

팥의 가속화 저장에 따른 미세구조 및 수분흡수 특성

곽지은¹ · 오선민² · 오유근¹ · 최유찬¹ · 박현진¹ · 송석보³ · 이정희⁴ · 이점식^{4,†}

Effect of Accelerated Storage on the Microstructure and Water Absorption Characteristics of Korean Adzuki Bean (*Vigna angularis* L.) Cultivar

Jieun Kwak¹, Seon-Min Oh², You-Geun Oh¹, Yu-Chan Choi¹, Hyun-Jin Park¹, Suk-Bo Song³, Jeong-Heui Lee⁴, and Jeom-Sig Lee^{4,†}

ABSTRACT This study investigated the microstructure and water absorption characteristics of the Korean adzuki bean (*Vigna angularis* L.) cultivar under accelerated storage. The germination rate, acid value, redness (a*), and yellowness (b*) values showed no significant differences after three months of storage compared to pre-storage under low temperatures (4°C). However, a statistically significant difference was observed under accelerated high temperatures (45°C). In particular, after storage for three months, the germination rate and acid value were 0% and 33.63 mg KOH/100g, respectively, under accelerated high temperatures. After storage for three months, the holes, hilum damage, and spaces between the seed coat and cotyledon shortened the time and speed of water absorption under accelerated high temperatures compared to that under low temperatures. Conversely, further research is required to investigate the reason for the low rate of parallel water absorption.

Keywords : accelerated, adzuki bean, microstructure, storage, water absorption

팥(*Vigna angularis* L.)은 콩과의 일년생 식물로 동아시아 국가인 한국, 중국 및 일본에서 전 세계 생산량의 대부분을 생산하고 있다(Rho *et al.*, 2003). 우리나라의 팥 재배면적은 연간 약 5,000 ha로 두과 작물 중 콩 다음으로 많이 재배되고 있다(MAFRARK, 2021). 팥은 콩에 비하여 지방과 단백질 함량은 낮지만 탄수화물 함량은 높다고 알려져 있으며(Song *et al.*, 2011), 혼반 용도 뿐만 아니라, 팥죽과 제과-제빵의 속 재료인 앙금, 통팥 등으로도 많이 이용되고 있다(Kim *et al.*, 2003).

식량작물의 경우 단기 혹은 장기 저장을 거친 후 다양한 용도로 활용되는 경우가 많은데 수분함량, 발아율, 지방산

가, 외관특성(색깔, 모양), 영양성분, 곰팡이 발생 등이 저장 중 품질 평가의 지표로 활용되고 있다(Karunakaran *et al.*, 2001; Mills, 1996; Pomeranz, 1992; White *et al.*, 1999). 특히, 파스타 용도의 듀럼밀에는 저장 중 수분함량, 발아율, 곰팡이 발생 등의 품질변화가 발생한다고 하였고(Nithya *et al.*, 2011), 팥에서는 고온다습(30~35°C, 상대습도 70%) 조건에서 장기간(7~10개월) 저장 시 수화능력의 저하, 종피 색의 변화, 군내(off-flavor)의 발생 및 지방 성분의 분해 등 품질변화가 나타난다고 보고되어 있다(Antunes & Sgarbrieri, 1979; Kon & Sanshuck, 1981; Yousif *et al.*, 2007).

팥 종자는 두류와 마찬가지로 종피, 배아(배꼽), 자엽의 세

¹농촌진흥청 국립식량과학원 중부작물부 수확후이용과 농업연구사 (Junior Research Scientist, Department of Central Area Crop Science, National Institute of Crop Science, Rural Development of Administration, Suwon 16613, Republic of Korea)

²한국식품연구원 가공공정연구단 연구원 (Researcher, Food processing Research Group, Korea Food Research Institute, Jeonju 55365, Republic of Korea)

³농촌진흥청 국립식량과학원 남부작물부 농업연구관 (Senior Research Scientist, Department of Southern Area Crop Science, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Miryang 50424, Republic of Korea)

⁴농촌진흥청 국립식량과학원 중부작물부 수확후이용과 농업연구관 (Senior Research Scientist, Department of Central Area Crop Science, National Institute of Crop Science, Rural Development of Administration, Suwon 16613, Republic of Korea)

†Corresponding author: Jeom-Sig Lee; (Phone) +82-31-695-0608; (E-mail) leejsyr@korea.kr

<Received 4 August, 2023; Revised 25 August, 2023; Accepted 28 August, 2023>

부분으로 구성되어 있으며, 특히 팔의 종피는 고도로 잘 정렬된 팰리세이드(palisade) 층이 이중 층의 역할을 하여 다른 두류 종류보다 더 오랜 시간의 수침이 필요하다(Yousif *et al.*, 2007). 두류의 수분흡수 관련하여 Deshpande & Cheryan (1986)은 수침 초기에는 수분흡수는 배꼽(hilum)과 주공(micropyle)에서 주로 이루어지나 그 이후부터는 배꼽 위주로 수분흡수가 일어난다고 보고하였다. 반면, Miano *et al.* (2016)은 배꼽 또는 주공을 차단할 경우 수분 흡수율이 급격히 감소되는 연구 결과를 통해 배꼽과 주공, 두 기관이 전체 수화과정에서 상호 시너지 효과를 낸다고 하였다.

최근 국내산 팔 품종의 수분흡수 특성을 분석한 연구 결과에 의하면, 팔 종실이 포화 수분함량에 도달하는 시간은 약 30시간이며, 포화 수분의 50% 수준까지 수분을 흡수하는 데 팔의 경우 9~10시간, 콩은 약 1시간 소요된다고 하였다(Oh *et al.*, 2021). 이처럼 팔의 느린 수분흡수 속도와 수분흡수를 위한 장시간의 수침 시간은 산업체와 소비자의 팔 이용성을 떨어뜨리는 제한 인자로 작용한다(Yousif *et al.*, 2007). 따라서 본 연구는 국내산 팔의 가속화 저장에 따른 미세구조 및 수분흡수 특성을 분석하여 수침 시간 단축의 기초자료로 제공하고자 수행하였다.

재료 및 방법

실험재료

본 실험에 사용된 적색 팔 품종 홍진(Hongjin)은 한국농업기술진흥원에서 2021년 수확한 종자를 분양받아 4°C에 보관하였으며, 최소 1시간 동안 상온에 방치 후 분석 시료로 사용하였다(Song *et al.*, 2019).

저장 조건

상온 및 가속화 고온 조건의 저장시험은 온도와 습도가 조절되는 배양기(Dasol Scientific CO., LTD., Model : DS-14CLHP, Korea)에서 25°C 및 45°C를 유지하며 상대습도는 65% 수준에서 수행하였다. 저장시험을 위한 온도 및 습도 조건은 Nithya *et al.* (2011)의 듀럼밀 고온 저장시험 조건을 참고하였으며 곰팡이 및 이슬이 발생하지 않는 범위에서의 최고 온도로 설정하였다(Yousif *et al.*, 2002; Nithya *et al.*, 2011). 또한 저장 시료의 분석 주기가 1.5개월(45일) 간격인 점을 고려하여 저온 조건(4°C, 상대습도 40%)을 대조구(control)로 하여 분석 주기마다 동시에 분석을 실시하였다.

저장 시료는 반복시료를 합쳐 처리 당 5 kg 단위로 공기가 잘 통하는 망사 자루에 담아 각각의 시료가 서로 겹치지

않게 잘 펼쳐놓았다. 성분 분석은 저장 후 1.5개월 간격으로 3개월 동안 실시하였으며, 반복은 분석 항목에 따라 최소 3반복 이상 수행하였다.

일반성분 분석

팔의 일반성분 분석은 AOAC법(AOAC International, 2000)에 따라 수분함량은 상압가열건조법, 조회분은 직접회화법, 조단백질은 Micro-kjeldahl법, 그리고 조지방은 Soxhlet법을 이용하여 분석하였다. 탄수화물의 함량은 100%에서 수분, 조회분, 조단백 및 조지방 함량을 뺀 값으로 나타냈다(Lee *et al.*, 2021; Oh *et al.*, 2021).

색도 분석

팔의 색도는 색차계(CM-3500d, Minolta, Tokyo, Japan)를 이용하여 측정하였고, 이를 L* (brightness), a* (redness), b* (yellowness)로 나타냈다.

발아율 및 지방산가

발아율은 팔 종자를 상온(25°C)에서 24시간 침지 후, 반복 당 50 립씩 25°C의 항온기에서 5일 동안 발아율을 조사하였다. 지방산가는 KOH를 이용한 적정법(AOAC Official Method 14.072)을 약간 변형하여 5회 반복으로 측정하였다. 먼저 팔가루 20 g에 50 mL benzene을 넣고 30분간 진탕하여 유리 지방산을 추출하였다. 이를 원심분리하여 상등액 25 mL를 취한 후, 동량의 alcohol-phenolphthalein 용액을 혼합한 후 0.0178 N KOH 용액으로 분홍색을 나타낼 때까지 적정하였으며, 그 계산식은 다음과 같다.

$$\text{Fat acidity}(\%) = 10 \times \frac{\text{titration} - \text{blank}}{\text{drymatterweight}}$$

미세구조 관찰

팔의 미세구조는 종실의 배꼽 부분을 중심으로 횡으로 절단하여 절단면이 위로 가도록 탄소 테이프 위에 고정된 후 이를 주사전자 현미경(Scanning Electron Microscope, TM3000, Hitachi, Tokyo, Japan)을 이용하여 15 kV 가속 전압에서 관찰하였다(Oh *et al.*, 2021).

수분흡수 특성 및 수분흡수 kinetics 분석

수분 흡수율은 팔 3 g에 10 mL의 증류수를 가한 후 25°C의 항온기에서 36시간 동안 수침하였으며, 정해진 시간에 도달하였을 때 시료를 꺼내 와이프올을 이용하여 표면의 물기를 제거하였다. 수침 전과 후의 팔의 무게를 아래의 식에 적용하여 수침 시간에 따른 팔의 수분 흡수율을 계산하

Table 1. Proximate composition of Hongjin adzuki bean cultivar.

| Cultivar | Moisture (%) | Protein (%) | Fat (%) | Ash (%) | Carbohydrate (%) |
|----------|--------------|-------------|-----------|-----------|------------------|
| Hongjin | 13.1±0.25 | 21.1±0.06 | 0.65±0.01 | 2.76±0.04 | 61.7±0.21 |

였다.

$$\text{수분흡수율} = \frac{\text{수침 후 팥의 무게} - \text{수침 전 팥의 무게}}{\text{수침 전 팥의 무게}} \times 100$$

팥의 수분흡수 속도는 Kaptso *et al.* (2008)이 제안한 아래의 식에 적용하여 모델링 하였다. 이때, M_t 는 시간 t 에서의 팥의 수분함량(% , dry basis, d.b.)이고 M_{eq} 는 평형수분함량(% , d.b.), τ (h)는 팥의 수분함량이 평형수분함량의 50%에 도달하는데 소요된 시간이며, 각 시료의 수분 흡수율이 유의적인 차이가 없는 시간일 때까지의 흡수 속도 k (h^{-1})를 구하였다.

$$M_t = \frac{M_{eq}}{(1 + \exp[-k \cdot (t - \tau)])}$$

통계처리

통계분석은 SPSS (v25.0)을 사용하여 분산분석(ANOVA)을 실시하였다. 반복은 분석 항목에 따라 최소 3회 이상 수행하였으며, 각 데이터 평균값의 유의성 검정은 Duncan’s multiple range test를 사용하였다($p < 0.05$).

결과 및 고찰

일반성분 분석

실험재료인 홍진 팥 품종의 저장 전 일반성분 분석 결과는 Table 1과 같다. 두류에 속하는 팥은 콩보다 탄수화물 함량은 약 60%로 많지만, 단백질 함량은 약 20%로 적고, 지방 함량 또한 약 1% 미만으로 적다고 하였다(Song *et al.*, 2011). Oh *et al.* (2021)에 따르면 국내산 팥 5품종의 지방 함량은 0.49~0.67%, 회분 함량은 3.06~3.52%, 탄수화물 함량은 60.34~62.97%였다. 본 실험에 사용한 홍진 팥 품종의 단백질 함량은 21.1%, 지방 함량은 0.65%, 회분 함량은 2.76%, 탄수화물 함량은 61.7%로 선행연구와 유사한 범위의 일반성분 함량을 보였다.

수분함량 및 색도 변화

저장에 따른 종실의 수분함량 변화는 Fig. 1과 같다. 대조구(control)인 저온 조건(4°C, 상대습도 40%)에서의 팥 수분함량은 저장 3개월 후까지 통계적으로 차이가 없었다.

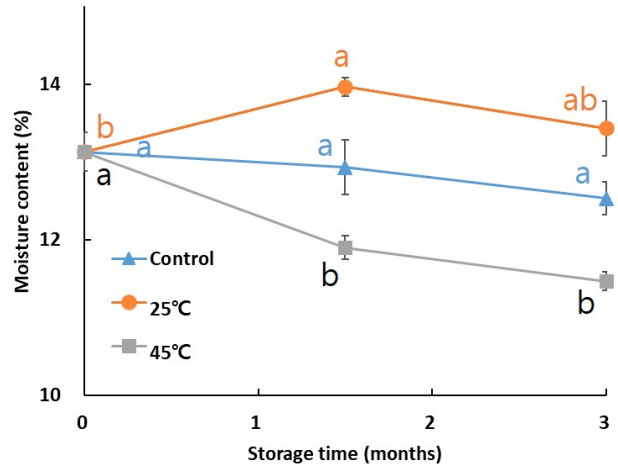


Fig. 1. Moisture content changes in adzuki bean depending on storage time and temperature; control condition (temp. 4°C).

상온 조건(25°C, 상대습도 65%)의 시료는 저장 1.5개월(45일)까지 수분함량이 유의하게 증가하다가($p < 0.05$) 다시 감소하는 경향을 보였다. 반면, 가속화 고온 조건(45°C, 상대습도 65%)에서는 저장 1.5개월(45일)까지 팥 수분함량이 유의적으로 감소하였다($p < 0.05$). 이처럼 저장 초기에 팥 종자의 수분함량이 증가 또는 감소한 후 유사한 수준으로 유지되는 이유는 저장 전후의 환경 차이에 의해 수분평형을 위한 수분 이동이 활발히 일어나지만, 수분평형이 이루어진 이후에는 수분 이동이 거의 일어나지 않기 때문으로 생각된다. 또한 상온 조건(25°C)과 가속화 고온 조건(45°C)의 상대습도가 같음에도 수분함량 변화가 큰 이유는 고온에 의해 종자 내부 수분 손실이 발생한 것으로 보인다.

한편, 팥의 종피 색은 팥의 중요한 외관 품질 지표이며 색의 종류, 밝기, 균일도 등을 평가에 활용하는데, 일본과 우리나라 사람은 적색 팥을 선호하는 편이다(RDA, 2018; Yousif *et al.*, 2007). 본 실험에서 사용된 홍진 품종은 적색 팥의 일종이며, 저장에 따른 적색 종피의 색도 변화는 Table 2와 같다. 명도를 나타내는 L* 값은 저장 온도 및 기간에 따라 통계적인 차이를 나타내지 않았다. 반면 적색도를 나타내는 a* 값은 대조구(control)인 저온(4°C) 조건에서는 저장기간에 따른 차이가 없었으나, 상온(25°C) 조건에서는 저장 3개월 후 유의하게 감소하였고 가속화 고온

Table 2. Color changes in adzuki beans depending on storage time and temperature.

| Storage time (Months) | L* (Lightness) | | | a* (Redness) | | | b* (Yellowness) | | |
|-----------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Control | 25°C | 45°C | Control | 25°C | 45°C | Control | 25°C | 45°C |
| 0 | 38.6±0.10 ^{a, b)} | 38.6±0.07 ^a | 38.6±0.37 ^a | 7.73±0.09 ^a | 7.73±0.19 ^a | 7.73±0.12 ^a | 2.88±0.12 ^a | 2.88±0.12 ^a | 2.88±0.07 ^a |
| 1.5 | 39.0±0.22 ^a | 38.6±0.16 ^a | 38.5±0.19 ^a | 7.64±0.31 ^a | 7.64±0.28 ^a | 5.84±0.20 ^b | 2.97±0.12 ^a | 2.69±0.20 ^a | 2.23±0.02 ^b |
| 3 | 39.3±0.15 ^a | 38.7±0.21 ^a | 38.6±0.16 ^a | 7.57±0.01 ^a | 6.86±0.35 ^b | 5.02±0.08 ^c | 2.95±0.07 ^a | 2.67±0.02 ^a | 2.14±0.10 ^b |

^{b)}Means within columns followed by the same letter are not significantly different at the 5% level by Duncan's test; control condition (temp. 4°C)

(45°C) 조건에서는 저장 3개월 동안 유의하게 감소하였다. 황색도 값을 나타내는 b* 값은 대조구(control)인 저온(4°C) 조건에서는 저장기간에 따라 큰 변화가 없었으나, 가속화 고온(45°C) 조건에서는 저장기간 전반에 걸쳐 유의하게 감소하였다. Hatai (1982)는 팥을 고온(35°C) 조건에서 7~9개월 동안 저장했을 때, 종피 색은 밝기가 덜 하고(less bright), 더 어두워졌다고(darker) 보고하였다. 본 연구에서 팥을 가속화 고온(45°C) 조건으로 3개월 동안 저장한 결과, 명도(L*)는 차이가 없었으나 적색도(a*) 및 황색도(b*) 값은 유의하게 낮아졌으며, 외관 관찰 시에서도 붉은 팥 종피의 적색이 얼어지고 윤기가 감소하는 결과를 확인하였다. 기존의 선행연구에서도 팥의 종피 색 종류에 따른 저장 중 색도 변화가 보고된 바 있으나(Oh *et al.*, 2021; Song *et al.*, 2011) 적색 종피 이외의 팥 품종에서는 저장 중 색도 변화 연구가 아직 미흡한 편이다. 팥의 외관 품질은 소비자의 구매 의사를 결정하는 주요 요인이므로 향후 적색뿐 아니라 흰색, 흑색, 녹색 등 다양한 종피 색의 팥을 대상으로 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다.

발아율과 지방산가 변화

종자는 저장 중에도 지속적인 대사활동을 통하여 양분을 소모한다. 저장기간이 길수록, 저장 조건이 열악할수록, 종자의 발아율은 더 빨리 떨어진다. 그래서 저장 중의 품질을 평가하기 위해 발아율을 저장 중 품질 지표로 활용하고 있다(Kim *et al.*, 2007a). 본 실험에서 측정한 팥 저장 중의 발아율 변화는 Fig. 2와 같다. 대조구(control)인 저온(4°C) 및 상온(25°C) 조건에서 발아율은 저장 후 3개월까지 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 반면, 가속화 고온(45°C) 조건에서는 저장기간 1.5개월 및 3개월 후 발아율이 각 57.0%, 0%로 감소하는 뚜렷한 변화를 보였다. 이상의 결과로부터 가속화 고온(45°C) 조건에서는 저장 후 1.5개월만 경과하더라도 팥 종자의 품질에 영향을 받는다는 것을 확인하였다. 팥은 종자 수명이 4~5년인 장명종자, 콩은 종자 수명이

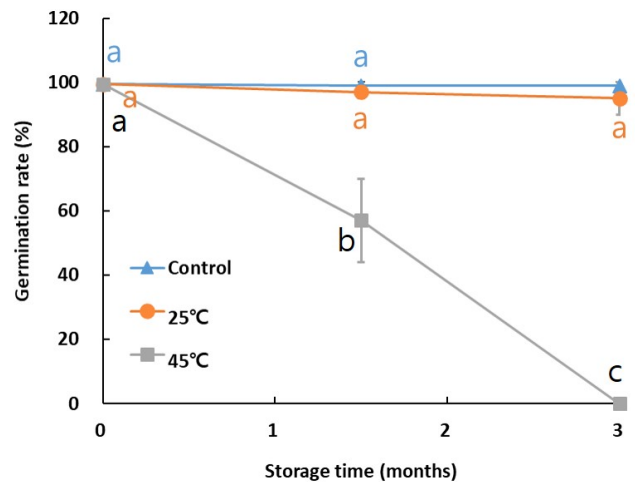


Fig. 2. Germination rate changes in adzuki beans depending on storage time and temperature; control condition (temp. 4°C).

2~3년인 상명종자로 알려져 두류 내에서도 팥은 종자 수명이 긴 편에 속한다. 팥의 적합한 저장 조건에 대하여 Kon & Sanshuck (1981)은 온도 10~20°C, 상대습도 50% 내외, 수분함량 10~14% 조건을 제시하였고 Yousif *et al.* (2007)은 온도 10°C, 상대습도 65%를 제시하였다. 또한 팥을 장기간(7~10개월), 고온(30~35°C) 및 높은 상대습도(70% 이하) 조건에서 저장하면 수화능력이 감소하고 종피의 색이 어두워지며 균내(off-flavor)가 발생하는 등 바람직하지 않은 방향으로 품질 변화가 일어나며 지방 성분의 분해 또한 지속적으로 진행된다고 하였다(Antunes & Sgarbrieri, 1979; Kon & Sanshuck, 1981; Yousif *et al.*, 2007).

곡물을 구성하고 있는 지방은 저장 과정 중 가장 먼저 변화가 일어나는 성분으로 산소와의 결합으로 산화되거나 중성 지방의 가수분해 작용으로 유리 지방산을 생성하여 결과적으로 지방산가를 증가시킨다. 따라서 지방산가 측정값은 곡물의 저장 중 품질 저하 정도를 평가하는 주요 지표로 사용되고 있다. 본 연구에서의 팥 저장 중 지방산가 변화는 Table

Table 3. Acid value changes in adzuki beans depending on storage time and temperature.

| Storage time (Months) | Acid value (mg KOH/100 g) | | |
|-----------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Control | 25°C | 45°C |
| 0 | 10.43±0.23 ^{a, b)} | 10.43±0.23 ^{b)} | 10.43±0.23 ^{c)} |
| 1.5 | 8.20±0.40 ^{a)} | 11.05±0.23 ^{b)} | 16.97±1.04 ^{b)} |
| 3 | 8.93±0.17 ^{a)} | 14.33±0.58 ^{a)} | 33.63±0.61 ^{a)} |

^{b)}Means within columns followed by the same letter are not significantly different at the 5% level by Duncan's test control condition (temp. 4°C)

3과 같다. 대조구(control)인 저온(4°C) 조건에서 지방산가는 저장 3개월 동안 유의적인 차이를 보이지 않았다. 반면 상온(25°C) 조건에서는 저장 3개월 경과 후 지방산가가 유의하게 증가하였고 가속화 고온(45°C) 조건에서는 저장 전 10.43 mg KOH/100 g에서 1.5개월 후 16.97 mg KOH/100 g, 3개월 후에는 33.63 mg KOH/100 g으로 유의적인 증가를 보였다. 곡물의 지방산가는 일반적으로 온도와 상대습도가 높고 저장기간이 길수록, 그리고 종자의 수분함량이 높을수록 증가하는 것으로 알려져 있으며(Kim *et al.*, 2007b; Han *et al.*, 1996) 본 연구 결과에서도 같은 경향을 나타냈다.

종실의 미세구조 특성

저장 3개월 후 팥 종실의 종피, 배꼽, 자엽의 미세구조를 전 자현미경으로 관찰한 결과는 Fig. 3과 같다. 대조구(control)인 저온(4°C) 및 상온(25°C) 조건에서 저장한 팥은 미세구조의 변화가 없는 반면, 가속화 고온(45°C) 조건에서 저장한 팥은 화살표로 표시한 부분과 같이 배꼽에 구멍이 나거나 찢어진 틈의 물리적 손상이 관찰되었다. 팥의 수분흡수는 주로 배꼽을 통해 이루어지므로(Deshpande & Cheryan, 1986; Miano *et al.*, 2016) 팥의 배꼽은 수분을 흡수하는 입구라고 할 수 있다. 최근의 연구 결과, Oh *et al.* (2022)은 마이크로파 처리를 통한 인위적인 배꼽 손상으로 팥의 수분흡수가 개선되는 효과를 보고하였다. 이런 측면에서 가속화 고온(45°C) 조건의 3개월 저장 팥에서 관찰된 배꼽 손상은 팥의 수분흡수 특성에도 영향을 주었을 것을 예상할 수 있었다.

저장 온도별 팥 종피의 관찰 결과, 대조구(control)인 저온(4°C) 및 상온(25°C) 조건에서는 변화가 없었으나 가속화 고온(45°C) 조건에서는 종피와 자엽 사이에 화살표로 표시한 공간이 벌어져 있었다(Fig. 3). 두류 종피의 구조는 큐티클(cuticle), 팔리세이드(palisade), 오스테오스크레리어

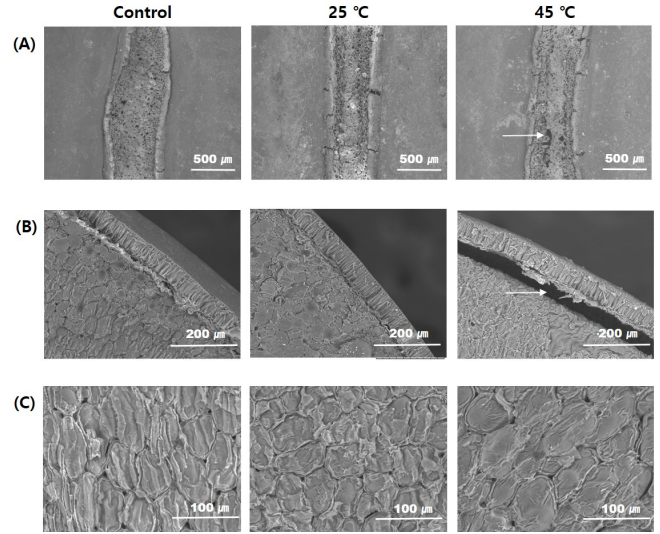


Fig. 3. Microstructure characteristics of adzuki beans stored for three months depending on storage temperature: hilum (A), seed coat (B), and cotyledon (C); control condition (temp. 4°C).

드(osteosclereid, 골다공증 뼈와 같이 구멍이 송송 뚫려있는 형태)의 세 부분으로 나누어져 있다(Yousif *et al.*, 2007). 이러한 종피의 구조적 차이는 수분의 이동에 영향을 미치며, 두류의 종류에 따라 수분의 이동량이나 속도가 달라지는 이유라고 하였다. 두류에 속하는 콩, 검정콩, 동부와는 다르게 팥에는 오스테오스크레리어드(osteosclereid) 층이 없고, 그 대신 고도로 잘 정렬된 팔리세이드(palisade) 층이 존재하며 이중 층의 역할을 하므로 콩, 동부 등 기타 두류보다 더 긴 수침 시간이 필요한 이유이다(Yousif *et al.*, 2007). 그러므로 포화 수분함량의 50% 수준으로 수분을 흡수하는데도 팥의 경우 콩보다 약 9~10배의 시간이 걸리며(Oh *et al.*, 2021), 이런 특징이 팥의 이용성을 떨어뜨리는 주요 원인이 된다. 한편, Miano *et al.* (2018)는 종피와 자엽 사이의 미세하고 밀접하게 붙은 공간이 수화과정을 더디게 한다고 하였는데, 본 연구의 가속화 고온(45°C) 처리에서와 같이 팥 종피와 자엽 사이 공간이 벌어지게 되면 수분의 이동이 용이해질 것으로 예상된다. 최근 연구 결과인 Oh *et al.* (2022)에 의하면 마이크로파 처리 또한 종피와 자엽 사이의 공간을 벌어지게 하며 총수분 흡수량은 적으나 총수분 함량의 50%까지 수분을 흡수하는 데 걸리는 시간을 단축하고 수분흡수 속도를 빠르게 하여 결과적으로 수분 이동을 도와준다고 하였다. 본 연구에서 처리 온도별로 팥을 저장하며 팥의 미세구조 변화를 관찰한 결과, 온도에 따른 자엽의 변화에는 큰 차이가 없었고, 다만 가속화 고온(45°C)에서 3개월 동안 저장한 팥에서는 자엽을 제외한 배

꼭과 종피에서만 구조적 변화가 관찰되었다. 이와 같은 결과를 통해, 팥 자엽의 미세구조를 바꾸기 위해서는 좀 더 강한 처리가 필요할 것으로 추측된다.

종실의 수분흡수 특성

곡류는 가공이나, 발아, 취반 등을 위해 수분흡수 과정을 거쳐야 한다. 일반적으로 곡류의 수분흡수 유형은 수침 시간에 따라 아래로 오목한 모양(downward concave shape: DCS)과 S자형 모양(sigmoidal shape: S)의 두 가지 유형으로 나뉘어진다. DCS자형은 수침 후 빠르게 수화하여 평형 수분함량에 도달하는 반면, S자형은 수침 후 초기에 느린 수화를 보이다가 일정 시간 이후에 급격하게 수분을 흡수하여 평형수분함량에 도달하는 유형이다. S자형에서 이처럼 초기 수분 흡수율이 낮은 구간을 락 페이스(lag phase)라고 한다. 수분흡수가 DSC자형 모양을 보이는 대표적인 품목은 수수, 기장, 콩, 옥수수 등이며, S자형 모양을 보이는 대표적인 품목이 팥, 녹두, 땅콩, 참깨 등이다(Li *et al.*, 2020; Oh *et al.*, 2021; Sopade *et al.*, 1992; Turhan *et al.*, 2002).

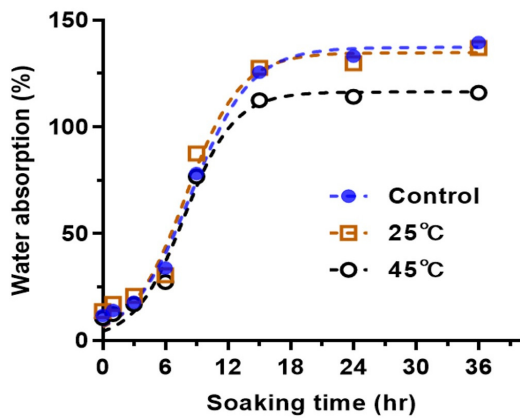


Fig. 4. Hydration properties of adzuki beans stored for three months depending on storage temperature; control condition (temp. 4°C).

본 연구의 팥의 수분흡수 및 수분흡수 kinetics 분석은 저장 중 발아율, 지방산가 및 미세구조 특성의 변화를 보였던 저장 3개월 시료를 대상으로 하였다. 세 가지 온도 조건(4, 25, 45°C)에서 3개월 동안 저장했던 팥의 수분 흡수율 변화는 Fig. 4와 같다. 세 가지 온도 조건의 저장 팥은 선행연구에서와 같이 S자형의 수분흡수 곡선을 보였으며 락 페이스(lag phase)는 대략 6시간까지 관찰되었다(Oh *et al.*, 2021). 대조구(control)인 저온(4°C), 상온(25°C) 및 가속화 고온(45°C) 조건에서의 저장 팥은 모두 수분 흡수율이 약 9시간 전 후에서 가장 빠르게 증가하였고, 반면 15시간 이후부터 36시간 까지 구간에서는 수분흡수가 천천히 진행되었다. 특히, 수침 9시간 이후부터는 가속화 고온(45°C) 조건의 팥이 대조구(control)인 저온(4°C) 및 상온(25°C) 조건에 비해 뚜렷한 수분 흡수율 감소세를 보였다. 수분흡수 곡선의 락 페이스(lag phase) 시간은 수침 온도 및 품종에 따라 차이를 보인다는 선행연구 결과가 보고된 바 있는데 Oliveira *et al.* (2013)은 수침 온도가 높을수록 수분흡수 속도가 빨라 락 페이스(lag phase)가 짧아진다고 하였고, Oh *et al.* (2021)은 국내산 팥 품종 중에서 한나래 품종의 락 페이스(lag phase)가 약 1시간으로의 일반 품종의 6시간에 비해 매우 짧다고 하였다.

팥에 적합한 수분흡수 kinetic 분석을 위해 Kaptso *et al.* (2008)이 제시한 모델을 적용하였으며 그 결과는 Table 4와 같다. Kaptso 모델에서는 3개의 변수를 도출할 수 있는데 첫째, 평형수분함량(M_{eq}), 둘째 평형수분함량의 50%에 도달하는데 소요된 시간(τ), 셋째 수분흡수 속도(k) 이다(Oh *et al.*, 2021). 이 모델이 팥의 평형수분함량, 수분흡수 속도 등을 설명하는데 적합한 모델인지는 Table 4의 결정계수(R^2) 값으로 판단할 수 있는데, 대조구(control)인 저온(4°C), 상온(25°C), 및 가속화 고온(45°C) 조건에서의 결정계수가 각 0.995%, 0.983% 및 0.988%의 높은 설명력을 가지므로 팥의 수분흡수 특성을 설명하는데 적합한 모델임을 확인하였다. 저장 팥의 수분흡수 kinetic 분석 결과, 대조구(control)인 저온(4°C), 상온(25°C), 및 가속화 고온(45°C) 저장 팥의 초기 수분함량(M_0)은 상온(25°C) 저장 팥이 유의적으로

Table 4. Water absorption parameters and kinetics of adzuki beans stored for three months depending on storage temperature using the sigmoidal Kaptso model^{b)}.

| Storage temperature | M_0 (%) | M_{eq} (%) | τ (h) | k (h ⁻¹) | R^2 |
|---------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-------|
| Control | 11.57±0.06 ^b | 137.23±3.35 ^a | 8.47±0.36 ^a | 0.35±0.04 ^c | 0.995 |
| 25°C | 13.70±0.10 ^a | 134.60±5.71 ^a | 7.94±0.59 ^{ab} | 0.38±0.07 ^b | 0.983 |
| 45°C | 10.43±0.06 ^c | 116.34±7.84 ^b | 7.84±0.46 ^b | 0.42±0.07 ^a | 0.988 |

^{b)} M_0 (%): initial moisture content (%; dry basis, d.b.); M_{eq} (%): equilibrium moisture content (%; d.b.); τ (h): half saturation time; k (h⁻¹): rate constant of hydration; R^2 : coefficient of determination; control condition (temp. 4°C)

가장 높았고, 평형수분함량(M_{eq})은 가속화 고온(45°C) 저장 팥이 가장 낮았다($p < 0.05$). 평형수분함량의 50%에 도달하는데 소요된 시간 τ (h)은 대조구(control)인 저온(4°C), 상온(25°C), 및 가속화 고온(45°C) 저장 팥에서 각 8.47, 7.49 및 7.84시간으로 가속화 고온(45°C) 조건에서 가장 짧았다. 또한 수분흡수 속도 k (h^{-1})도 팥의 저장 온도에 따라 차이를 보였는데, 대조구(control)인 저온(4°C) 저장 팥은 0.35 k (h^{-1})에 비해 가속화 고온(45°C) 저장 팥은 0.42 k (h^{-1})로 수분흡수 속도가 가장 유의하게 빨랐다. 이와 같이 3개월 저장 팥의 수분흡수 kinetic의 분석 결과를 종합해 보면 저장 팥의 수분흡수 특성은 대조구(control)인 저온(4°C) 대비 가속화 고온(45°C) 조건에서 평형수분은 낮았으나 평형수분함량의 50%에 도달하는데 소요된 시간은 짧았고, 수분흡수 속도 또한 빨랐는데 이러한 결과는 종실 배꼽의 구멍이나 찢어진 틈 등의 구조적 손상과 종피와 자엽 사이에 생성된 틈새 공간 등 저장 중에 발생한 미세구조 변화가 수분흡수 시간과 속도를 단축시킨 것으로 추론된다. 그러나 가속화 고온(45°C) 저장 팥에서 평형수분함량이 낮게 측정된 원인은 향후 추가 연구를 통한 고찰이 필요할 것으로 고찰된다.

적 요

팥 종실은 평형수분함량에 도달하는데 30시간 내외의 긴 시간이 소요되어 팥 이용 측면에서 주요 제한 인자로 작용한다. 따라서 수분흡수 특성 연구는 팥의 이용성 증진을 위한 중요한 분야이다. 본 연구는 국내산 팥의 가속화 저장에 따른 미세구조 및 수분흡수 특성을 분석하여 수침 시간 단축을 위한 기초자료를 제공하고자 수행되었다. 팥의 저장은 대조구(control)인 저온(4°C), 상온(25°C) 및 가속화 고온(45°C)의 세 조건에서 3개월 동안 수행하였다.

1. 발아율, 지방산가, 적색도(a^*) 및 황색도(b^*) 값은 저장 전 대비 3개월 후, 대조구(control)인 저온(4°C) 저장 팥은 차이를 나타내지 않았으나, 가속화 고온(45°C)에서는 통계적인 유의차를 보였다. 특히 가속화 고온(45°C) 조건에서 3개월 동안 저장한 팥은 발아율이 0%까지 감소하고, 지방산가는 초기 10.43 mg KOH/100 g에서 33.63 mg KOH/100 g까지 증가하는 등 품질 저하가 유의적으로 일어났다.
2. 저장 3개월 후, 종실의 배꼽, 종피, 자엽의 미세구조를 전자현미경으로 관찰한 결과, 가속화 고온(45°C) 조건에서만 배꼽의 구멍과 찢어진 틈 등의 손상이 있었고, 종피와 자엽 사이의 틈이 벌어지는 변화가 있었으나 자엽

자체의 변화는 관찰되지 않았다.

3. 저장 온도별 3개월 저장 시료를 대상으로 수분흡수 kinetic을 분석한 결과, 대조구(control)인 저온 조건(4°C) 대비 가속화 고온(45°C)에서는 팥 종실의 평형수분함량은 낮았으나, 평형수분함량의 50%에 도달하는 시간은 짧고, 수분흡수 속도는 빨랐다.
4. 팥의 수분흡수 특성은 종실의 미세구조 특성과 밀접한 관계가 있는 것으로 해석되며, 가속화 고온(45°C) 조건의 저장 팥에서 관찰되는 배꼽의 구멍 및 손상, 종피와 자엽 사이의 틈 등 미세구조의 변화가 수분흡수 시간과 속도를 단축시킨 것으로 생각된다. 다만, 미세구조의 변화와 평형수분함량과의 관계는 명확한 설명이 되지 않아 이와 관련된 추가 연구가 필요할 것으로 고찰되었다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 ‘팥의 지역특화 선순환 시스템 지원을 위한 품질관리 기술 개발’ 연구과제(과제번호: RS-2020-RD009866)의 지원으로 수행된 것임.

인용문헌(REFERENCES)

AOAC International. 2000. Official Methods of Analysis of AOAC International. 17th ed. Association of Official Analytical Chemists International.

Antunes, P. L. and V. C. Sgarbrieri. 1979. Influence of time and conditions of storage on technological and nutritional properties of a dry bean (*Phaseolus vulgaris*, L.) variety Rosinha G2. J. Food Sci. 44 : 1703-1706.

Deshpande, S. and M. Cheryan. 1986. Microstructure and water uptake of phaseolus and winged beans. J. Food Sci. 51 : 1218-1223.

Han, J. G., K. Kim, K. J. Kang, and K. K. Kim. 1996. Shelf-life prediction of brown rice in laminated pouch by n-hexanal and fatty acids during storage. Korean J Food Sci Technol. 25 : 643-648.

Hatai, A. 1982. Influences of storage temperatures on characteristics of adzuki beans, *Vigna angularis*, Ohwi et Ohashi. Jap. J. Dom. Sci. 33(11) : 579-584.

Kaptsou, K., Y. Njintang, A. Komnek, J. Hounhouigan, J. Scher, and C. Mbofung. 2008. Physical properties and rehydration kinetics of two varieties of cowpea (*Vigna unguiculata*) and bambara groundnuts (*Voandzeia subterranea*) seeds. J. Food Eng. 86 : 91-99.

Karunakaran, C., M. E. Muir, D. S. Jayas, N. D. G. White, and D. Abramson. 2001. Safe storage time of high moisture wheat. Journal of Stored Products Research 37 : 303-312.

- Kim, C. K., B. H. Oh, J. M. Na, and D. H. Shin. 2003. Comparison of physicochemical properties of Korean and Chinese red bean starches. *Korean J. Food Sci. Technol.* 35(4) : 551-555.
- Kim, H. Y., C. I. Yang, Y. H. Choi, Y. J. Won, and Y. T. Lee. 2007a. Changes of seed viability and physico-chemical properties of milled rice with different ecotypes and storage duration. *J. Crop Sci.* 52 : 375-379.
- Kim, K. Y., G. M. Lee, K. I. Noh, K. Y. Ha, J. Y. Son, and B. K. Kim. 2007b. Varietal difference of germination, fat acidity, and lipoxygenase activity of rice grain stored at high temperature. *Korean J. Crop Sci.* 52 : 29-35.
- Kon, S. and D. W. Sanshuck. 1981. Phytate content and its effect on cooking quality of beans. *J. Food Proc. Pres.* 5(3) : 169-178.
- Lee, J. Y., K. S. Woo, J. H. Seo, Y. Y. Lee, B. W. Lee, M. H. Kim, M. S. Kang, and H. J. Kim. 2021. Physicochemical qualities and physiological activities of black soybeans by cultivation area and cultivars. *J. Korean. Soc. Food Sci. Nutr.* 50 : 29-35.
- Li, P., Y. Li, L. Wang, H. Zhang, X. Qi, and H. Qian. 2020. Study on water absorption kinetics of black beans during soaking. *J. Food Eng.* 283 : 110030.
- MAFRARK. 2021. Agriculture, Food and Rural Affairs Statistics Yearbook.
- Miano, A. C., J. da Costa Pereira, N. Castanha, M. D. da Matta Junior, and P. E. D. Augusto. 2016. Enhancing mung bean hydration using the ultrasound technology: description of mechanisms and impact on its germination and main components. *Sci. Rep.* 6 : 1-14.
- Miano, A. C., V. D. Sabadoti, and P. E. D. Augusto. 2018. Enhancing the hydration process of common beans by ultrasound and high temperatures: Impact on cooking and thermodynamic properties. *J. Food Eng.* 225 : 53-61.
- Mills, J. T. 1996. Quality of stored cereals. In: Hendry, RJ, Kettlewell PS (Eds.), *Cereal Grain Quality*. Chapman & Hall, London, UK. pp. 441-478.
- Nithya, U., V. Chelladurai, D. S. Jayas, and N. D. G. White. 2011. Safe storage guidelines for durum wheat. *Journal of Stored Products Research* 47 : 328-333.
- Oh, S. M., Y. J. Jo, A. Chun, J. Kwak, Y. G. Oh, M. J. Kim, S. B. Song, and I. Choi. 2021. Seed and water absorption characteristics of red bean cultivars in Korea. *Korean J. Food Sci. Technol.* 53(5) : 607-612.
- Oh, S. M., S. B. Song, J. S. Lee, Y. G. Oh, Y. C. Choi, J. H. Lee, and J. Kwak. 2022. Effect of microwave treatment on Adzuki Beans (*Vigna angularis* L.) under dry state-Analyzing microstructure, water absorption, and antioxidant properties. *Foods* 11(11) : 1653.
- Oliveira, A. L., B. G. Colnaghi, E. Z. da Silva, I. R. Gouvea, R. L. Vieira, and P. E. D. Augusto. 2013. Modeling the effect of temperature on the hydration kinetic of adzuki beans (*Vigna angularis*). *J. Food Eng.* 118 : 417-420.
- Pomeranz, Y. 1992. Biochemical, functional and nutritive changes during storage. In: Anderson JA, Alcock AW. (Eds.), *Storage of Cereal Grains and Their Products*. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN. pp. 55-141.
- Rho, C. W., S. Y. Song, S. T. Hong, K. H. Lee, and I. M. Ryu. 2003. Agronomic characters of Korean adzuki beans (*Vigna angularis* (Willd.) Ohwi & Ohashi). *Korean J. Plant Res.* 16(2) : 147-154.
- RDA (Rural Development Administration). 2018. Standard agricultural manuals for adzuki bean cultivation. Rural Development Administration, Jeonju, Korea.
- Song, S. B., H. I. Seo, J. Y. Ko, J. S. Lee, J. R. Kang, B. G. Oh, M. C. Seo, Y. N. Yoon, D. Y. Kwak, M. H. Nam, and K. S. Woo. 2011. Quality characteristics of adzuki bean sediment according to variety. *J. Korean Soc. Food Nutr.* 40(8) : 1121-1127.
- Song, S. B., J. Y. Ko, K. S. Woo, M. E. Choe, J. Chu, T. Ha, S. Han, and D. Y. Kwak. 2019. A small redbean cultivar 'Hongjin' with lodging tolerance and high yield. *Korean J. Breed. Sci.* 51(4) : 523-528.
- Sopade, P., E. Ajisegiri, and M. Badau. 1992. The use of Peleg's equation to model water absorption in some cereal grains during soaking. *J. Food Eng.* 15 : 269-283.
- Turhan, M., S. Sayar, and S. Gunasekaran. 2002. Application of Peleg model to study water absorption in chickpea during soaking. *J. Food Eng.* 53 : 153-159.
- Yousif, A. M., H. C. Deeth, N. Caffin, and A. Lisle. 2002. The effect of storage time and conditions on the hardness and cooking quality of Adzuki (*Vigna angularis* L.) beans. *LWT Food Sci. Technol.* 34(4) : 338-343.
- Yousif, A., J. Kato, and H. Deeth. 2007. Effect of storage on the biochemical structure and processing quality of adzuki bean (*Vigna angularis*). *Food Rew. Int.* 23 : 1-33.
- White, N. D. G., R. B. Hulasare, and D. S. Jayas. 1999. Effects of storage conditions on quality loss of hull-less and hulled oats and barley. *Canadian Journal of Plant Science* 79 : 475-482.