



물리적 처리가 국산 다래 벌화분의 형태, 영양성분 및 폴리페놀 함량에 미치는 영향

문시원, 이샘결, 박신영¹, 박범석¹, 임푸름, 최홍민, 김선미, 이문선, 박수원, 손윤곤, 우순옥*

농촌진흥청 국립농업과학원 농업생물부, ¹농촌진흥청 국립식량과학원 식품자원개발부

Effects of Physical Treatments on the Morphology, Nutritional Composition and Phenolic Content of *Actinidia arguta* Bee Pollen

Si Won Moon, Samgyul Lee, Shin-Young Park¹, Beom-Seok Park¹, Pureum Im, Hong Min Choi, Seonmi Kim, Munseon Lee, Suwon Park, Yun Gon Son and Soon Ok Woo*

Department of Agricultural Biology, National Institute of Agricultural Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Republic of Korea

¹Department of Food Sciences, National Institute of Crop and Food Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Republic of Korea

Abstract

Bee pollen is a valuable apicultural product rich in nutrients and bioactive compounds, although its utilization may be limited by its rigid pollen wall structure. This study investigated the effects of freeze-drying, cryogenic grinding, and high-pressure processing on Korean *Actinidia*-derived bee pollen. Physical treatments partially altered the pollen wall structure while largely maintaining its overall morphology and basic nutritional composition. Total amino acid composition remained relatively stable, whereas free amino acids, extractable protein, and total phenolic content showed treatment-dependent changes. Compared with the untreated control, cryogenic grinding at -70°C increased total free amino acid content by 30.4%, while high-pressure processing increased extractable protein and total phenolic contents by 98.8% and 24.0%, respectively. These findings suggest that physical treatments may enhance the utilization potential of Korean *Actinidia*-derived bee pollen without substantially affecting its basic nutritional composition.

Keywords

Actinidia bee pollen, Physical treatment, High-Pressure processing, Amino acid, Phenolic content

서 론

벌화분(bee pollen)은 꿀벌이 식물의 꽃에서 채집한 꽃가루에 꿀, 타액 및 효소 등을 혼합하여 경단 형태로 운반하는 양봉산물로, 꿀벌 유충과 성충의 주요 단백질 공급원이자 로열젤리 생산에 필요한 영양원으로 알려져 있다(LeBlanc *et al.*, 2009). 벌화분은 단백질, 지질, 탄수화물,

비타민 및 무기질 등 다양한 영양성분을 함유하고 있으며, 필수아미노산, 폴리페놀 및 플라보노이드와 같은 생리활성 물질도 포함하고 있어 영양·기능성 식품소재로 주목받고 있다(Serra Bonvehí and Escola Jorda, 1997; Feás *et al.*, 2012; Khalifa *et al.*, 2021).

국내에서 생산되는 벌화분 중 다래화분은 다래나무(*Actinidia arguta*)에서 유래한 화분으로, 국내 양봉산물

중 활용 가능성이 높은 소재 중 하나이다. 다래화분 및 국내산 벌화분에 대해서는 형태학적 특성과 향산화 활성 (Hong *et al.*, 2014, 2015), 항혈전 활성 (Pyo *et al.*, 2020), 전립선암 세포 증식 억제 효과 (Lee *et al.*, 2023), 항염증 활성 (Kim *et al.*, 2024) 등이 보고되어 식품 및 기능성 소재로서의 개발 가능성이 제시된 바 있다. 그러나 벌화분은 식물 유래 꽃가루를 기반으로 하므로 식품소재화 과정에서 알러지 유발 가능성을 고려해야 하며, 동시에 견고한 화분벽 구조로 인해 내부 영양·기능성 성분의 이용성이 제한될 수 있다.

화분벽은 외피(exine)와 내피(intine)로 이루어진 이중 구조를 가지며, 외피는 생체 고분자인 스포로폴레닌(sporopollenin)을 주요 구성성분으로 한다. 이러한 구조적 특성은 화분벽을 외부 환경으로부터 보호하는 역할을 하지만, 식품소재 관점에서는 내부 단백질, 아미노산, 지질 및 생리활성 성분의 추출성과 소화이용성을 제한하는 요인이 될 수 있다(Roulston and Cane, 2000; Blackmore *et al.*, 2010). 따라서 벌화분을 식품 및 기능성 소재로 활용하기 위해서는 화분벽 구조와 내부 성분의 추출 특성을 함께 고려한 전처리 기술 평가가 필요하다.

화분벽의 구조를 변화시키고 내부 성분의 이용성을 높이기 위해 초음파, 고전단 및 고압처리 등 다양한 물리적 전처리 방법이 연구되어 왔다. 이러한 처리는 화분 벽의 파괴를 유도하여 영양성분의 방출과 소화 특성을 개선할 수 있으며(Wu *et al.*, 2021), 특히 고압처리는 화학적 첨가 없이 화분의 구조와 단백질 추출성 및 품질 특성에 영향을 줄 수 있는 것으로 보고되었다(Anjos *et al.*, 2023). 따라서 물리적 처리에 따른 화분의 구조적 변화와 영양·기능성 성분의 변화를 종합적으로 평가할 필요가 있다.

그러나 국산 다래화분을 대상으로 동결건조, 동결분쇄 및 고압처리와 같은 서로 다른 물리적 처리조건이 화분의 형태적 구조와 영양·기능성 특성에 미치는 영향을 종합적으로 비교한 연구는 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 국산 다래화분에 물리적 처리를 적용하고, SEM을 이용한 형태적 변화와 일반성분, 구성 및 유리아미노산, 추출성 단백질 및 총 폴리페놀 함량을 비교하였다. 이를 통해 처리 방식에 따른 다래화분의 구조적 특성과 영양성분의 이용성 및 생리활성 성분의 변화를 평가하고, 식품소재화를 위한 물리적 전처리 조건 선정의 기초자료를 마련하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 다래 벌화분의 물리적 처리

본 실험에서는 국내 농가에서 수확되어 유통되고 있는 2025년산 다래 벌화분을 구매하여 사용하였다. 구매한 벌화분에서 베이지색 화분을 분리한 후 ITS2 영역의 유전자 분석을 수행한 결과, 다래속(*Actinidia* sp.) 및 다래나무(*Actinidia arguta*)가 주요 식물 기원으로 확인되었다. 이에 따라 본 연구에서는 해당 시료를 다래속 유래 벌화분(*Actinidia*-derived bee pollen)으로 간주하고 시험재료로 사용하였다.

물리적 처리는 동결건조, 동결분쇄 및 고압처리의 3가지 방식으로 수행하였다. 무처리 다래 벌화분은 KWP(Korean kiwi bee pollen)로 표기하였고, 동결건조 처리구는 KWP-FD, -20°C 동결분쇄 처리구는 KWP-CM20, -70°C 동결분쇄 처리구는 KWP-CM70, 고압처리구는 KWP-HPP로 표기하였다(Table 1). 동결분쇄 처리구는 벌화분의 최종 수분함량을 10%로 조정한 후 -20°C 또는 -70°C 에서 8시간 동결하고 분쇄하였으며, 이후 열풍건조하였다. 고압처리구는 벌화분을 진공 포장한 후 450 MPa에서 10분간 처리하였다. 각 처리 시료는 국립식량과학원 식품자원개발부에서 동일한 원료를 대상으로 가공 처리한 후 제공받아 시험에 사용하였다.

2. 주사전자현미경을 이용한 형태적 특성 분석

물리적 처리에 따른 벌화분의 형태 및 표면 구조 변화를 확인하기 위해 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)을 이용하였다. 개별 화분벽의 관찰을 위해 시

Table 1. Physical treatment conditions of *Actinidia* derived bee pollen

No.	Sample ID	Abbreviation	Treatmentcondition
1	KWP-Control	KWP	Untreated
2	KWP-FD	FD	Freeze-drying
3	KWP-CM20	CM20	Cryogenic grinding 1 (-20°C freezing)
4	KWP-CM70	CM70	Cryogenic grinding 2 (-70°C freezing)
5	KWP-HPP	HPP	High-pressureprocessing (450 MPa, 10 min)

료를 증류수로 수세하여 화분립을 분산시킨 후 건조 오븐에서 40°C로 24시간 건조하였다. 실체현미경(Nikon SMZ 645, Nikon Instruments Inc., Tokyo, Japan)을 이용하여 화분립을 선별하고, 카본 테이프가 부착된 SEM 시료대에 고정하였다. 이후 스퍼터 코터(Quorum SC7620, Quorum, East Sussex, England)를 이용하여 15초씩 3회 백금 코팅한 후 SEM(Carl Zeiss GeminiSEM 300, Zeiss, Jena, Germany)으로 화분의 형태와 표면 구조를 관찰하였다. 시료 준비 및 분석은 기존 화분 형태 분석 연구 방법을 참고하여 수행하였다(Lee *et al.*, 2025).

3. 일반성분 분석

다래 별화분의 일반성분은 식품공전 일반시험법에 따라 분석하였다(식품의약품안전처, 2024). 수분함량은 105°C 상압가열건조법으로 측정하였고, 회분은 550°C 직접회화법으로 분석하였다. 조지방은 Soxhlet 추출법으로 측정하였으며, 조단백질은 Kjeldahl법으로 측정한 총 질소 함량에 질소 환산계수 6.25를 곱하여 산출하였다. 탄수화물 함량은 100에서 수분, 회분, 조지방 및 조단백질 함량을 뺀 값으로 계산하였다.

4. 구성아미노산 함량 분석

다래 별화분의 구성아미노산 함량은 식품공전 일반시험법에 기반하여 분석하였다(식품의약품안전처, 2024). 산 안정성 아미노산은 6 N HCl을 이용하여 가수분해하였고, 함황아미노산은 과개미산으로 산화한 후 6 N HCl로 가수분해하였다. 가수분해된 시료는 자동아미노산분석기(LA8080, Hitachi High-Tech Corporation, Tokyo, Japan)를 이용하여 분석하였다. 분리된 아미노산은 ninhydrin 시약(FUJIFILM Wako Pure Chemical Corporation, Osaka, Japan)과 반응시킨 후 570 및 440 nm에서 검출하여 정량하였다.

5. 유리아미노산 조성 분석

다래 별화분의 유리아미노산 분석을 위해 시료 0.2 g을 정밀히 취한 후 5% trichloroacetic acid (TCA)를 첨가하여 최종 시료 농도가 50,000 ppm이 되도록 조정하였다. 혼합액을 30분간 진탕한 후 13,000 rpm에서 15분간 원심분리하여 상등액을 회수하였다. 회수한 상등액은 0.22 µm syringe

filter로 여과한 후 분석에 사용하였다. 검량선의 정량범위를 초과하는 아미노산의 정량을 위해 상등액을 0.02 N HCl로 8배 희석하여 추가 분석하였다. 유리아미노산의 분리 및 정량은 구성아미노산 분석과 동일한 자동아미노산분석기 및 검출조건으로 수행하였다.

6. 추출성 단백질 함량 분석

물리적 처리에 따른 다래 별화분의 추출성 단백질 함량을 비교하기 위해 시료의 지질을 제거한 후 1% SDS를 이용하여 단백질을 추출하고 BCA법으로 정량하였다. 처리 전·후 별화분 50 mg에 70% ethanol (SK chemicals, Seongnam, Korea) 1 mL를 가하여 혼합하고 4°C에서 10분간 방치한 후 10,000 rpm에서 5분간 원심분리하여 상등액을 제거하였다. 이후 100% ethanol 1 mL를 가하여 동일한 과정을 2회 반복하고, pellet을 15분간 건조하였다. 탈지된 시료에 1% SDS 500 µL를 가하여 균질화한 후 20,000 rpm에서 10분간 2회 원심분리하여 상등액을 회수하였다. 단백질 함량은 Pierce™ BCA Protein Assay Kit (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA)를 이용하여 측정하였으며, bovine serum albumin을 표준물질로 작성한 검량선을 이용하여 산출하였다. 흡광도는 SpectraMax M2 (Molecular Devices, San Jose, CA, USA)를 이용하여 562 nm에서 측정하였고, 결과는 시료 g당 SDS 추출성 단백질 함량으로 나타내었다.

7. 총 폴리페놀 함량 분석

다래 별화분의 총 폴리페놀 함량은 Moon *et al.* (2024)의 Folin-Ciocalteu법을 변형하여 측정하였다. 시료 0.5 g에 70% ethanol 5 mL를 가하여 12시간 동안 교반 추출한 후, 4°C에서 정치하여 얻은 상등액을 분석에 사용하였다. 추출물 40 µL에 Folin-Ciocalteu's phenol reagent (Sigma Co., St. Louis, MO, USA) 40 µL와 증류수 360 µL를 가하여 혼합한 후 실온에서 5분간 반응시켰다. 이후 7% sodium carbonate 400 µL와 증류수 160 µL를 첨가하여 실온에서 90분간 반응시켰다. 반응액은 13,000 rpm에서 5분간 원심분리한 후 상등액의 흡광도를 725 nm에서 측정하였다. gallic acid를 표준물질로 작성한 검량선을 이용하여 총 폴리페놀 함량을 mg gallic acid equivalents (GAE)/g으로 나타내었다.

8. 통계처리

모든 정량 분석은 각 처리구별로 독립적인 3개의 생물학적 반복 시료 (biological replicates, $n=3$)를 사용하여 수행하였으며, 결과는 평균과 표준편차 (mean $\pm$ SD)로 나타내었다. 처리구 간 통계적 비교가 필요한 항목은 일원분산분석 (one-way analysis of variance, one-way ANOVA)을 실시한 후 Tukey's multiple comparison test를 이용하여 평균 간 유의성을 검정하였다. 통계적 유의수준은 $p<0.05$ 로 설정하였다. 유리아미노산 조성의 처리구별 변화는 heatmap을 이용하여 시각화하였다.

결과 및 고찰

1. 물리적 처리에 따른 다래화분의 미세구조 변화

주사전자현미경을 이용하여 물리적 처리에 따른 다래화분의 형태 및 표면 구조를 관찰한 결과, 처리 방법에 따라 화분립 외벽의 형태적 차이가 확인되었다 (Fig. 1). 무처리구(KWP)에서는 선행 연구에서 보고된 *Actinidia arguta* 화분의 형태적 특징과 유사하게 원형 또는 타원형의 화분립과 발아구가 관찰되었다 (Qin *et al.*, 2025). 동결건조 처리

구(FD)는 무처리구와 비교했을 때 뚜렷한 외벽 손상이 크지 않았으며, 전반적으로 화분립의 형태가 유지되는 양상을 보였다. 반면 동결분쇄 처리구에서는 일부 화분립에서 외벽 균열과 파열이 관찰되었다. 특히 -70°C 동결분쇄 처리구(CM70)에서 -20°C 동결분쇄 처리구(CM20)보다 손상이 뚜렷하게 관찰되었다. 고압처리구(HPP)에서도 일부 화분립의 변형, 함몰 및 파열이 확인되었다.

CM70과 HPP에서 관찰된 외벽 손상은 각각 동결분쇄 과정의 기계적 충격과 고압처리에 따른 압축력에 의해 화분벽의 구조적 완전성이 저하되어 미세균열 및 변형이 유도된 결과로 해석할 수 있다. 이러한 미세구조 변화는 화분 내부 성분의 추출성에 영향을 미칠 수 있으며, 화분벽의 구조를 변화시켜 내부 성분의 이용성을 높이기 위한 초음파 및 고압처리 등의 물리적 전처리가 보고된 바 있다 (Wu *et al.*, 2019). 따라서 본 연구에서 관찰된 미세구조 변화는 이후 확인된 유리아미노산 및 추출성 단백질 함량 변화에 일부 영향을 미쳤을 가능성이 있다.

2. 물리적 처리 후 다래화분의 일반성분 조성 변화

물리적 처리에 따른 다래화분의 일반성분 조성은 Table 2와 같다. 무처리구(KWP)의 수분함량은 9.28%였으며, 물리적 처리 후 2.83~4.44% 범위로 감소하였다. 이는 동결건

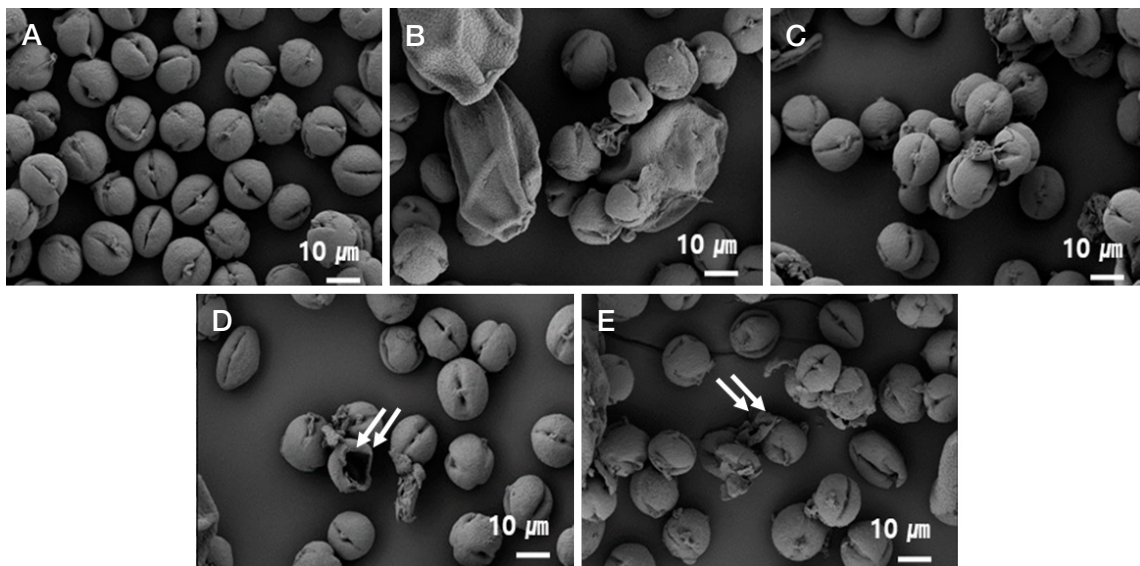


Fig. 1. Morphological characteristics of *Actinidia*-derived bee pollen subjected to different physical treatments. SEM images of (A) KWP, (B) FD, (C) CM20, (D) CM70, and (E) HPP at the same magnification. White arrows indicate pollen grains showing disrupted or deformed outer wall structures.

조, 동결분쇄 후 건조 과정과 고압처리 시료의 가공 과정에 따른 수분 감소에 기인한 것으로 판단된다. 조단백질과 회분 함량은 각각 27.81~28.45% 및 3.00~3.06% 범위로 나타나, 처리 전후 비교적 유사한 수준을 보였다. 이는 물리적 처리 후에도 다래화분의 주요 단백질 및 무기질 조성이 전반적으로 유지되었음을 보여준다. 반면 조지방 함량은 무처리구의 0.76%에서 처리후 0.99~2.25%로 증가하였으며, HPP 처리구에서 2.25%로 가장 높은 값을 보였다. 건물 기준으로 환산한 경우에도 HPP 처리구의 조지방 함량이 상대적으로 높게 나타나, 이러한 차이는 단순한 수분 감소에 따른 농축 효과만으로 설명되기 어려웠다. 물리적 처리에 따른 화분 조직의 구조 변화가 지방 추출 및 정량에 영향을 미쳤을 가능성이 있으나, 이에 대해서는 추가적인 검토가 필요하다. 탄수화물 함량은 59.12~63.91% 범위로 나타났으며, 처리구 간 차이는 수분, 조단백질, 조지방 및 회분 함량을 제외하여 산출하는 차감법의 영향을 받은 것으로 판단된다.

이상의 결과를 종합하면, 물리적 처리 후 다래화분의 조단백질과 회분 함량은 비교적 일정하게 유지된 반면, 주요 변화는 수분 및 조지방 함량에서 나타났다. 특히 HPP 처리구에서 상대적으로 높은 조지방 함량이 확인되었으며, 앞서 관찰된 화분립의 미세구조 변화와 함께 고려할 때 물리적 처리가 화분 성분의 추출성에 영향을 미칠 가능성을 시사한다.

3. 구성아미노산 조성의 안정성과 처리구별 총량 변화

물리적 처리에 따른 다래화분의 구성아미노산 조성은 Table 3 및 Fig. 2에 나타내었다. 분석 결과 총 17종의 아미노산이 검출되었으며, 주요 아미노산은 Asp, Glu, Leu, Lys 및 Arg 등으로 확인되었다. 무처리구의 총 구성아미노산 함량은 23.52 g/100 g이었고, 물리적 처리구에서는 24.00~

24.94 g/100 g 범위로 나타났다. 처리구 중 HPP는 24.94 g/100 g으로 가장 높은 값을 보였으며, 무처리구 및 CM20 보다 유의적으로 높게 나타났다($p < 0.05$). 개별 아미노산 함량은 처리에 따라 일부 차이를 보였으나, 전반적인 아미노산 조성은 유사한 양상을 나타냈으며 필수아미노산 역시 모든 처리구에서 유지되었다.

이는 동결건조, 동결분쇄 및 고압처리와 같은 물리적 처리가 다래화분의 구성아미노산 조성에 미치는 영향이 크지 않았음을 보여준다. 한편, HPP 처리구에서 총 구성아미노산 함량이 가장 높게 나타난 것은 아미노산이 새롭게 생성되었다기보다는 고압처리에 따른 화분 조직의 구조적 변화가 단백질의 가수분해 및 구성아미노산 회수율에 영향을 미쳤을 가능성을 시사한다. 이러한 해석은 앞서 SEM 관찰에서 HPP 처리 후 일부 화분립의 외벽 변형 및 손상이 확인된 결과와도 연관될 수 있다.

4. 처리구별 유리아미노산 프로파일의 선택적 변화

유리아미노산은 단백질이나 펩타이드에 결합하지 않은

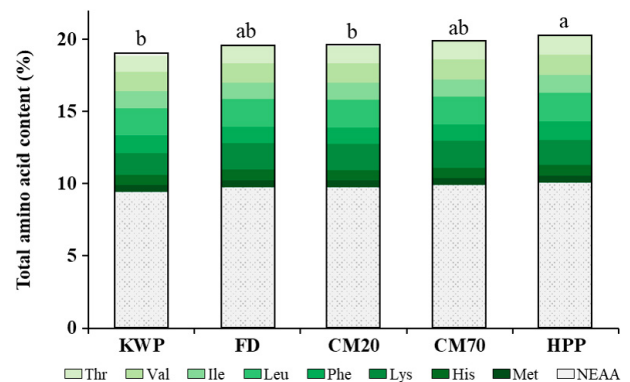


Fig. 2. Total amino acid content of *Actinidia* bee pollen subjected to different physical treatments. Different letters indicate significant differences in total amino acid content among treatments by Tukey's test ($p < 0.05$). NEAA, non-essential amino acids.

Table 2. Proximate composition of *Actinidia* bee pollen subjected to different physical treatments

Treatment	Moisture	Crude protein	Crude fat	Ash	Carbohydrate
KWP	9.28 ± 0.05	27.81 ± 0.17	0.76 ± 0.03	3.03 ± 0.06	59.12 ± 0.21
FD	4.15 ± 0.06	27.92 ± 0.07	0.99 ± 0.01	3.03 ± 0.09	63.91 ± 0.07
CM20	4.17 ± 0.04	28.07 ± 0.02	1.32 ± 0.16	3.00 ± 0.04	63.44 ± 0.23
CM70	4.44 ± 0.09	27.98 ± 0.02	1.51 ± 0.06	3.01 ± 0.03	63.07 ± 0.06
HPP	2.83 ± 0.02	28.45 ± 0.07	2.25 ± 0.12	3.06 ± 0.04	63.40 ± 0.26

Values are expressed as mean ± SD ($n = 3$), g/100 g. Carbohydrate content was calculated by difference: $100 - (\text{moisture} + \text{Crude protein} + \text{crude fat} + \text{ash})$.

Table 3. Amino acid composition of *Actinidia* bee pollen after different physical treatments

No.	Amino acid	KWP	FD	CM20	CM70	HPP
1	Asp	3.12 ± 0.01	3.13 ± 0.08	3.11 ± 0.04	3.14 ± 0.06	3.22 ± 0.03
2	Thr	1.17 ± 0.01	1.20 ± 0.02	1.20 ± 0.02	1.22 ± 0.02	1.25 ± 0.01
3	Ser	1.33 ± 0.01	1.39 ± 0.04	1.38 ± 0.03	1.40 ± 0.02	1.42 ± 0.01
4	Glu	2.96 ± 0.02	3.21 ± 0.06	3.19 ± 0.05	3.23 ± 0.05	3.25 ± 0.03
5	Gly	1.20 ± 0.01	1.20 ± 0.02	1.19 ± 0.01	1.21 ± 0.02	1.25 ± 0.01
6	Ala	1.43 ± 0.01	1.44 ± 0.03	1.43 ± 0.02	1.45 ± 0.02	1.48 ± 0.01
7	Val	1.34 ± 0.01	1.33 ± 0.05	1.35 ± 0.02	1.39 ± 0.02	1.42 ± 0.02
8	Ile	1.14 ± 0.01	1.14 ± 0.05	1.15 ± 0.02	1.18 ± 0.01	1.21 ± 0.02
9	Leu	1.91 ± 0.01	1.94 ± 0.02	1.94 ± 0.02	1.96 ± 0.02	2.01 ± 0.02
10	Tyr	1.01 ± 0.01	0.80 ± 0.01	0.80 ± 0.01	0.81 ± 0.02	0.96 ± 0.02
11	Phe	1.22 ± 0.01	1.11 ± 0.01	1.12 ± 0.01	1.14 ± 0.01	1.29 ± 0.02
12	Lys	1.53 ± 0.01	1.85 ± 0.02	1.83 ± 0.02	1.85 ± 0.02	1.71 ± 0.02
13	His	0.70 ± 0.01	0.73 ± 0.01	0.72 ± 0.01	0.73 ± 0.01	0.75 ± 0.01
14	Arg	1.53 ± 0.01	1.51 ± 0.02	1.50 ± 0.02	1.52 ± 0.03	1.55 ± 0.02
15	Pro	1.17 ± 0.03	1.37 ± 0.06	1.28 ± 0.03	1.35 ± 0.03	1.38 ± 0.02
16	Cys	0.31 ± 0.00	0.36 ± 0.01	0.34 ± 0.01	0.34 ± 0.01	0.34 ± 0.01
17	Met	0.44 ± 0.01	0.47 ± 0.02	0.45 ± 0.02	0.45 ± 0.01	0.46 ± 0.01
Total		23.52 ± 0.15	24.17 ± 0.34	24.00 ± 0.28	24.37 ± 0.33	24.94 ± 0.26

Values are expressed as mean ± SD ($n=3$), g/100 g. Essential amino acids are indicated in bold.

Table 4. Total free amino acid content of *Actinidia*-derived bee pollen subjected to different physical treatments

Treatment	Total free amino acid (mg/g)
KWP	8.50 ± 0.29
FD	9.99 ± 0.72
CM20	9.48 ± 1.32
CM70	11.08 ± 0.16
HPP	9.32 ± 0.60

형태로 존재하는 아미노산으로, 별화분의 영양적 특성과 맛, 생리활성에 영향을 줄 수 있는 주요 저분자 성분이다 (Bayram *et al.*, 2021; Rzepecka *et al.*, 2024). 물리적 처리에 따른 다래화분의 총 유리아미노산 함량은 Table 4에 나타내었다. 무처리구의 총 유리아미노산 함량은 8.50 mg/g이었으며, 물리적 처리 후 9.32~11.08 mg/g 범위로 나타나 모든 처리구에서 무처리구 대비 높은 값을 보였다. 처리구 중 CM70은 11.08 mg/g으로 총 유리아미노산 함량이 가장 높게 나타났으며, 이는 -70°C 동결 및 분쇄 과정이 다래화분의 저분자 수용성 성분 용출에 상대적으로 큰 영향을 미쳤을 가능성을 시사한다.

개별 유리아미노산 조성 변화는 무처리구 대비 $\log_2$ fold

change ($\log_2$ FC)를 이용하여 heatmap으로 시각화하였다 (Fig. 3). 분석 결과, 처리조건에 따라 유리아미노산의 증가 및 감소 양상이 서로 다르게 나타났으며, 일부 성분은 물리적 처리 후 새롭게 검출되거나 검출 양상이 변화하였다. 동결분쇄 처리구에서는 다수의 유리아미노산이 무처리구 대비 증가하는 경향을 보였고, 특히 CM70에서는 총 유리아미노산 함량 증가와 함께 여러 아미노산의 상대적 증가가 확인되었다. HPP 처리구는 총 유리아미노산 함량 증가 폭은 CM70보다 낮았으나, α -ABA와 Cys가 각각 $\log_2$ FC 4.72 및 2.48로 크게 증가하였고, β -Ala와 GABA도 증가하는 등 특정 성분 중심의 뚜렷한 profile 변화를 보였다. 동시에 Ser, Sar, Lys, His 등 일부 유리아미노산은 감소하여, 고압처리가 유리아미노산을 일괄적으로 증가시키기보다는 선택적인 조성 변화를 유도한 것으로 판단된다.

이러한 변화는 처리 방식에 따른 화분 조직의 물리적 손상과 이에 따른 저분자 성분의 추출성 변화와 관련될 수 있다. 특히 CM70에서 총 유리아미노산 함량이 무처리구 대비 약 30.4% 증가한 것은 SEM에서 확인된 비교적 뚜렷한 화분벽 손상과 함께 고려할 때, 저온에서 취약해진 화분 조직에 기계적 분쇄력이 가해지면서 내부 유리아미노산의 용출이 증가한 결과로 해석할 수 있다. 반면 HPP에

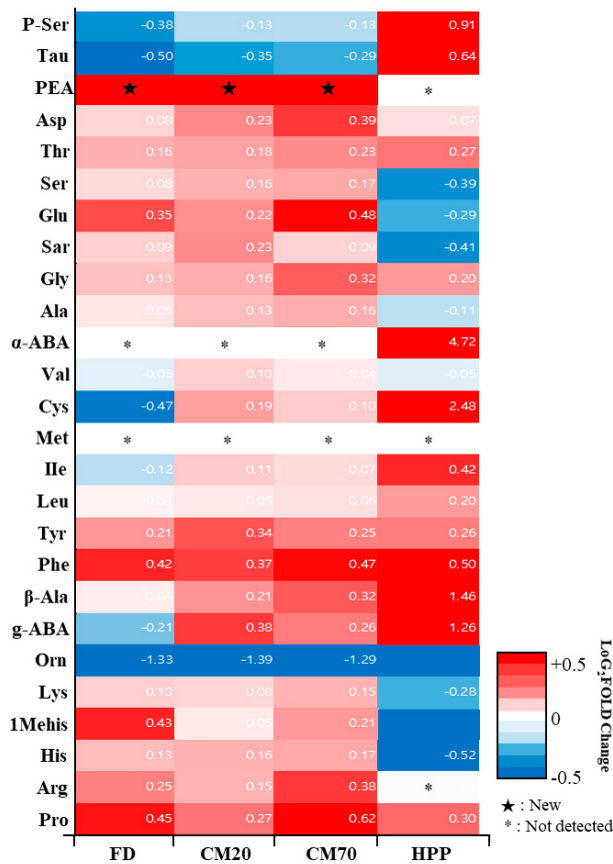


Fig. 3. Changes in free amino acid profiles of *Actinidia*-derived bee pollen subjected to different physical treatments. Values represent $\log_2$ fold changes relative to the untreated control. Red and blue indicate increased and decreased levels, respectively. ★, newly detected; *, not detected.

서도 화분벽의 변형과 손상이 관찰되었으나 총 유리아미노산 함량의 증가는 약 9.6%에 그쳤으며, 개별 성분에서는 증가와 감소가 동시에 나타났다. 선행 연구에서도 고압처리에 따라 벌화분의 유리아미노산 함량과 조성이 변하는 것으로 보고되어, 처리조건에 따라 개별 성분의 반응이 상이할 수 있음을 보여준다(Tuoheti *et al.*, 2024). 따라서 화분벽의 손상 정도만으로 유리아미노산 조성 변화를 모두 설명하기는 어려우며, 본 연구에서 나타난 변화는 화분 구조 변화에 따른 추출성 변화와 함께 처리 방식에 따른 성분별 반응을 종합적으로 고려하여 해석할 필요가 있다.

5. 단백질 추출성 평가

물리적 처리에 따른 다래화분의 추출성 단백질 함량 변화를 확인하기 위해 1% SDS를 이용하여 단백질을 추출하

Table 5. Extractable protein content of *Actinidia*-derived bee pollen subjected to different physical treatments

Treatment	Protein (mg/g)
KWP	30.01 ± 0.62
FD	39.98 ± 1.12
CM20	42.18 ± 0.69
CM70	46.11 ± 1.23
HPP	59.67 ± 3.53

Values are expressed as mean ± SD ($n = 3$).

고 BCA assay로 정량하였다(Table 5). Kjeldahl법으로 측정 한 조단백질 함량은 처리 전후 비교적 유사하였으나, 추출성 단백질 함량은 무처리구의 30.01 mg/g에서 물리적 처리 후 39.98~59.67 mg/g으로 증가하였으며, HPP 처리구에서 59.67 mg/g으로 가장 높은 값을 나타냈다.

이러한 결과는 전체 단백질 함량 자체의 증가보다는 물리적 처리에 의해 SDS로 추출 가능한 단백질 분획이 증가한 것으로 해석할 수 있다. 특히 HPP 처리구에서는 무처리구 대비 추출성 단백질 함량이 약 98.8% 증가하였으며, SEM에서 관찰된 화분벽의 변형 및 손상을 고려할 때 화분 조직의 구조적 변화가 내부 단백질의 추출성을 향상시켰을 가능성이 있다(Altuner *et al.*, 2012). 또한 고압처리는 단백질의 공유결합보다는 수소결합, 소수성 및 정전기적 상호작용 등의 비공유성 상호작용에 주로 영향을 미쳐 단백질의 입체구조와 용매 접근성을 변화시킬 수 있는 것으로 알려져 있다(Braspaiboon and Laokuldilok, 2024). 따라서 HPP 처리에 따른 추출성 단백질의 증가는 화분벽의 구조적 변화와 함께 단백질의 비공유성 상호작용 변화에 따른 용매 접근성 증가가 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

6. 물리적 처리에 따른 총 폴리페놀 함량 변화

폴리페놀 화합물은 벌화분의 주요 생리활성 성분 중 하나로, 항산화 활성 등 기능성 특성에 기여하는 것으로 알려져 있다(Karlidag, 2025). 물리적 처리에 따른 다래화분의 총 폴리페놀 함량을 분석한 결과(Fig. 4), 무처리구는 3.17 mg GAE/g으로 나타났으며, FD, CM20 및 CM70 처리구는 각각 2.95, 2.67 및 2.77 mg GAE/g으로 확인되었다. HPP 처리구는 3.93 mg GAE/g으로 가장 높은 값을 보였으며, FD, CM20 및 CM70 처리구보다 유의적으로 높게 나타났다($p < 0.05$).

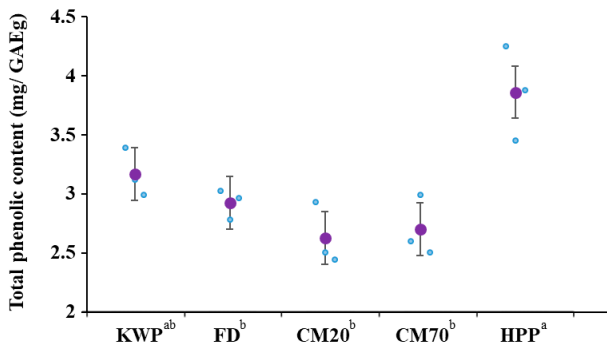


Fig. 4. Total phenolic content of *Actinidia*-derived bee pollen subjected to different physical treatments. Values are expressed as mean $\pm$ SD ($n = 3$). Different letters indicate significant differences among treatments by one-way ANOVA followed by Tukey's HSD test ($p < 0.05$).

이러한 결과는 물리적 처리 방법에 따라 다래화분의 폴리페놀 추출성이 달라질 수 있음을 보여준다. 동결건조 및 동결분쇄 처리구에서는 무처리구와 유사하거나 낮은 수준을 보인 반면, HPP 처리구에서는 무처리구 대비 약 24.0% 높은 함량을 나타냈다. 이는 고압처리가 다래화분의 폴리페놀 관련 성분을 크게 손실시키지 않으며, 처리 과정에서 일부 폴리페놀성 성분의 추출성을 높였을 가능성을 시사한다. 선행 연구에서도 고압처리는 벌화분의 품질 특성을 비교적 안정적으로 유지하거나 일부 기능성 성분의 추출성에 영향을 줄 수 있는 처리 방법으로 보고된 바 있다 (Anjos *et al.*, 2023). 본 연구에서도 HPP 처리구에서 총 폴리페놀 함량이 가장 높게 나타나, 고압처리가 다래화분의 기능성 관련 성분 유지 및 추출성 측면에서 유리한 처리조건일 가능성을 보여주었다. 다만, 총 폴리페놀 함량만으로 생리활성 또는 기능성의 향상을 직접적으로 판단하기에는 한계가 있으며, 향후 항산화 활성 등의 생리활성 평가와 LC 기반 개별 폴리페놀 성분 분석을 통한 추가 검증이 필요하다.

적 요

벌화분은 단백질, 아미노산 및 폴리페놀 화합물 등 다양한 영양·기능성 성분을 함유한 양봉산물이지만, 견고한 화분벽 구조로 인해 식품소재로서의 이용성이 제한될 수 있다. 본 연구는 물리적 처리에 따른 국산 다래화분의 형태, 영양조성, 아미노산 profile, SDS 추출성 단백질 및 총 폴

리페놀 함량 변화를 비교하기 위해 수행하였다. 다래화분에 동결건조, 동결분쇄 및 고압처리를 적용한 결과, 동결분쇄와 고압처리에서 일부 화분벽의 외벽 균열, 변형 및 파열이 관찰되었으나 전반적인 화분벽 형태는 유지되었다. 일반성분 분석에서는 조단백질과 회분 함량이 각각 27.81~28.45% 및 3.00~3.06% 범위로 나타나 처리 후에도 비교적 안정적으로 유지되었으며, 조지방 함량은 고압처리구에서 2.25%로 가장 높았다. 구성아미노산 조성은 처리 전후 전반적으로 유사하였고, 총 구성아미노산 함량은 고압처리구에서 24.94 g/100 g으로 가장 높게 나타났다. 유리아미노산 profile은 처리 방식에 따라 다르게 변화하였으며, 총 유리아미노산 함량은 -70°C 동결분쇄 처리구에서 11.08 mg/g으로 가장 높았다. SDS 추출성 단백질 함량은 고압처리구에서 59.67 mg/g으로 무처리구보다 크게 증가하였고, 총 폴리페놀 함량 역시 고압처리구에서 3.93 mg GAE/g으로 가장 높았다. 이상의 결과는 물리적 처리가 국산 다래화분의 기본 영양조성을 비교적 유지하면서도 처리 방식에 따라 유리아미노산 조성, 단백질 추출성 및 폴리페놀 관련 특성을 선택적으로 변화시킬 수 있음을 보여준다. 특히 -70°C 동결분쇄는 유리아미노산 함량 증가에, 고압처리는 SDS 추출성 단백질 및 총 폴리페놀 함량 증가에 유리한 처리조건으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ01781602)의 지원에 의해 이루어진 것임.

인 용 문 헌

- 식품의약품안전처. 2024. 식품의 기준 및 규격. 식품의약품안전처 고시 제2024-71호.
- Altuner, E. M., T. Ceter and H. Alpas. 2012. High hydrostatic pressure processing: A method having high success potential in pollen protein extraction. *High Press. Res.* 32: 291-298.
- Anjos, O., N. Seixas, C. A. L. Antunes, M. G. Campos, V. Paula and L. M. Estevinho. 2023. Quality of bee pollen submitted to drying, pasteurization, and high-pressure processing: A comparative approach. *Food Res. Int.* 170: 112964.
- Bayram, N. E., Y. C. Gercek, S. Celik, N. Mayda, A. Z. Kostic, A.

- M. Dramicanin and A. Ozkok. 2021. Phenolic and free amino acid profiles of bee bread and bee pollen with the same botanical origin - similarities and differences. *Arab. J. Chem.* 14(3): 103004.
- Blackmore, S., A. H. Wortley, J. J. Skvarla, N. I. Gabarayeva and J. R. Rowley. 2010. Developmental origins of structural diversity in pollen walls of Compositae. *Plant Syst. Evol.* 284: 17-32.
- Braspaiboon, S. and T. Laokuldilok. 2024. High hydrostatic pressure: Influences on allergenicity, bioactives, and structural and functional properties of proteins from diverse food sources. *Foods* 13(6): 922.
- Feás, X., M. P. Vázquez-Tato, L. Estevinho, J. A. Seijas and A. Iglesias. 2012. Organic bee pollen: Botanical origin, nutritional value, bioactive compounds, antioxidant activity and microbiological quality. *Molecules* 17: 8359-8377.
- Hong, I. P., S. O. Woo, S. M. Han, J. H. Yeo, M. R. Cho, W. T. Ju, H. S. Sim, Y. S. Choi, H. K. Kim, M. L. Lee and M. Y. Lee. 2014. Morphology and antioxidant activity in pollens of Korean oak and Darae (*Actinidia arguta*). *J. Apic.* 29: 137-142.
- Hong, I. P., S. O. Woo, S. M. Han, S. G. Kim, H. R. Jang, Y. S. Choi, H. K. Kim, M. L. Lee and M. Y. Lee. 2015. Nutrition extraction efficiency from Darae (*Actinidia arguta*) pollen using lyophilization. *J. Apic.* 30: 87-94.
- Karlidag, S. 2025. Investigation of phenolic compounds and antioxidant properties in honey, pollen and propolis according to regional and *Apis mellifera* genotypes. *Food Nutr. Res.* 69: 12234.
- Khalifa, S. A. M., M. H. Elashal, N. Yosri, M. Du, S. G. Musharraf, L. Nahar, S. D. Sarker, Z. Guo, W. Cao, X. Zou, A. A. Abd El-Wahed, J. Xiao, H. A. Omar, M. E. F. Hegazy and H. R. El-Seedi. 2021. Bee pollen: Current status and therapeutic potential. *Nutrients* 13: 1876.
- Kim, S. K., M. S. Lee, S. W. Moon, H. Y. Kim, H. M. Choi and S. O. Woo. 2024. Inhibition of inflammation response and the immune-related protein by treatment of *Actinidia arguta* pollen in Raw264.7 macrophage. *J. Apic.* 39: 223-231.
- LeBlanc, B. W., O. K. Davis, S. Boue, A. DeLucca and T. Deeby. 2009. Antioxidant activity of Sonoran Desert bee pollen. *Food Chem.* 115: 1299-1305.
- Lee, H. J., S. G. Kim, S. M. Han, H. Y. Kim, S. M. Kim, S. K. Kim, H. M. Choi, H. J. Moon, Y. S. Lee, S. Ryu and S. O. Woo. 2023. Inhibitory effect of the Darae pollen (*Actinidia arguta*) extract on the growth of LNCaP human prostate cancer cell line. *J. Apic.* 38: 77-82.
- Lee, M. S., H. Y. Kim, H. M. Choi, S. M. Han, S. K. Kim, S. M. Kim, S. G. Kim, H. J. Moon and S. O. Woo. 2025. Comparative morphological analysis of mixed pollen in *Robinia* honey and nectar plants around apiaries in Korea. *J. Apic.* 40: 65-74.
- Moon, S. W., S. G. Kim, H. Y. Kim, H. M. Choi, S. M. Han, S. K. Kim, S. M. Kim, M. S. Lee and S. O. Woo. 2024. Comparison of component pattern and antioxidant activity of Prunus honey. *J. Apic.* 39: 217-222.
- Pyo, S. J., Y. J. Lee and H. Y. Sohn. 2020. Anti-thrombotic activities of different pollen from acorn, Darae, multi-floral, pine tree and cattail. *J. Apic.* 35: 55-63.
- Qin, H., S. Fan, Y. Zhao, P. Xu, X. Chen, J. Li, Y. Yang, Y. Wang, Y. Wang, C. Li, Y. Liu, B. Zhang and W. Lu. 2025. Morphology-based evaluation of pollen fertility and storage characteristics in male *Actinidia arguta* germplasm. *Plants* 14: 2366.
- Roulston, T. H. and J. H. Cane. 2000. Pollen nutritional content and digestibility for animals. *Plant Syst. Evol.* 222: 187-209.
- Rzepecka, N., E. Matuszewska, S. Plewa, J. Matysiak and A. Klupeczynska-Gabryszak. 2024. Bee products as valuable nutritional ingredients: Determination of broad free amino acid profiles in bee pollen, royal jelly, and propolis. *J. Food Compos. Anal.* 126: 105860.
- Serra Bonvehí, J. and R. Escolà Jordà. 1997. Nutrient composition and microbiological quality of honeybee-collected pollen in Spain. *J. Agric. Food Chem.* 45: 725-732.
- Tuoheti, T., Q. Gao, Q. Yan, L. Xu and M. S. Dong. 2024. Enhanced antioxidant activities, polyphenols, flavonoids, and free amino acid contents of *Nelumbo nucifera* bee pollen via high hydrostatic pressure treatment. *CyTA J. Food* 22(1): 2413953.
- Wu, W., J. Qiao, X. Xiao, L. Kong, J. Dong and H. Zhang. 2021. In vitro and in vivo digestion comparison of bee pollen with or without wall-disruption. *J. Sci. Food Agric.* 101: 2744-2755.
- Wu, W., K. Wang, J. Qiao, J. Dong, Z. Li and H. Zhang. 2019. Improving nutrient release of wall-disrupted bee pollen with a combination of ultrasonication and high shear technique. *J. Sci. Food Agric.* 99: 564-575.