



Research Article

Comparison of physicochemical properties of radish powder by different drying methods using radish by-products

무 부산물을 활용한 건조방법별 무 분말의 이화학적 특성 비교

Eun Hwang Lee¹, Seong Hun Oh¹, Un Ha Mun², Seung Hyun Bae³, Change Gyu Go³, Gye Hwa Shin^{1*}
이은황¹ · 오성훈¹ · 문운하² · 배승현³ · 고창규³ · 신계화^{1*}

¹Department of Food & Nutrition, Kunsan National University, Gunsan 54150, Korea

²Sane Food, Iksan 54576, Korea

³FOODPOLIS, Korea National Food Cluster, Iksan 54576, Korea

¹국립군산대학교 식품영양학과, ²세인식품(주), ³한국식품클러스터진흥원

Abstract Radish powder was prepared using radish and by-products of radish processing by three different drying methods, such as hot air drying, freeze drying, and microwave vacuum drying. The radish powder was characterized by measuring moisture content, color change, particle size, particle shape, and antioxidant activity. The moisture contents of the standard radish powder under the hot air drying, freeze drying, and microwave vacuum drying conditions were 5.15%, 5.22%, and 4.62%, respectively, while the moisture contents of the non-standard radish powder were 5.57%, 5.51%, and 4.85%, respectively. The smallest particle size of the non-standard radish powder was $9.5 \pm 0.10 \mu\text{m}$ observed by the microwave vacuum drying, and the largest particle size of the non-standard radish powder was $12.2 \pm 0.08 \mu\text{m}$ observed by hot air drying. The DPPH and ABTS radical scavenging activities were the highest in the hot-air-dried standard radish powder of 79.0% and 83.4%, respectively, and the lowest in the microwave vacuum-dried non-standard radish powder of 50.0% and 16.7%, respectively. Therefore, when manufacturing radish powder using non-standard radish waste discarded during radish processing, freeze-drying is considered the most suitable drying method because it could minimize color change of the radish powder and show high antioxidant activity.

Keywords radish powder, hot air drying, freeze drying, microwave vacuum drying, upcycling



OPEN ACCESS

Citation: Lee EH, Oh SH, Mun UH, Bae SH, Go CG, Shin GH. Comparison of physicochemical properties of radish powder by different drying methods using radish by-products. Food Sci. Preserv., 32(5), 896-906 (2025)

Received: March 16, 2025

Revised: June 08, 2025

Accepted: June 11, 2025

*Corresponding author

Gye Hwa Shin

Tel: +82-63-469-4634

E-mail: winnie19@kunsan.ac.kr

Copyright © 2025 The Korean Society of Food Preservation. 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.

1. 서론

최근 식품 가공 후 폐기되는 농산물들로 인한 악취문제, 수질오염, 온실가스 배출 등의 환경오염 문제와 폐기물 처리시 발생하는 비용에 대한 부담이 가중됨에 따라, 폐기되는 소재를 재사용하고, 새롭고, 가치 있는 제품으로 개발하고자 하는 업사이클링(upcycling)에 많은 관심이 주목되고 있다 (Kim 등, 2024). 한편, 소비자들이 식품 선택이 환경에 미치는 영향에 대한 관심과 인식이 높아짐에 따라, 지속 가능하고 친환경적인 제품에 대한 관심도 크게 증가되고 있는 실정이다(Difonzo 등, 2022). 이러한 소비자 행동의 변화는 기능적이면서도 경제적인 업사이클링 식품 개발의 필요성을 정당화하며, 점차적으로 확산될 수 있는 힘이 되고 있다(Ufitikirezi 등, 2024). 업사이클링 식품은 일반적인 식품 생산 과정에서 발생하는 농업 부산물과 활용되지 않는 자원을 재사용하여 경제적 가치를 부여하는 과정을 의미한다. 현재 다양한 소재들이 업사이클링되고 있는데, 예를 들어, 과일 및 채소의 껍질, 씨앗, 잎과 같은 식품 부산물을 활용하여 고부가가치 식품이나 건강 기능성 제품으로 전환

하는 것이 대표적 사례이다(Witzel 등, 2023). 이러한 과정은 경제적 이익뿐만 아니라, 자원 효율성을 높이고 환경오염을 줄일 수 있는 잠재력을 가지고 있다(Sharma 등, 2023).

한편, 무(*Raphanus sativus*)는 근채류 중 아시아에서 가장 많이 이용되는 채소류 중 하나로, 영양학적으로 우수한 식재료로 알려져 있다(Coogan과 Wills, 2002). 무는 저칼로리 식품으로서 체중 관리에 유리할 뿐만 아니라, 구리, 마그네슘, 망간, 칼륨 및 비타민 B₆의 훌륭한 공급원으로서 신체 기능 유지에 중요한 역할을 한다(Gamba 등, 2021). 특히, 무의 영양 성분 중 칼슘 함량은 시금치의 4배 이상 높으며, 식이섬유 함량도 미나리보다 높아 소화기 건강 증진에 기여할 수 있다. 또한, 무에 함유된 비타민 C는 강력한 항산화제로서 세포 노화를 억제하고, 장기적인 암 예방 효과를 기대할 수 있다(Kim 등, 2015). 무의 생리 활성 대사산물 중 하나인 4-methylsulfinyl-3-butenyl isothiocyanate는 혈관 평활근 세포의 비정상적인 증식을 억제함으로써 심혈관 질환 예방에 긍정적인 영향을 미친다고 보고되었다(Banihani, 2017).

특히, 무를 활용하여 제품화 하는 식품 가공 업체는 다양하며, 무의 특성 상 규격에 맞게 가공후 여전히 영양적으로 가치 있고, 소재로써 활용이 가능함에도 불구하고, 그대로 버려지는 부분이 상당히 많은 실정이다. 이러한 버려지는 무는 폐기시 특유의 악취를 발생하고, 많은 비용이 소모되어 부담으로 작용할 수 있다. 그러므로 무와 같은 농업 부산물의 효과적인 활용을 위한 연구는 그 경제적 가치와 친환경적인 측면에서 중요한 과제이다.

무를 활용한 다양한 가공 방법 중 분말화는 유통을 용이하게 할 수 있고, 저장성 개선을 위한 중요한 공정이다. 식품을 건조하는데 활용할 수 있는 대표적인 건조 기술로는 열풍 건조, 동결 건조, 마이크로웨이브 진공 건조가 있다. 각 건조 방법은 무의 영양 성분, 물리적 특성, 기능성에 서로 다른 영향을 미칠 수 있고, 각 건조방법에 따라 장단점이 있다(Koo 등, 2019). 열풍 건조는 높은 온도에서 단시간 내에 식품의 수분을 제거하여 저장성을 크게 향상시킬 수 있으나, 세포 조직 손상과 같은 문제로 인해 제품의 품질 저하가 발생할 수 있다(Song 등, 2022). 반면, 동결 건조는 상대적으로 영양 성분과 세포 조직을 보존하는 데 탁월한 장점을 제공하지만, 비용이 많이 들고 처리 속도가 느리다는 단점이 있다. 마이크로웨이브 진공 건조는 건조 시간 단축과 동시에 식품 품질 유지를 가능하게 해주는 기술로 평가받고 있으며, 건조 과정에서의 온도 상승을 최소화하여 영양 성분 손실을 줄일 수 있다(Kim 등, 2023). 특히, 식품산업에서 규격 무와 비규격 무로 선별하는 과정에서 버려지는 비규격 무는 대량으로 폐기되어 경제적 손실과 환경오염 문제를 야기한다. 이를 해결하기 위한 업사이클링적 접근으로 부가가치를 높일 수 있는 소재의 활용과 제품 개발의 필요하다고 판단된다.

본 연구에서는 식품 가공 후 버려지는 무를 분말화 하기 위하여 서로 다른 3가지의 방식으로 건조를 시도하였다. 다양한 건조 방법이 무 분말의 영양 성분, 기능성, 물리적 특성에 미치는 영향을 비교하고 분석하였다. 특히, 연구의 주요 목적은 규격 무와 비규격 무를 건조 방법을 달리하여 각각 무 분말의 항산화 특성 변화, 색도, 입자의 형태적 특성 변화, 분말의 수용화 정도에 어떠한 영향을 미치는지를 관찰하였다. 이를 통해 무와 같은 농산물 부산물의 업사이클링 가능성을 평가하고, 궁극적으로는 자원 효율성을 높이고 환경 보호에 기여하는 식품 자원 활용 방안을 제시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 실험에서 사용된 주재료인 규격 무는 강원도 운두령에서 재배한 무를 군산 시내 마트에서 구입하여 절단하여 사용하였다. 비규격 무 시료는 (주)세인식품(Sane Food, Iksan, Korea)에서 치킨무 가공 후 폐기되는 무를 세인식품에서 제공받아서 실험에 사용하였다.

2.2. 실험 방법

2.2.1. 무 시료 준비

규격 무와 비규격 무를 깨끗하게 세척 후 두께 0.4 cm, 길이 7 cm로 일정하게 절단하였다. 일정한 크기로 절단한 무 시료는 각각 열풍건조(OCP-M600S, OCOO Co., Ltd., Boryeong, Korea), 동결건조(FD8508, Ilshin Biobase Co., Ltd., Dongducheon, Korea), 마이크로웨이브 진공건조기(V1400, Union Tech Co., Ltd., Cheonan, Korea)를 활용하여 건조하였으며, 건조 후 고속 분쇄기(RT-N081, Dawei Rd., Dali Dist, Taichung, Taiwan)를 활용하여 3분간 고속 분쇄를 진행하였다. 고속 분쇄 후 45 μ m 크기의 여과체를 사용하여 여과된 무 분말을 입자 크기 관찰에 사용하였다.

2.2.2. 열풍건조

일정한 크기의 무시료를 열풍건조기(OCP-M600S, OCOO Co., Ltd., Boryeong, Korea)를 사용하여 50°C에서 24시간 건조하였다.

2.2.3. 동결건조

일정한 크기의 무시료를 -60°C 급속동결기(ULT-387CR, GMS Co., Ltd., Yangju, Korea)를 사용하여, 24시간 동결 후 동결 건조기(FD8508, Ilshin Biobase Co., Ltd., Dongducheon, Korea)를 사용하여 건조하였다.

2.2.4. 마이크로웨이브 진공건조

일정한 크기의 무시료를 마이크로웨이브 진공건조기(V1400, Union Tech Co., Ltd., Seoul, Korea)를 이용하여 적외선 온도 50°C, 진공도를 28 torr의 조건하에 30분 동안 건조하였다.

2.3. 수분함량 측정

각 건조 방법별로 무게 변화가 없는 시점까지 시료를 건조하고, 초기 수분 함량, 건조 완료 후의 평형수분함량을 이용하여 다음과 같이 계산하고 이를 함수로 제시하였다. 평형수분함량은 선행연구를 참조하여 무게 변화가 없는 시점을 건조 기술의 특성에 따른 평형수분함량으로 설정하여 식 (1)을 이용하여 계산하였다(Shin 등, 2017).

$$\text{수분함량(\%)} = \frac{W_d}{W_i} \times 100 \quad (1)$$

여기서, W_i 는 건조 전 무게(g), W_d 는 건조 후 무게(g)를 나타낸다.

2.4. 색도 측정

무 분말의 색도는 $L=94.31$, $a=0.53$, $b=2.25$ 로 보정한 색차계(Ci6xNB, X-Rite Inc., Michigan, USA)를 이용하여 L^* 값(lightness), a^* 값(redness) 및 b^* 값(yellowness)을 측정하였다. 시료별로 3회 반복하여 측정하였으며, 색차(total color difference, ΔE)는 아래의 식 (2)를 이용하여 계산하였다(Park 등, 2020).

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)} \quad (2)$$

여기서 ΔL , Δa 및 Δb 는 표준 흰색배경 값과 각 건조 방법별 무 분말 시료 간의 차이이다.

2.5. Scanning electron microscopy(SEM)를 이용한 무 분말의 입자 형태 관찰

건조 방법별로 제조된 규격 무와 비규격 무 분말의 입자 형태 및 입자표면구조 측정은 전계방출형 주사전자현미경(FE-SEM, S-4800, Hitachi Co., Mastuda, Japan)을 이용하였다. 무 분말 시료들을 SEM stage에 올려놓고, 30초 동안 백금으로 코팅 후, 5.0 kV에서 1,000배와 3,000배의 배율로 관찰하였다.

2.6. 무 분말의 건식 및 습식 입자의 크기 관찰

서로 다른 3가지 건조 방식으로 제조된 무 분말과 수용액상에 분산시킨 시료의 평균 입자크기는 입도분석기(Mastersizer

3000, Malvern Panalytical., Co., Ltd, Seongnam, Korea)를 이용하여 건식 및 습식의 두 가지 타입의 시료를 레이저 회절법으로 분말의 입도를 측정하였다. 무분말의 평균 입자크기는 3회 반복 측정하여 평균값으로 표기하였으며, 본 연구에서 사용된 입도 측정값인 $D_v(10)$, $D_v(50)$, $D_v(90)$ 은 입도의 체적 누적 분포에서 10%, 50%, 90%에 해당하는 입자 크기를 의미하며, $D[4,3]$ 은 입자 부피 기준 평균 직경을 의미한다. 습식 시료의 경우 무 분말을 수용액상에서 관찰하기 위하여 증류수 45 mL에 5 g의 무분말을 혼합하여, 교반한 후 입도 분석기를 활용하여, 분산된 입자의 크기를 관찰하였다.

2.7. 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazil(DPPH) 라디칼 소거능 측정

무 분말 시료 1 g을 증류수 10 mL를 가하여 실온에서 4시간 동안 교반 한 후, 용해된 수용액을 이용하여 항산화능을 측정하였다. DPPH 라디칼 소거능은 Jung 등(2022)의 방법에 따라 분말시료 100 μ L를 0.004 mM의 DPPH 900 μ L에 넣고 20동안 암소에 방치하였다. 이후, 반응용액을 UV-Vis Spectrophotometer (OPTIZNE POP, Mecasys Co., Ltd., Daejeon, Korea)를 이용하여 492 nm에서 흡광도를 측정하였다. DPPH 라디칼 소거 활성은 다음 식 (3)에 의해 환산되었다.

DPPH radical scavenging activity (%) =

$$\left(1 - \frac{A_s}{A_0}\right) \times 100 \quad (3)$$

여기서, A_s 는 시료첨가구의 흡광도이며, A_0 는 시료 무첨가구의 흡광도를 나타낸다.

2.8. 2,2-Azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)(ABTS) 라디칼 소거능 측정

ABTS 라디칼 소거능은 Jung 등(2022)의 방법에 따라 7 mM의 ABTS와 2.4 mM potassium persulfate를 1:1로 혼합한 후 암소에서 24시간 방치하여 라디칼을 유도하였다. 시료 측정 전 라디칼 용액을 734 nm에서 흡광도가 0.7 ± 0.01 이 되도록 희석하여 사용하였다. 희석된 ABTS 라디칼 용액 2.7 mL와 시료 0.3 mL를 혼합하여 732 nm에서 흡광도를 측정하였다. 결과 값은 아래의 식 (4)에 의해 나타내었다.

ABTS radical scavenging activity(%) =

$$\left(1 - \frac{A_s}{A_0}\right) \times 100 \quad (4)$$

여기서, A_s 는 시료첨가구의 흡광도이며, A_0 는 시료 무첨가구의 흡광도를 나타낸다.

2.9. 통계 분석

본 실험의 분석 결과는 모두 3회 반복으로 실험한 평균 값이며, 각 분석결과에 대한 통계분석은 SPSS 통계프로그램 (Statistics Ver. 27.0 IBM, Chicago, IL, USA)을 이용하여 평균과 표준편차를 구하였고, ANOVA 분석을 이용해 $p < 0.05$ 수준에서 Duncan's multiple range test를 이용하여 각 시료간의 유의적인 차이를 검증하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 무 분말 시료의 특성

일반적으로 식품가공 과정에서 이용될 수 있는 무의 부위를 '규격 무'로 지칭하였고, 세척 후 절단과절에서 식품가공에 활용되지 못하고 크기가 작거나 모양이 일정하지 못해 버려지는, 그러나 충분히 가식할 수 있는 부위를 '비규격 무'라고 구분하여 실험을 진행하였다.

열풍 건조, 동결 건조 및 마이크로웨이브 진공 건조 방법에 따라 규격 무와 비규격 무 분말 시료들의 시각적 이미지를 Fig. 1에 제시하였다. 서로 다른 건조 방법에 따라 규격 무 분말과 비규격 무 분말의 입자 형태와 색상에 영향을 미치는 것으로 관찰되었다. 열풍 건조 조건에서의 규격 무 분말과 비규격 무 분말은 비교적 밝은 색상을 유지하였고, 수분이 제거되면서 표면에 상당히 많은 주름이 잡히는 것을 관찰하였다. 규격 무와 비규격 무 간의 외형의 차이는 크지 않은 것으로 관찰되었다. 동결 건조 조건에서의 규격 무 분말과 비규격 무 분말은 가장 밝고 흰색이 가까운 무 색상과 유사하게 건조되었다. 이는 동결 건조 방식의 특성상 얼어 있는 시료에서 승화의 방식으로 저온에서 수분을 제거하는 방식이기 때문에 시료의 외형에 변형을 가장 최소화할 수 있었을 것이라고 판단하였다. 마이크로웨이브 건조 조건 후 규격 무와 비규격 무 시료는 외관이 다소 황색으로 색 변화를 보여주었고, 열풍 건조와 마찬가지로, 건조 후 외형에 심하게 주름이 잡히는 등의 변화를 관찰할 수 있었다. 각각의 서로 다른 건조방법 적용시 외관은 동결건조의 경우가 외관의 변화가 가장 적은 것으로 관찰되었으며, 마이크로웨이브 진공 건조와 열풍 건조방법의 경우는 외관이 변형되고 색이 황색으로 유사한 변화가 발생한 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과로 보아 식품 건조 시 외형 변형에 온도가 중요한 요소로 작용을 한 것으로 판단되었다.

3.2. 무 분말 시료의 수분함량

서로 다른 건조방식에 따른 규격 무와 비규격 무 분말의 수

분 함량 측정 결과는 Table 1과 같다. 무 분말을 제조하기 위한 무 건조 조건을 각 건조방법별로 예비실험을 통해 수분함량을 조절하는 실험을 진행하였다. 규격 무의 경우 열풍건조와 동결 건조 방법에서는 5% 정도의 수분 함량일 때 분말화 하기 적합한 것으로 관찰되었으며, 마이크로웨이브 진공건조의 경우는 이보다 적은 4.62% 정도로 관찰되었다. 또한 비규격 무 시료의 경우에서도 열풍건조와 동결건조조건에서 5.5% 정도의 수분 함량이 분말화에 적합한 것으로 관찰되었으며, 마이크로웨이브 진공 건조방식에서의 수분함량은 4.85% 정도로 확인되었다. 전체 시료를 비교해본 결과 비규격 무의 수분함량이 규격 무의 수분함량보다 다소 높은 경향을 보여주었다. Yusof 등(2012)에 따르면 식품을 건조하여 가공하는 과정에서, 수분함량이 10% 이하이면 곰팡이 성장을 방지하기 때문에 분말 소재로서 적합한 수분함량이라고 보고되었으며, 본 실험에서도 서로 다른 각각 건조조건 모두 수분함량이 10% 미만으로 관찰되어 미생물에 대한 오염은 없을 것으로 판단되었다.

3.3. 무 분말 시료의 색도

규격 무와 비규격 무의 건조 조건을 달리하여 제조한 무 분말의 색을 색차계로 측정하여 명도(L^*), 적색도(a^*), 황색도(b^*) 값으로 나타낸 결과는 Table 2와 같다. L^* 값은 전체 무 분말 중 비규격 무를 동결 건조한 분말에서 91.15 ± 0.09 로 가장 높게 나타났으며, 규격 무를 마이크로웨이브 건조한 분말에서 82.08 ± 0.19 로 가장 낮은 값이 나타났다. 동일한 건조방법에서도 규격 무와 비규격 무 분말의 경우 L^* 값의 차이를 관찰할 수 있었다. 열풍건조와 동결건조의 경우에는 규격 무의 경우보다 비규격 무에서 L^* 값이 다소 높게 관찰되었으며, 마이크로웨이브 진공건조의 경우에는 낮은 L^* 값을 나타내었다. 한편, a^* 값의 경우는 다른 건조방법보다 규격 무를 마이크로웨이브 진공 건조한 분말에서 1.34 ± 0.02 로 높게 나타났다. 규격 무에서 열풍 건조 분말과 동결 건조 분말은 각각 0.11 ± 0.01 , -0.46 ± 0.01 의 값으로 규격 무 마이크로웨이브 진공건조 분말의 적색도에 비해 유의적으로 낮게 관찰되었다. 비규격 무 분말에서도 마이크로웨이브 건조 분말에서 a^* 값은 1.57 ± 0.01 으로 높은 적색도 값이 나타났고, 열풍 건조 분말과 동결 건조 분말에서 각각 -0.47 ± 0.01 , -0.65 ± 0.01 의 값으로 유의적으로 낮은 수치를 보여주었다. 규격 무 분말과 비규격 무 분말의 전체적인 a^* 값은 규격 무 분말에서 비규격 무 분말보다 더 높은 값을 나타내었다. 황색도를 나타내는 b^* 값은 모두 양의 값을 나타냈으며 건조 조건에 따라 유의적인 차이가 나타났다. 마이크로웨이브 진공건조 조건에서 규격 무 분말과 비규격 무 분말은 각각 13.37 ± 0.1 , 15.76 ± 0.04 의 값으로 건조 조건 중 가장 높은 값으로 나타났다. 다음으로, 열풍 건조 조건에서 규격 무 분말과 비규격 무 분말은 각각 12.33 ± 0.12 , 12.67 ± 0.05 의 값을 나타내었

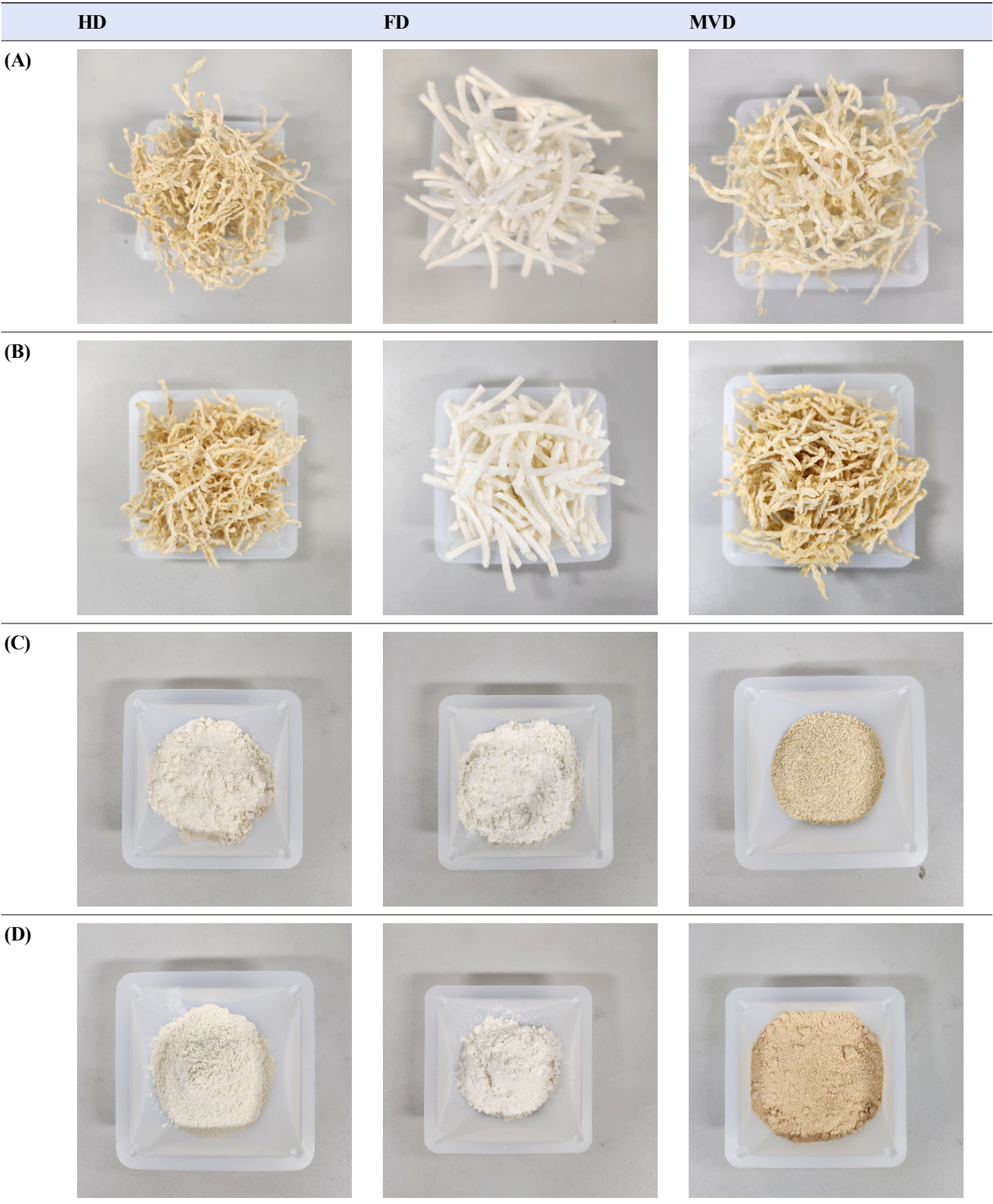


Fig. 1. Images of standard (A) and non-standard (B) dried radish samples, as well as standard (C) and non-standard (D) radish powder samples, under different drying methods. HD, hot air drying; FD, freeze drying; MVD, microwave vacuum drying.

Table 1. Moisture content of standard and non-standard radish samples according to different drying methods

Samples	Drying methods	Moisture content (%)
Standard	HD ¹⁾	5.15±0.21 ^{2)b}
	FD	5.22±0.13 ^b
	MVD	4.62±0.09 ^d
Non-standard	HD	5.57±0.09 ^a
	FD	5.51±0.05 ^a
	MVD	4.85±0.11 ^c

¹⁾HD, hot air drying; FD, freeze drying; MVD, microwave vacuum drying.

²⁾All values are mean±SD (n=3) and different superscript letters (^{a-c}) in the same column indicate significant differences (p<0.05) by Duncan's multiple range test.

고, 동결 건조 조건에서 규격 무 분말과 비규격 무 분말은 각각 7.88±0.03, 8.50±0.03의 b*값을 나타내었다. ΔE 값으로 표준 흰색 배경(L=96.36, a=-0.40, b=1.17)과 각각 시료와 총 색상 차이를 나타내었다. Kim 등(2007)에 따르면 식품 건조 시 수분 함량과 건조 온도에 따라 표면의 갈변도가 증가할 수 있다고 보고하였으며, 본 연구결과와 유사하게 온도의 증가가 시료의 색도 변화에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 또한 Kim 등(2023)에 따르면 마이크로웨이브 진공 건조한 생강과 인삼 분말은 열풍건조에 비해 더 높은 L*값을 가지고 동결건조한 농산물은 원물의 색을 가장 잘 보존한다는 연구결과를 보고하였다.

3.4. 무 분말 입자 형태 관찰

주사현미경을 이용하여 규격 무 분말과 비규격 무 분말의 건조 방법별 미세구조를 확인하여 Fig. 2에 제시하였다. 열풍 건조

조 조건의 규격 무 분말의 평균 입자 크기는 5-10 μm 크기를 나타냈다. 또 입자의 형태는 일정하지 않으며, 구형 입자 형태 및 무정형 입자 형태가 혼재되어 있는 것을 관찰하였다. 한편, 열풍 건조된 비규격 무 분말의 평균 입자 크기는 약 5-10 μm 크기를 나타냈다. 입자의 형태는 일정하지 않으며, 규격 무 열풍 건조 조건의 분말과 비교하였을 때 큰 차이를 보이지 않았다. 표면의 주름과 굴곡이 있는 층을 형성하기도 하였다. 동결 건조된 규격 무 분말의 평균 입자 크기는 약 3-8 μm 크기로 관찰되었다. 입자의 형태는 열풍 건조와 마찬가지로 일정하지 않으며, 열풍 건조와 비교하였을 때 크기가 더 작으나, 불균일한 형태의 입자로 관찰되었다. 동결 건조 조건의 비규격 무 분말의 평균 입자 크기는 약 5.5-10.5 μm 크기를 나타냈다. 입자의 형태는 일정하지 않으며, 규격 무 동결 건조 조건의 분말과 비교하였을 때 크기가 크고, 얇은 두께의 부정형의 조각형태로 관찰되었다. 마이크로웨이브 건조된 규격 무 분말의 평균 입자 크기는 약 4-11 μm 크기를 나타냈다. 입자의 형태는 일정하지 않으며, 열풍 건조 및 동결 건조와 비교하였을 때 입자의 형태는 표면이 거칠고 작은 입자들이 응집되어 있는 것으로 보였다. 마이크로웨이브 건조 조건의 비규격 무 분말의 평균 입자 크기는 약 3-8 μm 정도로 관찰되었다. 입자의 형태는 매우 불규칙하고, 일정하지 않으며, 동일한 건조 조건의 규격 무 분말과 비교하였을 때 입자의 형태의 큰 차이는 보이지 않았으나, 상대적으로 크기가 작은 것으로 관찰되었다. 서로 다른 건조 방법에 다른 입자의 형태로 볼 때 열풍 건조는 구형에 가까운 입자가 많았고, 동결건조는 얇은 막의 형태가 많이 관찰되었으며, 마이크로웨이브 진공 건조의 경우는 불규칙적인 형태의 작은 조각 형태들이 다수 관찰되었다. 또한, 입자의 표면을 자세히 관찰한 동결 건조된 무 분말 시료의 표면은 매끄러운 반면, 열풍건조와 마이크로웨이브 진공 건조된 무 분말 시료의 경우 표면에 주름이 잡히거나 매우 거친 것으로 관찰이 되었다. 이러한 현상은

Table 2. Hunter's color values of standard and non-standard radish powder samples under hot air drying (HD), freeze drying (FD), and microwave vacuum drying (MVD)

Samples	Drying methods ¹⁾	Color value			
		L*	a*	b*	ΔE
Standard	HD	88.20±0.16 ^{1)d}	0.11±0.01 ^c	12.33±0.12 ^d	13.87±0.10 ^c
	FD	90.69±0.35 ^b	-0.46±0.01 ^d	7.88±0.03 ^f	8.83±0.25 ^c
	MVD	82.02±0.19 ^c	1.34±0.02 ^b	13.37±0.1 ^b	18.26±0.09 ^b
Non-standard	HD	89.10±0.13 ^c	-0.47±0.01 ^c	12.67±0.05 ^c	13.64±0.06 ^d
	FD	91.15±0.09 ^a	-0.65±0.01 ^f	8.50±0.03 ^e	9.04±0.08 ^c
	MVD	79.58±0.07 ^f	1.57±0.01 ^a	15.76±0.04 ^a	21.67±0.03 ^a

¹⁾HD, hot air drying; FD, freeze drying; MVD, microwave vacuum drying.

²⁾All values are mean±SD (n=3) and different superscript letters (^{a-f}) in the same column indicate significant differences (p<0.05) by Duncan's multiple range test.

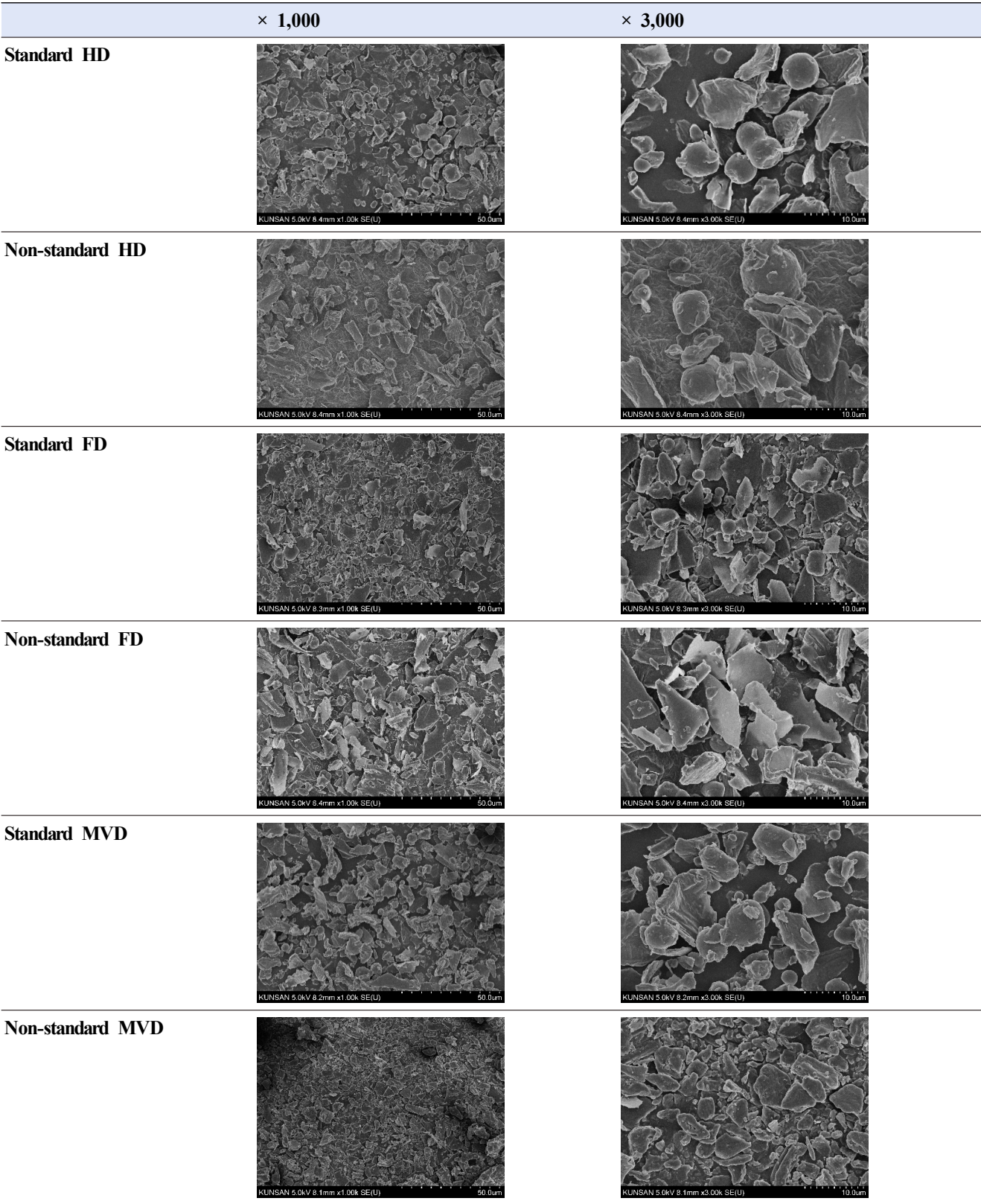


Fig. 2. Scanning electron microscope photographs of standard radish and non-standard radish samples according to drying methods. HD, hot air drying; FD, freeze drying; MVD, microwave vacuum drying.

건조 과정에서의 상대적으로 높은 온도가 수분 증발을 빠르게 유도하면서 표면에 주름 형태의 거친 표면을 형성한 것으로 판단된다(Jung 등, 2022).

3.5. 무 분말 입자크기 관찰

서로 다른 건조 방법으로 건조된 규격 무와 비규격 무 분말 시료의 입도 분석 결과를 Table 3과 Fig. 3A에 나타내었다. 입도 분석 결과, 무 분말의 평균크기는 열풍 건조 규격 무 분말 $11.7 \pm 0.1 \mu\text{m}$, 동결 건조 규격 무 분말 $10.10 \pm 0.16 \mu\text{m}$, 마이크로웨이브 건조 규격 무 분말 $9.8 \pm 0.07 \mu\text{m}$ 로 나타났고, 열풍 건조 비규격 무 분말 $12.2 \pm 0.08 \mu\text{m}$, 동결 건조 비규격 무 분말 $10.7 \pm 0.05 \mu\text{m}$, 마이크로웨이브 건조 비규격 무 분말 $9.5 \pm 0.10 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 열풍 건조와 동결 건조 조건에서는 비규격 무 분말이 규격 무 분말보다 입자 크기가 높게 관찰되었으나, 마이크로웨이브 진공 건조의 경우에는 규격 무 분말 시료의 입자가 비규격 무의 입자 크기보다 크게 관찰이 되었다. 열풍 건조 비규격 무 분말이 입자가 가장 큰 것으로 관찰되었고, 마이크로웨이브 진공 건조의 비규격 무 분말이 가장 작은 것으로 관찰되었다. 이러한 결과는 수분함량과 관련이 있다고 생각되며, 마이크로웨이브 진공 건조의 경우가 가장 수분함량이 낮게 측정되었고(Table 1), 건조가 잘 된 무건조시료는 분쇄할 경우, 더 잘게 분쇄될 수 있음을 관찰하였다. Zhang 등(2012)에 따르면 분말의 입자크기는 일반적으로 분쇄화에 따라 달라질 수 있다고 하였다.

또한, 무 분말 시료를 증류수에 분산시켰을 경우 분산되는 정도를 관찰하고, 각 조건에서 입자의 크기를 비교해 보기 위하여 입도 분석을 진행하였다(Fig. 3B). 그 결과, 동결 건조 무 분말 시료의 입자가 수용액상에서도 가장 작은 것으로 관찰되었으며, 마이크로웨이브 진공 건조의 경우는 분말 상태에서의 입자 크기보다 상당히 커지는 것으로 관찰되었다. 이 결과는 홍

미롭게도 분쇄된 후 분말의 형태와 관련이 있다고 생각된다. 동결 건조 무 분말 시료의 경우, 입자가 얇은 조각으로 수분을 흡수하였을 때 부피가 크게 증가하지 못했을 것으로 예상되나, 두꺼운 두께를 가진 입체형태로 분말화 된 열풍 건조 무 분말 시료와 마이크로웨이브 진공 건조 시료는 상대적으로 수분을 더 많이 흡수하여 크기가 상당히 커질 수 있었을 것으로 판단되었다. 한편 서로 다른 3가지 방식의 분말 시료를 증류수에 분산시켰을 경우 규격 무 분말 시료와 비규격 무 분말 시료 모두 잘 분산이 되는 것을 관찰하였다(Fig. 3C).

3.6. 무 분말의 항산화 특성

서로 다른 건조 방법으로 건조한 규격 무와 비규격 무 시료의 DPPH 라디칼 소거능은 Fig. 4A에 나타냈다. 열풍 건조 조건의 규격 무는 $79 \pm 0.98\%$ 의 상대적으로 높은 DPPH 활성을 보였으며, 동결 건조의 경우에서도 $74.54 \pm 0.74\%$ 의 높은 활성을 보였다. 그러나 마이크로웨이브 건조 조건에서 규격 무 시료는 DPPH 값이 $57.08 \pm 2.04\%$ 로 다소 낮은 것을 관찰하였다. 한편, 열풍 건조한 비규격 무 시료의 경우는 $58.56 \pm 0.74\%$, 동결 건조는 $72.32 \pm 1.18\%$, 마이크로웨이브 진공 건조는 $50.00 \pm 1.60\%$ 로 가장 낮은 것으로 관찰되었다. 결과적으로 마이크로웨이브 진공 건조 조건에서 전반적으로 낮은 DPPH 라디칼 소거능이 관찰되었으며, 특히 마이크로웨이브 진공 건조 방식으로 처리된 비규격 무의 DPPH 라디칼 소거능이 가장 낮은 것으로 관찰되었다. Hwang과 Kim(2024)의 연구결과에 따르면 돼지감자 시료의 경우 마이크로웨이브 진공 건조한 시료의 항산화활성이 열풍 건조나 동결 건조한 시료의 항산화 활성에 비해 낮은 것으로 관찰되어 본 연구결과와 유사한 결과라고 판단되었다.

ABTS 라디칼 소거능 결과는 Fig. 4B에 나타내었다. 라디칼 소거능이 가장 높게 관찰된 것은 열풍 건조 된 규격 무 시료였으며, 그 다음은 동결 건조 규격 무 시료로 나타났다. 가장

Table 3. Particle size of standard and non-standard radish powder samples under hot air drying (HD), freeze drying (FD), and microwave vacuum drying (MVD)

Samples	Drying methods	Particle size (μm)			
		Dv (10) ¹⁾	Dv (50)	Dv (90)	Span ²⁾
Standard	HD	$28.27 \pm 10.03^{a3)}$	349.00 ± 162.56^a	$1,520.00 \pm 96.44^a$	4.8 ± 1.72^b
	FD	4.89 ± 0.08^c	14.97 ± 0.21^c	73.10 ± 10.67^d	4.55 ± 0.63^b
	MVD	38.83 ± 3.35^b	132.67 ± 25.48^{bc}	658.00 ± 348.14^c	4.48 ± 1.57^b
Non-standard	HD	10.42 ± 0.77^c	120.67 ± 26.39^{bc}	$1,092.67 \pm 220.77^b$	9.03 ± 1.73^a
	FD	4.74 ± 0.03^c	14.50 ± 0.10^c	63.80 ± 3.08^d	4.07 ± 0.19^b
	MVD	41.70 ± 10.10^a	246.33 ± 44.28^{ab}	780.00 ± 106.41^{bc}	3.02 ± 0.14^b

¹⁾Dv (10), Dv (50) and Dv (90) are the equivalent volume diameters at 10%, 50% and 90% cumulative volumes, respectively.

²⁾Span, [Dv (90) - Dv (10)] / Dv (50).

³⁾All values are mean $\pm$ SD (n=3) and different superscript letters (^{a-c}) in the column indicate significant differences ($p < 0.05$) by Duncan's multiple range test.

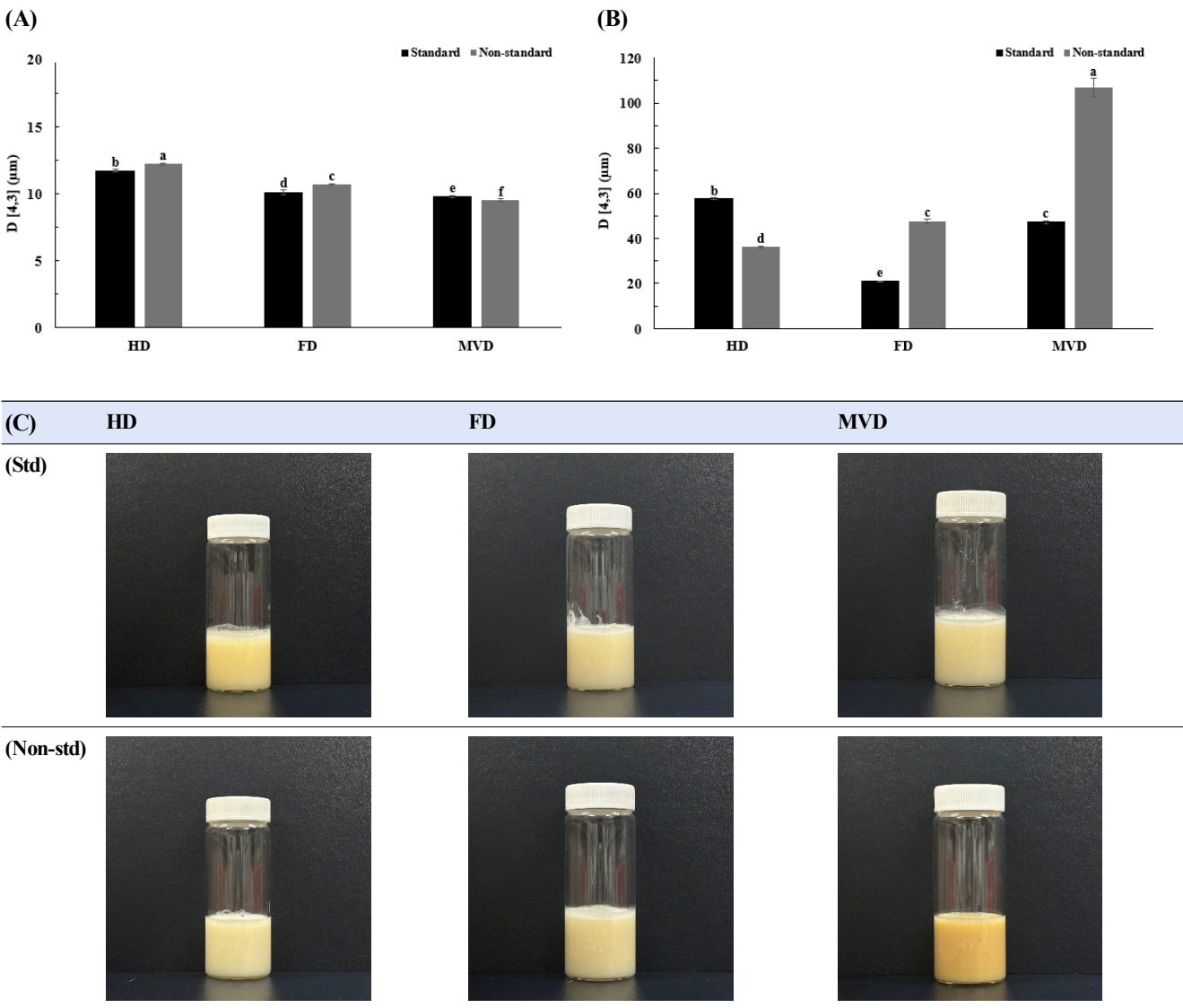


Fig. 3. Particle size of radish powders (A) and radish powder in water (B) by different drying methods, as well as dispersion images of standard and non-standard radish powder in water (C). Different superscript letters (a-f) on the bars indicate significant differences ($p<0.05$) by Duncan's multiple range test.

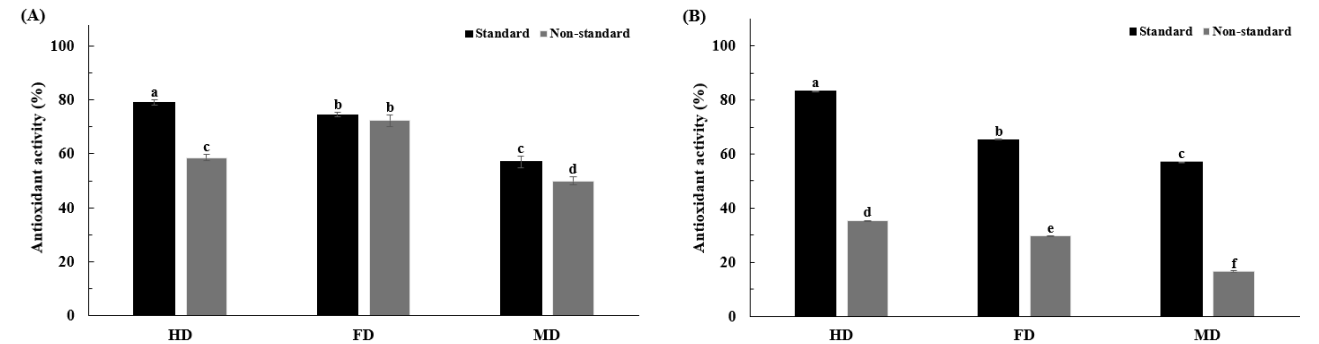


Fig. 4. Antioxidant activity DPPH (A), ABTS (B) of standard and non-standard radish powders according to drying methods. Different superscript letters (a-f) on the bars indicate significant differences ($p<0.05$) by Duncan's multiple range test.

ABTS 라디칼 소거능이 낮은 것은 마이크로웨이브 진공 건조 처리된 규격 무 시료로 관찰되었다. Youn과 Kim(2012)에 따르면, 건조방법에 따른 꾸지뽕 열매 추출물의 항산화활성 관련 연구에서도 ABTS 라디칼 소거능이 열풍건조의 값이 동결건조 시료의 소거능값보다 높은 수치를 나타내었는데, 이것은 열풍 건조 과정에서 불용성 성분들의 가용화 또는 분해되어 동결건조에 비해 추출이 용이하게 되고, 결과적으로 항산화성이 높게 관찰되었다고 보고하였다. 서로 다른 건조방법을 적용한 규격 무분말 시료의 ABTS 라디칼 소거능 관찰의 경우는 DPPH 라디칼 소거능의 결과값과 유사한 경향을 보여주었다. 한편, 비규격 무 분말시료는 열풍 건조 및 동결 건조방식에서 보다 마이크로웨이브 진공 건조 시료에서 가장 낮은 ABTS 라디칼 소거능 값을 관찰하였다. 열풍 건조와 동결건조 처리된 비규격 무 분말시료는 각각 $35.45 \pm 0.02\%$, $29.79 \pm 0.04\%$ 의 ABTS 라디칼 소거 활성을 나타내었다. 그러나 마이크로웨이브 건조 조건에서는 비규격 무 시료의 ABTS 값이 $16.7 \pm 0.26\%$ 로 눈에 띄게 감소하는 것이 관찰되었다. 전체적으로 규격 무 시료가 DPPH 라디칼 소거 활성과, ABTS 라디칼 소거 활성에서는 유의적으로 높은 값을 나타내었다. 또한, 서로 다른 건조 방법에 따라 항산화 활성 특성에 큰 차이가 있음을 관찰하였다.

한편, DPPH와 ABTS 분석 결과에서 나타난 시료 간의 차이는 두 분석법의 라디칼 특성 차이에서 기인할 수 있다고 판단된다. DPPH는 주로 지용성 항산화물질에 반응하며, ABTS는 수용성 및 지용성 모두에 반응하는 것으로 보고되어 있다. 무는 무의 뿌리(roots)와 무의 잎(leaves) 부분으로 가식부위를 나눌 수 있는데, 두 부위에 모두 다양한 항산화 물질을 함유하고 있는 것으로 보고되었다(Floegel 등, 2011). 특히 본 연구에서 활용한 무의 뿌리에는 지용성 항산화물질 sulforaphene, terpenes and derivatives와 수용성 항산화물질을 모두 함유하고 있는데, 건조과정에서 수용성 항산화 물질은 열이나 가공처리 중에 노출되어 손실이 되었을 것으로 판단되며, 지용성 항산화물질은 건조과정에서 크게 손실을 입지 않아서 DPPH 테스트에서 활성이 ABTS에서 보다 높게 나온 것으로 판단된다(Floegel 등, 2011).

4. 요약

본 연구는 산업 현장에서 크기와 형태 때문에 버려지는 비규격 무가 많아, 이를 활용할 수 있는 방법을 모색하기 위하여, 일반 무와 식품 가공 후 폐기되는 무를 규격 무와 비규격 무로 구분하여, 열풍건조, 동결건조, 마이크로웨이브 진공건조 3가지 방식으로 건조하여 분말화하고 이화학적 특성을 관찰하였다. 무 분말의 색도를 분석한 결과, 동결건조한 비규격 무 분말에서 L* 값이 가장 높았고, 마이크로웨이브 건조한 규격 무 분말에서 가장 낮았다. a* 값은 마이크로웨이브 진공건조한 규격

무 분말이, b* 값은 마이크로웨이브 진공건조한 비규격 무 분말이 가장 높았다. 수분함량은 마이크로웨이브 진공건조 분말이 가장 낮았으며, 입자 크기는 마이크로웨이브 진공건조한 비규격 무가 가장 작았으며, 열풍건조 비규격 무가 가장 큰 것으로 관찰되었다. SEM 관찰 결과, 마이크로웨이브 진공건조 분말은 주름진 표면과 작은 입자를 보였고, 동결건조 분말은 얇은 조각 형태로 관찰되었다. 규격 무와 비규격 무 모든 분말시료는 증류수에 잘 분산되었다. 항산화 활성은 열풍건조 규격 무 분말이 가장 높았고, 마이크로웨이브 진공건조 비규격 무 분말이 가장 낮았다. 무 분말은 색도 유지와 항산화 활성 면에서 기능성 소재로 활용 가능하며, 특히 동결건조가 색 변화 최소화하고 높은 DPPH 활성을 보여 식품산업에서 천연 항산화제, 건강기능식품 원료, 색소, 천연 조미료 및 즉석 분말 조리제품 등 다양한 용도로 활용이 가능할 수 있다. 비규격 무의 업사이클링은 식품 부산물 자원화와 부가가치 창출을 위한 지속 가능한 방안이라고 판단된다.

Funding

This study was supported by the Korea Food Industry Cluster Promotion Agency in 2024.

Acknowledgements

This research was conducted with the support of the 2024 Joint Technology Development Project of the Korea Food Industry Cluster Promotion Agency. We are grateful for their support.

Conflict of interests

The authors declare no potential conflicts of interest.

Author contributions

Conceptualization: Mun UH, Shin GH. Methodology: Lee EH, Oh SH, Mun UH, Shin GH. Formal analysis: Bae SH, Go CG. Validation: Lee EH, Shin GH. Writing - original draft: Lee EH. Writing - review & editing: Shin GH. Funding acquisition: Shin GH.

Ethics approval

This article does not require IRB/IACUC approval because there are no human and animal participants.

ORCID

Eun Hwang Lee (First author)

<https://orcid.org/0009-0004-2937-3684>

Seong Hun Oh
<https://orcid.org/0009-0003-2382-2277>
 Un Ha Mun
<https://orcid.org/0009-0000-5761-9590>
 Seung Hyun Bae
<https://orcid.org/0009-0003-3753-9800>
 Change Gyu Go
<https://orcid.org/0009-0008-2751-2918>
 Gye Hwa Shin (Corresponding author)
<https://orcid.org/0000-0002-1891-9053>

References

- Aschemann-Witzel J, Asioli D, Banovic M, Perito MA, Peschel AO, Stancu V. Defining upcycled food: The dual role of upcycling in reducing food loss and waste. *Trends Food Sci Technol*, 132, 132-137 (2023)
- Banihani SA. Radish (*Raphanus sativus*) and diabetes. *Nutrients*, 9, 1014 (2017)
- Coogan RC, Wills RBH. Effect of drying and salting on the flavour compound of Asian white radish. *Food Chem*, 77, 305-307 (2002)
- Difonzo G, Grassi S, Paciulli M. Upcycling of agro-food chain by-products to obtain high-value-added foods. *Foods*, 11, 2043 (2022)
- Floegel A, Kim DO, Chung SJ, Koo SI, Chun OK. Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods. *J Food Compos Anal*, 24, 1043-1048 (2011)
- Gamba M, Asllanaj E, Raguindin PF, Glisic M, Franco OH, Minder B, Bussler W, Metzger B, Kern H, Muka T. Nutritional and phytochemical characterization of radish (*Raphanus sativus*): A systematic review. *Trends Food Sci Technol*, 113, 205-218 (2021)
- Hwang ES, Kim SY. Quality characteristics, antioxidant activity, and acrylamide content of *Jerusalem artichokes* according to the drying method used. *J Korean Soc Food Sci Nutr*, 53, 824-831 (2024)
- Jung SA, Yoon JY, Kim JT, Shin GH. Comparison of physicochemical properties and flavor content of yuja (*Citrus junos*) powders prepared by different homogenization and drying methods. *Korean J Food Sci Preserv*, 29, 59-69 (2022)
- Kim DI, Yeo SS, Shin EC, Song HH, Kim KH, Lee HY, Jeong YH, Kim MS, Lee YS. Effect of microwave vacuum drying on the quality characteristics of garlic and Chili pepper powder. *J Korean Soc Food Sci Nutr*, 47, 1044-1050 (2018)
- Kim HR, Seog EJ, Lee JH, Rhim JW. Physicochemical properties of onion powder as influenced by drying methods. *J Korean Soc Food Sci Nutr*, 36, 342-347 (2007)
- Kim JN, Park YH, Noh YY, Kim Y, Kang MS. Quality characteristics of dried shredded radish and stir-fry dried shredded radish by different drying methods. *Korean J Food Cook Sci*, 31, 596-604 (2015)
- Kim JY, Hwang IG, Kim MJ, Choe JS, Im PR, Kim MA, Choi AJ. Correction to: Enhancement of drying efficiency and analysis of functional compounds for industrialization of citrus by-product. *J Korean Soc Food Sci Nutr*, 53, 981-981 (2024)
- Kim KH, Park SS, Kim DI, Hong KB, Shin EC, Kim IY, Lee YS. Physicochemical and sensory characteristics of ginger and ginseng powder produced by hot air, freeze, or microwave vacuum drying. *J Korean Soc Food Sci Nutr*, 52, 922-928 (2023)
- Koo HS, Lee JE, Jung HA. Storage and sensory characteristics according to drying methods of dried oriental melon. *Korean J Food Sci Preserv*, 26, 606-614 (2019)
- Park SJ, Choi YJ, Lee MJ, Seo HY, Yun YR, Min Sg, Lee HJ, Lee JH, Kang SR, Kim HJ, Park SH. Quality characteristics of radish pickle with natural preservatives. *J Korean Soc Food Cult*, 35, 577-581 (2020)
- Sharma CT, Deutsch JM. Upcycling in the context of biotechnology-based solutions for food quality, loss, and consumer perception. *Curr Opin Biotechnol*, 81, 102920 (2023)
- Shin IS, Park SH. Rapid production of dried sea cucumber (*Stichopus japonicus*) using infrared assisted freeze drying (IRAFD). *Food Eng Prog*, 24, 292-298 (2020)
- Song JM, Hwang Y, Cho YS, Jang HW, Kim YS. Optimization of drying conditions for steamed-dried sweet pumpkin products using response surface methodology. *Korean J Food Preserv*, 29, 440-454 (2022)
- Youn KS, Kim JW. Antioxidant and angiotensin converting enzyme i inhibitory activities of extracts from mulberry (*Cudrania tricuspidata*) fruit subjected to different drying methods. *J Korean Soc Food Sci Nut*, 41, 1388-1394 (2012)
- Youn SJ, Rhee JK, Yoo SH, Chung MS, Lee HJ. Total phenolics contents, total flavonoids contents and antioxidant capacities of commercially available korean domestic and foreign intermediate food materials. *Microbiol Biotechnol Lett*, 44, 278-284 (2016)
- Yusof YA, Mohd Salleh FS, Chin NL, Talib RA. The drying and tableting of pitaya powder. *J Food Process Eng*, 35, 763-771 (2012)
- Zhang ZP, Song HG, Peng Z, Luo QN, Ming JA, Zhao GH. Characterization of stipe and cap powders of mushroom (*Lentinus edodes*) prepared by different grinding methods. *J Food Eng*, 109, 406-413 (2012)