 용량은 일정 시간 동안 물에 잠긴 후 단위 질량당 분말 소재의 부피 팽창 용량을 나타낸다(Zhao et al., 2025). 감귤박 분말의 겉보기 밀도와 팽윤 용량 결과는 Fig. 5에 나타내었다.

분말의 겉보기 밀도는 수세하지 않은 감귤박(NW)에서 0.58~0.63 g/mL의 범위를 보였으며, 수세 감귤박(W)은 0.45~0.51 g/mL의 범위를 보이며 수세하지 않은 감귤박에서 더 높은 값을 보였다(Fig. 5A). 또한, NW와 W 각각 침지 70°C 해동(I70) 분말에서 가장 낮은 겉보기 밀도를 보였다. 이러한 차이는 수세여부와 해동조건이 감귤박 분말 입자간 공극률 차이에 영향을 줄 수 있음을 보여준다.



**Fig. 4.** Appearance (A), lightness (B), redness (C), and yellowness (D) of citrus pomace powder according to washing conditions (NW: non-washing and W: washing) and thawing methods (RT: room temperature, US: ultrasonic, I25: immersion at 25°C, and I70: immersion at 70°C). Different letters indicate significant differences between different samples ( $\alpha$ 0.05).

분말의 겉보기 밀도는 입자 크기가 작아짐에 따라 높아지는 경향이 있으며, 겉보기 밀도가 높을수록 분말의 부피가 작아져 운송 및 보관도 용이해진다. 반대로, 겉보기 밀도가 낮을수록 입자 표면이 거칠고 비표면적이 커지게 되며, 흐름성이 떨어지고 수분 흡수 속도를 높일 수 있게 된다(Kim et al., 2017b). 결과적으로, 본 연구에서는 높은 겉보기 밀도를 보인 수세 하지 않은 감귤박(NW) 분말이 업사 이클링 원료 대량 생산 시 비용적인 측면에서 이점을 가질 수 있는 처리구로 생각된다.

감귤박 분말의 팽윤 용량은 겉보기 밀도와는 서로 반대되는 경향을 보였다(Fig. 5B). 수세하지 않은 감귤박(NW) 분말은 6.26~7.45 mL/g, 수세 감귤박(W) 분말은 8.18~8.53 mL/g의 범위를 보이며 수세 감귤박 분말에서 유의적으로 더 높은 팽윤 용량이 확인되었다( $p < 0.05$ ). 이러한 결과는 수세공정을 거치면서 감귤박의 내부 구조가 열려 카복실기(-COOH), 하이드록실기(-OH)와 같은 극성 작용기가 더 많이 노출되면서 감귤박 분말과 물 분자 간의 상호작용이 증가하였기 때문이다(Zhao et al., 2025). 이러한 친수성기의 노출은 감귤박의 높은 수화 특성과의 밀접한 관련이 있다.

### 수분흡수지수 및 수분용해지수

분말 형태의 소재들은 대체로 입자 표면적이 크기 때문에 수분에

취약한 특성을 지니고 있으며, 높은 상대습도 조건에서는 공기 중에서도 입자 간의 응집이 발생하게 된다(Jung et al., 2021). 감귤박 분말의 수분흡수지수(water absorption index, WAI)와 수분용해지수(water solubility index, WSI)는 Fig. 5C와 5D에 나타내었다.

WAI는 시료가 수분을 흡수한 양을 의미하며, 식품에서 점도를 향상시킬 수 있는 능력을 의미한다(Lim & Hong, 2021). 본 연구에서는 수세여부에 따라 감귤박 분말 간의 유의적인 차이가 나타났다( $p < 0.05$ ). 수세 감귤박(W) 분말(7.61~7.85 g/g)은 수세 하지 않은 감귤박(NW) 분말(5.44~6.73 g/g)보다 유의적으로 높은 값을 보였다( $p < 0.05$ ). 이는 수세 과정에서 감귤박의 친수성기가 외부로 노출되면서 건조 및 분말화 이후에도 수세하지 않은 감귤박(NW) 분말보다 높은 WAI를 보인 것으로 생각된다. 또한, 수세하지 않은 감귤박(NW) 분말 중에서도 초음파 해동 처리구에서 유의적으로 낮은 WAI값이 확인되었다. 초음파 해동은 주파수와 전력의 세기에 따라 식품에 서로 다른 물리적 영향을 주게 되며, 미세 구조의 손상을 발생시키기도 한다. 본 실험에서 사용한 감귤박은 착즙 과정에서 발생하는 강한 기계적 전단 및 압착에 의해 1차적으로 세포벽 구조가 파괴되며, 이후 초음파를 처리하는 것은 미세 구조의 파괴를 더욱 심화시켜 WAI값을 낮추는 데 영향을 줄 수 있다(Télez-Morales et al., 2020). 그럼에도 불구하고, 수세 감귤박(W) 분말의 WAI값은

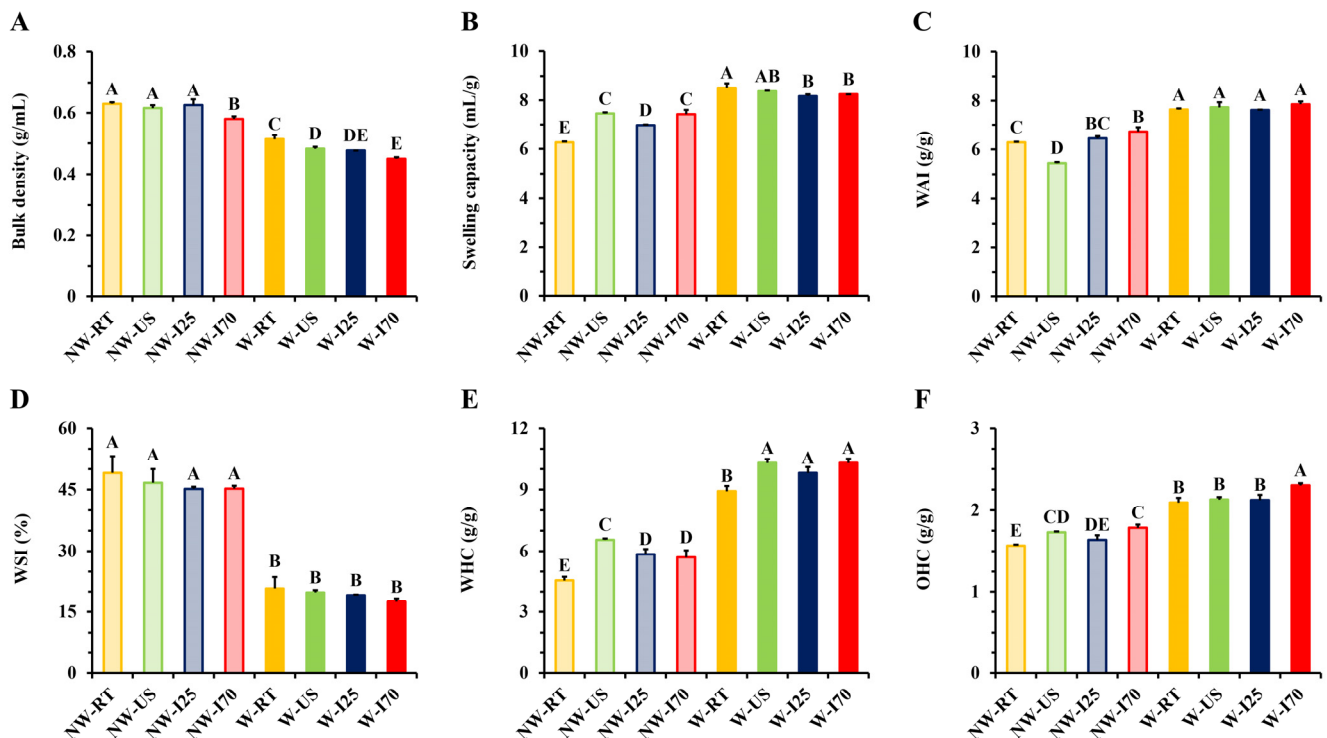


Fig. 5. Bulk density (A), swelling capacity (B), water absorption index (C), water solubility index (D), water holding capacity (E), and oil holding capacity (F) of citrus pomace powder according to washing conditions (NW: non-washing and W: washing) and thawing methods (RT: room temperature, US: ultrasonic, 125: immersion at 25°C, and 170: immersion at 70°C). Different letters indicate significant differences between different samples ( $p < 0.05$ ).



수세 공정을 거치면서 외부로 노출되는 친수성기가 많아짐에 따라 해동방법에 따른 유의미한 차이를 보이지 않은 것으로 생각된다. 수세하지 않은 감귤박(NW) 분말은 상대적으로 높은 겔보기 밀도를 나타내었으며(Fig. 5A), 이는 입자분포가 균일함을 의미하며, 낮은 WAI로 이어진 것으로 생각된다(Lim & Hong, 2021). 높은 WAI는 식품 가공 과정에서는 용이한 혼합을 돕지만, 수분의 영향으로 유해 물질이나 미생물의 혼입 가능성이 높아지며 caking 현상의 발생이 용이해지는 등 저장안정성 측면에서는 부정적인 영향을 준다(Perković et al., 2024).

WSI는 수세하지 않은 감귤박(NW) 분말(45.27~49.07%)이 수세 감귤박(W) 분말(17.47~20.80%)보다 2배 이상 높은 값을 보였다(Fig. 5D). 즉, 수세 감귤박(W) 분말은 유의적으로 높은 WAI와 낮은 WSI를 보였으며, 수세하지 않은 감귤박(NW) 분말은 유의적으로 낮은 WAI와 높은 WSI를 보였다( $p<0.05$ ). Wang et al. (2024)은 수용성 및 불용성 식이섬유의 비율이 수화 특성에 미치는 영향을 확인하였으며, 수용성 식이섬유의 비율이 높아짐에 따라 WSI값 또한 유의적으로 증가하였으며 이는 수용성 식이섬유가 물에 용해되는 것과 연관이 있다고 보고하였다. 따라서, 본 연구에서 수세하지 않은 감귤박(NW) 분말의 높은 WSI는 상대적으로 높은 수용성 식이섬유 함량으로 이어질 수 있다.

### 수분보유능력 및 유지보유능력

수분보유능력(water holding capacity, WHC)은 원심분리 또는 압축 조건 하에서 자유수, 고정수, 결합수를 유지하는 소재의 능력을 보여준다(Kurek et al., 2018). 감귤박 분말의 WHC는 Fig. 5E와 같다. 수세하지 않은 감귤박(NW) 분말(4.56~6.56 g/g)은 수세 감귤박(W) 분말(8.92~10.30 g/g)보다 유의적으로 낮은 값을 보였다( $p<0.05$ ). 이는 감귤박 분말의 팽윤 용량(Fig. 5B) 및 WAI(Fig. 5C)와 유사한 경향을 보였다. 식이섬유 소재의 팽윤 용량과 WHC는 수화 특성을 평가하는데 일반적으로 사용되며, 배변활동 원활, 위장관 독소 제거 등의 건강기능성효과도 밀접한 관련이 있다(Wang et al., 2024). 수세 감귤박(W) 분말의 높은 팽윤 용량, WAI, WHC는 수세 공정 중 감귤박이 물에 노출되면서 수용성 성분들이 용출되고 세포벽 구조가 느슨해지면서 결과적으로는 세포벽의 수분 결합 능력이 향상된 것에 따른 결과로 생각된다(Xiao et al., 2024).

유지보유능력(oil holding capacity, OHC)은 오일의 물리적 포집 능력을 뜻하며, 식품 조리 시 지방 손실을 방지할 뿐만 아니라 체내 과도한 지방 제거 및 혈중 콜레스테롤 수치 저해 효과 등 건강기능성 효과도 관련이 있다. 또한, 높은 OHC를 지닌 식이섬유는 고지방 식품과 에멀전의 안정화 및 유화능과도 밀접한 관련이 있다(Jia et al., 2019). 해동방법과 수세공정을 달리한 감귤박 분말의 OHC는 Fig. 5F

와 같다. 앞서 언급한 분석항목들과 유사하게 수세여부에 따른 유의미한 차이가 확인되어 수세하지 않은 감귤박(NW) 분말(1.57~1.78 g/g)은 수세 감귤박(W) 분말(2.09~2.30 g/g)보다 유의적으로 낮은 OHC를 나타내었다( $p<0.05$ ). 또한, 감귤박 분말의 OHC는 해동방법에 따른 차이도 확인할 수 있었는데, W-I70(2.30 g/g)에서 유의적으로 가장 높은 OHC값이 관찰되었으며( $p<0.05$ ), NW-I70(1.78 g/g) 또한 수세하지 않은 감귤박(NW) 분말 중에서 가장 높은 OHC값을 나타내었다. 이러한 결과는 침지 70℃(I70) 해동 시 감귤박에 존재하는 지용성 성분들의 용해도가 상대적으로 높아진 것에 따른 결과로 생각된다. Kurek et al. (2018)은 곡물 유래 식이섬유 추출을 위해 효소, 초음파, 효소-초음파 처리를 하였다. 이때, 초음파 추출을 통해 얻어진 식이섬유 분말은 가장 낮은 OHC값을 보였으며 이는 식이섬유의 손실에 따른 결과로 보고하였다. 이처럼 전처리 또는 추출 방법은 식이섬유 소재의 기능적 특성에 많은 영향을 주는 것으로 생각된다. 본 연구에서는 초음파(US) 해동이 수세하지 않은 감귤박(NW) 분말의 높은 팽윤 용량, WHC, OHC 및 낮은 WAI로 이어졌다.

### 공정요인에 따른 종합적 논의

본 연구에서 사용한 감귤 가공 부산물은 미생물 안전성이 확보된 원료로서 세척 및 이물질 제거를 위한 목적으로 수세 공정을 적용할 필요는 없다고 생각되며, 수세 공정은 오히려 수용성 성분의 손실로 이어져 수율 감소와 기능적 품질 저해 등 부정적인 영향을 줄 수 있는 것으로 생각된다. 또한, 해동방법은 해동속도를 제외하고는 감귤박 분말의 품질 특성에 큰 영향을 주지 않았다. 감귤박 업사이클링 원료를 대량 생산하기 위해서는 비용효율적인 측면을 고려하여 실온 해동하는 것이 가장 적합할 것으로 생각된다.

### 요약

본 연구에서는 감귤박의 전처리 조건에 따른 차이를 관찰하기 위해 해동방법(실온 해동, 초음파 해동, 침지 25℃ 해동 및 침지 70℃ 해동)과 수세여부를 달리하였으며, 이후 열풍건조 및 분쇄를 통해 얻어진 감귤박 분말의 품질 특성을 확인하였다. 냉동 감귤박 해동 시, 침지 70℃ 해동(1.72℃/min)은 실온 해동(0.08℃/min)보다 약 22배 더 빠른 해동속도를 보였으나, 초음파 해동(0.70℃/min)과 침지 25℃ 해동(0.60℃/min)간에는 유의미한 차이가 확인되지 않았다( $p>0.05$ ). 감귤박의 건조 수율은 수세하지 않은 감귤박(19.88~19.95%)이 수세 감귤박(10.18~10.86%)보다 약 2배 더 높게 나타났다. 또한, 수세하지 않은 감귤박(NW)은 수세 감귤박보다 유의적으로 높은 수분(8.23~8.87%) 및 가용성 고형분(1.10~1.13°Brix) 함량과 낮은 pH(4.20~4.26)를 나타내었다( $p<0.05$ ). 수세하지 않은 감귤박(NW) 분말은 수세 감귤

박(W) 분말보다 높은 겉보기 밀도( $0.58\sim0.63\text{g/mL}$ )와 WSI( $45.27\sim49.07\%$ )를 보였으며, 유의적으로 낮은 팽윤 용량( $6.26\sim7.45\text{ mL/g}$ ), WAI( $5.44\sim6.73\text{ g/g}$ ), WHC( $4.56\sim6.56\text{ g/g}$ ), OHC( $1.57\sim1.78\text{ g/g}$ )를 나타내었다. 결과적으로, 본 연구에서는 해동방법보다 수세여부가 감귤박 분말의 품질 특성에 많은 영향을 주는 것으로 확인되었다.

## ORCID

Hye-Yoon Yi <https://orcid.org/0000-0002-5871-6699>  
 Jung-Yeon Choi <https://orcid.org/0009-0008-9510-5855>  
 Jusang Kim <https://orcid.org/0009-0008-3847-3619>  
 Ji-Yeon Chun <https://orcid.org/0000-0002-4336-3595>

## Conflict of interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

## Acknowledgements

This work was supported by Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture and Forestry (IPET) through High Value-added Food Technology Development Program, funded by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (RS-2025-02217034). This research was also supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (RS-2025-25408732), as well as by the Regional Innovation System & Education (RISE) program through the Jeju RISE center, funded by the Ministry of Education (MOE) and the Jeju Special Self-Governing Province, Korea (2025-RISE-17-001).

## Data availability

Upon reasonable request, the datasets of this study can be available from the corresponding author.

## Authorship contribution statement

Conceptualization: Yi HY, Kim J, Chun JY.  
 Data curation: Yi HY, Choi JY.  
 Formal analysis: Yi HY, Choi JY.  
 Methodology: Yi HY, Chun JY.  
 Software: Yi HY, Choi JY.  
 Validation: Yi HY, Choi JY.  
 Investigation: Yi HY, Choi JY.

Writing - original draft: Yi HY, Choi JY.

Writing - review & editing: Yi HY, Choi JY, Kim J, Chun JY.

## Ethics approval

Not applicable.

## References

- Choi EJ, Park HW, Chung YB, Kim JS, Park SH, Chun HH. 2017. Effect of supercooling on the storage stability of rapidly frozen-thawed pork loins. *Food Sci. Preserv.* 24: 168-180.
- Choi JY, Kim J, Kim J, Jeong S, Gwak DH, Kang S, Han SJ, Kim HJ, Moon KD. 2022. Quality characteristics of dried onion and garlic slices according to thermal and nonthermal treatment methods. *Food Sci. Preserv.* 29: 34-48.
- DATA (Korea Public Data Portal). Available from: <https://www.data.go.kr/data/15030202/fileData.do>. Accessed Nov. 8, 2025.
- Farahnak R, Nourani M, Riahi E. 2021. Ultrasound thawing of mushroom (*Agaricus bisporus*): effects on thawing rate, protein denaturation and some physical properties. *LWT-Food Sci. Technol.* 151: 112150.
- Han JH, Lee SA, Kim DR, Chun JY. 2021. Physicochemical properties of various commercial dried tangerine peel tea products. *Food Eng. Prog.* 25: 221-227.
- Im JH, Nam JH, Ko AR, Jin HJ, Kim DR, Kim CS, Chun JY. 2022. Different blanching and thawing methods affect the qualities of potatoes and carrots: a study done at Jeju Island. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 51: 600-610.
- Jeong EJ, Cha YJ. 2012. Reduction in residual pesticides and quercetin yields in onion peel extracts by washing. *J. Life Sci.* 22: 1665-1671.
- Jeong KS. 2011. Extraction characteristics of soluble solid from *Rumex crispus* (curled dock) Roots. *J. Environ. Sci. Int.* 20: 1265-1272.
- Jia M, Chen J, Liu X, Xie M, Nie SP, Chen Y, Xie JH, Yu Q. 2019. Structural characteristics and functional properties of soluble dietary fiber from defatted rice bran obtained through *Trichoderma viride* fermentation. *Food Hydrocolloids.* 94: 468-474.
- Jo YJ, Jo YJ, Lee JK, Joo JI. 2024. Quality characteristics of ginger and ginger pomace powder according to pretreatment methods. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 37: 180-188.
- Jung SA, Shin GH, Yoon JY. 2021. Quality characteristics of yuja powder processed by different pretreatment and drying

- methods. Culi. Sci. Hos. Res. 27: 134-141.
- Kim G, Hwang Y, Lee S. 2017. A study of dispersion characteristics of sunsik using fluidized-bed granulator. Food Eng. Prog. 21: 267-272.
- Kim JY, Bae YM, Hyun JE, Kim EM, Kim JC, Lee SY. 2017. Microbiological quality of dried and powdered foods stored at various relative humidities. J. East Asian Soc. Dietary Life. 27: 576-582.
- Kim JY, Hwang IG, Kim MJ, Choe JS, Im PR, Kim MN, Choi AJ. 2024. Enhancement of drying efficiency and analysis of functional compounds for industrialization of citrus by-product. J. Korean Soc. Food Sci. Nutr. 53: 734-742.
- Kowalska H, Marzec A, Kowalska J, Ciurzyńska A, Czajkowska K, Cichowska J, Rybak K, Lenart A. 2017. Osmotic dehydration of honeoye strawberries in solutions enriched with natural bioactive molecules. LWT-Food Sci. Technol. 85: 500-505.
- Kurek MA, Karp S, Wyrwicz J, Niu Y. 2018. Physicochemical properties of dietary fibers extracted from gluten-free sources: quinoa (*Chenopodium quinoa*), amaranth (*Amaranthus caudatus*) and millet (*Panicum miliaceum*). Food Hydrocolloids. 85: 321-330.
- Lee SA, Shim DH, Um HS, Park IJ, Lee GM, Shin JK. 2023. Quality characteristics of dried burdock chips under various pre-treatment conditions. J. Food Sci. Technol. 55: 627-633.
- Lim MJ, Hong JH. 2021. Physicochemical properties and antioxidant activities of pray-dried powder from safflower extract. Food Sci. Preserv. 28: 218-230.
- Mahrouz M, Lacroix M, D'Aprano G, Oufedjikh H, Boubekri C, Gagnon M. 2002. Effect of  $\gamma$ -irradiation combined with washing and waxing treatment on physicochemical properties, vitamin C, and organoleptic quality of *Citrus clementina* Hort. ex. Tanaka. J. Agric. Food Chem. 50: 7271-7276.
- Martínez-Martí J, Panušková K, Larrea V, Bleha R, Quiles A, Hernando I. 2023. Using different physical treatments to modify the structure and improve the technofunctional properties of clementine by-products. Food Struct. 38: 100346.
- MCEE (Ministry of Climate, Energy and Environment). Available from: <https://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9%ED%8F%90%EA%B8%B0%EB%AC%BC%EA%B4%80%EB%A6%AC%EB%B2%95%EC%8B%9C%ED%96%89%EA%B7%9C%EC%B9%99>. Accessed Nov. 8, 2025.
- MinAlexander MJ, Nam KB, Lim SH, Son ES. 2023. Exploration of nutritional components, functional components and antioxidant activities of brewer's spent grain powder, red ginseng by-products and rice bran powder. J. Korea Acad. Ind. Coop. Soc. 24: 208-219.
- Perković G, Martinović J, Šelo G, Bucić Kojić A, Planinić M, Ambrus R. 2024. Characterization of grape pomace extract microcapsules: the influence of carbohydrate co-coating on the stabilization of goat whey protein as a primary coating. Foods. 13: 1346.
- RE:HARVEST. 2022. Methods for performing upcycling on by-products. Korea patent NO. 102472796.
- Shim JB, Jo YJ, Choi MJ, Min SG, Yoo SM, Chun JY. 2015. Potential combination of various freezing and thawing techniques applicable for frozen storage of mushroom (*Lentinula edodes*). Food Eng. Prog. 19: 218-225.
- Socas-Rodríguez B, Álvarez-Rivera G, Valdés A, Ibáñez E, Cifuentes A. 2021. Food by-products and food wastes: are they safe enough for their valorization?. Trends Food Sci. Technol. 114: 133-147.
- Son HL, Hwang ES. 2025. Quality characteristics and antioxidant activity of yogurt with different tomato pomace powder. J. Korean Soc. Food Sci. Nutr. 54: 462-471.
- Téllez-Morales JA, Hernández-Santo B, Rodríguez-Miranda J. 2020. Effect of ultrasound on the techno-functional properties of food components/ingredients: a review. Ultrason. Sonochem. 61: 104787.
- Wang L, Wang J, Wang J, Guo Z, Li Z, Qiu J, Wang L. 2024. Soluble and insoluble dietary fiber at different ratios: hydration characteristics, rheological properties, and ameliorative effects on constipation. Food Chem. X. 24: 101996.
- Xiao R, Qi JR, Liao JS, Wei HY, Zhuo T. 2024. Preparation of citrus fiber from lemon peel residue: effects of structure and endogenous pectin components on emulsifying properties of citrus fiber. Int. J. Biol. Macromol. 283: 137679.
- Yi HY, Jeon KH, Kim YJ, Chun JY. 2025. Effects of the cells alive system (CAS) freezing on aged hanwoo shoulder clod. Food Eng. Prog. 29: 62-71.
- Yi HY, Park JW, Yu SK, Kim DS, Chun JY. 2022. Optimization of spray drying conditions for immature *Citrus unshiu* concentrates using response surface methodology. J. Korean Soc. Food Sci. Nutr. 51: 845-854.
- Zhao X, Liu Y, Huang X, Cui C, Wang W. 2025. Enhancing functionality of citrus fibers from peel and pulp pomace via combined alkaline hydrogen peroxide and xylanase modification. Food Hydrocolloids. 168: 111526.